

# Kompenzacija slabljenja zvuka u vazduhu pri akustičkim merenjima u modelima prostorija

Dejan G. Ćirić

**Sadržaj** — Slabljenje zvuka u vazduhu predstavlja jedan od osnovnih problema akustičkih merenja u modelima prostorija. Ovo slabljenje je naročito na višim frekvencijama znatno veće od vrednosti koja je potrebno da postoji po zakonu o sličnosti prostorije i modela. Različite alternative se primenjuju za kompenzaciju povećanog slabljenja. U ovom radu je prezentovan algoritam za numeričku kompenzaciju slabljenja i izvršena je analiza primene ove vrste kompenzacije na različitim primerima. Rezultati pokazuju efikasnost algoritma numeričke kompenzacije i ističu značaj slabljenja zvuka u vazduhu.

**Ključne reči** — Akustička merenja, impulsni odziv, model prostorije, numerička kompenzacija, slabljenje zvuka u vazduhu.

## I. UVOD

JEDAN od osnovnih problema primene fizičkih modela prostorija, a pre svega akustičkih merenja u modelima je slabljenje zvuka u vazduhu [1]-[4]. Ovaj problem je posebno izražen na višim frekvencijama, jer se slabljenje značajno povećava sa povećanjem frekvencije. Postoji nekoliko alternativnih rešenja kojima se problem slabljenja može umanjiti ili prevazići [1]. Jedno od ovih rešenja jeste i numerička kompenzacija slabljenja koja se posebno izdvaja od početka primene digitalnih tehnika za akustička merenja [5]-[11].

U ovom radu se vrši analiza primene numeričke kompenzacije slabljenja zvuka u vazduhu pri akustičkim merenjima u modelima. Za tu svrhu, razvijen je algoritam za numeričku kompenzaciju slabljenja koji je implementiran u odgovarajući softverski modul. On je iskorišćen za analizu kompenzacije slabljenja na više različitih primera impulsnih odziva prostorije i modela. Ovi odzivi su izmereni u realnoj prostoriji, odnosno modelu ili su dobijeni na veštački način simulacionim algoritmom [12].

## II. FIZIČKI MODELI PROSTORIJA I MERENJA U NJIMA

Da bi zvučno polje u modelu bilo identično ili bar slično onom u originalnoj prostoriji potrebno je da budu zadovoljeni određeni uslovi, među kojima i

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.rs).

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

gde je  $l$  dužina,  $t$  vreme,  $c$  brzina prostiranja zvuka,  $\lambda$  talasna dužina i  $f$  frekvencija zvuka u prostoriji, dok su odgovarajuće veličine u modelu označene istim simbolima sa indeksom  $m$ , a  $S$  je faktor skaliranja. Ukoliko je  $i$  u prostoriji  $i$  u modelu ista sredina kroz koju se zvuk prostire, onda je  $c=c_m$ , tako da vreme u modelu mora biti  $S$  puta manje, dok frekvencija mora biti  $S$  puta veća.

Jedan od značajnih uslova da bi opadanje zvuka u modelu bilo ekvivalentno opadanju zvuka u prostoriji je da slabljenje zvuka u medijumu kroz koji se vrši prostiranje u modelu  $\alpha_m$  bude  $S$  puta veće od slabljenja u prostoriji  $\alpha$  na odgovarajućim frekvencijama

$$\alpha_m(Sf) = S\alpha(f). \quad (2)$$

U najvećem broju slučajeva je medijum upravo vazduh.

## III. SLABLJENJE ZVUKA U VAZDUHU

Prilikom prostiranja zvuka kroz vazduh dolazi do njegovog slabljenja (apsorpcije), koje uzrokuju dva različita mehanizma: klasični efekti i relaksacioni efekti [2],[3]. Klasični efekti su rezultat procesa transporta koji se dešava u gasovima, odnosno interne frikcije, provođenja toplote i molekularne difuzije. Od ovih mehanizama najveći doprinos klasičnim efektima daju interna (unutrašnja) frikcija ili viskoznost i provođenje toplote. Relaksacioni efekti su rezultat dodatnog mehanizma gubitaka - rotacione i vibracione relaksacije.

