

Analiza akustičkog odziva spregnutih prostorija dobijenog metodom rej-trejsing

Srđan R. Bojičić, *Elektrotehnički fakultet, Beograd*

Sadržaj — U radu je prikazana nova fizička veličina, vremenska raspodela srednje dužine slobodnog puta u prostoriji. S obzirom da postojeći komercijalni softveri ne proračunavaju ovu veličinu napravljen je nov softver za tu potrebu. Prikaz ove veličine pomoću napravljenog softvera dat je na apstraktnim slučajevima spregnutih prostorija. Analizom akustičkog odziva u ovim slučajevima i pomenute fizičke veličine dolazi se do njihove međusobne zavisnosti, što može biti predmet daljih istraživanja.

Ključne reči — Akustika prostorija, rej-trejsing metoda, spregnute prostorije.

I. UVOD

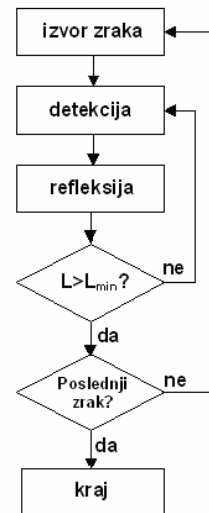
Softverski realizovani matematički modeli tj. računarski modeli omogućavaju bolje razumevanje akustičkih performansi prostorije u fazi akustičkog dizajna. Komercijalni softveri za akustičku obradu prostorija omogućavaju ljudima i sa limitiranim znanjima iz oblasti akustike da vladaju akustičkim konceptima i akustičkim modelovanjem prostorija.

Iako na tržištu postoji veliki broj programa koji simuliraju akustički odziv prostorije i iz dobijenog impulsnog odziva izračunavaju mnoštvo akustičkih parametara, postoje parametri koje nijedan program do sada nije uvrstio u svoju opciju. To su: vremenska raspodela srednje dužine slobodnog puta, vremenska raspodela broja refleksija, vremenska raspodela broja zraka i prvi izvod Šrederove krive po vremenu. Posebno korisnom za razumevanje akustičkih fenomena pokazuje se vremenska raspodela srednje dužine slobodnog puta.

II. OPIS SOFTVERA

Za potrebe ovog rada napravljen je softver za simulaciju akustičkog odziva prostorije pomoću rej-trejsing metode. Sam softver je realizovan u programskom jeziku C++. Za odabir ovog programskog jezika bile su ključne dve njegove osobine: brzina prilikom izvršavanja velikog broja proračuna i objektno-orijentisano programiranje. S obzirom da srž programa predstavlja algoritam rej-trejsing metode, koji je prikazan na slici 1, jasno je da u programu postoji veliki broj proračuna. Objektno orijentisano programiranje je poslužilo prilikom modelovanja prostorije, izvora, prijemnika i akustičkih zraka.

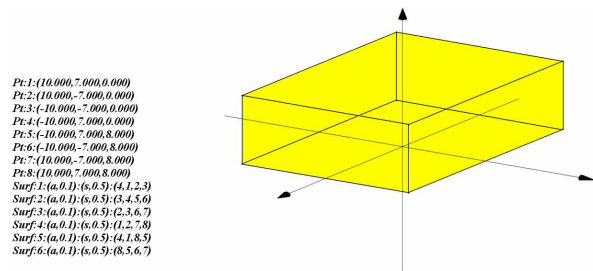
Srđan R. Bojičić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (telefon: 381-64-1243281, e-mail: srdjan.bojicic@gmail.com)



Sl. 1. Dijagram toka rej-trejsing metode.

Zvuk koji emituje zvučni izvor modeluje se konačnim brojem zraka koji predstavljaju nosioce zvučne snage. Svaki od ovih N zraka nosi $1/N$ -ti deo zvučne snage izvora. Ovi zraci putuju kroz prostor brzinom zvuka i reflektuju se od zidova prostorije prilikom sudara. Za to vreme njihova energija se smanjuje kao posledica apsorpcije zvuka u vazduhu i usled apsorpcije zvučne energije prilikom refleksije od zidova. U programu se zid modeluje jednačinom ravni, tj. zid nema debljinu. Zid ima pridružene atribute, kao što su apsorpcija i koeficijent difuznosti refleksija. Refleksija zvučnog zraka od zida predstavlja rešenje jednačine preseka prave, koja predstavlja zrak, i ravni koja predstavlja zid. Iz tačke preseka zrak polazi duž novog pravca, koji se određuje na osnovu koeficijenta difuznosti refleksija zida.

