

Jedna metoda merenja kritičnog rastojanja u realnim prostorijama

Draško B. Mašović

Sadržaj — U postojećoj literaturi praktično ne postoje podaci o merenjima kritičnog rastojanja u realnim prostorijama, osim proračuna opšte usvojenom formulom statističke teorije. Zbog toga, kao i zbog njegovog značaja, posebno u ozvučavanju, cilj ovog rada je da predstavi metodu kojom se može meriti stvarna veličina kritičnog rastojanja unutar prostorije. Opisane su prednosti njenog korišćenja u odnosu na proračun statističkom teorijom, kao i svi relevantni faktori koji mogu uticati na grešku merenja.

Ključne reči — direktan i reflektovan zvuk, kritično rastojanje, zona direktnog zvuka

I. UVOD

PO definiciji kritično rastojanje u prostoriji je rastojanje od izvora zvuka na kome energija direktnog zvuka, u procesu svog opadanja sa udaljavanjem od izvora, postaje jednaka energiji reflektovanog [1]. Ono je od značaja u mnogim okolnostima prenosa informacija zvukom, bilo da je izvor govornik, muzički instrument ili zvučnik, a zvučna informacija govor ili muzika. Reverberaciono polje u prostoriji uvek narušava razumljivost zvučne informacije, pa je ona najveća na rastojanjima od izvora manjim od kritičnog, gde dominira direktan zvuk – u tzv. zoni direktnog zvuka. Neki od primera u kojima je veličina kritičnog rastojanja od značaja su: studiji (za snimanje u bliskom polju), režijske prostorije (kvalitetan monitoring), amfiteatri i druge prostorije za govor (za veću razgovetnost), PA sistemi (za razumljivost emitovane poruke).

U sadašnjoj praksi veličina kritičnog rastojanja najčešće se ne meri neposredno, već estimira na osnovu statističkog modela zvučnog polja u prostoriji. Prema osnovnim zakonima prostiranja zvuka u slobodnom prostoru intenzitet direktnog zvuka u pravcu ose maksimalnog zračenja izvora iznosi [1]:

$$J_{dir} = \frac{\gamma P_a}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

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.

D. B. Mašović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (telefon: 381-64-4604564; e-mail: drasko.masovic@gmail.com).

Mentor: prof. dr Miomir Mijić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (e-mail: emijic@etf.bg.ac.yu).

gde je P_a zvučna snaga izvora, γ faktor usmerenosti (za neusmerene izvore $\gamma = 1$, za usmerene $\gamma > 1$), a r rastojanje od izvora. Model zvučnog polja u prostoriji statističke teorije daje sledeći izraz za intenzitet reflektovanog zvuka:

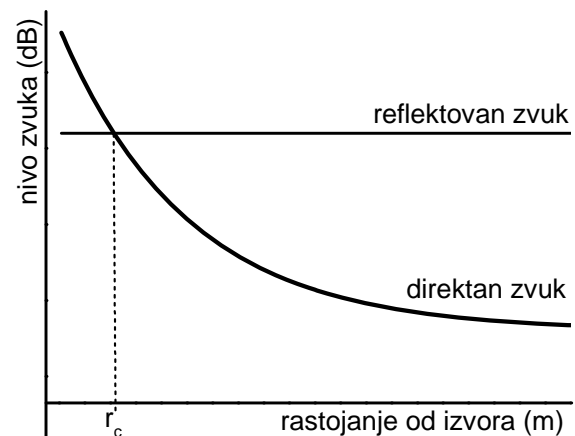
$$J_{refl} = \frac{4P_a}{A} = \frac{25P_a T}{V}, \quad (2)$$

gde je A ukupna apsorpcija prostorije, T vreme reverberacije, a V zapremina prostorije.

Iz prethodnih jednačina, nakon jednostavnog računa sledi da kritično rastojanje (na kome je $J_{dir} = J_{refl}$) ima vrednost:

$$r_c = 0.057 \sqrt{\frac{\gamma V}{T}}. \quad (3)$$

Teorijski nivoi direktnog i reflektovanog zvuka u prostoriji u funkciji rastojanja od izvora prikazani su na Sl. 1.



