

Primena multifraktala u analizi impulsnog odziva prostorija – početna istraživanja

Milan Pavlović, Dragan M. Ristić

Sadržaj — Analiza impulsnog odziva zauzima centralno mesto u akustici prostorija. U ovom radu dat je prikaz istraživanja koje je za cilj imalo ispitivanje mogućnosti primene multifraktala u analizi impulsnog odziva prostorije. Posmatranje impulsnog odziva kao signala sa multifraktalnim svojstvima otvara nove mogućnosti za opisivanje zvučnog polja u prostoriji. Autori su korišćenjem karakterističnih vrednosti sa dobijenih multifraktalnih spektara pokušali da kvantifikuju impulsne odzive različitih prostorija. Metodologija predložena u radu zajedno sa dobijenim rezultatima pokazuje neke od mogućih pravaca u primeni multifraktala u akustici prostorija.

Ključne reči — akustika prostorija, impulsni odziv, multifraktali, multifraktalni spektar.

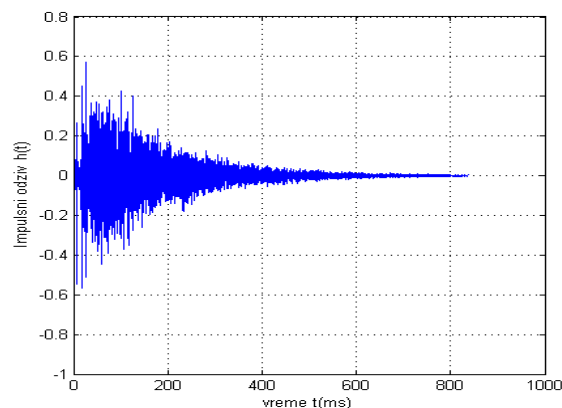
I. UVOD

U svakoj akustičkoj obradi prostorije veoma važnu ulogu ima analiza njenog akustičkog impulsnog odziva, zato što svaki prostor daje svoj karakterističan pečat strukturi impulsnog odziva. Koncertne i konferencijske sale, crkve, audio režije, sve one imaju karakteristični i međusobno različit impulsni odziv. Impulsni odziv prostorije sadrži sve informacije o akustičkim svojstvima prostorije između dve specifične pozicije izvora i prijemnika [1]. Pri prenosu zvuka od izvora do neke prijemne tačke u prostoriji, postojanje reflektovane zvučne energije je osnovna odlika prostorije kao akustičnog prenosnog sistema [2].

Tipičan izgled jednog impulsnog odziva prostorije prikazan je na Sl. 1. Kada se emituje kratak zvučni impuls od nekog izvora zvuka u samoj prostoriji, zvučni talas putuje u svim pravcima, a potom se reflektuje od svih zidova i prepreka u prostoriji. Sam impulsni odziv prostorije počinje u trenutku kad direktni zvuk stigne u odabranu prijemnu tačku. Sve ostale komponente koje se u odzivu vide nakon njega predstavljaju razne refleksije koje su stigle s manjom ili većim kašnjenjem u odnosu na direktan zvuk. Prve refleksije na specifičan način utiču na doživljaj direktnog zvuka u smislu povećanja glasnoće, razumljivosti govora, jasnoće muzike i doživljaj širine zvučnog izvora [3]. One mogu predstavljati veliki problem zbog njihove korelisanosti sa direktnim zvukom.

M. Pavlović, Visoka ICT škola, Zdravka Čelara 16, 11000 Beograd, Srbija. (e-mail: milan.pavlovic@ict.edu.rs).

D. Ristić, student doktorskih studija na Elektrotehničkom fakultetu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija. (e-mail: ristic.dragan@gmail.com).



Sl. 1. Primer realnog akustičnog impulsnog odziva izmerenog u Ljubljanskoj operi

Nakon prvih refleksija sledi reverberacioni deo impulsnog odziva kao posledica formiranja sukcesivnih refleksija zvuka u prostoru koje energetski ispunjavaju impulsni odziv duž vremenske ose. Najveće varijacije u formi impulsnog odziva od prostorije do prostorije javljaju se u vremenskom trajanju odziva, i u strukturi prvih refleksija, što direktno zavisi od dimenzija i akustičke obrade prostorije [2].

