

# Problemi akustičkih merenja u modelima prostorija

Dejan G. Ćirić

**Sadržaj** — Modeli prostorija umanjениh dimenzija i danas zauzimaju značajno mesto u modelovanju akustike prostorija. Jedna od najvažnijih aktivnosti koja se obavlja na modelima jesu akustička merenja. Međutim, ova merenja imaju izvesne probleme koje treba prevazići. U radu se ukazuje na specifičnosti i probleme akustičkih merenja u modelima. Posebna pažnja se posvećuje slabljenju zvuka u vazduhu i smanjenju dinamičkog opsega odziva. Daje se analiza najznačajnijih komponenti mernog lanca, i predlažu se rešenja za prevazilaženje problema merenja.

**Ključne reči** — Akustička merenja, impulsni odziv, model, pojačanje šuma, pretvarači, slabljenje zvuka u vazduhu.

## I. UVOD

MODELOVANJE akustičkih sistema predstavlja postupak predviđanja ponašanja sistema [1]. Postoje tri vrste modela koje se koriste za modelovanje akustike prostorija: matematički, fizički i kompjuterski [1], [2]. Fizički model predstavlja umanjени model prostorije u adekvatnoj srazmeri koji se koristi za testiranje. Pojavom kompjuterskog modela i njegovim brzim usavršavanjem su se javila mišljenja da su preostale dve vrste modela izgubile značaj. Međutim, kako svaki od modela ima odgovarajuće prednosti i nedostatke, tako svaki od njih ima i svoje mesto u modelovanju.

Početak primene fizičkih modela (u nastavku modela) datira još iz vremena Sabine-a. Do sada su ovi modeli prošli kroz različite faze razvoja, od primitivnih modela za analize prvih refleksija u dvodimenzionalnom prostoru do savremenih modela npr. u razmeri 1:50 [1], [2].

Akustička merenja u modelima imaju specifične karakteristike koje nisu svojstvene merenjima u prostorijama [3]-[8]. One su pre svega posledica smanjenih dimenzija modela i transponovanja frekvencije u ultrazvučno područje. Specifičnosti merenja u modelima prostorija se javljaju i pri merenju u drugim modelima, npr. modelima urbanih prostora (ulica, fasada) [9], [10].

U ovom radu se analiziraju specifičnosti akustičkih merenja u modelu prostorije (posebno primenom novih metoda, kao što je MLS i SineSweep tehnika [11], [12]), ističu se problemi koji se tom prilikom javljaju i predlažu

Rezultati publikovani u ovom radu su dobijeni istraživanjem realizovanim u okviru projekta „Akustički dizajn prostora i zvučni sadržaji u Srpskoj pravoslavnoj crkvi“, broj 23046, finansiranog od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Dejan G. Ćirić, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14 (p. fah 73), 18000 Niš, Srbija; (telefon: 381-18-529-301; faks: 381-18-588-399; e-mail: dejan.ciric@elfak.ni.ac.yu).

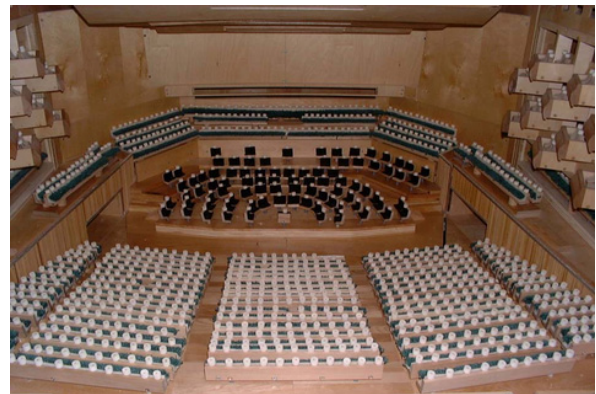
postupci za njihovo rešenje ili ublažavanje posledica. Posebna pažnja se posvećuje zvučnom izvoru i mikrofону, zatim slabljenju zvuka u vazduhu i pojačanju šuma koje se dobija kompenzacijom slabljenja u vazduhu.