Sl. 1. Nivoi direktnog i reflektovanog zvuka u prostoriji u funkciji rastojanja od izvora, prema statističkoj teoriji.

Statistička teorija međutim podrazumeva određene pretpostavke za njenu primenu. To su pretpostavke homogenosti i difuznosti reverberantnog zvučnog polja u prostoriji. Da bi reverberantno polje ispunilo ove kriterijume potrebno je da srednji koeficijent apsorpcije prostorije bude dovoljno mali. U praksi to ne mora biti ostvareno, naročito u slučaju muzičkih studija (za snimanje i montažu) i akustički obrađenih prostorija za govor. Tada izmerene veličine mogu da značajno odstupaju od teorijski proračunatih. Statistička teorija se zato u najvećem broju slučajeva može koristiti samo za početnu, grubu procenu zone direktnog zvuka. Njena stvarna veličina može se odrediti jedino merenjem.

II. MERENJE KRITIČNOG RASTOJANJA

Najjednostavniji postupak merenja kritičnog rastojanja je verovatno korišćenjem fonometra (ili nekog drugog uređaja za merenje nivoa zvuka) [2]. Najpre se fonometar postavi vrlo blizu zvučnog izvora u prostoriji (kako bi reflektovan zvuk bio zanemarljivog intenziteta u odnosu na direktan) i izmeri nivo zvuka. Zatim se u jednom pravcu udaljava od izvora i kada na određenom rastojanju nivo zvuka počne da stagnira (reflektovani zvuk počinje da dominira nad direktnim) to rastojanje se smatra kritičnim rastojanjem. Glavni nedostatak ovog postupka je nepreciznost određivanja mesta gde reflektovan zvuk postaje jednak direktnom. On može biti zadovoljavajuć za neke praktične potrebe, kada je dovoljno grubo odrediti zonu direktnog zvuka, na primer za postavku mikrofona u muzičkim studijima pri snimanju.

Nešto složeniji je način merenja kritičnog rastojanja predložen od strane Dejvisa (*Davis*) [3]. Najpre se fonometrom izmeri nivo direktnog zvuka u bliskom polju izvora. Pri tome se teži merenju na rastojanju na kom je nivo direktnog zvuka bar 10 dB viši od nivoa reflektovanog. Zatim se izmeri i nivo reflektovanog zvuka u dalekom polju. Kritično rastojanje se onda određuje primenom zakona „6 dB“ korišćenjem formule:

$$r_c = r_r \cdot 10^{(L_r - L_R)/20}, \quad (4)$$

gde je r_r referentno rastojanje, odnosno rastojanje od izvora na kome je vršeno prvo merenje, L_r izmereni nivo zvuka na referentnom rastojanju i L_R nivo zvuka u dalekom polju.

Značajan problem Dejvisove metode je što je prvo merenje na vrlo malom rastojanju od izvora (najčešće nekoliko desetina centimetara). Ukoliko se mikروفon suviše približi izvoru nezanemarljivih dimenzija zakon „6 dB“ neće važiti jer talasni front nema sferan oblik. Ukoliko se pak suviše udalji dominacija direktnog zvuka nije garantovana. Problem postoji i pri merenju u dalekom polju. Nivo direktnog zvuka često nije zanemarljivo mali u odnosu na nivo reflektovanog čak ni na većim rastojanjima. To je na primer slučaj u prostorijama visoke apsorpcije i malih dimenzija (kod kojih se i ne mogu postići velike daljine od izvora), a većina studija je primer upravo takvih prostorija. Sve to je još izraženije u delovima opsega u kojima je izvor usmereniji.

