

TIILA-AIKA-ANALYYSI KONSERTTISALEISTA VISUALISOINNIN AVULLA

Jukka Pätynen, Sakari Tervo ja Tapio Lokki

Aalto-yliopisto, Mediatekniikan laitos
PL 15500, 00076 AALTO
etunimi.sukunimi@aalto.fi

Tiivistelmä

Konserttisalien akustisia ominaisuuksia pyritään usein esittämään ja vertailemaan mitatuista impulssivasteista laskettavilla standardoiduilla tunnusluvuilla. Tilaimpulssivasteiden analyysimenetelmien viimeisimmät kehitysaskeleet mahdollistavat saliakustiikan havainnollistamisen samanaikaisesti sekä ajan että suunnan funktiona. Nyt esiteltävä tila-aika-menetelmä täydentää aikaisemmin Akustiikkapäivillä [1] esitettyä analyysitapaa, jossa mono-impulssivasteesta analysoidaan energian kumulatiivinen vaikutus taajuusvasteeseen. Käyttämällä näitä kahta analyysimenetelmää rinnakkain voidaan mitattujen konserttisalien ominaisuuksia vertailla helposti visuaalisessa muodossa. Menetelmien avulla on myös löydetty uutta tietoa seat-dip -vaimentuman käyttäytymisestä.

1 JOHDANTO

Objektiiviset menetelmät ovat olennainen osa arvioitaessa huone- ja saliakustiikkaa. Jo satavuotisesta saliakustiikan tutkimuksen historiasta huolimatta nykyiset standardoidut tunnusluvut eivät kuvaa havaittua äänikuvaa riittävän tarkasti. Vaikka salivasteen varhainen osa on todettu akustisen vaikutelman kannalta tärkeäksi, standardoidut tunnusluvut pyrkivät esittämään varhaisen osan tilastollisesta näkökulmasta. Käytännössä tämä tarkoittaa moniulotteisen mittausdatan tiivistämistä yksittäisiksi luvuiksi. Suoran äänen ja varhaisten heijastusten ajanjaksoa eli impulssivasteen ensimmäistä 80-100 millisekuntia ei kuitenkaan pitäisi analysoida yksinomaan tilastolliselta kannalta. Sen sijaan tutkimuksessa tulisi keskittyä varhaisen impulssivasteen yksityiskohtaiseen tarkasteluun. Näin ollen standardoidut tunnusluvut soveltuvat varsin huonosti varhaisen äänikentän yksityiskohtaiseen analysointiin.

Tämä artikkeli esittelee menetelmän konserttisaliakustiikan ominaisuuksien yksityiskohtaista tarkastelua varten. Analyysi perustuu aikaisemmin kuvattuun menetelmään [1], jossa huoneimpulssivasteen ominaisuuksia tarkastellaan graafisessa muodossa integroimalla impulssivastetta eteenpäin kasvavassa aikaikkunassa. Artikkelissa esiteltiin taajuusvasteen kehityksen analysointi ajan funktiona. Tämän rinnalle soveltuva uusi menetelmä hyödyntää viimeisimpiä edistysaskeleita saapuvan äänen suunnan analysoinnissa [2]. Tila-aika-analyysi esittää impulssivasteen energian saapumissuunnan kumuloitumisen ajan funktiona kuuntelupisteessä. Menetelmän selkeänä etuna on akustisten heijastusten yksityiskohtainen esitystapa ajan sekä suunnan funktiona.

Impulssivasteiden suuntainformaation visualisointia on esitelty kirjallisuudessa tilään analysointitapojen kehittyessä [3, 4, 5, 6]. Yhteinen piirre edeltävissä tutkimuksissa on suunnan analysointi yksittäisissä lyhyissä aikaikkunoissa. Tämän vuoksi varhaisten heijastusten kumulatiivista vaikutusta on vaikea arvioida. Nyt esitelty menetelmä puolestaan havainnollistaa äänienergian integroitumisen eri suunnista suorasta äänestä alkaen.