## II. FIZIČKI MODEL

Pristup koji se još od 1930 godine koristi za akustičko projektovanje prostora je izgraditi njegov umanjени model, poput onog na Sl. 1, i proučavati prostiranje zvuka u modelu [1]. Pri tome, potrebno je da bude zadovoljeno:

$$l_m = \frac{l}{S} \quad t_m = \frac{t}{c_m} = \frac{ct}{c_m S} \quad \lambda_m = \frac{\lambda}{S} \quad f_m = S \frac{c_m}{c} f, \quad (1)$$

gde su veličine u prostoriji:  $l$  dužina,  $t$  vreme,  $c$  brzina prostiranja zvuka,  $\lambda$  talasna dužina i  $f$  frekvencija, dok su odgovarajuće veličine u modelu označene istim simbolima sa indeksom  $m$  ( $l_m$ ,  $t_m$ ,  $c_m$ ,  $\lambda_m$  i  $f_m$ ), a  $S$  je faktor skaliranja.



Sl. 1. Model Royal Festival Hall-a iz Londona (vlasništvo kompanije Kirkegaard Associates).

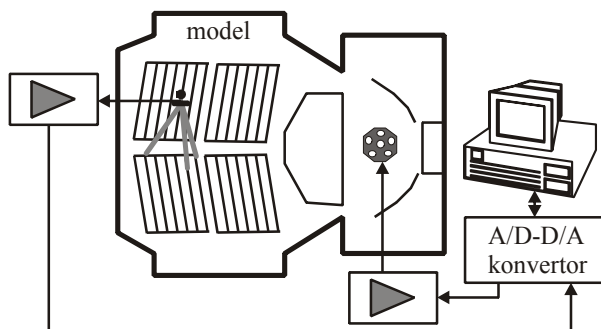
Kada je sredina kroz koju se zvuk prostire ista u prostoriji i modelu ( $c/c_m=1$ ), onda frekvencije u modelu moraju biti  $S$  puta veće nego u prostoriji. Dakle, osnovni princip kod modela je smanjivanje svih dimenzija uključujući i talasne dužine, odnosno ekvivalentno povećanje frekvencija. Tako, ako je opseg od interesa u prostoriji od 100 Hz do 10 kHz, onda je ekvivalentan opseg u modelu 1:10 ( $S=10$ ) od 1 kHz do 100 kHz.

Da bi se opadanja zvučne energije vršila po istom zakonu u prostoriji i modelu, jedan od uslova koji treba ispuniti je da slabljenja zvuka u vazduhu u modelu  $\alpha_m$  treba da bude  $S$  puta veće od slabljenja u prostoriji  $\alpha$ .

## III. MERENJA U MODELU

Kako se najveći broj objektivnih parametara prostorije dobija na osnovu njenog impulsnog odziva [11], onda je

osnovno akustičko merenje u modelu - merenje impulsnog odziva. Merni sistem koji se koristi za ovo merenje, Sl. 2, je u osnovi isti kao onaj koji bi se koristio za merenje impulsnog odziva prostorije.



Sl. 2. Sistem za akustička merenja u modelu.

Upoređujući uslove za merenje u prostoriji i modelu, jedna od osnovnih razlika je frekventijski opseg, odnosno gornja granična frekvencija koja je mnogo viša u modelu (npr. do 30 kHz u [5], ali i do 160 kHz u [3] ili do 200 kHz u [9]). Zbog toga su i problemi ispunjavanja zahteva koji se postavljaju pred mernu opremu uglavnom posledica frekventijskog opsega.