Koeficijent slabljenja (slabljenje  $\alpha$  u dB/m) se može dobiti na osnovu izraza [3]

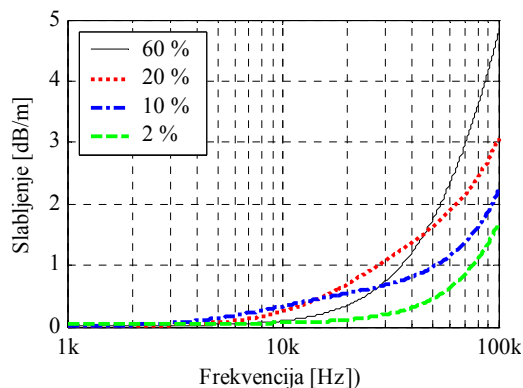
$$\alpha = 8,686 f^2 \left[ \left[ 1,84 \cdot 10^{-11} \left( \frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_r} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \left( \frac{T}{T_r} \right)^{\frac{5}{2}} \right] \cdot \left\{ 0,01275 \cdot e^{-\frac{2239,1}{T}} \frac{f_{rO}}{f_{rO}^2 + f^2} \right\} + 0,1068 \cdot e^{-\frac{3352}{T}} \frac{f_{rN}}{f_{rN}^2 + f^2} \quad (3)$$

gde su  $p_r$  i  $T_r$  referentni pritisak i temperatura ( $p_r=101,325$  kPa,  $T_r=293,15$  K), dok su  $p_a$  i  $T$  atmosferski pritisak i temperatura koji postoje u modelu,  $f$  je frekvencija, dok su  $f_{rO}$  i  $f_{rN}$  relaksacione frekvencije azota i kiseonika koje zavise od molarne koncentracije vodene pare  $h$ . Podaci o vlažnosti vazduha su retko dati preko  $h$ , već su oni obično dati preko relativne vlažnosti. Izraz kojim se na osnovu relativne vlažnosti  $h_{rel}$  može dobiti molarna koncentracija vodene pare  $h$  je

$$h = h_{rel} \left( 10^{-6,8346 \left( \frac{T_{01}}{T} \right)^{1,261} + 4,6151} \right) \left( \frac{p_a}{p_r} \right)^{-1}, \quad (4)$$

gde je  $T_{01}$  izotermalna temperatura od 273,16 K.

Od elemenata koji čine atmosferu dominantan uticaj na slabljenje ima koncentracija vodene pare, pri čemu je generalno slabljenje u vazduhu manje vlažnosti manje, Sl. 1. Treba imati u vidu da se slabljenja prikazana na Sl. 1 dobijaju za približno svake 3 ms prostiranja zvuka. Drugim rečima, pošto je zavisnost slabljenja od vremena prostiranja linearna, za svake 3 ms prostiranja treba dodati prikazanu vrednost slabljenja (npr. za prostiranje od 30 ms vrednosti slabljenja će biti 10 puta veće).



Sl. 1. Slabljenje zvuka u vazduhu na temperaturi od 20°C i pritisku 101325 Pa za relativnu vlažnost vazduha od 60, 20, 10 i 2 %.

#### IV. NUMERIČKA KOMPENZACIJA SLABLJENJA

##### A. Postupak numeričke kompenzacije

Negativan uticaj slabljenja zvuka u vazduhu se eliminiše ili ublažava primenom odgovarajućih metoda za kompenzaciju slabljenja. Oni se mogu klasifikovati u tri kategorije: sušenje vazduha tako da se dobije relativna vlažnost oko 2 %, zamena vazduha azotom i numerička kompenzacija [5]-[11]. U literaturi je predloženo više algoritama za numeričku kompenzaciju slabljenja koji imaju dosta zajedničkih karakteristika [5],[7]-[9],[11].

