

Jedan pristup u modelovanju akustičkog impulsnog odziva prostorije na osnovu ehograma

Srđan Bojičić, Miomir Mijić

Odsek za telekomunikacije i informacione tehnologije

Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

srdjan.bojicic@gmail.com; emijic@etf.rs

Sažetak—Krajnji rezultat simulacije akustičkog odziva prostorije rej-trejsing metodom je raspodela energije u vremenu registrovana u prijemnim tačkama. Za potrebe auralizacije zvučnog polja potrebno je formirati audio signale impulsnog odziva koji se mogu reprodukovati slušaocima. U radu su predložene metode za modelovanje impulsnog odziva na osnovu izračunate vremenske raspodele energije u posmatranoj prijemnoj tački kao doprinos tehnologiji auralizacije zvučnog polja u prostorijama.

Ključne riječi- rej-trejsing; impulsni odziv; akustika prostorija;

I. UVOD

U toku proteklog stoljeća razvijeno je više metoda za modelovanje akustičkog odziva prostorije. Bila je namera da se akustički dizajn auditorijuma pomeri od pozicije slabo shvaćene umetnosti do naučno zasnovane oblasti inženjerstva. Sa najnovijim razvojem računarskog modelovanja postalo je moguće kombinovanje najboljih karakteristika starijih i novijih metoda, za dobijanje pouzdane predikcije objektivnih akustičkih parametara.

Uvođenje digitalnih računara u akustiku prostorija je zasluga M.R.Šredera i njegovih saradnika '63. godine. Od tada su ovu tehnologiju koristili mnogi autori da istražuju različite probleme u akustici prostorija. Prvi koji su upotrebili računare za simulaciju akustičkog odziva koncertnih dvorana bili su Krokstad, Strom i Sorsdal '68. godine. Oni su generisali akustički impulsni odziv prostorije pomoću računarske simulacije, eksperimentišući sa mnoštvom parametara koje su mogli lako da menjaju pri simulacijama. U međuvremenu, računarska simulacija akustičkog odziva se više ne koristi samo za sve tipove auditorijuma (koncertne dvorane), već i za fabrike i druge radne prostore.

Razvoj računarskih modela je tekao u pravcu korišćenja hibridnih metoda za modelovanje akustičkog odziva, pri čemu su najčešće kombinovane metode rej-trejsing i metoda likova. Akcenat je bio na povećanju brzine proračuna i pouzdanosti dobijenih rezultata. Jedan od postignutih rezultata je i auralizacija odličnog kvaliteta.

II. EHOGRAM I IMPULSNI ODZIV

Kada se govori o signalu impulsnog odziva onda se misli na pritisak zvuka, $p(t)$. S druge strane, glavne metode za

modelovanje akustičkog odziva prostorije, metoda likova i rej-trejsing, na svom izlazu daju intenzitet zvuka (ehogram). Po svojoj definiciji, ehogram je energetski ekvivalent impulsnog odziva prostorije: ilustruje kvadrat pritiska signala kao funkcije vremena [1]. Konverzija iz pritiska zvuka $p(t)$ u energetski odziv, $p^2(t)$, se izvodi pravolinijski kvadriranjem pritiska. Konverzija u obrnutom smeru nije trivijalna zato što energetski odziv sadrži manje informacija nego odgovarajući impulsni odziv. Ipak, signal impulsnog odziva je potreban za auralizaciju. Kako bi se razrešio ovaj problem predlažu se različiti algoritmi za takvu konverziju [2].

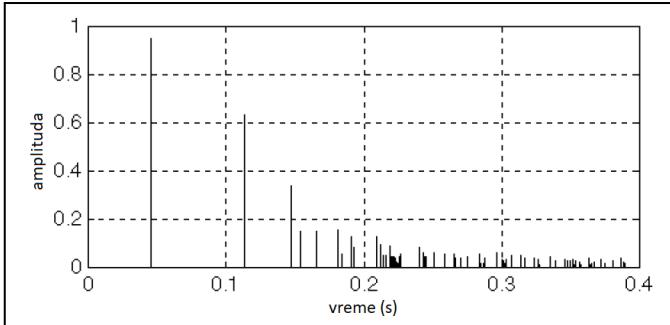
U tehnikama modelovanja zasnovanim na pritisku zvuka, čiji je tipičan predstavnik metoda likova, izvođenje započinje u frekvencijskom domenu, a onda se pomoću inverzne Furijeove transformacije dobija izraz za $p(t)$ u vremenskom domenu. Ako se uvrste i gubici usled propagacije zvuka u vazduhu i apsorpcije zvuka na površinama, onda dobijamo proizvod dva člana u frekvencijskom domenu. Imajući u vidu da je inverzna Furijeova transformacija proizvoda dva člana u frekvencijskom domenu jednaka konvoluciji njihovih pojedinačnih inverznih Furijeovih transformacija u vremenskom domenu, dobijamo izraz za $p(t)$ u vremenskom domenu u koji su uvršteni i gubici (tzv. Green-ova funkcija u vremenskom domenu). Na ovaj način dobija se rešenje talasne jednačine [3].

