

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Dragan M. Ristić

**KARAKTERIZACIJA TEKSTURE IMPULSNOG  
ODZIVA PROSTORIJA PRIMENOM  
MULTIFRAKTALNE ANALIZE**

doktorska disertacija

Beograd, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Dragan M. Ristić

**CHARACTERIZATION OF ROOMS IMPULSE  
RESPONSE TEXTURE USING MULTIFRACTAL  
ANALYSIS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015.

**Mentor:**

vanredni profesor, dr Dragana Šumarac Pavlović, Univerzitet u Beogradu,  
Elektrotehnički fakultet

**Članovi komisije:**

1. vanredni profesor, dr Dragana Šumarac Pavlović, Univerzitet u Beogradu,  
Elektrotehnički fakultet
2. redovni profesor, dr Miomir Mijić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički  
fakultet
3. redovni profesor, dr Dragan Kandić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet
4. redovni profesor, dr Irini Reljin, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
5. docent, dr Jelena Čertić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

**Datum odbrane:**

## KARAKTERIZACIJA TEKSTURE IMPULSNOG ODZIVA PROSTORIJA PRIMENOM MULTIFRAKTALNE ANALIZE

**Rezime** – U ovoj disertaciji eksperimentalno je proverena mogućnost za primenu multifraktalne analize za kvantifikovanje pojava u akustici prostorija koje do sada nisu imala odgovarajuću (zadovoljavajuću) meru. Pored u naslovu pomenute teksture, analizom pomoću fraktalne teorije obuhvaćeni su i fenomeni koji su tesno povezani sa teksturom impulsnog odziva, a to su: detekcija ranih refleksija, difuznost zvučnog polja i granica između oblasti ranih refleksija i reverberacije. Analiza impulsnih odziva sa multifraktalnog stanovišta obavljena je korišćenjem MF DFA (*Multifractal Detrended Fluctuation Analysis*) metoda i metod histograma. Osnova za primenu multifraktalne teorije u analizi impulsnog odziva leži u samoj prirodi impulsnog odziva i procesu putem koga se on formira. Dobijeni rezultati pokazuju da postoje osnovi za tumačenje impulsnog odziva prostorije sa multifraktalnog stanovišta. Karakterizacija teksture primenom multifraktalne analize kretala se u dva pravca, kroz analizu lokalne i globalne regularnosti. Eksperimentalni rezultati potvrđuju da se difuznost uspostavljenog zvučnog polja u prostoriji i tekstura impulsnog odziva prostorije mogu izraziti kroz multifraktalni spektar impulsnog odziva. Kvantifikovanje ovih karakteristika i klasifikaciju impulsnih odziva, a samim tim i prostorija moguće je ostvariti poređenjem njihovih multifraktalnih spektara, za šta su u radu date konkretne smernice. Analiza lokalne regularnosti impulsnog odziva kroz detekciju refleksija, osim načina za karakterizaciju, tj. kvantifikovanje teksture daje i predlog metoda za detekcije ranih refleksija u impulsnom odzivu.

**Ključne reči:** Akustika prostorija, Impulsni odziv, Tekstura impulsnog odziva, Difuznost zvučnog polja, Primena multifraktalne analize

**Naučna oblast:** Elektrotehnika

**UDK broj:** 621.3

## CHARACTERIZATION OF ROOMS IMPULSE RESPONSE TEXTURE USING MULTIFRACTAL ANALYSIS

**Summary** – In this dissertation experimentally is tested the possibility of applying multifractal analysis to quantify the phenomena in acoustics that don't have adequate (satisfactory) measures. In addition to the title mentioned texture, analysis using fractal theory also covered and phenomena that are closely linked with the texture of the impulse response, such as: detection of early reflections, sound field diffuseness and the boundary between the early reflections and reverberation part of impulse response. The analysis of room impulse response from multifractal standpoint was performed by the MFDFA (Detrended Multifractal Fluctuation Analysis) method and the histogram method. The basis for the application of multifractal theory to analyse room impulse response lies in the very nature of the impulse response and the process through which it is formed. The results show that there are grounds for the interpretation of the room impulse response from multifractal standpoint. Texture characterization using multifractal analysis ranged in two directions, through the analysis of local and global regularity. Experimental results confirm that the diffusivity of sound field established in room and impulse response texture can be expressed through impulse response multifractal spectrum. Quantifying these characteristics and classification of impulse responses, and consequently rooms is possible by comparing their multifractal spectra, for which guidelines are defined. The analysis of impulse response local regularity through detecting reflections, in addition to the method for texture characterization, also gives the suggestion for early reflection detection in the impulse response.