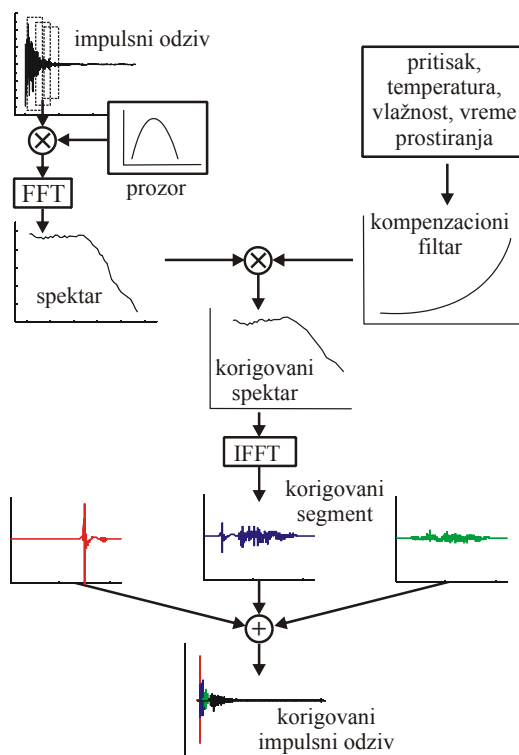
Jedan od algoritama numeričke kompenzacije slabljenja predložen u [11], koji je primenjen u ovom radu je prikazan na Sl. 2. Impulsni odziv se najpre segmentira množenjem odziva sa odgovarajućim prozorskim (Heningovim) funkcijama u vremenskom domenu, pri čemu postoji preklapanje između prozora od 50 %. Brzom Furijeovom transformacijom se zatim dobijaju spektri segmenata. Sa druge strane, na osnovu vremenske pozicije segmenata - prozora, izrazima za slabljenje zvuka dobijaju se frekvencijske karakteristike kompenzacionih filtara. Množenjem spektra svakog od segmenata odgovarajućim kompenzacionim filtrom dobijaju se korigovani spektri segmenata. Inverznom Furijeovom transformacijom se zatim dobijaju korigovani segmenti odziva koji se zatim sabiraju kako bi se dobio korigovani impulsni odziv.

Opisani postupak numeričke kompenzacije je primenjen na više izmerenih i simuliranih impulsnih odziva.

##### B. Impulsni odziv prostorije

Da bi se video značaj uticaja slabljenja zvuka u vazduhu na prostiranje zvuka u zatvorenom prostoru generalno, najpre je izvršeno ispitivanje ovog uticaja koristeći impulsni odziv izmeren u jednoj od laboratorija

Elektronskog fakulteta u Nišu. Ovo nije klasičan slučaj za primenu kompenzacije slabljenja u vazduhu jer je ono sastavni deo prostiranja zvuka u zatvorenom prostoru.

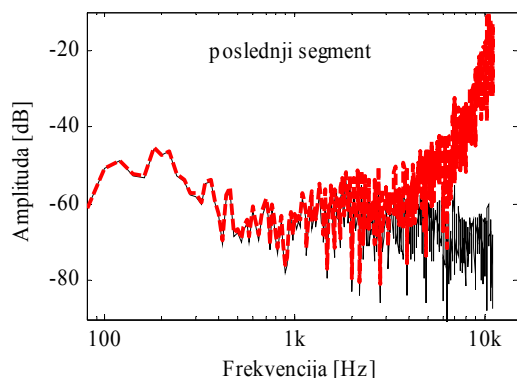


Sl. 2. Algoritamski prikaz postupka za numeričku kompenzaciju slabljenja zvuka u vazduhu.

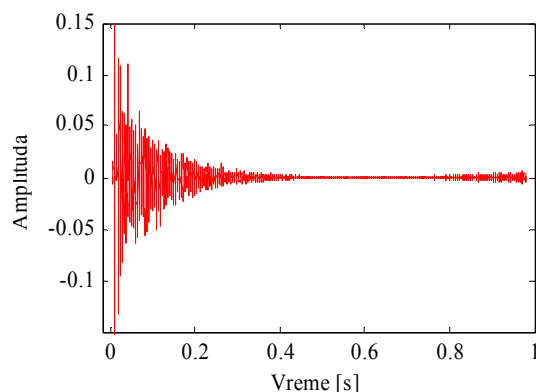
Za izabranu dužinu Heningovog prozora od 50 ms u impulsnom odzivu trajanja oko 1 s ima oko 40 segmenata. Frekvencijske karakteristike pojačanja kompenzacionih filtara koje treba primeniti na ove segmente imaju oblik poput krivih sa Sl. 1, ali su vrednosti mnogo veće. Za prve segmente, odnosno relativno mala rastojanja koja prelazi zvuk, slabljenja zvuka u vazduhu su mala (ispod 5 dB) na frekvencijama do polovine frekvencije odmeravanja (do oko 11 kHz). Međutim, za poslednji segment odziva gde je zvuk prešao preko 300 m dobija se slabljenje od preko 50 dB na frekvencijama oko 10 kHz.