Kao rezultat simulacije pomoću metode likova na opisani način dobija se odziv u vremenskim tačkama koje nisu nužno ekvidistantno raspoređene. Primer toga prikazan je na slici 1. Prikazani su nivoi energije sa svojim vremenskim trenucima u kojima su pristigli. Nasuprot tome, kao rezultat simulacije metodom rej-trejsing dobija se energetski odziv u vremenu, u kome se u pravilnim vremenskim intervalima sumira pristigla energija.

Tehnike koje se trenutno primenjuju u praksi su tipično hibridnog tipa. Glavni pravac u razvoju hibridnih metoda je bio korišćenje metode likova za detekciju ranih spekularnih putanja refleksije i metode rej-trejsing za kasnu reverberaciju, s obzirom da nema potrebe za tačnu detekciju spekularnih refleksija za kasnije komponente impulsnog odziva već se može koristiti manje precizna a procesorski brža tehnika.

Hibridne tehnike u realnom vremenu najčešće žrtvuju izvesnu fizičku preciznost za performanse. Takvi sistemi najčešće modeluju kompleksne prostore, koji mogu uključivati brojne sobe i hodnike, i imaju sasvim različite zahteve za

simulaciju u poređenju sa akustičkim dizajnom jednog prostora poput koncertne hale ili učionice. Za takva okruženja, prednost je podeliti prostoriju na odvojene sobe koje su međusobno povezane prolazima kako je predložio Schroeder i drugi [4]. Zatim se sprovodi odvojeno praćenje putanja u svakoj sobi a rezultujući impulsni odziv se dovodi na ulaz mreže filtra čija topologija je izvedena iz geometrijskog modela.



Slika 1. Ilustracija energetskog impulsnog odziva prostorije (ehogram) [8].

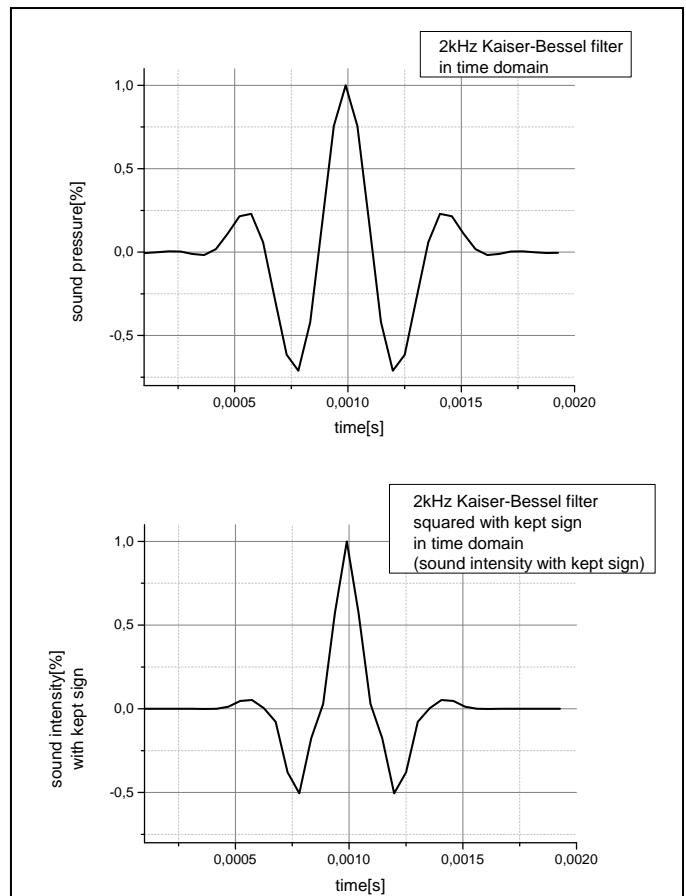
III. MODIFIKACIJA PRORAČUNA IMPULSNOG ODZIVA NA OSNOVU EHOGRAMA

Impulsni odziv je funkcija zvučnog pritiska u zavisnosti od vremena. Rezultat rej-trejsing simulacije je zvučna energija u zavisnosti od vremena (ehogram). Kao rezultat rej-trejsinga, kada zrak pogodi prijemnu tačku registruje se njegov intenzitet zvuka. Svi pogoci, odnosno zvučni intenziteti u nekom intervalu vremena ($t, t + \Delta t$) se sabiraju, i kao rezultat nastaje ehogram. Frekvencija odabiraka se definiše kao $f_s = 1/\Delta t$. Pogodak je u stvari tačka u vremenu, i ima širokopojasni frekvencijski odziv.