#### IV. PROBLEMI MERENJA I NJIHOVO PREVAZILAŽENJE

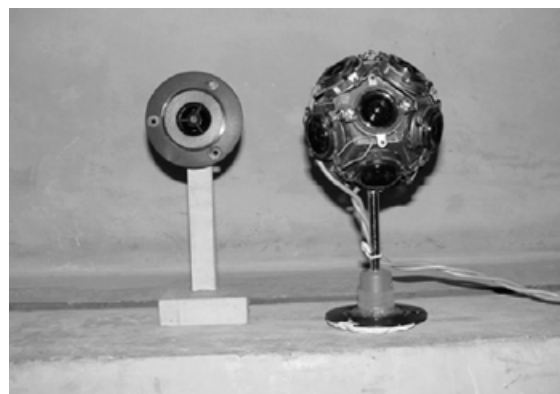
Problemi korišćenja modela se mogu klasifikovati u dve kategorije: problemi u vezi sa samim modelom i problemi u vezi sa merenjem. U ovom radu se razmatraju samo problemi akustičkih merenja u modelu. U ovu kategoriju se mogu svrstati: izbor prihvatljive karakteristike usmerenosti i frekventijskog odziva zvučnog izvora i mikrofona, veličina zvučnog izvora i mikrofona, uticaj preostale opreme iz mernog lanca (A/D i D/A konvertora, pojačavača, itd.), kompenzacija slabljenja zvuka u vazduhu, korekcija pojačanja šuma itd.

##### A. Zvučni izvor i mikrofoni

Za merenje impulsnog odziva modela primenom novih mernih metoda (MLS i Sine Sweep tehnike) potrebno je koristiti neusmereni zvučni izvor i mikrofoni, odgovarajuće malih dimenzija i ravne frekventijske karakteristike. Kako se merenje obavlja u oblasti ultrazvuka, pomenute zahteve nije tako lako ispuniti. Problem postaje sve veći kako se faktor skaliranja ( $S$ ) povećava (kako se merenje vrši na višim frekvencijama).

Kada je u pitanju zvučni izvor, zadovoljenje pomenutih zahteva je omogućeno razvojem posebnih elektrostatičkih i piezoelektričnih zvučnika [1], [8]. Rešenje se u nekim slučajevima nalazi i u tzv. plazma zvučniku (npr. Magnat MP-02) koji pokriva frekventijski opseg od 5 kHz do 100 kHz [5], ili u minijaturnom neusmerenom dodekaedru [7], Sl. 3, ili čak u korišćenju kondenzatorskog mikrofona (npr. Bruel & Kjaer type 4165) kao izvora [10].

Kod mikrofona je nešto lakše naći kompromisno rešenje. Tako, postoje prihvatljivo mali kondenzatorski mikrofoni. Obično se koristi mikrofoni od 1/8 inča (npr. Bruel & Kjaer type 4138 u [3], [4], [9]), čija gornja granična frekvencija može biti oko 160 kHz [3], [9].



Sl. 3. Minijaturni zvučnik (levo) i neusmereni dodekaedar (desno) kao zvučni izvori u modelu [7].

U praksi, i zvučni izvor i mikrofoni pokazuju odstupanja frekventijske karakteristike od željene ravne karakteristike. Ovo je svojstveno i merenjima u prostorijama, a razlika u modelima je frekventijski opseg koji je sada u oblasti ultrazvuka, tako da je još teže obezbediti nesmereni izvor/mikrofon sa ravnom frekventijskom karakteristikom. Zbog toga je u modelu još izraženija potreba da se izvrši ekvalizacija odziva izvor-mikrofon referentnim merenjem [4], [8]. Sam postupak se u osnovi ne razlikuje od onog koji bi se koristio u prostoriji. Tako, kada se MLS tehnika primenjuje za merenja, može se koristiti prednost ove tehnike da se ekvalizacija najjednostavnije vrši adekvatnim uobličavanjem pobudnog signala [11].

##### B. Ostale komponente mernog lanca

Merna oprema mora da zadovolji dva zahteva: a) dinamički opseg mora da bude dovoljno veliki da bi se detektovala kasne refleksije koje čine reverberaciju, i b) brzina odziva mora da bude adekvatna za frekventijski opseg od interesa [3]. U praksi, gornja granična frekvencija merenja se dobija izborom pretvarača, a iza toga se biraju preostale komponente mernog lanca.