2 MENETELMÄT

Aika-taajuusvasteen analysointi [1] lasketaan seuraavasti: Lähdepisteestä l mitattu monauraalinen impulssivaste $h_l(t)$ ikkunoidaan suoran äänen alusta alkaen eri kasvavan mittaisilla suorakulmaisilla ikkunafunktioilla $W(t, t_0^l, \tau)$, missä τ on ikkunan pituus, ja t_0^l impulssivasteen suoran äänen alku. Ikkunoitu impulssivaste muunnetaan taajuusalueeseen diskreetillä Fourier-muunnoksella. Eri lähdepisteiden mittaukset keskiarvoistetaan, jolloin saadaan salin taajuusvaste $G_{0,\tau}(\omega)$ ensimmäisen τ sekunnin ajalta. Lisäksi taajuusvasteet normalisoidaan lähteiden vasteilla 10 m etäisyydellä (termi $H_{\text{ref},l}(\omega)$), jolloin saatava tulos vastaa ISO3382-1 -standardin mukaista parameteria G .

$$H_l(\omega, \tau) = |\text{DFT} \{h_l(t) \cdot W(t, t_0^l, \tau)\}| \quad (1)$$

$$W(t, t_0^l, \tau) = 1, \text{ kun } t_0^l \leq t \leq t_0^l + \tau, \tau > 0; 0 \text{ muualla.} \quad (2)$$

$$G_{0,\tau}(\omega) = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L H_l(\omega, \tau)^2 / |H_{\text{ref},l}(\omega)|_\omega^2 \right]. \quad (3)$$

τ :n arvoina on käytetty 10-200 ms 10 ms välein ja lisäksi koko impulssivasteen pituutta. Tuloksena saavat eri mittaisten aikaikkunoiden taajuusvasteet piirretään kuvaajaan päällekkäin, jolloin käyrien välinen etäisyys ilmaisee kussakin aikavälissä tapahtuvan taajuusvasteen kehityksen samalla kun analysoitavaan vasteeseen integroidaan enemmän energiaa.

Tila-aika-analyysin periaate vastaa yleisellä tasolla aika-taajuusvasteen laskentaa. Tila-analyysi vaatii monauraalisen impulssivasteen lisäksi tilaimpulssivasteen mittauksen suunnan laskemiseksi. Nyt impulssivaste usean kapselin tilamikrofonista merkitään $h_l(t)$. Suuntainformaatio lasketaan tilaimpulssivasteesta esim. SDM (Spatial Decomposition Method) -menetelmän avulla [2, 7]. Lyhyesti, SDM-funktio estimoi jokaiselle yksittäiselle impulssivasteen näytteelle suunnan, joka pallokoordinaatistossa merkitään atsimuutti- ja elevaatiokulmina $\hat{\theta}_l(t)$, $\hat{\phi}_l(t)$:

$$h'_l(t) | \hat{\theta}_l(t), \hat{\phi}_l(t) \triangleq [h_l(t), \hat{\theta}_l(t), \hat{\phi}_l(t)] = \text{SDM}\{h_l(t)\}. \quad (4)$$

Impulssivasteen suuntavisualisoinnissa kumulatiivinen energiahistogrammi eri leikkaustasojen suhteen lasketaan jälleen muuttuvapituisten ikkunoinnin avulla. Jokaiseen histogrammin segmenttiin summataan ikkunoidun impulssivasteen energia suunnan mukaan luokiteltuna ja keskiarvoistettuna lähteiden yli. Lisäksi taso normalisoidaan aikaisempaan tapaan 10 m vapaakenttävasteella G_{ref} . Seuraavassa esimerkissä lasketaan vaakatason kulmien θ energiahistogrammi:

$$G_{0,\tau}^{\text{DIR}}(\theta) = 10 \log_{10} \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \int_{t=t_0^l}^{t_0^l+\tau} \left[h_l'(t | \hat{\theta}_l(t) = \theta) \right]^2 dt - G_{\text{ref}}. \quad (5)$$