Impulsni odziv nosi ogromnu količinu informaciju. Pitanje koje proističe odavde jeste kako redukovati to mnoštvo informacija na one neophodne za akustičku analizu prostorija i objašnjenje zašto u različitim prostorijama različito doživljavamo zvuk. Odgovore na ovo pitanje, manje ili više uspešno, daju tri teorije na kojima se bazira akustika prostorija: statistička, talasna i geometrijska teoriji [4].

Ovaj rad ispituje mogućnosti za primenu multifraktala u analizi impulsnog odziva prostorija, odnosno načine za kvantifikovanje akustičkih osobina prostorije uz pomoć multifraktalnog spektra. Signal ne mora da bude „fraktal“ da bi bio efikasno analiziran „fraktalnim metodama“ [5]. Pitanje koje se postavlja, a na koje su autori pokušali da daju odgovor nije da li je impulsni odziv prostorije fraktal, već kakva su lokalna skalirajuća svojstva signala i da li postoji jednostavan, geometrijski ili statistički, globalni opis ovih svojstava uz pomoć fraktala. Rad je organizovan na sledeći način: u narednom poglavlju dat je kratak pregled teorije o multifraktalima i uporišta za primenu multifraktalam u akustici. Poglavlje III opisuje korišćenu metodologiju, rezultati su dati u IV poglavlju.

II. IMPULSNI ODZIV KAO SIGNAL SA MULTIFRAKTALNIM SVOJSTVIMA

Multifraktali se prvi put javljaju u radovima B. B. Mandelbrota, tvorca fraktalne geometrije [6]. On je objedinio prethodna saznanja iz ove oblasti i razvio novu geometriju prirode i uveo njenu primenu u različitim poljima istraživanja [7]. Fraktalna geometrija se zasniva na ideji da naizgled kompleksni i složeni oblici u prirodi pokazuju, jednu fundamentalnu osobinu poznatu kao samosličnost, koja se kvantifikuje odgovarajućom fraktalnom dimenzijom [8]. Prirodni fraktali za razliku od veštački generisanih, imaju različitu fraktalnu dimenziju pri različitim skalama. Ako neka pojava iskazuje svojstva samosličnosti, koja u različitim skalama nisu ista mada jesu slična, onda se govori o multifraktalima [9].

Kvantitativni opis multifraktalnih svojstava se može vršiti na razne načine. Poslednjih godina razvijeni su mnogi algoritmi za izdvajanje karakterističnih multifraktalnih parametara iz posmatranog skupa podataka. Uopšteno govoreći, prilikom analize multifraktala posmatra se određena struktura S koja se deli na nepreklapajuće bokseve S_i stranica ε , tako da je $S = \cup_i S_i$. Svaki boks je karakterisan nekim iznosom mere $\mu(S_i)$. Za opisivanje multifraktala uvodi se, tzv. grubi Hölder-ov eksponent [10]:

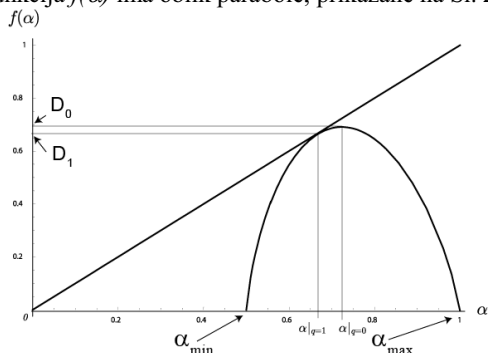
$$\alpha_i = \frac{\ln(\mu(S_i))}{\ln(\varepsilon)} \quad (1)$$

Pri čemu je α , njegova granična vrednost, kada $\varepsilon \rightarrow 0$:

$$\alpha = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\alpha_i) \quad (2)$$

Parametar α zavisi od položaja u strukturi i opisuje lokalnu regularnost. Kao mera, $\mu(S_i)$, unutar posmatranih bokseva pri određivanju Holder-ovih eksponenata mogu se koristiti različite vrednosti: maksimum, minimum, suma, devijacija, itd. Ove mere se normalizuju na sumu svih vrednosti veličine koja se posmatra.