Zajednička mana obe navedene metode merenja kritičnog rastojanja je što su zasnovane na statističkoj teoriji i stavu da je energija reflektovanog zvuka približno konstantna nezavisno od rastojanja od izvora. U praksi to nije slučaj, već nivo reflektovanog zvuka po pravilu opada sa udaljavanjem od izvora, kao što to pokazuje „korigovana teorija“ koju su formulisali Baron i Li (*Barron, Lee*) [4]. Oni su predložili sledeći izraz za intenzitet reflektovanog zvuka:

$$J_{refl} = \frac{4P_a}{A} e^{-0.04r/T}, \quad (5)$$

gde je r rastojanje između izvora i prijemnika izraženo u metrima, a T vreme reverberacije u sekundama. Jedina razlika u odnosu na izraz (2) je u mnoziocu $e^{-0.04r/T}$. To

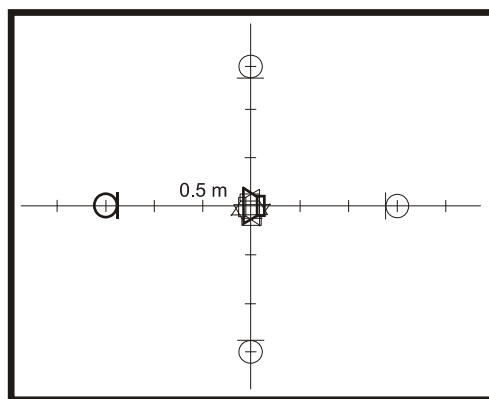
praktično znači da će opadanje nivoa reflektovanog zvuka sa udaljavanjem od izvora biti brže što je vreme reverberacije manje, odnosno apsorpcija u prostoriji veća.

III. RAZVIJENA METODA MERENJA KRITIČNOG RASTOJANJA U REALNIM PROSTORIJAMA

Osnovni cilj u nastavku opisane metode jeste izračunavanje kritičnog rastojanja u realnim prostorijama iz njihovih impulsnih odziva. Metoda je testirana u jednoj prostoriji, a rezultati merenja takođe su dati u nastavku.

A. Postupak analize i merenja

Impulzni odzivi su dobijeni korišćenjem MLS tehnike i frekvencijom odabiranja od 44100 Hz. Snimani su na rastojanjima od 0.5 m do maksimalno mogućeg u prostoriji u koracima od po 0.5 m, kao što je prikazano na Sl. 2.



Sl. 2. Merenje kritičnog rastojanja u prostoriji u četiri pravca.

Sve veličine: vreme reverberacije, odnos direktnog i reflektovanog zvuka i kritično rastojanje računane su po oktavama. Oktave u kojima je vršena analiza imaju centralne frekvencije: 125, 250, 500, 1000, 2000 i 4000 Hz. Oktava oko 8000 Hz nije uzeta u razmatranje jer je usmerenost korišćenog zvučnika u njoj velika, pa se rezultati ne mogu smatrati validnim. Istovremeno to utiče na rezultate posmatrane širokopoljasno, pa se ni oni ovde ne iznose.

Kao izvor korišćen je monitorski zvučnik firme JBL Control 1. Prema kataloškim podacima proizvođača RMS snaga ovog zvučnika je 150 W. Snimanje je vršeno 1/2-inčnim mernim mikrofonom neusmerenim svim analiziranim oktavama.

Za potrebe izračunavanja kritičnog rastojanja snimljeni impulsi odzivi analizirani su pomoću dva računarska programa razvijena u MATLAB softverskom paketu. Cilj prvog programa je izračunavanje odnosa direktnog i reflektovanog zvuka u decibelima iz snimljenog impulsnog odziva. Merenjem ovog odnosa na različitim udaljenostima od izvora omogućava da se u drugom MATLAB programu ekstrapolacijom odredi realna eksponencijalna kriva njegovog opadanja.

U preseku krive razlike nivoa direktnog i reflektovanog zvuka sa apscisom može se očitati izmerena vrednost

kritičnog rastojanja. Promenom pravca ose zvučnika u prostoriji i ponavljanjem merenja za iste udaljenosti od zvučnika (kao na Sl. 2.) mogu se odrediti varijacije kritičnog rastojanja duž različitih pravaca u prostoriji.

