

Veličina zone direktnog zvuka u realnim prostorijama

Miomir Mijić, Draško Mašović

Sadržaj — Poluprečnik zone direktnog zvuka, nazvan još i kritično rastojanje, važan je parametar u sistemima za reprodukciju. Statistička teorija zvučnog polja u prostorijama daje jednostavan izraz za njegovo izračunavanje, a u literaturi se opisuju neke pojednostavljene metode za merenje njegove približne vrednosti. Da bi se sagledale stvarne vrednosti kritičnog rastojanja u realnim prostorijama utvrđena je metoda za njegovo preciznije merenje. Na osnovu toga izvršeno je određivanje kritičnog rastojanja u nekoliko realnih prostorija. Rezultati su prikazani u ovom radu.

Gljučne reči — akustika prostorija, kritično rastojanje, reprodukcija zvuka

I. UVOD

POLUPREČNIK zone direktnog zvuka u prostoriji ili kritično rastojanje kako se uobičajeno naziva u literaturi iz oblasti audiotehnike, predstavlja rastojanje od zvučnog izvora u prostoriji na kome se nivo direktnog zvuka u procesu svog opadanja izjednačuje sa nivoom reflektovanog zvuka. Za kvalitetan prijem zvučnih informacija koje emituje izvor neophodno je da se slušalac nalazi unutar zone u kojoj dominira direktan zvuk, a to znači na rastojanjima od izvora manjim od kritičnog rastojanja. Zbog toga je veličina poluprečnika zone direktnog zvuka značajan parametar u nekim oblastima akustika, posebno u oblasti reprodukcije zvuka. U oblasti ozvučavanja to je parametar koji najdirektnije utiče na izbor zvučnih sistema.

Određivanje vrednosti kritičnog rastojanja u praksi vrši se polazeći od osnovnih relacija statističkog modela zvučnog polja u prostorijama. Taj pristup vodi ka jednostvanom praktičnom uzrazu koji se navodi u mnogim udžbenicima [1]:

$$r_c = 0.057 \sqrt{\frac{\gamma V}{T}} \quad (1)$$

gde je r_c kritično rastojanje u (m), V zapremina prostorije u (m^3), T vreme reverberacije u (s) i γ faktor usmerenosti zvučnog izvora. Izraz važi za rastojanja u pravcu ose

Istraživanja na osnovu kojih je napisan ovaj rad sprovedena su u okviru aktivnosti na projektu 23046 koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Miomir Mijić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, Srbija; (e-mail: emijic@etf.rs)

Draško B. Mašović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija; (e-mail: drasko.masovic@gmail.com)

izvora u kojoj je prostorni maksimum njegovog zračenja. U literaturi se opisuje i mogućnost pojednostavljenog merenja kritičnog rastojanja na osnovu pretpostavke da važi statistički model zvučnog polja [1,2]. U konkretnim okolnostima rada zvučnog izvora u nekoj prostoriji veličina kritičnog rastojanja može se izračunati na osnovu dva podataka: o nivou zvuka izmerenom dovoljno daleko od zvučnog izvora, gde pouzdano dominira reflektovani zvuk, i u njegovoj neposrednoj blizini gde je pouzdano da dominira direktan zvuk.

U oba pristupa određivanju veličine kritičnog rastojanja, proračunom ili jednostavnim merenjem, podrazumeva se pretpostavka statističke teorije da je nivo reflektovanog zvuka konstantan po prostoriji. Međutim, takva pretpostavka u realnim prostorijama nije zadovoljena iz više razloga. Prvo, u realnosti teško se ostvaruje homogeno zvučno polje, zbog čega nivo reflektovanog zvuka po prostoriji nije konstantan. Drugo, na nižim frekvencijama uticaj na nivo zvuka mogu imati stojeći talasi. Najzad, u prostorijama sa relativno malim vremenom reverberacije, kao što je to u studijskim prostorima, varijacije u strukturi jakih refleksija od tačke do tačke mogu imati značajnijeg uticaja na vrednost nivoa reflektovanog zvuka, a time i na veličinu kritičnog rastojanja.