Ako umesto jedne tačke, registrujemo niz tačaka u vremenskim intervalima $(t, t + \Delta t)$; $(t, t + 2 \cdot \Delta t)$; $(t, t + 3 \cdot \Delta t)$; ... $(t, t + n \cdot \Delta t)$; pri čemu n predstavlja broj tačaka oktavnog Kajzer-Besel FIR filtra u vremenskom domenu, a amplitude tih tačaka odgovaraju koeficijentima ovog filtra, kao rezultat dobiće se oktavni frekvencijski impulsni odziv u vremenskom domenu.

U skladu sa poznatom relacijom za ravanske zvučne talase, intenzitet zvuka je proporcionalan kvadratu zvučnog pritiska, $I \sim p^2$. Imajući u vidu činjenicu da se diskretni Kajzer-Besel FIR filter u vremenskom domenu odnosi na pritisak, sumiranjem pritisaka na ovaj način zanemaruju se fazni pomeraji i interferencijski efekti između zvučnih talasa u prostoriji. Alternativa koja se ovde uvodi je pokušaj sumiranja u "domenu intenziteta". U tu svrhu, svaki oktavni Kajzer-Besel filter $p_{KB}(t)$ u vremenskom domenu, će biti modifikovan prema sledećoj formuli [6]:

$$I_{KB}(t) = \text{sign}(p_{KB}(t)) \cdot p_{KB}^2(t) \quad (1)$$

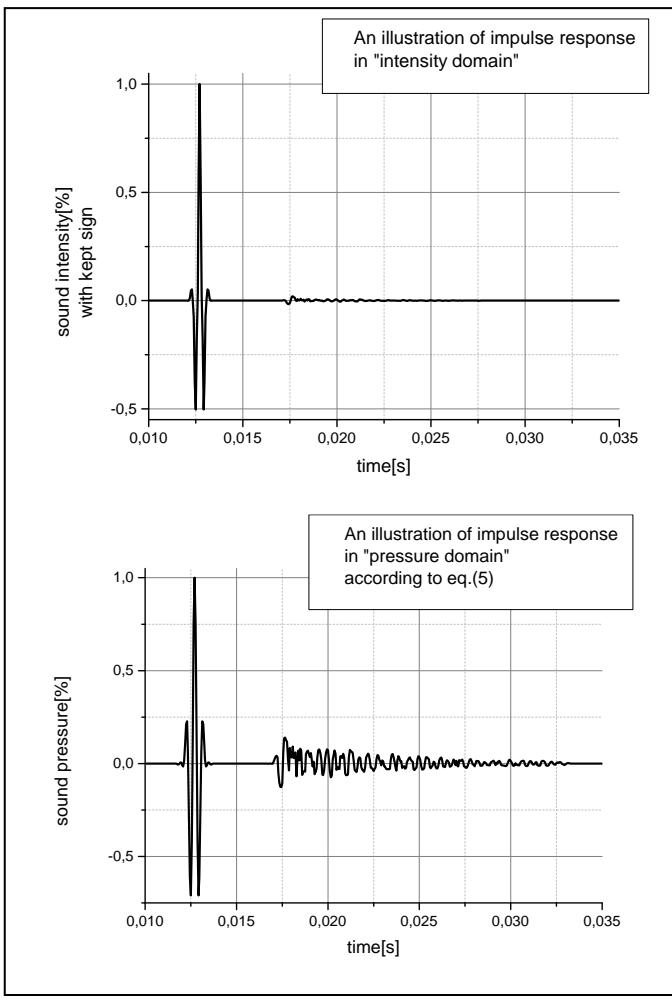


Slika 2. Kajzer-Besel filter oktava 2kHz u vremenskom domenu $p_{KB}(t)$ (gore). Modifikovan Kajzer-Besel filter 2kHz u "domenu intenziteta" $I_{KB}(t)$, prema jednačini (1) (dole).

gde je $I_{KB}(t)$ filter u "domenu intenziteta" tj. intenzitet zvuka Kajzer-Besel filtra sa očuvanim znakom. Kao ilustracija, na slici 2 (gore) prikazan je signal $p_{KB}(t)$ za oktavu od 2kHz, i na slici 2 (dole) prikazan je signal $I_{KB}(t)$ dobijen na osnovu jednačine (1). Posle sumiranja na opisani način rezultat je intenzitet zvuka sa očuvanim znakom, slika 3 (gore). Kako bi se vratili u "domenu pritisaka", primenjuje se inverzna operacija [6]:

$$p_{\Sigma}(t) = \text{sign}(I_{\Sigma}(t)) \cdot \sqrt{\text{abs}(I_{\Sigma}(t))} \quad (2)$$

gde je $I_{\Sigma}(t)$ suma intenziteta u odgovarajućem oktavnom opsegu, koja predstavlja intenzitet zvuka sa očuvanim znakom, i $p_{\Sigma}(t)$ predstavlja zvučni pritisak u odgovarajućem opsegu, slika 3 (dole). Signal dobijen na ovaj način ima slične karakteristike magnitudo u frekvencijskom domenu kao i originalni Kajzer-Besel filter. Međutim, sumiran je u "domenu intenziteta" što znači da su prethodne primedbe koje se odnose na fazne pomeraje i interreferencijske efekte izbegnute.