Posle množenja odgovarajućih vrednosti pojačanja kompenzacionih filtara i spektara segmenata dobijaju se korigovani spektri segmenata. Korekcija kod prvog segmenta je gotovo neznatna, dok je korekcija kod poslednjeg segmenta jako velika, Sl. 3. Ovde treba imati u vidu da u poslednjem segmentu nema reverberacionog zvuka već postoji samo šum, tako da se kompenzacijom slabljenja pojačava samo šum.

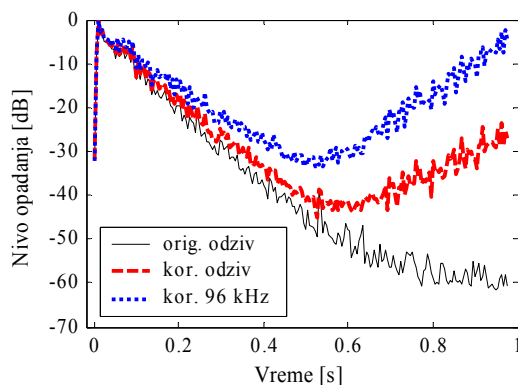
Korigovani impulsni odziv je prikazan na Sl. 4. Može se reći da se u ovom slučaju kompenzacijom vrši mala korekcija dela odziva gde je reverberacioni zvuk dominantan (uzimajući u obzir amplitudu ovog zvuka) i pojačanje šuma iz zadnjeg dela odziva. Pomenuto pojačanje šuma dovodi do promena oblika krive opadanja, Sl. 5. Posle određenog vremenskog trenutka kriva prestaje da opada i počinje ponovo da raste. Sa druge strane, treba primetiti i značajnu razliku u strmini reverberacionog dela impulsnog opadanja originalnog i korigovanog odziva. Strmina je znatno veća kod originalnog odziva.



Sl. 3. Spektar izdvojenog poslednjeg segmenta odziva (—) i korigovani spektar (---) ovog segmenta.



Sl. 4. Korigovani impulsni odziv prostorije.



Sl. 5. Krive impulsnog opadanja originalnog, korigovanog i korigovanog odziva na 96 kHz.

### C. Modifikovani impulsni odziv prostorije

Povećanjem frekvencije odmeravanja impulsnog odziva prostorije iz prethodnog primera na 96 kHz može se dobiti odziv koji je po frekvencijskom opsegu sličniji odzivu modela. Kod ovakvog odziva slabljenje zvuka na višim frekvencijama je znatno manje od slabljenja koje se realno javlja u praksi. Ipak, analiza kompenzacije slabljenja ovako modifikovanog odziva može istaći osnovne karakteristike kompenzacije u modelu. Za faktor skaliranja se može uzeti da je približno 4 (96 kHz/22,05 kHz).

Osnovna razlika u odnosu na prethodni slučaj je u slabljenjima zvuka koja se ovde javljaju i koja su sada znatno veća jer se radi o višim frekvencijama (do 48 kHz). Promenom frekvencije odmeravanja došlo je i do promena vremenske ose, tako da su vrednosti na njoj sada približno 4 puta manje. Slabljenje koje treba kompenzovati

predstavlja razliku slabljenja u modelu i skaliranog slabljenja u prostoriji. Ova razlika slabljenja (pojačanje kompenzacionih filtara) za različite segmente odziva ima slične oblike kao krive sa Sl. 1, sa tom razlikom da je maksimalna vrednost slabljenja za poslednji segment na najvišoj frekvenciji oko 75 dB.

Kako su vrednosti pojačanja koje kompenzacioni filtri treba da imaju nešto veće nego u prethodnom primeru, onda će i razlike originalnog i korigovanog odziva biti veće. Međutim, to je i razlog još većeg pojačanja šuma iz zadnjeg dela odziva, tako da prethodno primećeni trend porasta amplituda impulsnog odziva od neke tačke do kraja odziva sada postaje još očigledniji. Zbog svega navedenog su i razlike krivih impulsnog opadanja originalnog i korigovanog odziva znatno veće i razlika postaje primetna od samog početka opadanja, Sl. 5 (pri tome, vreme za korigovani odziv na 96 kHz je uvećano onoliko puta koliko i frekvencija odmeravanja).

