

Zavisnost ukupne apsorpcije u prostoriji u funkciji difuznih karakteristika unutrašnjih površina

Milan B. Petrović

Sadržaj — U radu su prikazani rezultati analize promene ukupne apsorpcije u prostoriji u funkciji promene difuznih karakteristika njenih unutrašnjih površina. Analiza je sprovedena merenjima na fizičkom modelu prostorije paralelopipednog oblika. Različite konfiguracije postignute su promenama difuznih karakteristika svake od 6 unutrašnjih površina. Za veliki broj konfiguracija, na osnovu merenja impulsnog odziva, analizirana je ukupna ostvarena apsorpcija u prostoriji. Ostvarene vrednosti apsorpcije upoređene su sa statistički očekivanim vrednostima.

Ključne reči — Apsorpcija, difuznost, fizički model, impulsni odziv, sketering koeficijent.

I. UVOD

POSTUPAK modelovanja bilo kog sistema, pa i akustičkog, predstavlja način predviđanja ponašanja tog sistema. Jedan akustički sistem moguće je modelovati na tri načina : matematički, računarski ili fizički. Analiza pomoću fizičkih modela prostorija, napravljenih u nekoj smanjenoj razmeri, među svim danas korišćenim alatima za predikciju zvučnog polja predstavlja jednu od najstarijih metoda korišćenih u istraživanju i projektovanju. Razvoj računara i pojava komercijalnih softverskih paketa za predikciju zvučnog polja pomoću geometrijskog modela u jednom periodu razvoja akustike prostorija stvorili su privid da je vreme fizičkih modela prošlo. Iskustvo je, međutim, pokazalo da postoje značajni uticaji enterijera prostorija na zvučno polje koji se u softverskim paketima, zbog teorijskih ograničenja, ne mogu uočiti [1]. To nekada može biti ozbiljan nedostatak, i to je doprinelo izlasku iz "senke" fizičkih modela.

Greške u dizajnu koje utiču na akustiku objekata obično nisu podložne popravci nakon započete izgradnje i čak iako su neke prepravke moguće, pokazuje se da su one veoma skupe za izvesti. Stoga bilo koji korak koji može biti načinjen u smeru prevencije takvih grešaka treba

Milan B. Petrović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (telefon: 381-64-2395340; e-mail: beograd11231@yahoo.com).

Mentor: doc. Dr. Dragana Šumarac Pavlović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (e-mail: dsumarac@etf.rs).

razmotriti obzirom na uštedu koja bi mogla biti postignuta. Za arhitektu bi bilo veoma korisno kada bi mogao da odredi akustički efekat različitih promena dizajna ako bi se to moglo izvesti na jednostavan način i bez prevelikih troškova [2]. To omogućava fizičko modelovanje.

Koncept fizičkih modela zasniva se na principima dinamički sličnih sistema. Taj princip znači da se dva sistema mogu konstruisati da budu različiti u svojoj veličini, ali da budu slični u svakom drugom pogledu, što znači da se dinamički procesi u njima odvijaju na jednak način [1]. U nedisperzivnoj sredini kakva je vazduh talasna dužina obrnuto je proporcionalna frekvenciji. Stoga, ako je faktor skaliranja $1/n$ sledeći uslovi će biti ostvareni ili zahtevani:

- Intuitivno je jasno da su sve dimenzije modela skalirane faktorom $1/n$.
- Ako je i u modelu vazduh, vreme između refleksija biće redukovano odnosom $1/n$, jer je brzina zvuka ostala ista.
- Talasna dužina zvuka mora biti redukovana odnosom $1/n$. Stoga, frekvencija mora biti pomnožena faktorom $n/1$.
- Apsorpcija u vazduhu bi trebalo da ima n puta veću vrednost od one na originalnim frekvencijama.
- Ako su sve akustičke impedanse površina jednake u originalu i modelu u odgovarajućim frekvencijskim opsezima onda će vreme reverberacije biti redukovano faktorom $1/n$ [2].