Da bi se pojednostavilo korišćenje napravljenog programa njegova upotreba je podeljena u nekoliko faza. Prva faza je definisanje temena prostorije i površina koje čine prostoriju.



Sl. 2. Ulazni fajl za prostoriju na slici desno.

Na slici 2 prikazan je ulazni fajl za prostoriju prikazanu na istoj slici desno. Da bi se uneta prostorija pretvorila u oblik pogodniji za analizu i obradu pomoću programa, potrebno je pre svega podeliti površi na trouglove. Razlog zašto se ovo radi je da bi se izbeglo tzv. curenje zraka iz prostorije što je opisano u literaturi [1]. To je druga faza korišćenja softvera.

Posle podele zidova na trouglove ostalo je još da se unesu pozicije izvora i prijemnika, koeficijent apsorpcije zvuka u vazduhu, broj zraka koji će se koristiti pri simulaciji i dužina vremenskog odziva pri simulaciji. To je treća faza.

Četvrta faza u korišćenju softvera je pokretanje izvršnog fajla *AcousticalRayTracing*, što predstavlja naziv napravljenog softvera. Za vreme rada programa pojavljuje se komandni prozor koji ispisuje trenutak u kome se prelazi na praćenje svakog stotog zraka, tako da je moguće proceniti koliko vremena će još trebati da se završi sa obradom. Na slici 3 prikazan je komandni prozor koji prikazuje izvršavanje programa *AcousticalRayTracing*. Da bi se pravilno procenilo koliko zraka za simulaciju je potrebno da se dobije koristan izlazni fajl potrebno je kraće iskustvo pri radu sa programom. Osnovni pokazatelj je taj da gustina odziva bude dovoljna tako da ne postoje pauze u odzivu, tj. nulti odbirci. Preporuka iz praktičnog iskustva u radu sa programom je da veličina izlaznog fajla, koji se zove *log.txt*, bude bar nekoliko desetina megabajta. To naravno zavisi i od složenosti prostorije, tj. što je broj površina u prostoriji veći potreban je i veći izlazni fajl i više vremena za obradu.

```

F:\AcousticalRayTracing.exe
1.33943
5.32135
0.971205
2.48325
2.25426
1.73629
2.31266
1.92638
4.68658
1.89277
5.9399
5.49401
2.3093
5.06758
Teta u stepenima je: 130.479
Phi u stepenima je: 246.066
Jednacina zraka je:
x = 7 + -0.30858*t
y = 2 + -0.69541*t
z = 2 + -0.649168*t
Zrak broj 0 je krenuo?
Zrak broj 100 je krenuo?
Zrak broj 200 je krenuo?
Zrak broj 300 je krenuo?

```

Sli. 3. Komandni prozor softvera *AcousticalRayTracing*.

Po završetku izvršnog programa zatvara se komandni prozor i to je signal da je završeno generisanje izlaznih fajlova *log.txt* i *raspodela.txt*. Sledeća, peta faza, je puštanje izvršnog programa *Raspodela.exe* kojim se generiše raspodela slobodne dužine puta u prostoriji i njena srednja vrednost iz fajla *raspodela.txt*. Poslednja faza je puštanje batch programa *Statistika.bat* koji poziva izvršni program *Statistika.exe*. Na ovaj način iz izlaznog fajla *log.txt* dobijamo čitav niz izlaznih veličina smeštenih u fajlove. Osim već dobro poznatih veličina, kao što su nivo zvuka i impulsni odziv tu su i veličine pobrojane na početku ovog rada: vremenska raspodela srednje dužine slobodnog puta, vremenska raspodela broja refleksija, vremenska raspodela broja zraka i prvi izvod Šrederove krive po vremenu.