B. Analiza greške merenja

Metoda merenja kritičnog rastojanja predstavljena u ovom radu uključuje brojne faktore koji utiču na njenu tačnost. Kritično rastojanje se računa u odnosu na akustički centar izvora (zamišljena tačka oko koje se širi sferni talasni front po zakonu „6 dB“). Izvori poput monitorskog zvučnika korišćenog pri testiranju ove metode najčešće su nezanemarljivih dimenzija u odnosu na talasne dužine zvuka koji emituju, pa i talasni front u njihovoj blizini nije idealno sfernog oblika. Stvarni akustički centar nalazi se u radijusu od nekoliko centimetara od tačke usvojene pri testiranju metode, pa se u startu može računati sa tolikom greškom pri merenju veličine kritičnog rastojanja.

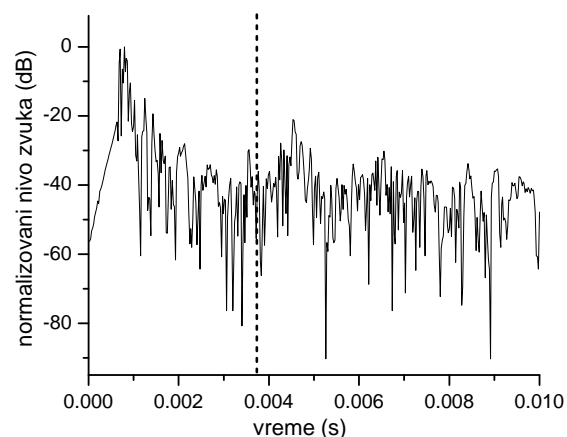
Dok početak direktnog zvuka najčešće nije teško odrediti, granica između direktnog i reflektovanog zvuka nije uvek jasna. Zvučnici na primer uvek imaju sopstvenu reverberaciju, kao posledicu vremena potrebnog za smirivanje membrane i njen povratak u ravnotežni položaj nakon pobude, čime je trajanje direktnog zvuka produženo. Granica se najčešće određuje na širokopojasnom impulsnom odzivu i ista koristi za sve oktave, kako bi se izbeglo preklapanje direktnog i reflektovanog zvuka u vremenu u nižim oktavama. I pored toga usvojeno trajanje direktnog zvuka može uticati na iznos njegove energije na niskim frekvencijama, čije su periode bliske tom trajanju. Da bi se stekao uvid u veličinu ovih varijacija, na primeru impulsnog odziva snimljenog na rastojanju od 1.5 m od izvora, koji je u centru akustički neobrađene, paralelopipedne prostorije, određen je odnos direktnog i reflektovanog zvuka za nekoliko usvojenih trajanja direktnog zvuka. Rezultati su dati u Tabeli 1.

TABELA 1. UTICAJ TRAJANJA DIREKTOG ZVUKA NA ODNOS DIREKTOG I REFLEKTOVANOG ZVUKA U DECIBELIMA.

oktava	1.5 ms	2.5 ms	3.5 ms	4.5 ms
125	-10.82	-8.06	-8.23	-8.42
250	-5.24	-4.35	-4.11	-3.50
500	-3.54	-4.02	-4.00	-4.01
1000	-1.06	-0.93	-0.87	-0.48
2000	1.92	1.86	1.93	2.38
4000	5.36	5.37	5.40	5.67

Varijacije razlike nivoa direktnog i reflektovanog zvuka u zavisnosti od trajanja direktnog zvuka u najvišoj oktavi su zanemarljive. Sa opadanjem frekvencije one su sve izraženije i dostižu 2 dB u oktavi oko 125 Hz. Ipak može se uočiti da za trajanja veća od 2.5 ms razlike nisu velike. Na Sl. 3. prikazano je prvih 10 ms jednog snimljenog impulsnog odziva sa usvojenom granicom direktnog zvuka. Izdvojeni vrhovi signala tokom trajanja direktnog zvuka posledica su sopstvene reverberacije zvučnika, kao i difrakcionih pojava na zvučničkoj kutiji i refleksija u njoj, a manjim delom i razdvojenosti visokotonske membrane od membrane za srednje i niske frekvencije. U globalu

energija direktnog zvuka opada prvih 3.5 ms, pa je ova vrednost usvojena za njegovo trajanje.



Sl. 3. Primer snimljenog impulsnog odziva i usvojena granica direktnog zvuka.