Slika 3. Ilustracija impulsnog odziva u "domenu intenziteta" (gore), treba primetiti da intenziteti imaju male absolutne vrednosti. Ilustracija impulsnog odziva u "domenu pritiska" prema jednačini (2) (dole) [6].

Proces kreiranja jedinstvenog širokopojasnog impulsnog odziva korišćenjem impulsnih odziva po oktavama je sledeći. Prvo, impulsni odzivi po oktavama se konvertuju u „domen intenziteta“ na opisani način. Pri tome je važno ne raditi normalizaciju impulsnih odziva tako da maksimalna amplituda pritiska bude 1, čime čuvamo odnos energija po oktavama. Drugi korak je sumiranje svih impulsnih odziva u „domenu intenziteta“, i na kraju konverzija dobijenog zbira u „domen pritiska“ prema jednačini (2).

Do sada opisani načini modelovanja impulsnog odziva u literaturi [9] podrazumevaju:

- da se svaki oktavni FIR filter, uzimajući u obzir slabljenje od refleksija prilikom kretanja zvučnog zraka po prostoriji, konvoluiru sa HRTF (Head Related Transfer Function) za levo i desno uho, prema upadnom uglu u odnosu na glavu slušaoca, i sabere po oktavama kreirajući binauralnu predstavu krajnjeg slušaoca.

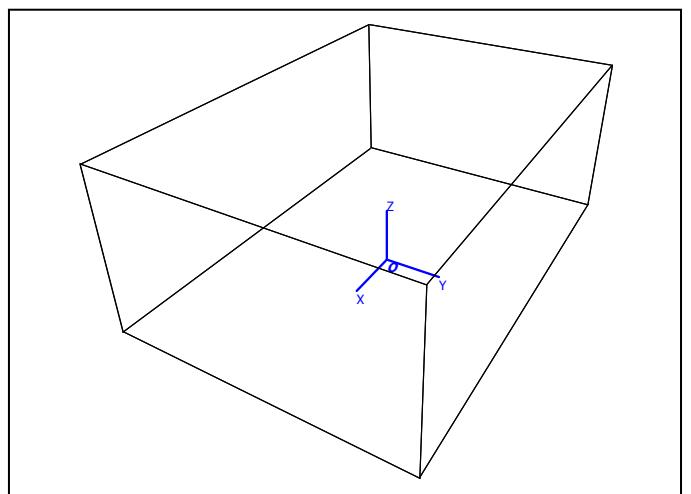
- da se doda fazni pomeraj prilikom refleksija od površina prostorije u zavisnosti od upadnog ugla, a zatim primeni postupak opisan u prethodnoj stavci.
- svakom zvučnom zraku koji se prati se doda slučajna faza, kako bi se uklonila jednosmerna komponenta iz finalnog BRIR (Binaural Impulse Response of a Room) impulsnog odziva prostorije.

Prednost prikazane metodologije pokazuje se prilikom proračuna impulsnih odziva u slučaju parcijalnih modela prostorije, kada se ne posmatra celokupan impulsni odziv, već doprinos pojedinih površina u prostoriji. Ovo je detaljnije opisano u literaturi [6]. U složenoj strukturi impulsnog odziva, doprinosi pojedinih površina u ukupnom odzivu ostaju maskirani celokupnim akustičkim odzivom prostorije. U tom smislu je predložena metoda razvijena sa ciljem da se ispita akustički doprinos određenih površina, što je posebno značajno kod akustičkog dizajna prostorija.