Globalno svojstvo pojave opisuje se pomoću multifraktalnog spektra, tzv. funkcije $f(\alpha)$, koja prikazuje raspodelu bokseva koji imaju Holder-ov eksponent unutar nekog opsega $\alpha + d\alpha$. Za striktno fraktalne objekte ili pojave (monofraktale) sve tačke imaju istu vrednost eksponenta, pa je multifraktalni spektar tačka. Kod prirodnih fraktala postoji raspodela vrednosti, takva da funkcija $f(\alpha)$ ima oblik parabole, prikazane na Sl. 2.



Sl. 2. Prikaz multifraktalnog spektra, $f(\alpha)$

Na osnovu para $(\alpha, f(\alpha))$ može se opisati signal sa lokalnog i globalnog stanovišta. Male vrednosti α

označavaju signal koji se lokalno slabo menja. Male vrednosti $f(\alpha)$ označavaju da je pojava koja ima lokalnu vrednost α slabo verovatna, i obratno, za veliko $f(\alpha)$ [11].

Multifraktalni spektar (MF spektar) predstavlja osnovni rezultat multifraktalne analize (MA). Bez ulaženja u dublje tumačenje značenja MF spektra, za potrebe analize impulsnog odziva korišćene su karakteristične vrednosti spektra α_{\min} , α_{\max} , α_0 , $\Delta\alpha$ (širina spektra dobijena kao razlika α_{\max} i α_{\min}).

Danas postoje različite metode za određivanje MF spektra, odnosno funkcije $f(\alpha)$. Jedna od metoda je MDFA (*Multifractal detrended fluctuation analysis*) [12], koja je našla primenu u mnoštvu različitih oblasti među kojima je i akustika [13, 14]. Za procenu i analizu multifraktalnih karakteristika impulsnog odziva prostorija autori su koristili metodu velikih devijacija (*Continuous large deviation*) [15]. MF spektar izračunat metodom velike devijacije nudi kompromis između preciznosti i složenosti algoritma.

MF spektri impulsnih odziva za potrebe ovog rada računati su korišćenjem Fraclab-a [16]. Fraclab je dodatak za Matlab koji omogućava proučavanje neregularnih ali inače proizvoljnih signala primenom fraktalnih metoda [u 17], razvijen je od strane INRIA (*Institut national de recherche en informatique et automatique*). MF spektar, izračunat metodom velikih devijacija u Fraclab-u, dobija se korišćenjem algoritama u vremenskom domenu [15].

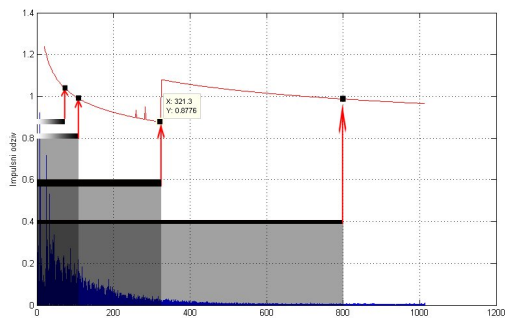
Primena multifraktalne teorije u analizi akustičkog impulsnog odziva predstavlja novinu u domenu akustike. U nekoliko istraživanja [13, 14, 18], impulzni odziv predstavljen je kao signal sa koji poseduje osobinu samosličnosti i koji se zbog toga može predstaviti svojim karakterističnim MF spektrom. Zaključak koji proizilazi iz ovih radova je da MF spektar poseduje određene informacije o zvučnom polju unutar prostorije. Ustanovljeno je da je širina multifraktalnog spektra u direktnoj vezi sa kompleksnošću strukture akustičkog impulsnog odziva [13].

III. NEKI OD MOGUĆIH PRISTUPA U ANALIZI

Primena novih metoda za analizu signala uvek sa sobom nosi dilemu izbora odgovarajućeg načina za njihovu implementaciju. U cilju ispitivanja mogućnosti primene multifraktalne analize na impulzni odziv prostorija posmatrana su globalna i lokalna svojstva signala. Pre nego što se MF analiza primeni na impulzni odziv potrebno je izabrati odgovarajuće signale. Da bi se osobine impulsnog odziva od značaja učinile vidljivim, lakše prepoznale i kvantifikovale, neophodno je izabrati adekvatan vid grafičkog prikaza impulsnog odziva pri njegovoj analizi. Prikaz impulsnog odziva može biti u obliku bipolarnog ili unipolarnog signala, u vremenskom ili frekvencijskom domenu. Najzad, impulzni odziv se iz domena signala može po potrebi transformisati u domen nivoa zvuka preračunavanjem signala u njegovu efektivnu vrednost.