Skoro svi problemi u radu sa modelima skupčani su sa transponovanjem frekvencijskog opsega. Mora se koristiti nestandardna oprema, koja je skupa i teško je naći. Mora se izvršiti kompenzacija povećane disipacije, a to nije nimalo jednostavno. Takođe, utrošak novca i vremena za njihovu izradu često se ne mogu uklopiti u finansijske i vremenske okvire za završetak celokupnog projekta izrade realnog objekta. Zbog toga se javljaju ideje o primeni fizičkih modela kao dopuna softverskim modelima, gde se samo određeni deo enterijera modeluje i tako dobijeni podaci unose u softver.

Zvuk u prostoriji je kombinacija direktnog zvuka i refleksija od graničnih površina i predmeta u njoj. Jedna od centralnih tema u akustici prostorija je kako upravljati tim refleksijama koje utiču na naš doživljaj zvuka [3]. Energija zvuka koja pogađa neku površinu se jednim delom izrači sa druge strane površine a ostatak se reflektuje. Reflektovana energija može biti oslabljena zbog apsorpcije površine, preusmerena od ravne (reflektujuće) površine (pravilna refleksija) ili raspršena od difuzne

površine. Kada je značajna količina energije raspršena, takvu površinu nazivamo difuzor.

Difuzor je bilo koja površina koja reflektuje zvuk, u svim ili velikom broju pravaca, nezavisno od upadnog ugla. To su površine koje imaju neravnine (prirodne ili namenski dizajnirane) koje su po veličini poredljive sa talasnom dužinom zvuka u frekvencijskom opsegu u kome se refleksije posmatraju [4].

Kvalitet difuzora može se izraziti preko skatering (scattering) koeficijenta. To je izuzetno podesan parametar za opisivanje neravnih površina. On se jednostavno definiše kao odnos "nepravilno" (upadni i reflektovani ugao nisu jednaki) reflektovane energije i ukupne reflektovane energije i ne sadrži bilo kakvu informaciju o usmerenosti raspršene energije (takva informacija potrebna je samo u izuzetno retkim slučajevima). Skatering koeficijent generalno zavisi od frekvencije i upadnog ugla zvuka [5]. Međutim, on se može definisati analogno koeficijentu apsorpcije tako da ne zavisi od upadnog ugla.

Upotrebom difuzora mogu se postići mnogobrojna pozitivna poboljšanja akustičkog odziva prostorije. Oni se mogu iskoristiti za:

- Umanjivanje rizika od postojanja "mrtvih tačaka" ili loših sedišta u auditorijumu.
- Kreiranje "mekšeg" zvuka.
- Ublažavanje nepoželjnih refleksija u medijalnoj ravni ako se koriste kao plafonski reflektori, tako što deo reflektovane energije premeštaju u lateralnu ravan time povećavajući binauralnu razliku.
- Umanjivanje efekta komb filtra koji je posledica jakih i brzih pravilnih refleksija.

U radu je razmotren uticaj povećanja difuznosti na promenu koeficijenta apsorpcije. Analizirane su promene koje se javljaju u odzivu prostorije delovanjem difuznih elemenata koji su unutar modela različito raspoređivani formirajući različite konfiguracije. Rezultati mogu poslužiti kao pokazatelj šta se može očekivati kao rezultat implementacije difuzora u rešavanju realnog problema.

II. OPIS EKSPERIMENTA

Analiza prezentovana u ovom radu izvršena je na fizičkom modelu koji je ranijih godina konstruisan u okviru Laboratorije za akustiku na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Sva merenja u radu [6] izvršena su upravo na ovom modelu.

A. Opis modela

Model je paralelopipednog oblika unutrašnjih dimenzija 80 x 60 x 47 cm. Izgled modela prikazan je na slici 1.