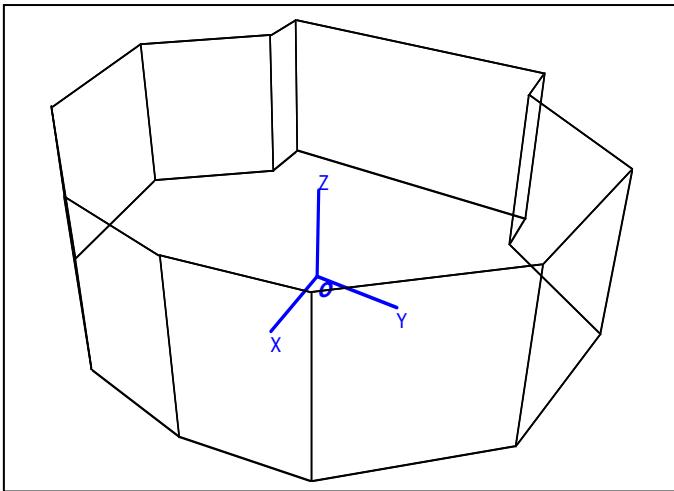
IV. EKSPERIMENT

Da bi se proverili rezultati koji se dobijaju opisanom metodom, analizirani su simulirani impulsni odzvi u tri modela prostorija, korišćeni u literaturi [7], i prikazani na slikama 4, 5 i 6. Prva prostorija je jednostavnog paralelopipednog oblika i prikazana je na slici 4. Druga prostorija je kompleksnijeg oblika. To je scenski prostor u kome su pod i plafon ravni i paralelni, a oblik u osnovi je mnogougao. Njen model je prikazan na slici 5. Najzad, treća prostorija je geometrijski najkompleksnija. To je hala „Morača“ u Podgorici koja ima vrlo kompleksan oblik sa mnogo pojedinačnih unutrašnjih površina. Njen model je prikazan na slici 6.

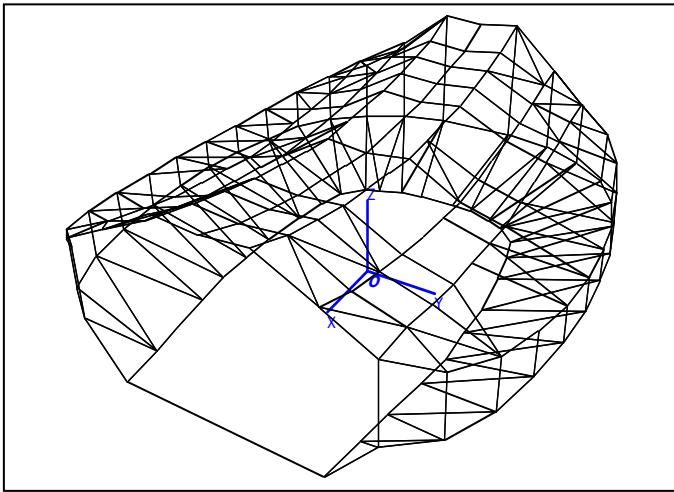
Svi prikazani modeli realizovani su tako da imaju uniformu raspodelu koeficijenta apsorpcije na površinama, i usvojeno je da to bude vrednost 0.1. Cilj toga je da se umanji efekat apsorpcije i tako učini prepoznatljivim uticaj geometrijskih karakteristika na tokove saobraćaja zvučne energije po prostoriji i po pojedinim površinama. Zvučno polje u modelima je simulirano sa slučaj uniformne raspodele sketering koeficijenta po svim površinama i njegova vrednost je 0.5.



Slika 4. Model paralelopipedne prostorije.



Slika 5. Model prostorije način scenskom prostoru.



Slika 6. Model sportske dvorane "Morača" u Podgorici.

Kako bi se proverila validnost simulacije predloženom metodom, urađena je i simulacija akustičkog odziva prostorija klasičnom rej-trejsing metodom, i upoređena su dobijena vremena reverberacije. Da bi rezultati bili uporedivi, po svim oktavama dodeljen je sketering koeficijent 0.5 za sve površine u prostoriji, dok je kod simulacije klasičnom rej-trejsing metodom takođe dodeljena širokopojasna vrednost sketering koeficijenta od 0.5. Simulacija je izvršena do vremena koja premašuju vremena reverberacije procenjenog na osnovu Sabinovog obrasca, i iznose 4s, 3s i 10s, za prostorije prikazane na slikama 4, 5 i 6, respektivno.

Kao referentnu informaciju, treba reći da su vremena reverberacija za tri prikazana modela prema Sabinovom obrascu, 3.34s, 1.85s i 7.54s, za prikazane modele respektivno. Iako Sabinov obrazac važi za uslove totalne difuznosti površina u prostoriji, a u simulaciji je usvojeno da je vrednost sketering koeficijenta 0.5, ova informacija je korisna jer pruža uvid u to koliko su rezultati simulacije blizu očekivanja.