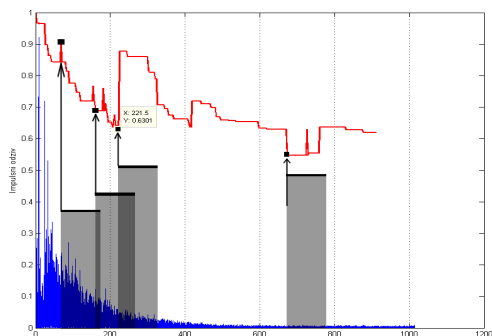
Globalna svojstva impulsnih odziva posmatrana su računanjem MF spektra od celokupnog signala. Analiza

lokalnih svojstva izvršena je tako što su računati MF spektri delova impulsnog odziva obuhvaćenih odgovarajućim prozorom. Korišćene su dve metode za analizu lokalnih svojstva: širenje prozora i pomeranje (klizanje) prozora. Prozor obuhvata deo signala impulsnog odziva za koji se računa MF spektar. Sa ovako izračunatih spektara preuzete su karakteristične vrednosti i posmatrano je kako se one menjaju.



Sl. 3. Ilustracija metode širenja prozora.

Metoda širenja prozora ilustrovana je na Sl. 3. Crvenom linijom prikazan je grafik promene širine MF spektra ($\Delta\alpha$) dobijen širenjem prozora kojim je obuhvaćen signal. Grafik širine spektra dobijen je tako što je za svaki korak širenja prozora izračunata širina MF spektra (početak prozora je fiksiran, dok se širina prozora povećava u svakom koraku za 2 mS). Na ovaj način se u impulsnom odzivu pronalaze delovi koje značajno utiču na oblik (širinu) MF spektra.



Sl. 4. Ilustracija metode pomeranja prozora.

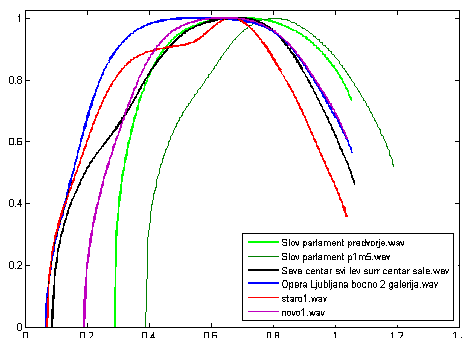
Ilustracija metode sa pomeranjem prozora data je na Sl. 4. Prozor promenljive širine pomeran je sa korakom od 2 mS. Za svaki deo impulsnog odziva obuhvaćen prozorom izračunate su karakteristične vrednosti MF spektra, slučaju prikazanom na Sl. 4 širina spektra (crvena linija). Za razliku od slučaja sa širenjem prozora ovde se vrednosti MF spektra beleže na početku prozora, tako je i veliki skok koji na Sl. 3. nastupa u 321 mS, u grafiku na Sl. 4. detektovan u 221 mS, dakle 100 mS ranije, kolika je i širina prozora. Poređenje je rađeno i za dve različite predstave impulsnog odziva (unipolarnu i bipolarnu) za svaki signal.

IV. REZULTATI

Na slikama koje slede prikazani su multifraktalni spektri impulsnih odziva korišćenih u istraživanju i dati su grafici sa promenama vrednosti karakterističnih parametara