Da bi se utvrdila primenljivost izraza (1) za izračunavanje kritičnog rastojanja u realnim okolnostima, organizovana je serija eksperimenata u kojima je izvršeno merenje te veličine u nekoliko različitih prostorija. U posebnom radu opisana je metodologija koja je razvijena za merenje kritičnog rastojanja u realnim prostorijama [3]. Analizirane prostorije su odabrane tako da pokrivaju širi raspon zapremina i vrednosti vremena reverberacije. U ovom radu opisani su ti eksperimenti i prikazani dobijeni rezultati. Na osnovu toga izvedeni su zaključci o razlikama koje se javljaju između realnih vrednosti kritičnog rastojanja u prostorijama i teorije.

II. MERENJE KRITIČNOG RASTOJANJA U NEKIM REALNIM PROSTORIJAMA

Metoda tačnijeg određivanja kritičnog rastojanja u realnim prostorijama zasniva se na merenju odnosa direktnog i reflektovanog zvuka u nizu tačaka raspoređenih na različitim rastojanjima duž pravca ose zvučnika koji je imao funkciju zvučnog izvora. Za merenje je odabran zvučnik za koga je proizvođač u fabričkoj dokumentaciji prikazao podatke o vrednosti faktora usmerenosti po frekvencijama. U svakoj od tačaka merenja je impulsni odziv. Za to je korišćena MLS

metoda. Detaljnim pregledom strukture snimljenog impulsnog odziva i njegovim editovanjem razdvajani su signali direktnog i reflektovanog zvuka. Ta dva signala su filtrirani po oktavnim opsezima i na osnovu toga je za svaki snimljeni odziv izračunavan odnos nivoa direktnog i reflektovanog zvuka.

Sva merenja u prostorijama izvršena su sa izvorom postavljenim na mestu koje je određeno prema njihovoj nameni. U prostorijama koje imaju funkciju učionice zvučnik je postavljan u centralnoj zoni, a u studijskim prostorima to je bila pozicija monitorskih zvučnika.

A. Prostorija 1

Ova prostorija je paralelopipednog oblika, dimenzija 8.5 x 8.3 x 4.3 m i zapremina joj je 303 m³. Ona je po svojoj osnovnoj nameni učionica. U toj učionici ne postoje nikakve akustičke intervencije, pa su svi zidovi i plafon tvrdi a na podu je parket. Jedina značajnija apsorpcija u njoj je na diskretno tapaciranim stolicama (naslon i sedišta). Zbog toga je mereno vreme reverberacije relativno veliko, na srednjim frekvencijama oko 1.7 s. Prilikom merenja kritičnog rastojanja zvučnik je postavljen približno u centar učionice, usmeren u pravcu jedne njene ose. Rezultati merenja vremena reverberacije i kritičnog rastojanja u ovoj prostoriji prikazani su po oktavnim opsezima u Tabeli 1. U istoj tabeli su prikazane i izračunate teorijske vrednosti kritičnog rastojanja prema formuli (1).

TABELA 1. IZMERENE VREDNOSTI VREMENA REVERBERACIJE I KRITIČNOG RASTOJANJA U PROSTORIJI 1 I KRITIČNO RASTOJANJE U NJOJ PREMA STATISTIČKOJ TEORIJI

frekvencija	T (s)	r_c mereno (m)	r_c teorijsko (m)
125 Hz	1.58	0.53	0.80
250 Hz	1.88	0.84	0.80
500 Hz	1.80	0.97	1.03
1000 Hz	1.69	1.38	1.34
2000 Hz	1.49	2.02	2.02
4000 Hz	1.32	3.06	2.55

B. Prostorija 2

Druga analizirana prostorija bila je jedna standardna laboratorijska soba koja takođe povremeno ima funkciju učionice. Ona ima paralelopipedni oblik dimenzija 5 x 4 x 2.5 m i zapremina joj je 50 m³. U ovoj prostoriji postoji intenzivna akustička obrada formirana kao spuštenu plafon sa visokoapsorpcionim pločama koje imaju $\alpha > 0,9$ na srednjim i visokim frekvencijama. Bočni zidovi i pod su tvrdi, veoma malog koeficijenta apsorpcije. Kao rezultat takve obrade mereno vreme reverberacije na srednjim frekvencijama je oko 0,5 s. Prilikom merenja kritičnog rastojanja zvučnik bio je postavljen u centru prostorije, a merenje je izvršeno po dužoj osi. Rezultati merenja vremena reverberacije i kritičnog rastojanja u ovoj prostoriji prikazani su po oktavnim opsezima u Tabeli 2. U istoj tabeli su prikazane izračunate teorijske vrednosti kritičnog rastojanja prema formuli (1).