Pored pretvarača, jedna od značajnijih komponenata mernog lanca čiji uticaj ne treba zanemariti je A/D-D/A konvertor, koji se može nazvati i operacioni centar sistema za akviziciju podataka. Kvalitet i preciznost mernog sistema u mnogome zavisi od ove periferne komponente. Zavisno od konkretne primene, frekvencija odmeravanja konvertora može biti čak i reda 400 kHz. Konvertori koji mogu da zadovolje ove zahteve postoje na tržištu, ali treba voditi računa o njihovim karakteristikama.

##### C. Slabljenje zvuka u vazduhu

Prilikom prostiranja kroz vazduh dolazi do slabljenja (apsorpcije) zvuka koje je rezultat procesa interne frikcije, provođenja toplote, termalne i difuzije mase i molekularne relaksacije [13]. Slabljenje u vazduhu se često daje u dB/m i zavisi od frekvencije, vlažnosti vazduha, pritiska i temperature. Ono je na višim frekvencijama koje se koriste u modelu mnogo veće nego na nižim frekvencijama. Kao posledica toga, zahtev za odnosom slabljenja u modelu i prostoriji ne može biti direktno ispunjen, jer je slabljenje u modelu za više od  $S$  puta veće od slabljenja u prostoriji. Zbog toga je potrebno izvršiti

kompenzaciju ovog dodatnog slabljenja. Postoje tri metoda kojima se vrši kompenzacija: sušenje vazduha tako da se dobije relativna vlažnost oko 2 %, zamena vazduha azotom i numerička kompenzacija [3]-[5], [8]-[10]. Prvo rešenje zahteva specifične i dobro kontrolisane uslove i značajno vreme. Drugo pomenuto rešenje zahteva specijalnu opremu. Ovde će biti analizirana numerička kompenzacija koja nije ni malo jednostavan postupak.

Prilikom prostiranja zvuka u vazduhu duž rastojanja  $d$ , amplituda zvučnog pritiska  $p_t$  se eksponencijalno smanjuje od početne vrednosti  $p_i$  kao rezultat apsorpcije u vazduhu

$$p_t = p_i e^{-0,1151 \alpha d} = p_i e^{\frac{-\alpha d}{20 \log e}}, \quad (2)$$

gde je  $\alpha$  koeficijent slabljenja zvuka usled apsorpcije u vazduhu koji je funkcija frekvencije i atmosferskih uslova, i čija je jedinica dB/m [13]. Slabljenje  $\delta(f)$  u decibelima zvuka frekvencije  $f$  usled apsorpcije na rastojanju  $d$  je

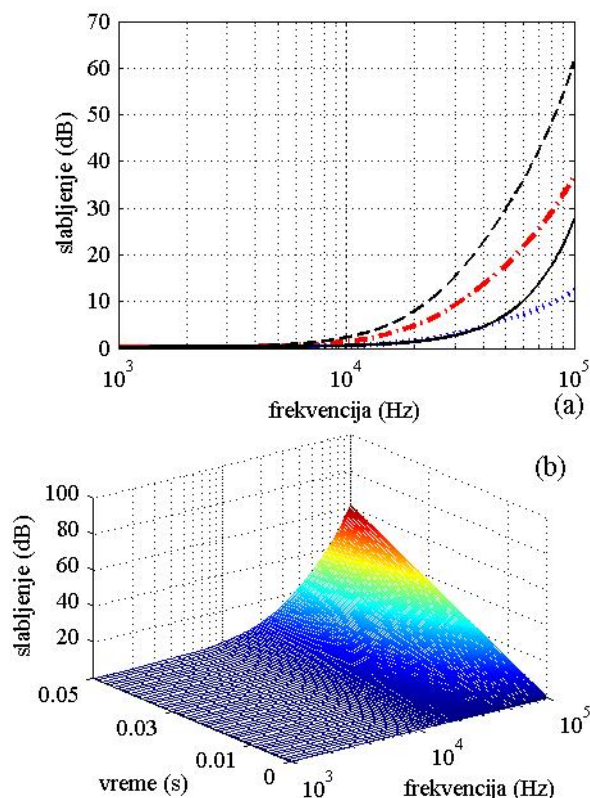
$$\delta(f) = -10 \log \left( \frac{p_t^2}{p_i^2} \right) = -20 \log \left( e^{\frac{-\alpha d}{20 \log e}} \right) = \alpha d. \quad (3)$$