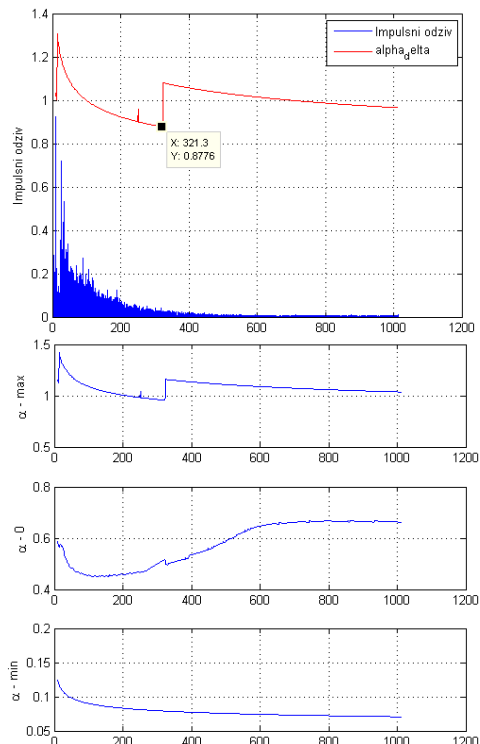
impulsnog odziva α_{\min} , α_{\max} i α_0 .

Na Sl. 5 prikazani su MF spektri izračunati za celokupne signale. Dobijeni spektri pokazuju izvesne razlike između signala koji potiču iz prostorija različitih akustičkih karakteristika, kada se posmatra parametar α_{\min} . Na levoj strani oko vrednosti $\alpha_{\min}=0.1$ nalaze se spektri impulsnih odziva iz Ljubljanske opere, Sava Centra i signal *staro1*, dok se na desnoj strani oko vrednosti $\alpha_{\min}>0.3$ nalaze signali iz predvorja Slovenskega parlamenta.



Sl. 5. Multifraktalni spektri različitih impulsnih odziva.

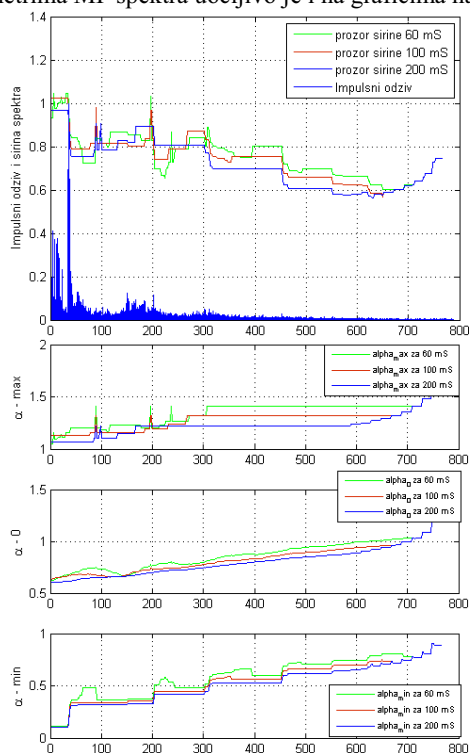
Na Sl. 6 prikazani su rezultati dobijeni metodom širenja prozora. Rezultati analize impulsnih odziva metodom pomeranja prozora (Sl. 7) dati su u tri slučaja za tri različite vrednosti širine prozora (60, 100 i 200 mS), korak je uvek bio 2 mS.



Sl. 6. Prikaz promene karakterističnih parametara MF spektra dobijenih metodom širenja prozora

Grafik promene parametra α_{\min} na Sl. 6. ne daje neke značajnije informacije, dok promena α_0 pokazuje izvesni stepen korelacije sa posmatranim signalom impulsnog odziva u logaritamskoj skali. Grafik promene α_{\max} i grafik širine spektra (crvena linija na Sl. 6.) pokazuju postojanje

„anomalije“ u signalu koja dovodi do naglog skoka u širini multifraktalnog spektra. Postojanje izvesnih „anomalija“ u signalu impulsnog odziva koje izazivaju skokove u parametrima MF spektra uočljivo je i na graficima na Sl. 7.



Sl. 7. Prikaz promene karakterističnih parametara MF spektra dobijenih metodom pomeranja prozora za impulsni odziv iz Sava Centra

V. ZAKLJUČAK

Impulsni odziv prostorije ima veliki značaj u akustici pošto predstavlja „ličnu kartu“ prostorije. Posmatranje impulsnog odziva kao signala sa multifraktalnim osobinama pruža nove mogućnosti za tumačenje ovog signala. Upravo je to ovaj rad pokušao da pokaže prikazom nekih od mogućih načina za primenu multifraktalne analize na impulsni odziv prostorije. Brojna pitanja ostaju otvorena za razmatranja koja će biti predmet budućeg rada. Neka od njih su: na koji način multifraktalni spektar kvantifikuje akustičke osobine prostorije i šta nam on govori o uspostavljenom zvučnom polju u prostoriji? Koje pojave u impulsnom odzivu je moguće uočiti uz pomoć MF spektra, odnosno, šta nam multifraktalni spektar zapravo pokazuje i šta možemo s njim da izmerimo u akustici prostorija? Inverzan problem takođe predstavlja veliki izazov, tj. kako iz MF spektra izdvojiti karakteristične delove impulsnog odziva.