TABELA 2. IZMERENE VREDNOSTI VREMENA REVERBERACIJE I KRITIČNOG RASTOJANJA U PROSTORIJI 2 I KRITIČNO RASTOJANJE U NJOJ PREMA STATISTIČKOJ TEORIJI

frekvencija	T	r_c mereno	r_c teorijsko
125 Hz	0.73	0.50	0.52
250 Hz	0.60	0.56	0.83
500 Hz	0.52	0.78	1.03
1000 Hz	0.43	1.09	1.27
2000 Hz	0.43	1.51	1.83
4000 Hz	0.45	1.77	2.21

C. Prostorija 3

Treća analizirana prostorija je režija jednog muzičkog studija. Ona u osnovi ima nepravilan oblik, ali se približno može aproksimirati paralelopipedom dimenzija 6.5 x 8 x 3.2 m i zapremina joj je 166 m³. U prostoriji postoje postavljeni apsorberi radi podešavanja impulsnog odziva, tako da je vreme reverberacije na srednjim frekvencijama oko 0.4 s. Prilikom merenja zvučnik je postavljen u prednji deo prostorije, približno u liniji postojećih monitorskih zvučnika. Merenja su obavljena duž centralne ose prostorije prema zadnjem zidu. Rezultati merenja vremena reverberacije i kritičnog rastojanja u ovoj prostoriji prikazani su po oktavnim opsezima u Tabeli 3. U istoj tabeli prikazane su izračunate vrednosti kritičnog rastojanja prema formuli (1).

TABELA 3. IZMERENE VREDNOSTI VREMENA REVERBERACIJE I KRITIČNOG RASTOJANJA U PROSTORIJI 3 I KRITIČNO RASTOJANJE U NJOJ PREMA STATISTIČKOJ TEORIJI

frekvencija	T	r_c mereno	r_c teorijsko
125 Hz	0.55	0.51	1.00
250 Hz	0.50	1.14	1.15
500 Hz	0.39	1.99	1.64
1000 Hz	0.40	2.63	2.03
2000 Hz	0.39	3.49	2.93
4000 Hz	0.35	4.99	3.67

TABELA 4. IZMERENE VREDNOSTI VREMENA REVERBERACIJE I KRITIČNOG RASTOJANJA U PROSTORIJI 4 I KRITIČNO RASTOJANJE U NJOJ PREMA STATISTIČKOJ TEORIJI

frekvencija	T	r_c mereno	r_c teorijsko
125 Hz	2.43	0.84	0.83
250 Hz	1.51	1.20	1.15
500 Hz	2.11	1.24	1.23
1000 Hz	2.37	1.51	1.46
2000 Hz	2.29	2.12	2.10
4000 Hz	1.86	3.36	2.76

D. Prostorija 4

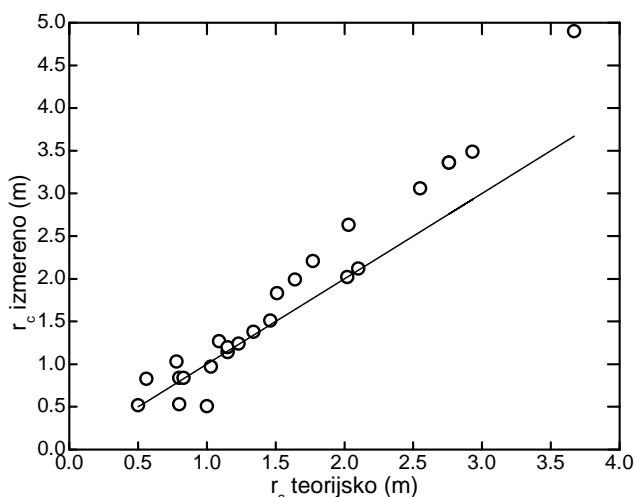
Četvrta prostorija bila je jedna relativno velika učionica. Njene dimenzije su 14 x 8 x 4.5 m i zapremina joj je 504 m³. U njoj nema nikakve akustičke obrade, pa je izmereno vreme reverberacije na srednjim frekvencijama čak oko 2,3 s. Prilikom merenja zvučnik je bio postavljen u osi prostorije, dovoljno daleko od svih zidova, a merenje impulsnog odziva je realizovano po njenoj dužoj osi. Rezultati merenja vremena reverberacije i kritičnog