**Keywords:** Room Acoustics, Impulse Response, Room Impulse Response Texture, Sound Field Diffuseness, Multifractal Analysis

**Scientific field:** Electrical engineering

**UDK code:** 621.3

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. IMPULSNI ODZIV PROSTORIJE .....</b>	<b>3</b>
2.1 DOŽIVLJAJ ZVUKA U PROSTORIJI .....	3
2.2 IMPULSNI ODZIV PROSTORIJE .....	9
2.3 UTICAJ REFLEKSIJA NA ZVUČNU SLIKU .....	14
2.4 DETEKCIJA REFLEKSIJA .....	23
2.5 SUBJEKTIVNI I OBJEKTIVNI AKUSTIČKI PARAMETRI .....	28
2.6 DIFUZNOST .....	30
2.7 TEKSTURA .....	40
<b>3. FRAKTALI I MULTIFRAKTALNA ANALIZA.....</b>	<b>43</b>
3.1 UVOD - PITANJE MERE OBJEKTA.....	43
3.2 FRAKTALNA TEORIJA.....	44
3.3 OPISIVANJE FRAKTALNIH I MULTIFRAKTALNIH SVOJSTAVA SIGNALA.....	51
3.4 MULTIFRAKTALNA ANALIZA .....	55
<b>4. BAZA IMPULSNIH ODZIVA KORIŠĆENIH U ISTRAŽIVANJU .....</b>	<b>64</b>
4.1 FIZIČKI MODELI PROSTORIJA.....	65
4.2 SOFTVERSKI MODELI PROSTORIJE .....	73
4.3 REALNE PROSTORIJE.....	79
<b>5. DETEKCIJA RANIH REFLEKSIJA POMOĆU MULTIFRAKTALA .....</b>	<b>80</b>
5.1 PRETPOSTAVKE ZA PRIMENU MULTIFRAKTALA U ANALIZI IMPULSNOG ODZIVA PROSTORIJE .....	80
5.2 RANE REFLEKSije KAO MERA TEKSTURE IMPULSNOG ODZIVA .....	82
5.3 METOD ZA DETEKCIJU REFLEKSIJA .....	85
5.4 VERIFIKOVANJE REZULTATA – USPEŠNOST DETEKCIJE KOHERENTNIH REFLEKSIJA .....	90
5.5 UNAPREĐENJE POSTUPKA ZA DETEKCIJU .....	94
5.6 MOGUĆNOSTI I NEDOSTACI PREDLOŽENOG POSTUPKA ZA DETEKCIJU REFLEKSIJA.....	98
<b>6. KVANTIFIKOVANJE GLOBALNIH KARAKTERISTIKA IMPULSNOG ODZIVA PRIMENOM MULTIFRAKTALA .....</b>	<b>100</b>
6.1 OPISIVANJE IMPULSNOG ODZIVA POMOĆU MULTIFRAKTALNOG SPEKTRA.....	100
6.2 OCENA DIFUZNOSTI ZVUČNOG POLJA POMOĆU MF SPEKTRA .....	104
6.3 KVANTIFIKOVANJE UTICAJA APSORBERA I DIFUZORA U PROSTORIJI NA OBLIK MF SPEKTRA .....	113
6.4 ANALIZA UTICAJ GEOMETRIJSKIH KARAKTERISTIKA PROSTORIJE .....	117
6.5 ANALIZA IMPULSNIH ODZIVA SNIMLJENIH U REALNIM PROSTORIJAMA.....	122
6.6 KLASIFIKACIJA PROSTORIJA PREMA PARAMETRIMA MF SPEKTRA.....	129
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>135</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>140</b>