### D. Simulirani impulsni odziv modela

Još jedan od odziva korišćen za analizu kompenzacije slabljenja je i odziv modela dobijen simulacionim algoritmom [12] trajanja oko 120 ms, koji daje vreme reverberacije od oko 0,4 s sa faktorom skaliranja  $S=10$ . Frekvencija odmeravanja je opet 96 kHz. Ovakav odziv ima određene karakteristike ekvivalentne realnom odzivu, ali ne i slabljenje na višim frekvencijama koje nije uzeto u obzir prilikom generisanja odziva.

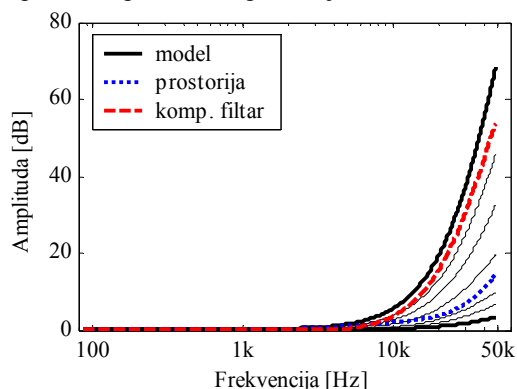
Slabljena zvuka u modelu za datu dužinu impulsnog odziva, odnosno odgovarajući pređeni put, su prikazana crnim krivama na Sl. 6. Maksimalno ekvivalentno slabljenje u prostoriji (koje odgovara poslednjem segmentu odziva) uvećano  $S$  puta je prikazano na istoj slici plavom bojom, dok je razlika maksimalnog slabljenja u modelu i ovog skaliranog maksimalnog slabljenja u prostoriji prikazana crvenom bojom. Poslednje pomenuta kriva ujedno predstavlja i pojačanje kompenzacionog filtra za poslednji segment. Osnovna svojstva kompenzacije slabljenja uočena u prethodnim primerima postoje i ovde (korekcija frekvencijskog odziva i pojačanje šuma), Sl. 7.

### E. Izmereni impulsni odziv modela

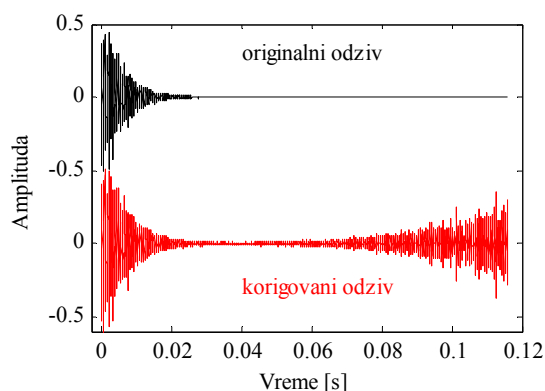
Kompenzacija slabljenja zvuka je primenjena i na impulsnom odzivu izmerenom u modelu. Frekvencija odmeravanja je 192 kHz, dok je faktor skaliranja 10. Kako se radi o modelu prostorije koja ima veliko vreme reverberacije, dužina dela odziva sa dominantnim reverberacionim zvukom je dosta velika i ona je kod širokopojasnog odziva gotovo reda 1 s, Sl. 8(a). Najveći doprinos ovako dugom opadanju daju pre svega niže frekvencije, dok je dužina dela odziva gde je dominantan reverberacioni zvuk na visokim frekvencijama znatno kraća (na najvišim frekvencijama oko 50 ms), Sl. 8(b).