rastojanja u ovoj prostoriji prikazani su po oktavnim opsezima u Tabeli 4. U istoj tabeli su prikazane izračunate vrednosti kritičnog rastojanja prema formuli (1).

III. DISKUSIJA REZULTATA MERENJA

Prostorije u kojima su izmerene vrednosti kritičnog rastojanja bile su u relativno širokom rasponu veličina i raspona vrednosti vremena reverberacije. Njihove zapremine su od 50 m^3 do 500 m^3 , a vreme reverberacije u u rasponu od 0,4 s do 2,4 s. Među analiziranim prostorijama bila je jedna režija sa intenzivnom akustičkom obradom, ali i velika prostorija bez ikakve akustičke obrade. Na taj način odabrane prostorije pokrivaju širok raspon mogućih okolnosti koje se sreću u praksi kada se može postaviti pitanje veličine kritičnog rastojanja.

Odnos između teorijskih vrednosti kritičnog rastojanja i njegovih izmerenih vrednosti u analiziranim prostorijama prikazan je grafički na slici 1. To su vrednosti iz tabela 1-4. Na istom dijagramu ucrtana je prava $r_c \text{ izmereno} = r_c \text{ teorijsko}$. Sa dijagrama se vidi da u oblasti malih vrednosti r_c , ispod 1 m, postoji rasturanje izmerenih vrednosti koje ide u oba pravca, manje i veće od teorijskih. Sa porastom vrednosti r_c rezultati pokazuju konstantno premašenje u odnosu na teorijsku vrednost.

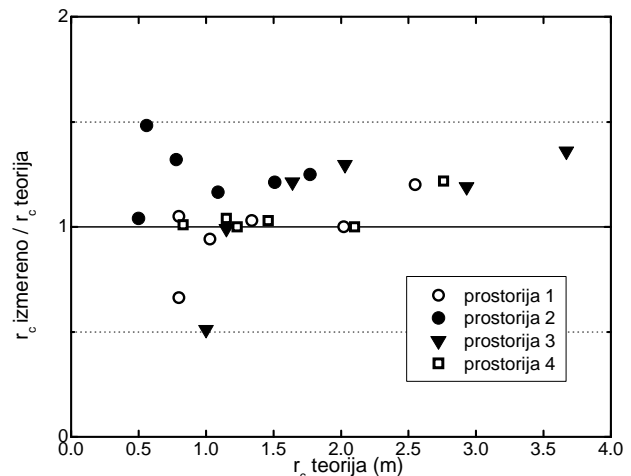


Sl. 1. Odnos između teorijske i izmerene vrednosti kritičnog rastojanja.

Da bi se jasnije kvantifikovao odnos izmerenih i očekivanih vrednosti prema statističkom modelu zvučnog polja izvršena je normalizacija izmerene vrednosti r_c u odnosu na teorijsku vrednost koju definiše izraz (1). Rezultat je prikazan grafički na slici 2. Na dijagramu su različitim oznakama predstavljene vrednosti dobijene po raznim prostorijama. Vidi se da su u prostoriji 2 sve izmerene vrednosti veće od teorijskih, dok su u prostoriji 1 četiri od šest izmerenih vrednosti vrlo bliske teorijski očekivanim.