## 1. Uvod

Impulsni odziv predstavlja osnovni izvor informacija o akustičkim osobinama prostorije. U literaturi su definisani razni jednobrojni parametri koji se izračunavaju iz impulsnog odziva prostorije, i koji svojom vrednošću opisuju pojedine partikularne odlike zvučnog polja u njoj. Uprkos mnoštvu parametara koji već postoje, i koji su precizno definisani, u praksi akustičkog dizajna prostorija postoji izražena potreba za novim načinima za numeričko kvantifikovanje akustičkih svojstava njihovog odziva. U prvom redu to su potrebe za: određivanjem vremenske granice gde se završava oblast ranih refleksija, kvantifikovanje kvaliteta teksture impulsnog odziva, kvantifikovanje stepena ostvarene difuznosti u zvučnom polju, određivanje vremenske pozicije koherentnih refleksija u odzivu i slično. Ovo su sve karakteristike impulsnog odziva za koje postoji jasna korelacija sa subjektivnim doživljajem zvučnog polja u prostoriji, a za koje do sada u literaturi nije utvrđena metodologija objektivnog opisivanja.

Predmet istraživanja u ovoj disertaciji je ispitivanje mogućnosti za primenu novog pristupa u analizi impulsnog odziva prostorije korišćenjem fraktala i multifraktala, tj. traženje odgovora na pitanje da li je moguće, i pod kojim uslovima, koristiti dostignuća fraktalne teorije za opisivanje i analizu impulsnog odziva prostorije. Cilj takvog pristupa je da se na neki način numerički kvantifikuju osobine impulsnog odziva značajne za subjektivni doživljaj zvuka, u prvom redu to su tekstura i difuznost, a koje u ovom trenutku nemaju svoj numerički kvantifikator. U cilju provere ovih pretpostavki multifraktali će se koristiti za ispitivanje lokalne i globalne regularnosti signala impulsnog odziva. Ispitivanje lokalne regularnosti treba da omogući lokalizaciju vremenskih oblasti u impulsnom odzivu u kojima se regularnost signala menja na određeni način. Ovo u prvom redu za cilj ima detekciju ranih refleksija koje su odgovorne za formiranje teksture impulsnog odziva. S druge strane analiza globalnih karakteristika impulsnog odziva izračunavanjem multifraktalnog spektra trebalo bi da omogući akustičku klasifikaciju impulsnih odziva, a samim tim i prostorija u kojima su snimljeni. Organizacija doktorske disertacije po poglavljima je sledeća:

Drugo poglavlje disertacije daje pregled relevantnih teorijskih osnova o impulsnom odzivu prostorije i njegovim najznačajnijim karakteristikama. Ovo poglavlje daje generalne opise problema iz akustike prostorija koji su predmet ovog istraživanja kao i pregled dosadašnjih metoda za rešavanje ovih problema i njihovih rezultata. Takođe, u ovom poglavlju data su i teorijska razmatranja koja povezuju objektivne i subjektivne karakteristike zvučnog polja u prostoriji.

Treće poglavlje sadrži uvod u fraktalnu teoriju i multifraktalnu analizu. Pored kratkog osvrtu na istoriju fraktala i pregleda osnovnih parametara koji se koriste za opisivanje fraktala, u ovom poglavlju dati su i kratki teorijski opisi metoda koje su u ovoj tezi korišćene za eksperimentalno izračunavanje željenih parametara.

Četvrto poglavlje daje pregled baze impulsnih odziva koja je formirana za potrebe ovog istraživanja. Impulsne odzive sačinjavaju odzivi snimljeni u fizičkim modelima različitih prostorija, odzivi iz računarski simuliranih prostorija i realni impulsni odzivi. Impulsni odzivi su podeljeni u grupe prema prostorijama u kojima su snimljeni ili generisani, a sve u zavisnosti o kom tipu prostorije se radi.

U petom poglavlju predstavljena su rezultati na karakterizaciji teksture impulsnog odziva pomoću detekcije refleksija. Ovo poglavlje daje i opis metoda zasnovanog na multifraktalnoj analizi koji se koristi za detekciju ranih refleksija. Predloženi metod koristi raspodelu Holderovih eksponenata za izdvajanje refleksija koje odgovaraju sličnim strukturama u impulsnom odzivu, a koje su odgovorne za nastanak pojedinih akustičkih fenomena.