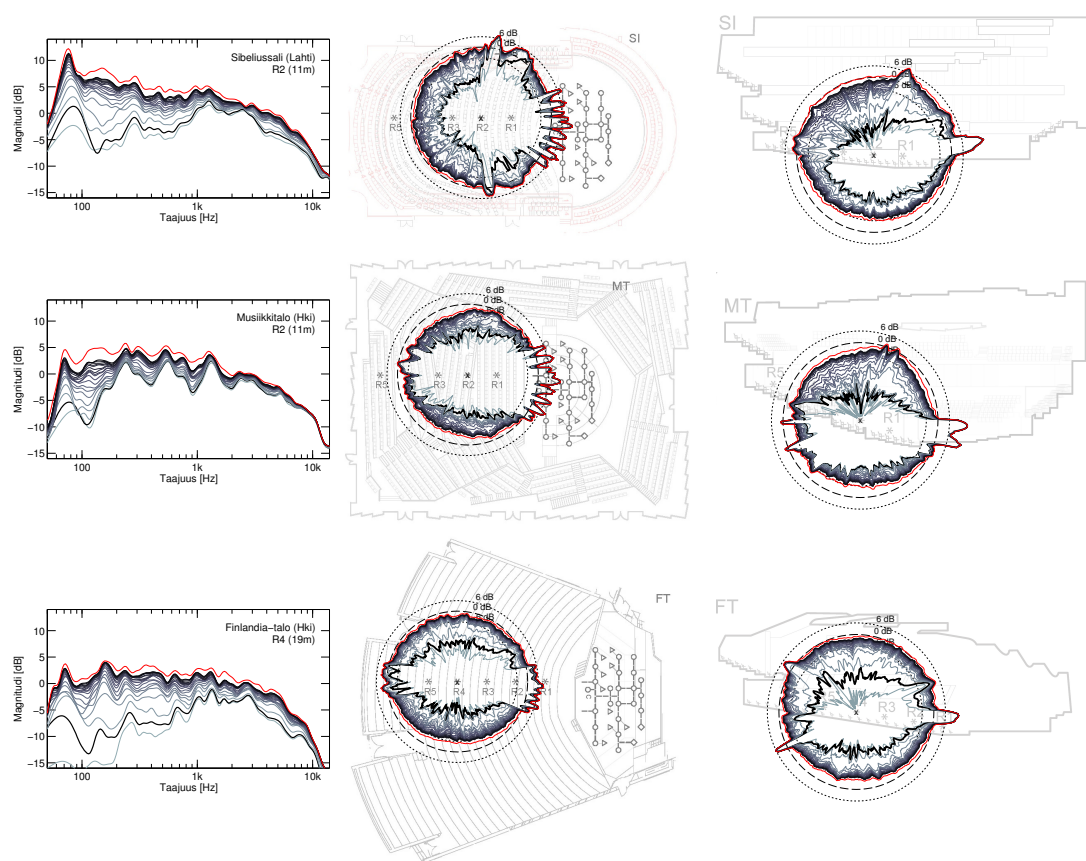
Visualisoinnista saa intuitiivisemman lisäämällä histogrammifunktioon kyseiselle tasolle kohtisuorassa olevan dimension kosinin, eli esimerkkinä lateraalisten suuntien energia kerrotaan näytteiden elevaatiokulman kosinilla. Tällöin suoraan ylhäältä tuleva energia ei vaikuta vaakatason energia-analyysiin. Poikki- ja pitkittäisleikkauksille saadaan vastaavat energiahistogrammit yksinkertaisimmin käyttämällä affineja muunnoksia, eli käytännössä vaihtamalla sopivasti x-, y- ja z-koordinaatteja keskenään. Keskitämällä polaarikuvaaja salin piirrustuksen päälle mittauspisteeseen saadaan havainnollinen esitys geometrian vaikutuksesta. Luvussa esitetyt menetelmiä ja niiden yhteyttä ISO3382-tunnuslukuihin on selostettu yksityiskohtaisesti vuonna 2013 julkaistussa lehdiartikkelissa [7].

Seuraavassa kappaleessa esitellään poimintoja salimittausten analyysituloksista. Aaltoyliopiston virtuaaliakustiikan tutkimusryhmä on mitannut kaiken kaikkiaan yhdeksän suomalaista konserttisalia [8] kaiutinorkesteri-menetelmän [9] avulla. Mikrofonina käytettiin kolmesta pallomikrofoniparista koostuvaa GRAS-mikrofonianturia, josta tilaimpulssivasteiden ohella saadaan tarkka monauraalinen impulssivaste aika- ja taajuusanalyysiä varten. Samalla menetelmällä ryhmä teki syksyllä 2012 laajan mitauskiertueen Keski-Eurooppaan, jonka aikana mitattiin kymmenen konserttisalia, mukaanlukien kuuluisat Musikverein ja Concertgebouw.