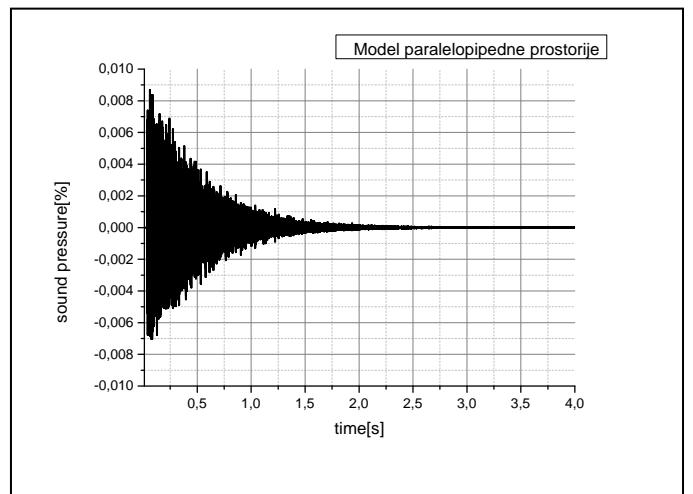
V. REZULTATI

Rezultati simulacije impulsnog odziva prikazani su na slikama 7, 8 i 9, respektivno. Rezultat predloženog metoda za

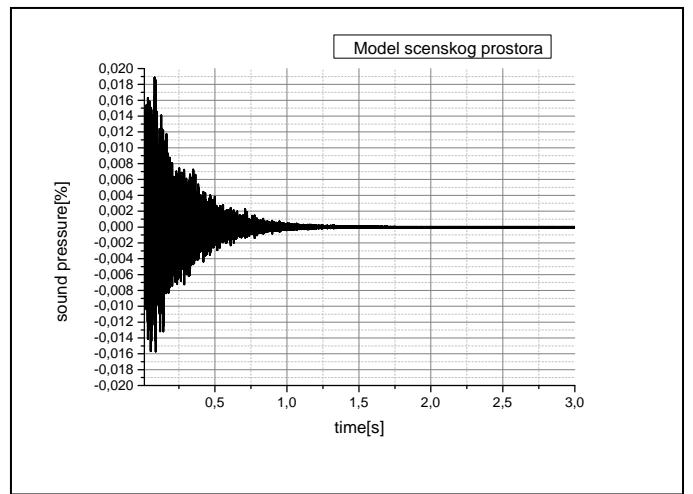
proračun impulsnog odziva se može videti na prikazanim slikama. Vidi se da je u pitanju pritisak zvuka, kakav se sreće u praksi pri eksperimentalnim merenjima. Upravo ovakav oblik impulsnog odziva omogućava auralizaciju.

Nivo pritiska zvuka prikazan je na slikama 10, 11 i 12, respektivno. Kako bi se utvrdilo vreme reverberacije, izračunata je Šrederova kriva. Na ovaj način su određena vremena reverberacije za navedene modele, koja iznose 3.22s, 1.76s i 7.34s, respektivno, i prikazana su u tabeli I.

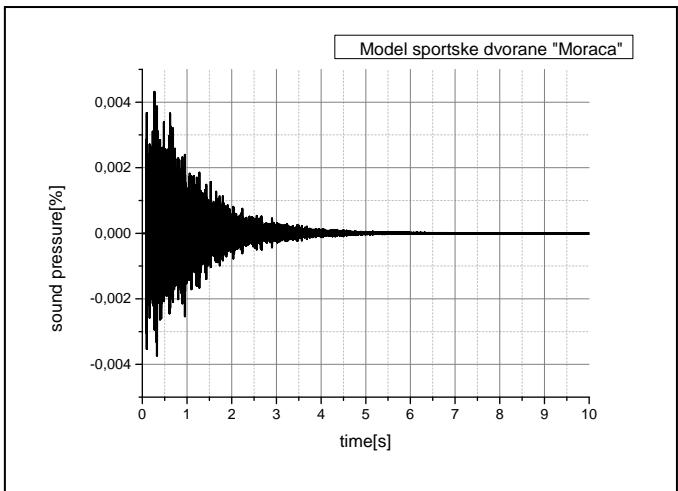
Kako bi se utvrdilo odstupanje od simulacije klasičnom rej-trejsing metodom, urađene su simulacije i ovom metodom i rezultati su prikazani na slikama 13, 14 i 15, respektivno. U tabeli I su prikazana dobijena vremena reverberacije izračunata pomoću Šrederove krive za klasičnu rej-trejsing simulaciju, i ona iznose 3.26s, 1.77s i 7.33s, za navedene modele respektivno.



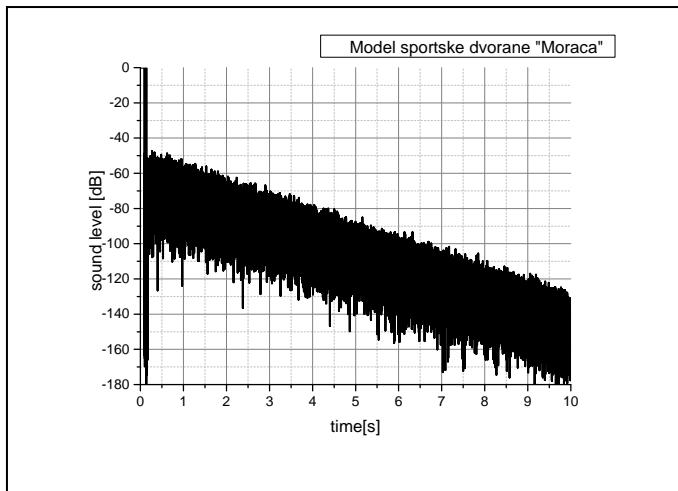
Slika 7. Model paralelopipedne prostorije, impulsni odziv.