Šesto poglavlje opisuje analizu globalnih svojstava impulsnog odziva pomoću multifraktala. Korišćenjem MFDFA i LD metode za ispitivane impulsne odzive izračunati su multifraktalni spektri iz kojih su zatim izdvojeni karakteristični parametri spektra. Odabrani parametri analizirani su na različitim impulsnim odzivima i na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata predloženi su kriterijumi za kvantifikovanje pojedinih akustičkih svojstava prostorije i njihovu klasifikaciju. Prikazani rezultati akcenat stavljaju na opisivanju difuznosti zvučnog polja i teksture impulsnog odziva.

U sedmom poglavlju dat je pregled najznačajnijih rezultata ovog rada i izvedenih zaključaka.



## 2. Impulsni odziv prostorije

### 2.1 Doživljaj zvuka u prostoriji

#### 2.1.1 Priroda zvuka (objektivno vs. subjektivno)

*Gde se rađa muzika, u uhu ili na muzičkom instrumentu?*

Ovo naizgled jednostavno pitanje trebalo bi da ima jednostavan inženjerski odgovor: da je muzički instrument mesto gde nastaje zvuk, ostavljajući čulo sluha izvan procesa rađanja zvuka. Međutim, pitanje do koga se neminovno dolazi je, da li zvuk ima značaja i smisla ako ga ne čujemo? Nauka ne gleda potpuno blagonaklono na filozofsko razmišljanje da je čovek mera svih stvari, i da bi shodno tome zvuk trebalo da se rađa u uhu. Ovo neslaganje u tumačenju prirode zvuka je sukob sa dubljom pozadinom (nešto više od proste dileme: izvor ili detektor?), to je u stvari razmimoilaženje između objektivnog i subjektivnog, između nauke i umetnosti.

Kada se govori o čisto inženjerskim oblastima ova dilema izgleda veštačka i bez osnova za dublju raspravu, pošto je argumentacija uvek na strani objektivnog, odnosno izvora. Međutim, kada je u pitanju akustika, uticaj čoveka kao prijemnika je nezaobilazan i veoma značajan za tumačenje karakteristika zvuka. Uvođenjem čoveka, tj. slušaoca i njegove svesti kao faktora u proceni kvaliteta zvuka, situacija se komplikuje, zato što se sasvim izvesno izlazi iz sfere objektivnog i zalazi se u domene estetike i umetnosti.

Ako se generalizuje pitanje s početka, tako da glasi: gde zapravo nastaje, odnosno gde se rađa signal, u izvoru ili na detektoru? Davanje odgovora bi trebalo da bude jednostavno i logično, ali sama priroda signala umnogome otežava dobijanje tačnog odgovora na ovo pitanje. Dok je za signale koji postoje mimo čoveka i koji nisu stvoreni po meri čoveka sasvim izvesno da je njihov izvor mesto njihovog nastanka (a da sredina u kojoj se opažaju/detektuju definiše meru njihovog postojanja), signali koji se generišu za potrebe čoveka nikako se ne mogu posmatrati odvojeno od detektora, odnosno čula

kojima se opažaju. Svrha njihovog stvaranja određena je čovekovim potrebama, pa tako i filozofska istina antičkih sofista „Čovek je mera svih stvari, pri čemu svaki čovek ima svoju posebnu istinu“ dobija na težini i verodostojnosti.

Kako to obično biva, krajnji rezultat većine rasprava je priznanje da ne postoji jedno tumačenje (apsolutna istina) koje objašnjava sve. Tako, i dilema koja se ovde nudi nikako ne može dobiti odgovor samo na jednoj strani. Najpribližnije istini bilo bi reći da analiza signala, a svakako i njegova obrada, ne može da se obavlja u potpunosti bez razmatranja obe strane, i prijemne i predajne, odnosno izvora i detektora. Za sve signale koji su predmet interesovanja čoveka kao prijemnika neophodno je razmatrati obe strane, tj. objektivne i subjektivne parametre kojima se opisuje signal. Ako se sada vratimo na naše pitanje s početka, onda možemo reći da signal nastaje na izvoru a da se predstava o signalu stvara na mestu detekcije, tj. prijema. Predstava signala, pošto govori o njegovoj primeni, je jako bitna za signale koji su namenjeni čoveku kao prijemniku. Zvuk je jedan od takvih signala. Ovo potvrđuje i tzv. subjektivistička definicija zvuka, koja kaže da je zvuk sve ono što registruje čulo sluha. Iako je ova definicija nepotpuna jer ne obuhvata sve zvukove i ne objašnjava fizičku prirodu zvuka, ona je u izvesnom smislu primenjiva u inženjerskim oblastima gde je ljudsko uvo „mera stvari [1].