Kako je za snimanje impulsnog odziva korišćena MLS tehnika, nivo šuma je preko 40 dB niži od maksimalnog nivoa impulsnog odziva. Toliki dinamički opseg onemogućava da manje pomeranje granice kraja reflektovanog zvuka na vremenskoj osi bitno utiče na njegov nivo u bilo kojoj oktavi.

Navedeni problemi uvek prate merenje nivoa direktnog i reflektovanog zvuka i kritičnog rastojanja. Ovde primenjena metodologija i način analize snimljenih odziva mogu dodatno uticati na grešku merenja. Opisani MATLAB programi ekstrapolacijom (metodom najmanjeg kvadratnog rastojanja) proračunavaju krivu odnosa direktnog i reflektovanog zvuka u decibelima sa eksponencijalnim opadanjem (kakvo se teorijski očekuje). U praksi će na velikim rastojanjima i u prostorijama sa nezanemarljivom apsorpcijom opadanje sa rastojanjem biti sporije od eksponencijalnog, zbog smanjenja nivoa reflektovanog zvuka („korigovana teorija“).

Ekstrapolacija je tačnija što je broj mernih tačaka veći. Za potrebe testiranja razvijene metode merenja su vršena na rastojanjima počev od 0.5 m u koracima po 0.5 m, kao kompromis između preciznosti merenja i vremena potrebnog za analizu. Koliko vrednosti kritičnog rastojanja mogu da variraju u zavisnosti od broja mernih tačaka ispitano je na primeru pomenute paralelopipedne prostorije. Tri merne tačke su na rastojanjima 0.5, 1 i 1.5 m i svaka sledeća je na 0.5 m većem rastojanju, do poslednje osme. Odstupanja nisu velika i čak i za samo tri merne tačke iznose ispod $\pm 3\%$ srednje vrednosti.

Na primeru iste prostorije uočena su i odstupanja izmerenih vrednosti odnosa direktnog i reflektovanog zvuka od vrednosti na ekstrapoliranoj krivi. Ona iznose do ± 2 dB, a standardna devijacija je od 0.5 dB na visokim do 1 dB na niskim frekvencijama. Kako po zakonu „6 dB“ važi (ako J_{refl} ima konstantnu vrednost):

$$\frac{J_{dir}}{J_{refl}} r^2 = const. \quad (6)$$

lako se može izračunati da promena odnosa direktnog i reflektovanog zvuka od $\pm 1/-1$ dB utiče na promenu

vrednosti kritičnog rastojanja od $-11/+12\%$. Uzrok ovim odstupanjima je nestacionarna priroda zvuka kao fizičke pojave i ona presudno utiče na tačnost merenja. U realnosti stoga uvek treba govoriti o opsegu rastojanja oko neke srednje vrednosti koja se usvaja za veličinu kritičnog rastojanja, umesto o nekoj egzaktnoj vrednosti. Koliko će granice tog opsega odstupati relativno od srednje vrednosti zavisi osim od nestacionarne prirode zvuka i od tačnosti metode kojom se vrši merenje, ali se teško može očekivati preciznost veća od $\pm 15\%$.

IV. REZULTATI MERENJA KRITIČNOG RASTOJANJA NA PRIMERU JEDNE PROSTORIJE

Analizirana prostorija je paralelepipednog oblika, relativno malih dimenzija: $5 \times 4 \times 2.5$ m (zapremine 50 m^3). Površine prostorije su malog koeficijenta apsorpcije osim plafona sa apsorpcionim pločama, tako da je vreme reverberacije oko 0.5 s (Tabela 2). Zvučnik je postavljen u centar prostorije. Merenja su obavljena u četiri pravca (ka sva četiri bočna zida) i to na rastojanjima od 0.5 do 2 m po dužoj osi prostorije, odnosno od 0.5 do 1.5 m po kraćoj osi, u koracima od po 0.5 m (Sl. 2.). Za odnos direktnog i reflektovanog zvuka uzete su srednje vrednosti na datim rastojanjima, pa su iz tako dobijene krive opadanja odnosa ekstrapolacijom proračunate vrednosti kritičnog rastojanja date u Tabeli 2.