Koeficijent slabljenja  $\alpha$  se može dobiti na osnovu izraza datih u [13], a slabljenje dobijeno na ovaj način je prikazano na Sl. 4. Ono je linearno zavisno od vremena prostiranja, odnosno pređenog puta, ali nelinearno zavisno od frekvencije, Sl. 4(b). Vrednosti slabljenja za visoke frekvencije posle svega nekoliko desetina ms prostiranja mogu da bude i preko 50 dB.

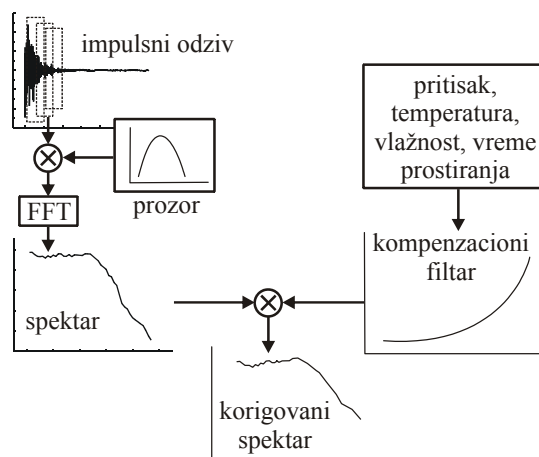
Postupak kompenzacije slabljenja u vazduhu bi mogao da se svede na sledeću proceduru, Sl. 5: najpre se vrši segmentacija izmerenog impulsnog odziva u vremenu množenjem odgovarajućom prozorskom funkcijom, npr. *Hanning*-ovim [8] (ili alternativno *Blackman*-ovim [4]) prozorom sa preklapanjem, i na taj način se dobijaju segmenti u vremenu koji su pomereni za određeni vremenski interval, npr. 5 ms.. Zatim se ovi segmenti konvertuju u frekvencijski domen. Iza toga se vrši kompenzacija slabljenja u vazduhu filtrom projektovanim na osnovu centralnog vremenskog trenutka tog segmenta i karakteristike slabljenja. Pri tome se pretpostavlja da je u intervalu od početka do kraja segmenta slabljenje u vazduhu konstantno. Na taj način se dobija korigovani spektar segmenta. U nastavku postupka koji nije prikazan na Sl. 5 treba na odgovarajući način sabrati doprinose iz svih segmenata bilo sabiranjem spektralnih komponenata koje pripadaju istom frekvencijskom opsegu i onda vraćanjem u vremenski domen, ili sabiranjem filtriranih segmenata odziva u vremenskom domenu kako bi se dobio korigovani impulсни odziv.

#### D. Korekcija pojačanja šuma

Kompenzacijom slabljenja u vazduhu se značajno pojačavaju komponente impulsnog odziva, pogotovu na višim frekvencijama i sa kraja odziva. Kao posledica ovoga dolazi i do značajnog povećanja šuma koji obično dominira u poslednjem delu odziva. Tako, koliko god da je nivo šuma u ovom delu odziva nizak, on posle kompenzacije obično postaje čujan, a kriva opadanja dobija neprirodan tok, Sl. 6. Naime, posle izvesnog vremenskog trenutka, dolazi do promene trenda opadanja odziva tako da njegove vrednosti počinju da rastu.



Sl. 4. Slabljenje zvuka u vazduhu na temperaturi od 20°C i pritisku 101325 Pa; a) dvodimenzioni prikaz za vreme prostiranja od 10 ms (···), 30 ms (---) i 50 ms (---) i vlažnost vazduha od 60 %, i za vreme prostiranja od 50 ms (—) i vlažnost od 2 %, i b) trodimenzioni prikaz.