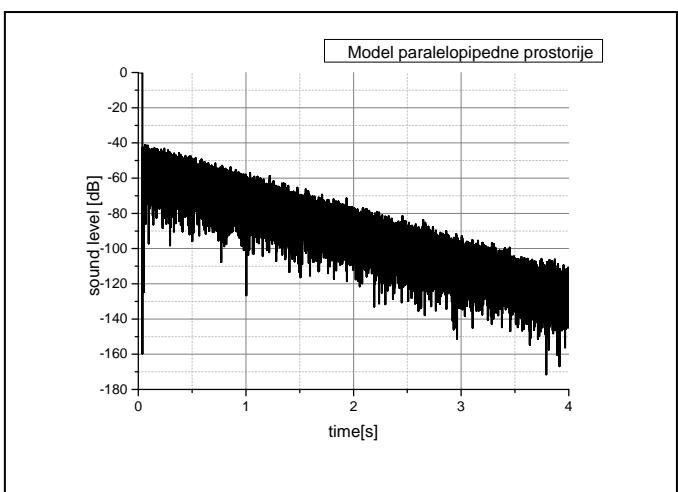
Slika 8. Model scenskog prostora, impulsni odziv.



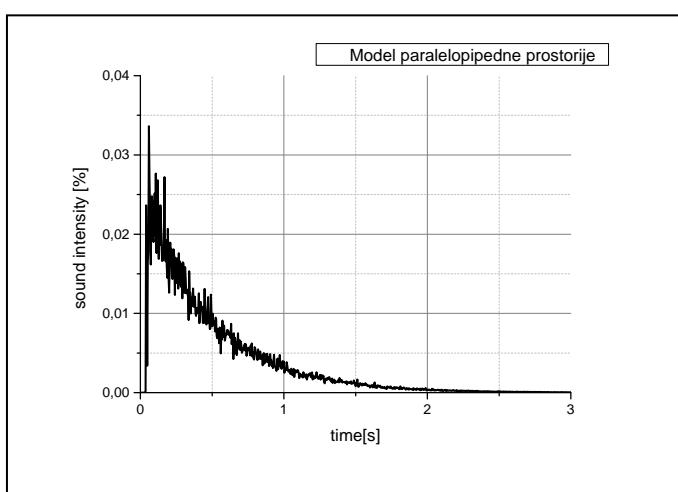
Slika 9. Model sportske dvorane "Morača", impulsni odziv.



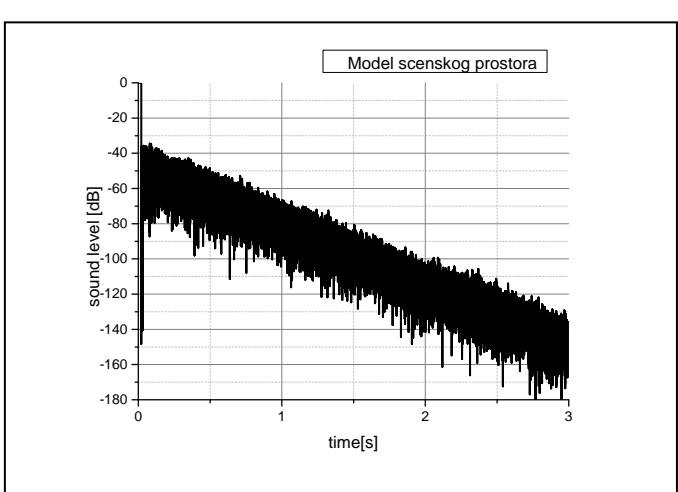
Slika 12. Model sportske dvorane "Morača", nivo zvuka.



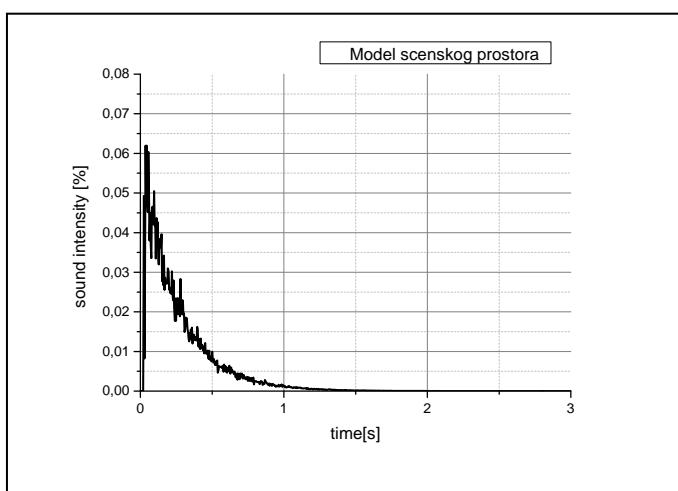
Slika 10. Model paralelopipedne prostorije, nivo zvuka.