3 TULOKSET

Tuloksissa keskitytään tarkastelemaan muutamia havainnollisia tapauksia. Kuvassa 1 on kolmen suomalaisen konserttisalin aika-taajuusvasteet sekä tila-aikakuvaajat valituissa mittauspisteissä. Ylinnä Lahden Sibeliustalossa nähdään huomattava seat-dip ilmiö [1] suorassa äänessä, joka kuitenkin korjaantuu 70 ms aikana $1/f$ -spektrin tapaiseksi. Keskipermannon vastaanottopistettä ympäröi salille ominainen betonikaari, joka tuottaa harvinaisen keskittyneet sivuheijastukset. On merkillepantavaa, että vaakatason energiaa saapuu runsaasti myös ensimmäisten sivuheijastusten jälkeen. Selkeä kattoheijastus saapuu 40-50 ms välisenä aikana. Kauemmissa vastaanottopisteissä heijastukset käyttäytyvät vastaavasti geometrian mukaan, ja permannon kaaren takana sivuheijastukset ovat heikot. Identtisessä vastaanottopisteessä Helsingin Musiikkitalossa seat-dip on syvämpi mutta kapeammalla taajuuskaistalla. Sivuheijastukset permannolla puuttuvat, mutta heijastus kanoopista vastaa Sibeliustalon tilannetta. Finlandia-talon vasteet ovat puolestaan samantyyppiset kuin Musiikkitalossa. Varhainen kattoheijastus saapuu mittauspisteeseen matalasta kulmasta katon muodon takia. Huomattava heijastus saadaan myös takaa parven etureunasta n. 50 ms suoran äänen jälkeen.

Kuvassa 2 on esitetty vastaavat analyysit kolmesta eurooppalaisesta konserttisalista. Tällä kertaa vastaanottopiste on kaikissa tapauksissa 19 metrin päässä lavasta. Aika-tilavasteissa on lisätty 5 ja 10 ms käyrät ylläoleviin verrattuna. Ylinnä olevien kahden kenkälaatikkomallisen salin taajuusvasteen kehitys muistuttaa pitkälti Sibeliustalon vas-