Osnova modela je metalna konstrukcija na koju se lako montiraju stranice. Osnovni komplet stranica napravljen je sa ravnim pločama od medijapana, debljine 2 cm. Svaka od šest ravnih ploča ima svoj pandan u vidu ploče istih dimenzija, od istog materijala i i sa istom obradom samo sa implementiranom reljefnom strukturom, čime se simulira povećanje ukupne difuznosti refleksija (skatering koeficijenta u modelu).

Reljefna struktura napravljena je postavljanjem drvenih poluloptastih formi poluprečnika 2 cm. Skatering

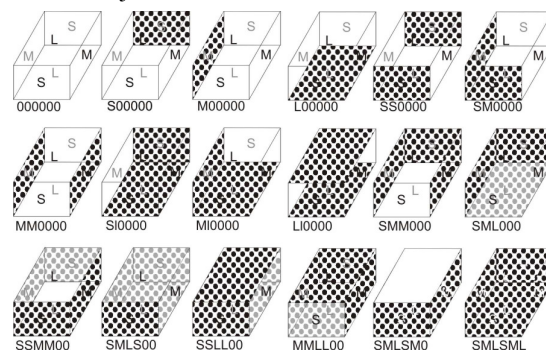
koeficijent takve strukture zavisi od gustine raspoređenih polulopti i taj podatak prikazan je u radu [7]. Reljefne površine su tako napravljene da je gustina polulopti 50% i vrednosti izmerenog skatering koeficijenta za taj slučaj postoje u [7].



Sl. 1. Izgled korišćenog fizičkog modela

B. Konfiguracije modela

Kombinacijom ravnih i reljefnih površina formirano je nekoliko različitih stepena difuznosti (konfiguracija). Početna konfiguracija je sa svim ravnim pločama a ostale se dobijaju dodavanjem određenog broja reljefnih površina. Analizirane konfiguracije prikazane su na slici 2. Ispod svake konfiguracije stoji njena oznaka (od šest karaktera jer ima šest strana). Ako je na odgovarajuću poziciju za malu, srednju ili veliku stranicu ubačena reljefna površina to je simbolički označeno slovima S, M ili L, respektivno. Ako je postavljena ravna površina to je označeno brojem 0.



Sl. 2. Šematski prikaz realizovanih konfiguracija (S-small, M-medium, L- large)

C. Postupak merenja

U svim konfiguracijama modela izvršeno je merenje impulsnog odziva. Kao impulsna pobuda služio je varničar pobuđivan impulsnim generatorom. I varničar i generator su konstruisani u okviru Laboratorije za akustiku, specijalno za potrebe merenja u modelima. Merenja su vršena za jednu poziciju zvučnog izvora i dve pozicije prijemnih tačaka. Snimanje je vršeno sa frekvencijom odmeravanja 192 kHz. Izvršeno je i merenje vlažnosti vazduha i temperature u modelu.

D. Vraćanje u osnovni domen

Na osnovu izmerenih vlažnosti vazduha i temperature u modelu izvršena je kompenzacija disipacije, a potom transponovanje impulsnih odziva faktorom 10 u osnovni domen. Na osnovu tako modifikovanih izmerenih impulsnih odziva izračunato je vreme reverberacije u opsegu 125-6300 Hz (analiza 1/3-oktavnim filtrima), što odgovara opsegu u modelu od 1.25-63 kHz.

III. REZULTATI ANALIZE

Za sva računanja korišćen je Sabineov obrazac:

$$T = \frac{0.16V}{\alpha S + 4mV} \Rightarrow \bar{\alpha} = \frac{0.16V}{ST} - \frac{4mV}{S} \quad (1)$$