III. SREDNJA DUŽINA SLOBODNOG PUTA

Srednja dužina slobodnog puta (MFPL – Mean Free Path Length) u prostoriji definisana je kao srednja vrednost

svih mogućih putanja zvuka po vremenu i po ansamblu. Ansambl putanja na kome se vrši usrednjavanje determinisan je saobraćajem zvučne energije po prostoriji, što je funkcija njenih geometrijskih atributa na makro i mikro planu (opšta geometrijska forma i difuznost refleksija na površinama). U literaturi [2] je pokazano da varijacije geometrijskih osobina prostorije utiču na preraspodelu oblika statističke raspodele slobodnih dužina puteva, a time i na vrednost MFPL kao matematičkog očekivanja raspodele. Zbog toga se vrednost MFPL u prostoriji može u izvesnom opsegu menjati naviše i naniže u odnosu na $4V/S$.

Da bi se analizirao proces uspostavljanja zvučnog polja, za ocenu stanja može se posmatrati vremenski tok promene vrednosti srednje dužine slobodnih putanja energije koja stiže do prijemnika postavljenog u prostoriji. Zbog toga se uvodi veličina $l_{ST}(t)$ koja predstavlja kratkovremenski usrednjenu slobodnu dužinu puta (ST – Short Time MFPL). Ona se definiše kao srednja vrednost po ansamblu slobodnih putanja energije koja stiže u prijemnu tačku u ograničenom vremenskom intervalu Δt . Pomerajući taj interval duž vremenske ose ST MFPL postaje vremenska funkcija. Ovako definisana vrednost može se predstaviti izrazom:

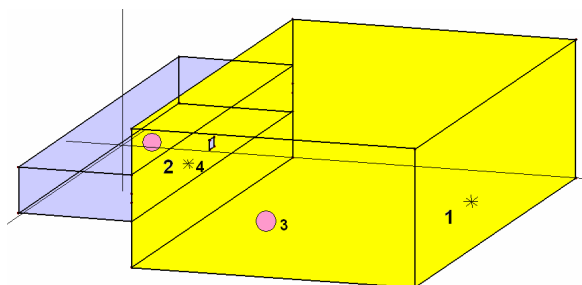
$$\overline{l_{ST}}(t) = \frac{1}{\sum N_{i,j}} \left[\sum_{i \in (t-\Delta t, t)} \left(\sum_{j=1}^{N_i} l_j \right) \right] \quad (1)$$

gde su l_j -dužine putanja i -tog zraka koji u prijemnu tačku stiže u vremenskom intervalu Δt , N_i -predstavlja broj slobodnih putanja koje je prešao i -ti zrak pre nego što je pogodio prijemnu sferu uključujući i putanju od poslednje refleksije do prijemne sfere, a $N_{i,j}$ -je ukupan broj putanja svih zraka koji su u intervalu Δt stigli do prijemne tačke. Vidi se da je $l_{ST}(t)$ funkcija vremena i veličine perioda usrednjavanja Δt .

IV. EKSPERIMENT SA SPREGNUTIM PROSTORIJAMA

Posebno korisnom za analizu prelaznog režima pri uspostavljanju stacionarnog zvučnog polja ST MFPL se pokazuje u slučaju spregnutih prostorija. Ovde će biti analiziran akustički odziv dva slučaja spregnutih prostorija. Prvi slučaj predstavlja klasičan slučaj dve prostorije povezane relativno malim otvorom u odnosu na njihove dimenzije. Prikazan je na slici 4. Drugi slučaj predstavlja prostorije koje su međusobno povezane uskim tunelom. Prikazan je na slici 5. U oba slučaja koeficijent apsorpcije svih zidova je 0,1 i koeficijent difuznosti refleksija 0,5. Zamišljeni slučajevi spregnutih prostorija su apstraktni. Dimenzije veće prostorije su $70 \times 50 \times 30$ [m], dok su dimenzije manje $70 \times 30 \times 10$ [m]. Veličina otvora kojim su prostorije povezane je 2×2 [m], a dužina tunela 100[m].