LITERATURA

- [1] T. D. Rossing, *Springer handbook of acoustics*, New York, Springer, 2007.
- [2] D. Havelock, S. Kuwano, M. Vorlander, *Handbook of signal processing in acoustics*. New York, Springer Science + Business Media, 2008.
- [3] M. Vorländer, *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. New York, Springer, 2008.
- [4] M. Mijić, *Elektroakustika*. [Online], Available: <http://telekomunikacije.etf.bg.ac.rs>
- [5] J. L. Veheh, "Fractal Approaches in Signal Processing," *Fractals*, vol. 3(4), pp. 755–775, 1995.
- [6] B.B. Mandelbrot, J.W. Van Ness, 1968. Fractional Brownian Motion, Fractional Noises and Applications. *SIAM Review*, 1 (4), 422-437.
- [7] B. B. Mandelbrot, *The fractal geometry of nature*. New York, W. H. Freeman and company, 1977.
- [8] A. B. Chhabra, C. Meneveau, R. V. Jensen, K. R. Sreenivasan, "Direct determination of the $f(a)$ singularity spectrum and its application to fully developed turbulence," *Physical Review A*, Vol. 40, No. 9, Nov. 1, 1989.
- [9] B. Reljin, I. Reljin, "Fraktalna i multifraktalna analiza signala", *Telfor 2001*.
- [10] C. Evertsz, B. Mandelbrot: "Multifractal Measures", Appendix B in H. Peitgen, H. Jurgens, P. Andrews, *Chaos and Fractals*, Springer, 1992.
- [11] R. H. Riedi, *Introduction to Multifractals*, Dept of ECE MS 366 Rice University, Houston TX, October 26, 1999. [Online]. Available: <http://www.itsec.gov.cn>
- [12] C. J. G. Evertsz, H. O. Peitgen, R. F. Voss, *Fractal Geometry and Analysis*. World Scientific Pub Co Inc, 1996
- [13] S. J. Loutridis, "Quantifying sound-field diffuseness in small rooms using multifractals," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 125, No. 3, March 2009.
- [14] N. Hart, N. Xiang, „Using multifractals to quantify diffuseness in rooms,“ *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Volume 6, 2009.
- [15] J. L. Veheh, "Numerical computation of the large deviation multifractal spectrum," *CFIC*, Rome, 1996.
- [16] <http://fraclab.saclay.inria.fr/homepage.html>
- [17] J. L. Veheh, P. Legrand, "Signal and Image processing with FracLab," in Proc. of FRACTAL04, Complexity and Fractals in Nature, 8th International Multidisciplinary Conference, Vancouver, Canada, 2004
- [18] S. J. Loutridis, "A Study on the Temporal Evolution and Sound-Field Homogeneity in Small Rooms," *Journal of the Audio Engineering Society*, Volume 57, Number 4, 2009.
- [19] J. W. Kantelhardt, S. A. Zschiegner, E. Koscielny-Bunde, A. Bundel, S. Havlin, H. E. Stanley, "Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Nonstationary Time Series," [Online], Available: www.arxiv.org

ABSTRACT

Analysis of the room impulse response takes central place in room acoustics. In this paper, a research that was aimed to examine possible application of multifractals in the analysis of room impulse response is described. The authors used characteristic values of the obtained multifractal spectra in attempt to quantify the impulse responses of different rooms. The methodology proposed in this paper together with the obtained results shows some of the possible directions in the application of multifractals in room acoustics.

APPLICATION OF MULTIFRACTALS IN THE ANALYSIS OF ROOM IMPULSE RESPONSE - INITIAL RESEARCH

Milan Pavlović, Dragan M. Ristić