Na osnovu izmerenog vremena reverberacije u modelu sa početnom konfiguracijom (sve ravne, 000000) iz relacije (1) dobija se srednji koeficijent apsorpcije. Kako je obrada ravnih i reljefnih površina urađena na isti način može se pretpostaviti da je srednji koeficijent apsorpcije isti u svim konfiguracijama i ta vrednost je korišćena prilikom računanja očekivanih vremena reverberacije u ostalim konfiguracijama. Kako se unošenjem reljefnih površina povećala ukupna unutrašnja površina, a samim tim se smanjila zapremina prostorije, potrebno je uraditi korekcije površine i zapremine za svaku narednu konfiguraciju, što je urađeno kroz parametre k_s i k_v , respektivno. Prema tome formula po kojoj je računato očekivano vreme reverberacije je sledeća:

$$T_{ocekivano} = \frac{0.16V \cdot k_v}{\alpha S \cdot k_s + 4mV \cdot k_v} \quad (2)$$

Za svaku konfiguraciju određen je i „izmereni“ srednji koeficijent apsorpcije koji je računat na osnovu formule (2), gde su umesto očekivanog unošeni podaci o izmerenom vremenu reverberacije za svaku konfiguraciju.

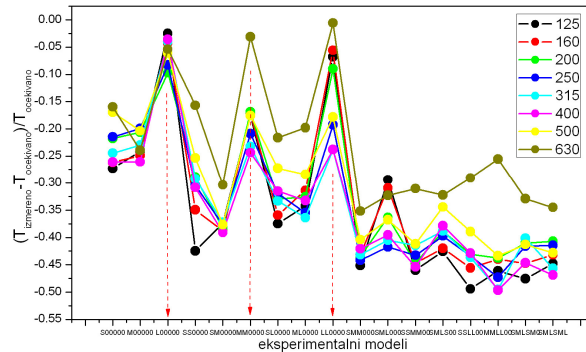
Za potrebe analize i poređenja dobijenih rezultata definisan je i sračunat indeks difuznosti m , koji opisuje uticaj prisustva reljefnih površina. Definisan je tako što je ravnoj površini dodeljen sketering koeficijent 0 a reljefnoj 1. On zavisi i od udela površina pojedinih stranica. Na taj način za analizirane konfiguracije dobija se indeks difuznosti koji je relativno ravnomerno raspoređen u rasponu 0-1. U tabeli 2 su prikazani indeksi difuznosti za analizirane konfiguracije.

TABELA 1: INDEKS DIFUZNOSTI ZA ANALIZIRANE KONFIGURACIJE

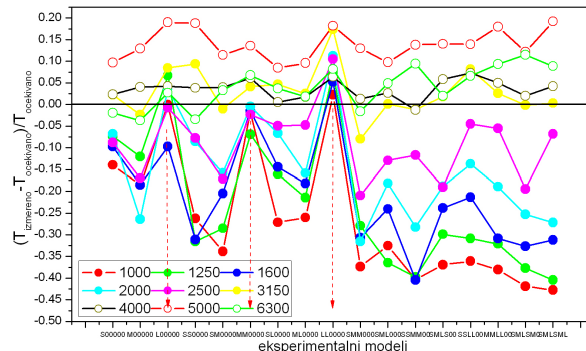
Konf.	m	Konf.	m
000000	0	LL0000	0.4218
S00000	0.1239	SMM000	0.4543
M00000	0.1652	SML000	0.5
L00000	0.2109	SSMM00	0.5782
SS0000	0.2478	SMLS00	0.6239
SM0000	0.2891	SSL000	0.6696
MM0000	0.3304	MMLL00	0.7522
SL0000	0.3348	SMLS00	0.7891
ML0000	0.3761	SMLSML	1