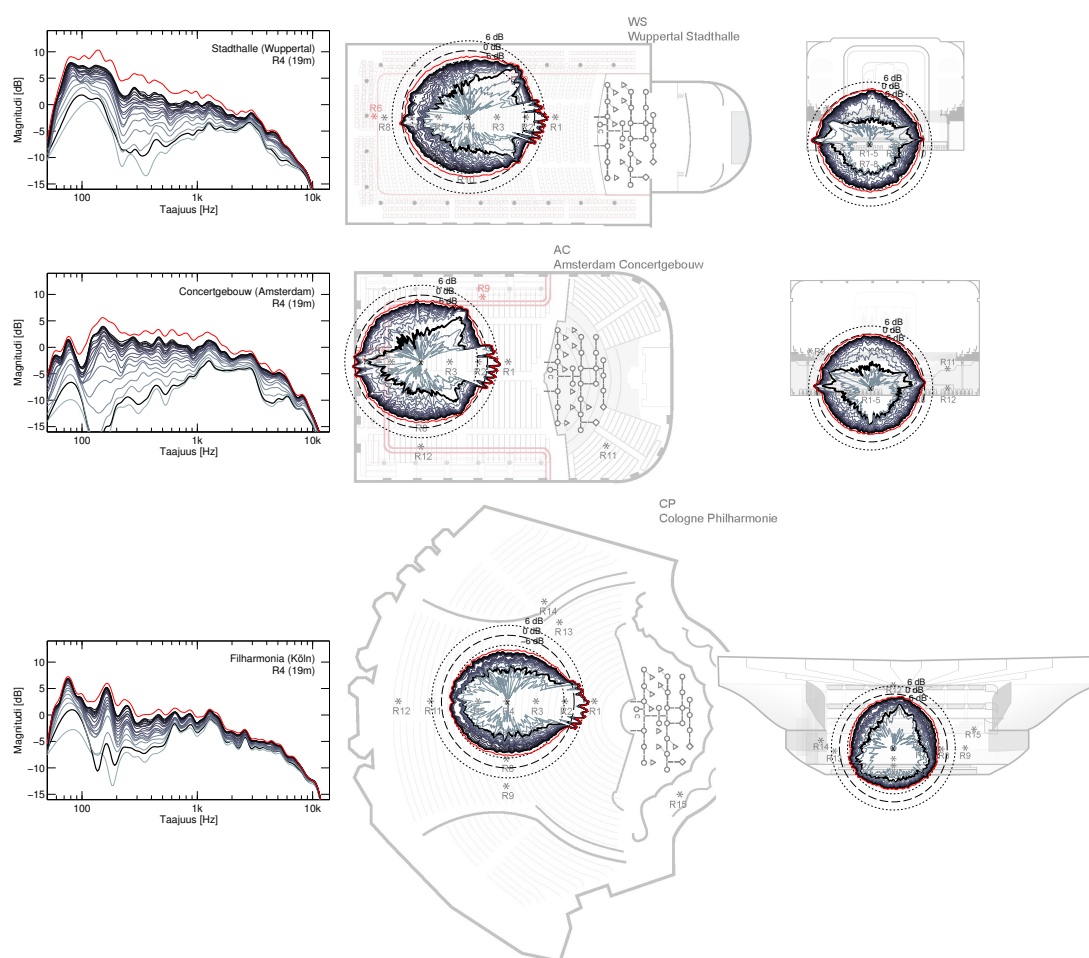


Kuva 1: Esimerkki yhdistetystä aika-taajuusvaste- ja tila-aika-analyysistä kolmessa konserttisalissa. Vaste 30 ms jälkeen on piirretty mustalla viivalla, lopullinen vaste punaisella. Katkoviivalla piirretty rengas vastaa 0 dB G-referenssitilaa sekä 10 m fyysistä etäisyyttä mittauspisteestä. (Vasemmalta oikealle: aika-taajuusvaste, vaakatason leikkaus, pitkittäisleikkaus; Ylhäältä alas: Sibeliustalo, Musiikkitalo, Finlandia-talo.)

tetta laajalle taajuuskaistalle ulottuvalla seat-dipillä. Wuppertalin salin vaakatason sivuheijastukset ovat tyypiesimerkki klassisten kenkälaatikkosalien sivuheijastuksista, jotka synnyttävät 30-40 ms kohdalla kolmionmuotoisen varhaisen energiahistogrammin. Ilmiötä selkeyttää oikeanpuoleisin poikittaisleikkaus, josta voi helposti todeta parvien tuottavan etu- ja alareunojen kautta myös toisen kertaluvun heijastukset. Sama ilmiö on havaittavissa Concertgebouw'ssa, jossa tosin alimman oktaavin taso jää lopulta matalaksi. Kuvassa alinna oleva Kölnin Filharmonia edustaa varsin erilaista salityyppiä sekä muodoltaan että akustisesti. Lava vahvistaa suoraa ääntä, ja seat-dip on kapeakaistaisempi. Kulhomaisten salin varhaisessa äänikentässä merkittävää on vain nopea kattoheijastus.

4 POHDINTAA

Seat-dip -vaimeneman pääasialliseksi korjaavaksi vaikutukseksi on ehdotettu kattoheijastusta, johon seat-dip ei vaikuta [10]. Suomalaisten salien laajamittaisemmassa analyysissä on tästä poiketen havaittu, että kattoheijastus pikemminkin nostaa taajuusvasteen kokonaistasoa ilman erityistä korjaavaa vaikutusta [7]. Tämän voi havaita vertaa-



Kuva 2: Kolmen eurooppalaisen konserttisalin aika-taajuusvasteet sekä tila-aika-analyysit vaaka- ja poikittaistasoissa yhdessä vastaanottopisteessä. Poikittaistason kuvaajassa suora ääni (5 ms) on ikkunoitu pois tilaimpulssivasteista.

mallalla kuvan 1 saleja, missä ainoastaan Sibeliustalon seat-dip korjaantuu nopeasti. Yläsuunnista tulevat varhaiset energiat ovat puolestaan melko samanlaiset. Näin ollen vaakatason sivuttaisenergia on merkittävin ero salien välillä. Korjaava ilmiö korostuu aivan erityisesti Sibeliustalon 4 metriä etäisemmässä vastaanottopisteessä, missä taajuusvaste korjautuu vielä nopeammin voimakkaasti heijastavan betonikaaren ollessa lähempänä.