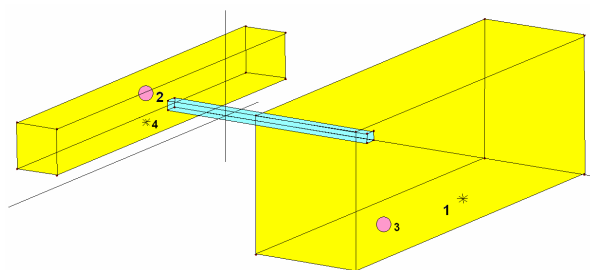
U oba slučaja postavljene su tačke izvora i prijema zvuka, od 1 do 4. Izabrane su sledeće četiri kombinacije izvor-prijemnik: 1-2, 2-1, 1-3 i 2-4. Simuliran je nivo zvuka i srednja dužina slobodnog puta u vremenu, približno do vremena reverberacije.



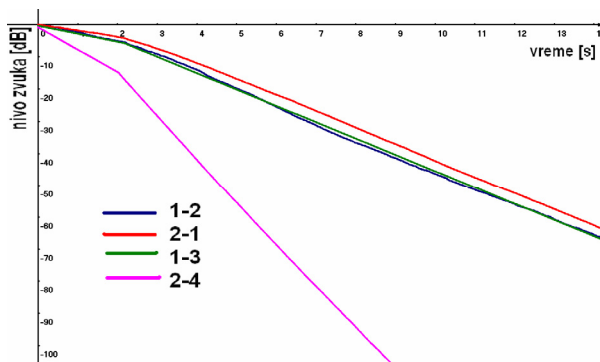
Sl. 4. Prvi slučaj spregnutih prostorija. Tačke od 1 do 4 predstavljaju lokacije predajnika i prijemnika.

V. REZULTATI SIMULACIJE

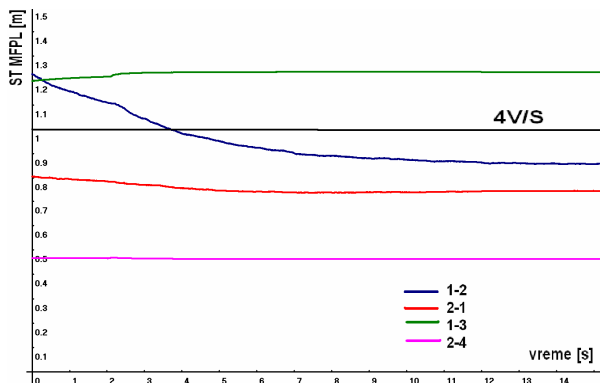
Dobijeni rezultati simulacije za prvi slučaj spregnutih prostorija, za nivo zvuka i srednju dužinu slobodnog puta prikazani su na slikama 6 i 7.



Sl. 5. Drugi slučaj spregnutih prostorija.

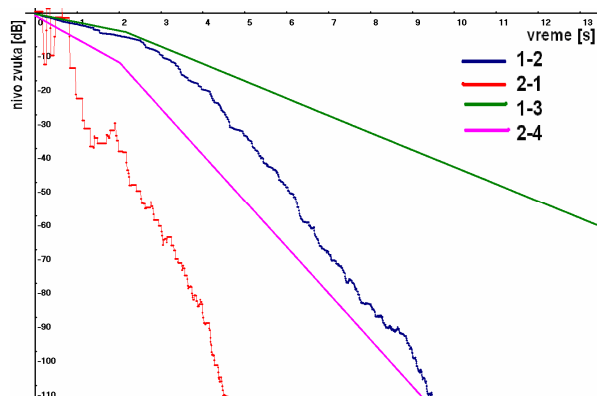


Sl. 6. Nivo zvuka u prvom slučaju spregnutih prostorija za prikazane kombinacije izvor-prijemnik.

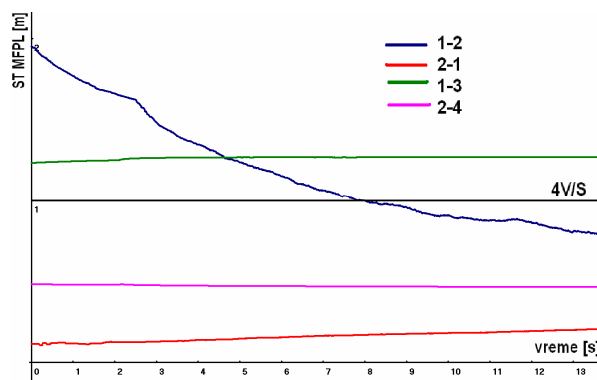


Sl. 7. ST MFPL u prvom slučaju spregnutih prostorija za prikazane kombinacije izvor-prijemnik.