Na slikama 3 i 4 (u različitim 1/3 oktavnim opsezima)

prikazano je relativno odstupanje izmerenih vrednosti vremena reverberacije od statistički očekivanih, izračunatih po formuli (2), za različite konfiguracije modela. Na apscisi su poredane konfiguracije u redosledu koji odgovara rastućem indeksu difuznosti. Svaka kriva predstavlja odstupanje koje je dobijeno u određenom frekvencijskom opsegu za sve posmatrane konfiguracije. Nulta vrednost na ordinati predstavlja tačku u kojoj su izmerene vrednosti vremena reverberacije jednake statistički očekivanim vrednostima. U nižim frekvencijskim opsezima evidentno je veliko odstupanje, i može se generalno uočiti da ono biva sve veće sa povećanjem difuznosti unutrašnjih površina odnosno indeksa difuznosti. Mogu se uočiti tri konfiguracije koje odstupaju od tog trenda. Uočava se da odstupanje opada sa porastom frekvencije. U višim frekvencijskim opsezima odstupanje menja i znak što znači da izmerena vrednost premašuje statistički očekivanu. Mogu se izdvojiti konfiguracije LL0000 i SML000 za koje se prema statističkoj teoriji očekuje da imaju približno isto vreme reverberacije, jer im je približno ista površina pokrivena reljefom, a što se vidi na osnovu vrednosti indeksa difuznosti. Sa slika se vidi da im se izmerena vremena reverberacije razlikuju i do 50%.



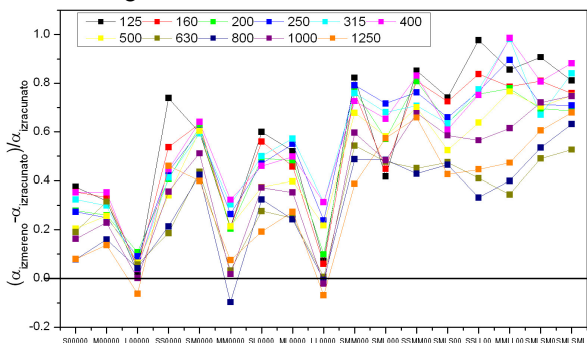
Sl. 3. Odstupanje vremena reverberacije za različite konfiguracije (125-630 Hz)



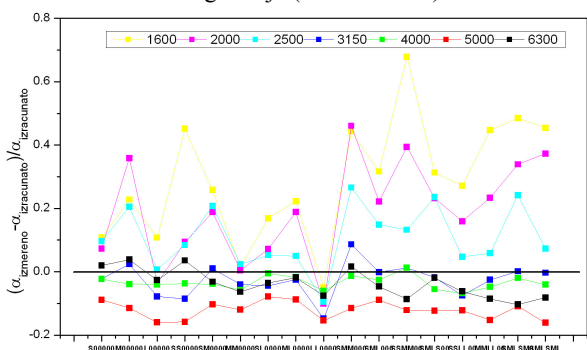
Sl. 4. Odstupanje vremena reverberacije za različite konfiguracije (800-6300 Hz)

Na slikama 5 i 6 prikazano je relativno odstupanje izmerenih vrednosti apsorpcije na isti način kao i vremena reverberacije. Vidi se da odstupanje raste sa porastom indeksa difuznosti i da opada sa porastom frekvencije. To je i očekivano obzirom da su koeficijent apsorpcije i vreme

reverberacije vezani formulom (1). Uočava se još da je na nižim frekvencijama odstupanje gotovo 100%, što znači da je očekivani koeficijent apsorpcije skoro dvostruko manji od izmerenog.



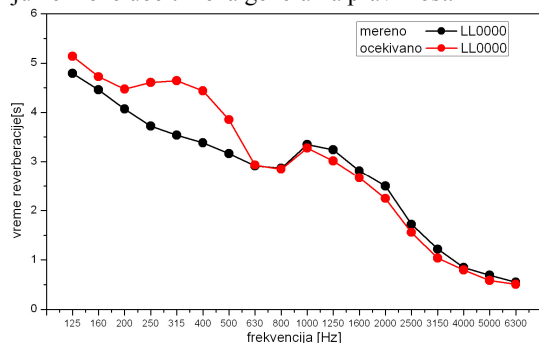
Sl. 5. Odstupanje koeficijenta apsorpcije za različite konfiguracije (125-1250 Hz)