Tuoreiden mittausten perusteella sama ilmiö toistuu myös eurooppalaisissa kenkälaattikosaleissa. Kuvan 2 poikkeuksena on Concertgebouw, missä varsinainen seat-dip -keskitaajuus korjaantuu tehokkaasti, mutta alin oktaavi jää heikoksi. Viuhka- ja viinitarhamallisissa saleissa taajuusvaste matalilla taajuuksilla jää järjestäen kenkälaattikosaleja heikommaksi. Kölnin sali on kuvassa mukana eräänlaisena ääritapauksena. Esimerkiksi Berliinin Filharmoniaa keskipermannon kohdalla lievä käänteinen viuhkamuoto tuottaa lähemmän seinän puolella 60 ms kohdalla yhden sivuheijastuksen, ja muutamia myöhäisempi heijastuksia etäisemmistä pinnoista. Tässä mielessä Berliinin Filharmonia ja Helsingin Musiikkitalo ovat varsin saman luonteisia - visualisoinnit paljastavat akustiikan toimivan suoran äänen ja kattoheijastuksen ehdoilla.

Kaikista mitatuista saleista saadun kokemuksen perusteella erityisen mielenkiintoinen seikka on aika-taajuusvasteesta nähtävä myöhäisen energian määrä ja spektri. Kuvajissa punaisen ja ylimmän tumman käyrän välille jäävä alue esittää jälkikaiunnan sävyn, joka on kenkälaatikoissa tyypillisesti kirkkaampi. Musiikkitalossa tai Kölnissä yli 1 kHz taajuuksilla myöhäistä energiaa on varsin vähän, kun taas Concertgebouw'ssa käyrä erottuu selvästi aina 5 kHz asti.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Artikkelissa on esitelty aika-taajuusvasteiden sekä tila-aika-analyysin yhteiskäyttöä konserttisaliakustiikan tutkimuksessa. Menetelmiä sovellettiin samalla tavalla mitattuihin eri tyyppisiin konserttisaleihin. Analyysimenetelmien perusteella on pystytty toteamaan, että varhaiset sivuheijastukset ovat hyödyksi seat-dip -vaimentuman nopeassa korjaantumisessa aikaisemmissa tutkimuksista löydetyn kattoheijastuksen korjaavan vaikutuksen sijaan. Yleisesti voimme päätellä, että varhaisella sivuttaisenergialla on huomattava merkitys analyttiseen taajuusvasteeseen, puhumattakaan subjektiivisista ilmiöistä tai kaksikorvaisesta havaitsemisesta. Nämä tulokset puhuvat vahvasti suoralmaisten konserttisalien akustiikan etujen puolesta.

Kiitokset: Tutkimusta ovat rahoittaneet Suomen Akatemia, projekti [257099] sekä Euroopan tutkimusneuvosto, ERC grant agreement no. [203636].

VIITTEET

- [1] PÄTYNEN J, SOUTHERN A, & LOKKI T, Konserttisalien akustiikan taajuusvaste ajan funktiona, in *Akustiikkapäivät*, pages 227–232, Tampere, Finland, May 11-12 2011.
- [2] TERVO S, PÄTYNEN J, KUUSINEN A, & LOKKI T, Spatial decomposition method for room impulse responses, *J. Audio Eng. Soc.*, **61**(2013) 1/2, 16–27.
- [3] YAMASAKI Y & ITOW T, Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method, *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **10**(1989) 2, 101–110.
- [4] ABDU A & GUY R W, Spatial information of sound fields for room-acoustics evaluation and diagnosis, *J. Acoust. Soc. Am.*, **100**(1996) 5, 3215–3226.
- [5] GOVER B, RYAN J, & STINSON M, Measurements of directional properties of reverberant sound fields in rooms using a spherical microphone array, *J. Acoust. Soc. Am.*, **116**(2004) 4, 2138–2148.
- [6] MERIMAA J, LOKKI T, PELTONEN T, & KARJALAINEN M, Measurement, analysis, and visualization of directional room responses, in *111th Convention of Audio Engineering Society*, New York, NY, USA, Sep 21-24 2001, paper no. 5449.
- [7] PÄTYNEN J, TERVO S, & LOKKI T, Analysis of concert hall acoustics via visualizations of time-frequency and spatiotemporal responses, *J. Acoust. Soc. Am.*, **133**(2013) 2, 842–857.
- [8] LOKKI T, PÄTYNEN J, KUUSINEN A, & TERVO S, Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles, *J. Acoust. Soc. Am.*, **132**(2012) 5, 3148-3161.
- [9] PÄTYNEN J, *A virtual symphony orchestra for studies on concert hall acoustics. (109 p.)*, PhD dissertation, Aalto University School of Science, Espoo, Finland, 2011.
- [10] BRADLEY J S, Some further investigations of the seat dip effect, *J. Acoust. Soc. Am.*, **90**(1991), 324–333.