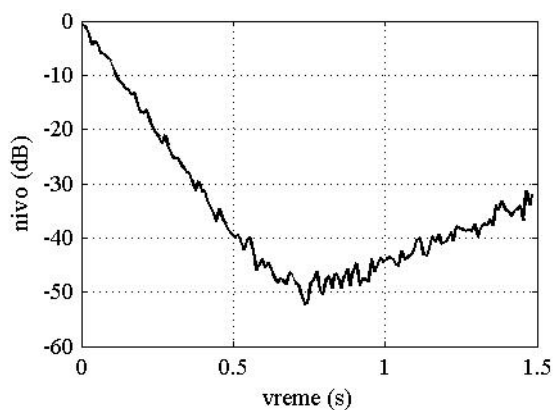


Sl. 5. Kompenzacija slabljenja zvuka u vazduhu.

Rešenja ovog problema koja su predložena u literaturi [3]-[5], [8]-[10], uglavnom se baziraju na tome da se deo odziva gde je šum pojačan, odnosno deo krive opadanja gde nivoi rastu, odbacuje i zamenjuje sintetizovanim odzivom (opadanjem) dobijenim na osnovu prvog dela odziva gde je reverberantna energija dominantna. Pri tome, rešenja se razlikuju po složenosti i implementaciji.

Ovde se predlaže generalizovano rešenje za istovremenu kompenzaciju slabljenja u vazduhu i korekciju pojačanja šuma, odnosno povećanje dinamičkog opsega odziva. Dakle, najpre treba izmereni impulсни odziv filtrirati tako da se dobiju odzivi u frekvencijskim

opsezima u kojima će se oni kasnije koristiti (npr. opsezima terce). Iza toga treba odseći svaki od odziva u tački kolena (mestu preseka strmine opadanja i nivoa šuma) adekvatnim postupkom poput onog prezentovanog u [12]. Zatim treba primeniti već opisanu kompenzaciju slabljenja u vazduhu sa Sl. 5, vodeći računa da se u frekvencijskom domenu sve operacije obavljaju samo na delu spektra. Na ovaj način neće doći do pojačanja šuma, jer je deo gde je šum dominantan odsečen, već samo do pojačanja reverberantne energije. Krive opadanja se mogu dobiti direktno iz korigovanih odziva. Ukoliko je neophodno imati širokopojasni impulsni odziv na izlazu (tamo gde je potrebno realizovati npr. auralizaciju u modelu), onda se može izvršiti adekvatno sabiranje impulsnih odziva iz različitih frekvencijskih opsega.



Sl. 6. Kriva opadanja dobijena na osnovu odziva kod koga je izvršena kompenzacija slabljenja u vazduhu.

Ukoliko dinamički opseg odziva dobijen na ovaj način, odnosno dužina odziva nije dovoljna za konkretnu aplikaciju (npr. auralizaciju), onda se mogu primeniti alternativne metode za proširenje odziva (krive opadanja) ispod nivoa šuma. Jedna od ovakvih alternativa je prezentovana u [11]. Pored toga, odziv se može produžiti dodavanjem odgovarajuće skaliranog šuma na kraju odziva. Ovaj šum može biti i šum iz dela odziva odsečenog pre kompenzacije slabljenja. Na taj način se kompenzuje slabljenje samo za deo reverberantne energije, a izbegava se pojačanje šuma.

Kod bilo koje od pomenutih alternativa, proširenje opadanja se vrši ili vraćanjem dinamičkog opsega koji je postojao pre kompenzacije slabljenja u vazduhu ili sintezom zadnjeg dela opadanja. Dakle, u svakom slučaju je poželjno imati što veći dinamički opseg odziva pre kompenzacije slabljenja, pogotovu na višim frekvencijama. Zbog toga se mogu preduzeti dodatne mere za dobijanje što većeg dinamičkog opsega odziva još prilikom merenja: a) usrednjavanje (uključujući i primenu naprednih metoda kao što je množenje impulsnih odziva), b) primena mernih tehnika koje omogućavaju dobijanje velikih dinamičkih opsega, kao što je MLS tehnika, a pre svega Sine Sweep tehnika, c) uobličavanje pobudnog signala pri merenju impulsnog odziva (npr. MLS signala) tako da se nivoi pobudnog signala na visokim frekvencijama povećaju, pri čemu povećanje postaje sve veće sa porastom frekvencije.