Za dati frekvencijski opseg i dužinu odziva, slabljenja zvuka u modelu su jako velika. Za poslednji segment, na frekvencijama do 96 kHz slabljenja su čak preko 1000 dB. Razlika ovog slabljenja i slabljenja u prostoriji (pojačanje kompenzacionih filtara) je takođe jako veliko (na najvišim frekvencijama preko 700 dB). Zbog toga se kompenzacija

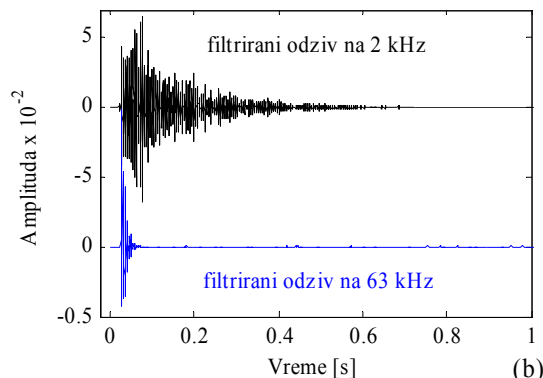
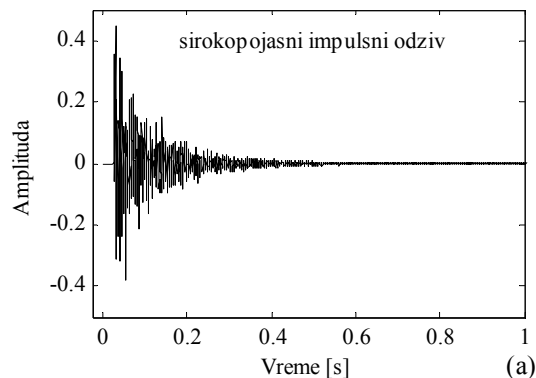
kod ovakvog odziva može vršiti tako što se on najpre filtrira u opsezima koji će biti korišćeni za analizu (npr. tercama), a zatim se na adekvatno odsečene filtrirane odzive primeni opisana kompenzacija.



Sl. 6. Slabljenje zvuka u modelu (—), kao i skalirano slabljenje zvuka u prostoriji (···) i pojačanje kompenzacionog filtra (---) za poslednji segment odziva.



Sl. 7. Simulirani i korigovani impulsni odziv modela.



Sl. 8. Širokopojasni impulsni odziv izmeren u modelu (a), i filtriran u opsezima terce na 2 kHz i 63 kHz (b).

## V. ZAKLJUČAK

U radu je prezentovan algoritam za numeričku kompenzaciju slabljenja zvuka u vazduhu. Algoritmom se efikasno kompenzuje slabljenje zvuka, ali se javlja i negativan efekat pojačanja šuma. Zbog toga je poželjno da se pre kompenzacije izvrši odsecanje odziva na mestu gde se reverberaciono opadanje seče sa nivoom šuma, odnosno gde prestaje opadanje i počinje porast nivoa. Pored toga, predlaže se da se pre kompenzacije izvrši filtriranje odziva u opsezima terci ili oktava u kojima će on kasnije i biti korišćen. Vrednosti dobijenih slabljenja ističu značaj pravilne kompenzacije slabljenja zvuka u vazduhu.

## LITERATURA

- [1] H. Kuttruff, *Room Acoustics*. London: E&FN Spon, 2000, ch. 9.
- [2] H. Bass, and H. J. Bauer, "Atmospheric absorption of sound: Analytical Expressions," *J. Acoust. Soc. America*, vol. 52, no. 3, pp. 821–825, 1972.
- [3] *Method for calculation of the absorption of sound by the atmosphere*, ANSI Standard S1.26-1995.
- [4] *Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by atmosphere*, ISO Standard 9613-1-1993.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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, "Problemi akustičkih merenja u modelima prostorija," u *Zborniku radova TELFOR*, Srbija, 2008, pp. 641–644.
- [12] A. Pantić i D. Ćirić, "Modelovanje opadanja zvučne energije prostoriji," u *Zborniku radova 52 Konf. za ETRAN*, Srbija, 2008, rad AK2.5.

## ABSTRACT

Sound attenuation in air represents one of the main problems of acoustical measurements in room models. This attenuation especially at higher frequencies is considerably greater than it should be according to the law of similarity between the room and model. Various alternatives have been applied for compensation of the attenuation excess. In this paper, the algorithm for numerical compensation of the attenuation is presented, and its implementation is analysed through different examples. The results show the efficiency of the algorithm and emphasize the importance of sound attenuation in air.

## COMPENSATION OF SOUND ATTENUATION IN AIR IN ACOUSTICAL MEASUREMENTS OF ROOM MODELS

Dejan G. Ćirić