Slika 13. Model paralelopipedne prostorije, ehogram.

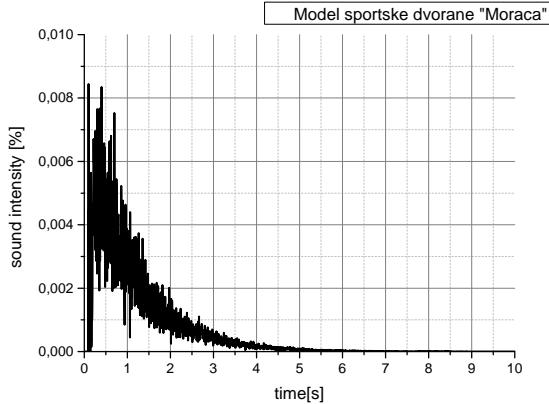


Slika 11. Model scenskog prostora, nivo zvuka.



Slika 14. Model scenskog prostora, ehogram.

LITERATURA



SLIKA 15. Model sportske dvorane „Moraca“, ehogram.

VI. ZAKLJUČAK

Kako bi jasnije uočili razlike između vremena reverberacije proračunatih pomoću Sabinovog obrasca i računarskih simulacija, ova vremena su prikazana u tabeli I.

TABELA I. UPOREDNI PREGLED VREMENA REVERBERACIJE

RT ₆₀ [s]	Paralelopiped	Scenski prostor	Morača
Sabin	3,34	1,85	7,54
Predložena metoda	3,22	1,76	7,34
rej-trejsing	3,26	1,77	7,33

Na osnovu prikazanog poređenja, iako su vremena dobijena Sabinovim obrascem neznatno veća od druge dve simulacije (što se može objasniti totalnom difuznošću površina), može se konstatovati da ne postoje prepreke za korišćenje predložene metode za proračun impulsnog odziva na osnovu ehograma, zato što su razlike zanemarljive. Takođe, slušanjem generisanih impulsnih odziva na osnovu predložene metode, kao i konvolucijom impulsnih odziva sa zvučnim signalima, može se stvoriti utisak koliko dobro zvučno odražavaju prostoriju za koju su generisani.

LITERATURA

- [1] J. J. Embrechts, "Review on the Applications of Directional Impulse Responses in Room Acoustics", The 13th French Acoustics Congress, April 11 to 15, 2016 Le Mans.
- [2] Srđan Bojičić, "Načini modelovanja signala impulsnog odziva u sobnoj akustici na osnovu računarske simulacije", ETRAN 2016, Zlatibor, AK2.1.
- [3] Renate Heinz, „Binaural room simulation based on an Image Source model with addition of statistical methods to include the diffuse sound scattering of walls and to predict the reverberant tail“, Applied Acoustics, vol. 38, 1993, 145-159.
- [4] K. H. Kuttruff, "Auralization of Impulse Responses Modeled on the Basis of Ray-Tracing Results", J. Audio Eng. Soc., Vol. 41, No 11, 1993.
- [5] K. H. Kuttruff, "Room Acoustics", Fifth edition, Spon Press, 2009.
- [6] Srđan Bojičić, Dragana Šumarac-Pavlović, Miomir Mijić, „Formation of scattering characteristics for acoustical ray tracing simulation“, Archives of Acoustics, Vol 43, No 3 (2018).
- [7] Srđan Bojičić, Dragana Šumarac Pavlović, Ivana Ristanović, Miomir Mijić, "Analiza raspodele incidentne energije na unutrašnjim površinama prostorija pomoću softverske simulacije", ETRAN 2017, Kladovo, AK2.1
- [8] A. T. Furjes, E. Arato-Borsi, T. Poth, F. Augusztinovicz, "Validation of geometrical room acoustics algorithms by comparing predicted and measured room responses", International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Januar 1999.
- [9] Odeon 9.22 Combined edition, User manual.

ABSTRACT

The final result of the room acoustic impulse response simulation using ray-tracing method is the distribution of energy in time, calculated at the observed points. For sound field auralization, it is necessary to generate audio signals of an impulse response that can be played to the listeners. Methods for modeling the impulse response based on the calculated time distribution of energy at the observed receiving points are proposed in this paper as a contribution to the technology of sound field sounding in a room.

ONE APPROACH IN MODELING THE ACOUSTIC IMPULSE RESPONSE OF THE ROOM BASED ON THE ECHOGRAM

Srđan Bojičić, Miomir Mijić