## V. ZAKLJUČAK

Među najveće izazove primene modela i merenja u njima spadaju obezbeđivanje odgovarajućih karakteristika zvučnog izvora i mikrofona, i skaliranje viskotermlnih karakteristika vazduha, kako se definišu u nekim radovima, odnosno kompenzacija slabljenja zvuka u vazduhu i proširenje opadanja. Upravo analiza ovih problema i predložena rešenja pokazuju da postoje mogućnosti za poboljšanje akustičkog testiranja modela.

## LITERATURA

- [1] H. Kuttruff, *Room Acoustics*. London: E&FN Spon, 2000, ch. 9.
- [2] J. H. Rindel, "Modelling in auditorium acoustics – from ripple tank and scale models to computer simulations," in *Proc. CD-ROM Forum Acusticum 2002*, Sevilla, 2002, paper KL-04.
- [3] J. D. Pollack, A. H. Marshall, and G. Dodd, "Digital evaluation of the acoustics of small models: The MIDAS package," *J. Acoust. Soc. America*, vol. 85, no. 1, pp. 185–193, January 1989.
- [4] J. D. Pollack, X. Meynial, and V. Grillon, "Auralization in scale models: Processing of impulse response," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 41, no. 11, pp. 939–945, November 1993.
- [5] M. M. Boone, and E. Braat-Eggen, "Room acoustics parameters in a physical scale model of the new music centre in Eindhoven: Measurement method and results," *Applied Acoustics*, vol. 42, no. 1, pp. 13–28, 1994.
- [6] J. K. Ryu, and J. Y. Jeon, "Subjective and objective evaluations of a scattered sound field in a scale model opera house," *J. Acoust. Soc. America*, vol. 124, no. 3, pp. 1538–1549, September 2008.
- [7] J. Y. Jeon, J. K. Ryu, Y. H. Kim, and S. Sato, "Influence of absorption properties of materials on the accuracy of simulated acoustical measures in 1:10 scale model test," *Applied Acoustics*, 2008, to be published.
- [8] K. -H. Lorenz, "Auralisation of a scale model of the Royal Albert Hall," *NAG Journal*, no. 158, 2001.
- [9] J. Picaut, and L. Simon, "A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas," *Applied Acoustics*, vol. 62, no. 3, pp. 327–340, 2001.
- [10] M. R. Ismail, and D. J. Oldham, "A scale model investigation of sound reflection from building facades," *Applied Acoustics*, vol. 66, no. 2, pp. 123–147, 2005.
- [11] D. Ćirić, "Određivanje akustičkih karakteristika prostorije primenom MLS tehnike," Magistarska teza, Elek. fakultet, Univerzitet u Nišu, Niš, 2000.
- [12] D. Ćirić, "Doprinos razvoju postupka merenja i obrade impulsnog odziva prostorije pri određivanju akustičkih karakteristika," Doktorska disertacija, Elek. fakultet, Univerzitet u Nišu, Niš, 2006.
- [13] *Method for calculation of the absorption of sound by the atmosphere*, ANSI Standard S1.26-1995.

## ABSTRACT

Scale models of rooms play important role in modelling of room acoustics even nowadays. One of the most important activities performed in the models are acoustical measurements. However, these measurements show certain problems that should be solved. Some specific features and problems of acoustical measurements in scale models are indicated in this paper. Special attention is paid to the sound attenuation in the air and decrease of impulse response dynamic range. The contribution of the most important components of measurement chain is analysed, and the solutions for overcoming the difficulties of measurements are proposed.

## PROBLEMS OF ACOUSTICAL MEASUREMENTS IN SCALE MODELS

Dejan G. Ćirić.