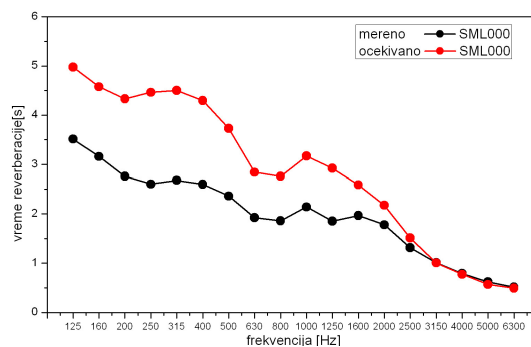
Sl. 6. Odstupanje koeficijenta apsorpcije za različite konfiguracije (1600-6300 Hz)

IV. DISKUSIJA DOBIJENIH REZULTATA

Neke konfiguracije za koje se, na osnovu statističke teorije, očekuje da imaju približno isto vreme reverberacije pokazuju velika odstupanja. Kao takav primer izdvojeni su rezultati za konfiguracije LL0000 i SML00, za koje su na slikama 7 i 8 prikazane očekivane i izmerene vrednosti vremena reverberacije. Ove konfiguracije imaju približno istu površinu prekrivenu reljefnim detaljima ali je njihov raspored u prostoru drugačiji, što može voditi ka zaključku da prostorni raspored reljefnih detalja može uticati da se odgovor prostorije značajnije promeni, ali se po tom pitanju ne može uočiti neka generalna pravilnost.



Sl. 7. Očekivano i izmereno vreme reverberacije za konfiguraciju LL0000



Sl. 8. Očekivano i izmereno vreme reverberacije za konfiguraciju SML000

V. ZAKLJUČAK

Prisustvo reljefnih površina u prostoriji utiče na akustički odziv prostora. Da bi se na neki način kvantifikovalo prisustvo reljefnih površina, u radu je uveden parametar pod nazivom indeks difuzivnosti i on je numerički pokazatelj prisustva reljefa na unutrašnjim površinama.

Dobijeni rezultati pokazuju da postoji odstupanje ukupne apsorpcije u odnosu na teorijsku vrednost prevashodno na nižim frekvencijama, sa nekim manje-više opštim trendom, ali i da su mehanizmi delovanja difuznih elemenata jako kompleksni.

LITERATURA

- [1] M. Mijić, D. Šumarac-Pavlović, "20 godina tradicije u upotrebi fizičkih modela u akustičkom projektovanju i istraživanju u Laboratoriji za akustiku ETF", TELFOR, Serbia, 2007.
- [2] H. D. Harwood, A. N. Burd, "Acoustic scaling: General outline", BBC Research Department Report No. 1970/13, April 1970.
- [3] P. D'Antonio, T. J. Cox, "Diffusor application in rooms", Applied Acoustics 60, 2000.
- [4] B. Dalenback, M. Klenier, P. Svensson, "A Macroscopic View of Diffuse Reflection", J. Audio Eng. Soc., Vol. 42, No 10, October 1994.
- [5] T. J. Cox, P. D'Antonio, "Acoustic Absorbers and Diffusers-theory, design and application", Spon Press, 2004.
- [6] D. Šumarac-Pavlović, M. Mijić, "Analiza uticaja geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv – merenja na fizičkim modelima", LII Konferencija za ETRAN, 2008.
- [7] M. Vorlander, E. Mommertz, "Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients", Applied Acoustics 60, 2000.

ABSTRACT

The paper presents the results of the analysis of changes in total absorption in the room due to changes of diffuse characteristics of internal surfaces. The analysis was carried out by measurements on the scale model with rectangular solid shape. Different configurations are achieved by changing diffuse characteristics of each of 6 internal surfaces. For a large number of configurations, based on measured impulse responses, total absorption in the room was analyzed. Accomplished absorption values are compared with the statistically expected values.

TOTAL ABSORPTION DEPENDENCE AS FUNCTION OF DIFFUSE CHARACTERISTICS OF INTERNAL SURFACES

Milan B. Petrović