TABELA 2. VREME REVERBERACIJE I VREDNOSTI KRITIČNOG RASTOJANJA DOBIJENE STATISTIČKOM TEORIJOM, DEJVISOVOM FORMULOM I MERENJEM U ANALIZIRANOJ PROSTORIJI.

oktava	T	r_c teorijsko	r_c Davis	r_c mereno
125 Hz	0.73	0.50	0.50	0.52
250 Hz	0.60	0.56	0.90	0.83
500 Hz	0.52	0.78	0.90	1.03
1000 Hz	0.43	1.09	1.29	1.27
2000 Hz	0.43	1.51	1.68	1.83
4000 Hz	0.45	1.77	2.11	2.21

Opadanje nivoa reflektovanog zvuka sa udaljavanjem od izvora može se zanemariti, jer maksimalna udaljenost od izvora iznosi svega 2 m i po „korigovanoj teoriji“ na njoj je smanjenje nivoa reflektovanog zvuka ispod 0.8 dB.

Izmerene vrednosti kritičnog rastojanja znatno su veće od teorijskih. Uzrok tome je visoko apsorpcioni plafon, koji narušava polazne pretpostavke statističke teorije o homogenom i difuznom zvučnom polju. Kritično rastojanje se povećava sa frekvencijom zbog povećanja usmerenosti zvučnika ali i apsorpcije plafonskih ploča, što sveukupno smanjuje nivo reflektovanog zvuka. Na srednjim frekvencijama kritično rastojanje teorijski estimirano iznosi od 0.8 do 1.5 m, a na visokim i do 1.8 m. Izmerene vrednosti su više: od $1 - 2$ m na srednjim frekvencijama do 2.2 m u najvišim oktavama. Izmerena zona direktnog zvuka u najvišim oktavama praktično pokriva celu prostoriju.

Odstupanja odnosa direktnog i reflektovanog zvuka po pravcima u prostoriji na srednjim frekvencijama iznose do oko ± 1 dB, odnosno do $\pm 10\%$ srednje vrednosti. Ka izrazito visokim i niskim frekvencijama odstupanja su veća. Na rezultate u nižim oktavama utiče i pojava stojećih talasa usled relativno malih dimenzija prostorije.

V. ZAKLJUČAK

Opisana metoda merenja kritičnog rastojanja u realnim prostorijama je jedna od mogućih. Metoda je dovoljno precizna i otporna na greške, pa se najveća odstupanja javljaju usled nestacionarne prirode zvuka. Ona mogu iznositi do $\pm 15\%$ srednje vrednosti (u retkim slučajevima i više), pa je preporučljivo da se pri merenju kritičnog rastojanja ima u vidu ovaj opseg vrednosti oko izmerene vrednosti.

Sledeći cilj korišćenja metode trebalo bi da bude iznalaženje veze između pojedinih akustičkih parametara prostorija i veličine odstupanja teorijskih vrednosti kritičnog rastojanja od stvarnih (izmerenih). Ukoliko bi ta veza bila određena sa dovoljnom sigurnošću i tačnošću ona bi mogla da olakša sva buduća merenja kritičnog rastojanja. Formula statističke teorije bi se mogla prilagoditi određenom tipu prostorije (npr. prostorijama za govor, akustički (ne)obrađenim učionicama, studijima i sl.) ili modifikovati unošenjem dodatnih parametara. Izložena metoda je pogodna osnova za istraživanja u tom pravcu.

LITERATURA

- [1] M. Mijić, "Ozvučavanje, beleške sa predavanja," unpublished.
- [2] Shure Inc, <http://www.shure.com/>, *Official Shure Incorporated Website*, 2009.
- [3] D. Davis, C. Davis, "Sound System Engineering," *Howard W. Sams & Co*, 1987.
- [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

There is very little facts in literature about measurements of critical distance in real rooms, except its estimation by generally accepted formula of statistical theory. For that reason, and because of its significance, particularly in sound reinforcement, this paper deals with a method for measuring critical distance in a room. Advantages of its use in comparison with statistical theory estimation are described, and so are all relevant factors that can cause measurement error.

A METHOD FOR MEASURING CRITICAL DISTANCE IN REAL ROOMS

Draško B. Mašović