Dobijeni rezultati simulacije za drugi slučaj spregnutih prostorija, za nivo zvuka i srednju dužinu slobodnog puta prikazani su na slikama 8 i 9.



Sl. 8. Nivo zvuka u drugom slučaju spregnutih prostorija za prikazane kombinacije izvor-prijemnik.



Sl. 9. ST MFPL u drugom slučaju spregnutih prostorija za prikazane kombinacije izvor-prijemnik.

VI. DISKUSIJA REZULTATA

U prvom slučaju spregnutih prostorija nivo zvuka je prikazan na slici 6, za navedene kombinacije izvor-prijemnik. Na slici 6 se uočava da postoji razlika za nagib krive opadanja nivoa zvuka jedino kod kombinacije 2-4. Ta kombinacija prikazuje izvor i prijemnik zvuka u drugoj prostoriji, koja je manja po zapremini. Nivo zvuka opada brže usled češćih sudara zvučnih zraka sa zidovima prostorije, čime je i srednja dužina slobodnog puta kraća. Ovo se vidi na slici 7. Najmanju vrednost ST MFPL pokazuje upravo kombinacija 2-4. Na slici 7 je prikazana i vrednost koju srednja dužina slobodnog puta dostiže u stacionarnom, $4V/S$, i sve ostale vrednosti ST MFPL su normalizovane na ovu vrednost.

U drugom slučaju spregnutih prostorija nivo zvuka je prikazan na slici 8, za navedene kombinacije izvor-prijemnik. Uočava se da sve četiri kombinacije izvor-prijemnik imaju različite nagibe krivih opadanja nivoa zvuka. Najstrijmiji nagib ima kombinacija 2-1, a za nju se na slici 9 uočava i najmanja vrednost ST MFPL, što govori da se usled čestih sudara zvučnog zraka sa zidovima prostorija najviše energije i gubi. Najblaži nagib krive opadanja nivoa zvuka na slici 8 ima kombinacija 1-3 i to se potvrđuje i na slici 9. Na slici 9 ST MFPL za kombinaciju

1-3 ima najveću vrednost. Interesantno je primetiti kako promenljivi nagib krive opadanja, na slici 8, u slučaju kombinacije 1-2 istovremeno prati promenljiva vrednost ST MFPL na slici 9 za istu tu kombinaciju 1-2. Uočava se prelaz od velike vrednosti ST MFPL u prvih nekoliko sekundi, ka sve manjim vrednostima, što istovremeno prati i sve veći nagib krive opadanja nivoa zvuka.

VII. ZAKLJUČAK

Prikazani rezultati ukazuju da je vremenska raspodela srednje dužine slobodnog puta veoma korisna akustička veličina pri proučavanju prelaznih pojava ka uspostavljanju stacionarnog zvučnog polja u prostoriji. Promene ove veličine na putu ka svojoj stacionarnoj vrednosti imaju svoju analogiju u promenama nivoa zvuka u odgovarajućim vremenskim trenucima.

LITERATURA

- [1] S. Bojičić, "ODREĐIVANJE RASPODELE SREDNJIH DUŽINA SLOBODNIH PUTANJA U PROSTORIJI POMOĆU REJ-

TREJSING ALGORITMA", magistarski rad, Elektrotehnički Fakultet u Beogradu, 2010.

- [2] D.Šumarac-Pavlović, M.Mijić, "An insight into the influence of geometrical features of rooms on their acoustic response based on free path length distribution", Acta Acustica, Vol 92, No 6 (2007) 1012-1026.
[3] Heinrich Kuttruff, „Room Acoustics“, Fourth edition, Taylor & Francis Group, 2000.

ABSTRACT

In this paper acoustic responses of two coupled rooms are given. Acoustics responses are calculated with made software using Ray-Tracing technique. Acoustical responses of these coupled rooms are analysed in details and some interesting results are shown, which could be subject of future researches.

ACOUSTIC RESPONSE ANALYSIS IN CASE OF COUPLED ROOMS USING RAY-TRACING

Srđan R. Bojičić