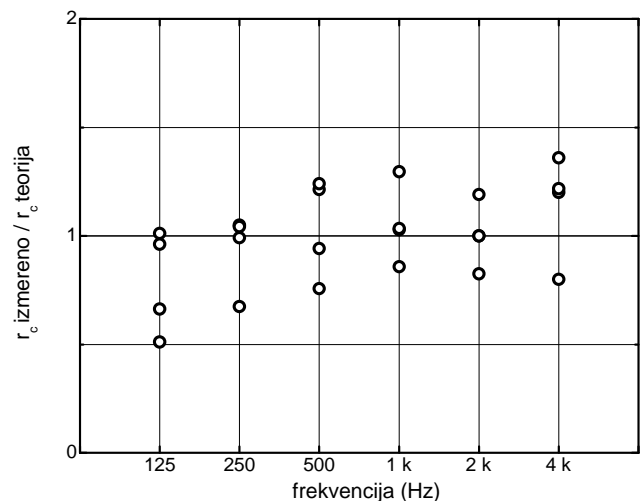
Gledajući globalno sve pojedinačne prikazane rezultate može se zaključiti da je većina izmerenih vrednosti kritičnog rastojanja veća od teorijski očekivane. Vidi se da postoje okolnosti u kojima su izmerene vrednosti i do 50% manje ili veće od vrednosti koje definiše statistička teorija

zvučnog polja u prostorijama .



Sl. 2. Normalizovana vrednost izmerenog kritičnog rastojanja u funkciji teorijski očekivane vrednosti.

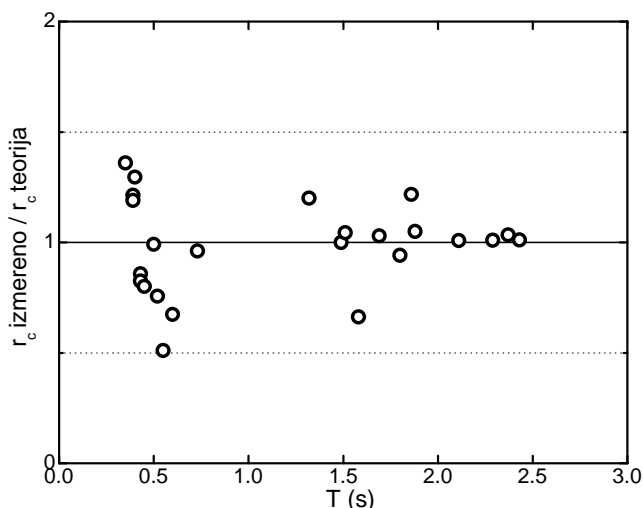
Da bi se sagledao eventualni uticaj frekvencije na varijacije veličine zone direktnog zvuka, na slici 3 su zbirno prikazane normalizovane vrednosti izmerenog kritičnog rastojanja u sve četiri prostorije, prikazane po oktavnim opsezima. Sa ovog dijagrama se jasnije vidi da su na niskim frekvencijama, preciznije u oktavi na 125 Hz, vrednosti izmerenog kritičnog rastojanja bliske ili manje od teorijske vrednosti. U ovoj oktavi se javlja i najveće negativno odstupanje izmerene vrednosti. Ova pojava se može objasniti uticajima stojećih talasa, koji čine da u nekim okolnostima nivo reflektovanog zvuka bude viši od statistički očekivanog, a što kao posledicu proizvodi da je vrednost kritičnog rastojanja manja.



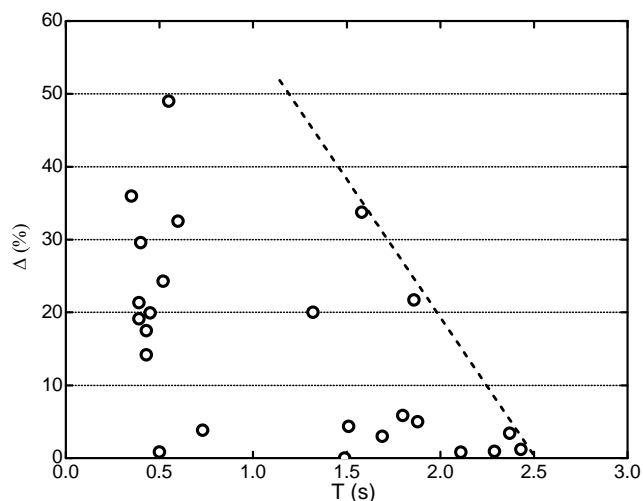
Sl. 3. Normalizovana vrednost izmerenog kritičnog rastojanja u funkciji frekvencije.

U svim ostalim oktavnim opsezima normalizovane vrednosti izmerenog kritičnog rastojanja bliske su teorijski očekivanim, ili ih premašuju. Prema tome, samo u najnižoj posmatranoj oktavi izmerena su značajna negativna odstupanja, to jest vrednosti manje od teorijski očekivanih. U oktavi na 125 Hz izmereno je i najveće premašenje teorijski očekivane vrednosti, koje je oko

50%. U ostalim oktavama najveća premašenja su oko 30%.



Sl. 4. Normalizovana vrednost izmerenog kritičnog rastojanja u funkciji vremena reverberacije.



Sl. 5. Relativna razlika između izmerene i teorijske vrednosti, izražena u procentima, u funkciji vremena reverberacije (ucrtana prava pokazuje granicu opadanja odstupanja s vremenom reverberacije).

U nastojanju da se bliže odrede faktori koji mogu imati uticaja na realne vrednosti kritičnog rastojanja, na slici 4 prikazano je odstupanje normalizovane vrednosti izmerenog kritičnog rastojanja u funkciji vremena reverberacije u prostoriji. Sa dijagrama se vidi da se sa porastom vremena reverberacije u prostoriji razlika merenja i teorije smanjuje. Da bi se jasnije sagledala razlike izmerenih i izračunatih vrednosti, na slici 5 prikazano je relativno odstupanje izmerene vrednosti Δ iskazano u procentima relativno u odnosu na estimiranu vrednost. Vidi se da je u okolnostima kada je vreme reverberacije prostorije veće od 2 s odstupanje relativno malo. Sa smanjenjem vrednosti vremena reverberacije odstupanja rastu kao što pokazuje ucrtana prava, da bi u

oblasti ispod 0,7 s odstupanja izmerenih vrednosti i teorije u nekim okolnostima bila u intervalu od oko $\pm 50\%$.

IV. ZAKLJUČAK

Rezultati merenja veličine zone direktnog zvuka u realnim prostorijama pokazuju da kritično rastojanje u njima u najvećem broju slučajeva manje ili više odstupa od vrednosti koju definiše statistička teorija, i koja je definisana izrazom (1). Na nižim frekvencijama, u oktavi na 125 Hz, ta odstupanja mogu ići u oba smera, to jest kritično rastojanje može biti i veće i manje od teorijske vrednosti. Na srednjim i višim frekvencijama, u oktavama na 250 Hz i više, izmerene vrednosti mogu biti bliske ili veće od teorijske vrednosti.

Rezultati merenja su pokazali da u okolnostima malog vremena reverberacije u prostoriji primena izraza (1) za izračunavanje kritičnog rastojanja nosi potencijalno veliku grešku. Ovo je bio očekivani rezultat, s obzirom na preduslove koji su potrebni da bi statistički model zvučnog polja bio dovoljno tačan. Posebno u studijskim prostorima, gde je vreme reverberacije malo, čini se da teorijski izraz (1) nije pouzdan, s obzirom na moguće varijacije u rasponu $\pm 50\%$, kao što pokazuju slike 4 i 5.

Dobijeni rezultati u izvesnom smislu modifikuju važeći teorijski pogled na maksimalno opuštena rastojanja slušalaca od zvučnika. U tom smislu u dizajnu sistema za ozvučavanje mogu se korigovati zahtevi u pogledu potrebne usmerenosti zvučnih sistema.

LITERATURA

- [1] D. Davis, C. Davis, "Sound System Engineering," *Howard W. Sams & Co*, 1987.
- [2] Shure Inc, <http://www.shure.com/>, *Official Shure Incorporated website*, 2009.
- [3] D. Mašović, Metode merenja kritičnog rastojanja u realnim prostorijama, TELFOR 09
- [4] Stephen Chiles, Mike Barron, "Sound Level Distribution and Scatter in Proportionate Spaces," *Journal of Acoustical Society of America* 116 (3), str. 1585-1595, 2004.

ABSTRACT

Radius of direct sound zone around the source, also called critical distance, is important parameter in sound reproduction. Statistical model of sound field in room gives a simple formula for its calculation, and also a simple method for its approximate value measurement is described in literature. To discover values of the critical distance in real rooms a method is established for its more accurate measurements. This paper is concerned with the results of critical distance measurement in several rooms.

ZONE OF DIRECT SOUND IN REAL ROOMS

Miomir Mijić, Draško Mašović