U prethodnoj raspravi zapostavljena je činjenica da uticaj sredine u kojoj se reprodukuje ili stvara zvuk nikako nije zanemarljiv. Ovo znači da ako želimo da saznamo pravu istinu o zvuku u prostoriji, moramo uzeti u obzir i prenosni sistem, tj. okruženje u kome zvuk nastaje i u kome se doživljava. Jedino tako možemo da dobijemo potpunu sliku i sve informacije koje su nam potrebne za ocenu kvaliteta zvuka koji čujemo.

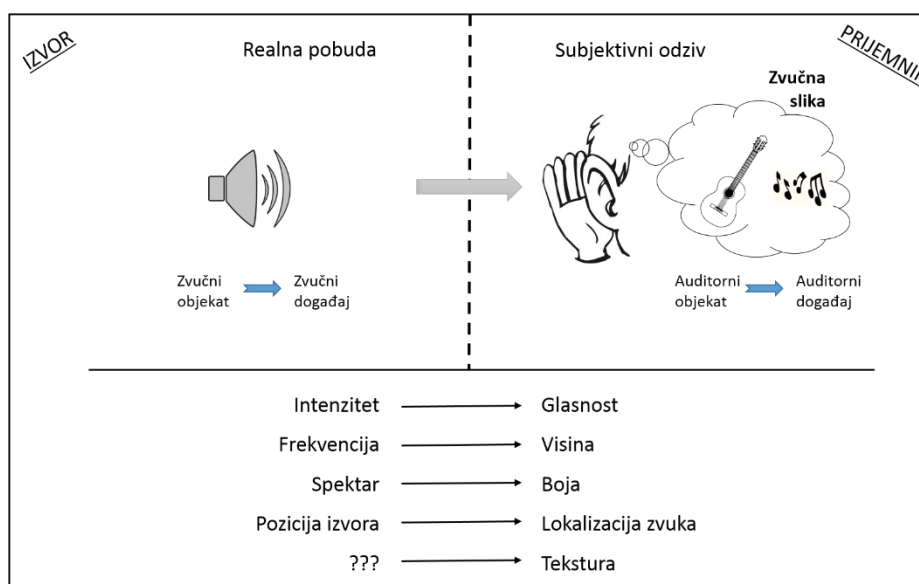
Zalaženje doživljaja zvuka u sferu umetničkog doživljaja dovodi do toga da se subjektivni efekti pri slušanju nikako ne mogu smatrati zanemarljivim. Iako se u ovom istraživanju ograničavamo na prostoriju, neophodno je imati u vidu da na formiranje utiska o nekom zvučnom sadržaju utiču kako oni koji taj sadržaj reprodukuju tako i oni koji taj sadržaj slušaju. Neretko, kada se govori o muzičkom sadržaju koji se reprodukuje u nekoj koncertnoj sali, mogu se čuti oprečni komentari o „kvalitetu zvuka“ koji su osim objektivnih karakteristika posledica i razlike u afinitetima, školovanosti čula sluha, pa čak i raspoloženja slušaoca. Zato je subjektivni doživljaj zvuka jako bitan za njegovo

razmatranje. Čulo sluha je poslednji sudija i možda onaj sa najvećom težinom kada treba da se proceni kvalitet zvuka.

Iz prethodno navedenog može se zaključiti da doživljaj zvuka u prostoriji nije samo inženjersko pitanje, pa se problem akustičkog dizajna prostorije ne može posmatrati samo kao problem pronalaženja prave formule, odnosno parametra kojim se prostorija kvantifikuje. Već bi pre to bilo pronalaženje prave mere između zahteva slušaoca, građevinskih ograničenja i sadržaja koji se izvodi/reprodukuje.

### 2.1.2 Objektivni i subjektivni doživljaj zvuka

Kao posledica već pomenute dileme o objektivnom i subjektivnom doživljaju zvuka, neophodno je napraviti i pojmovnu razliku o doživljaju zvuka u realnom i subjektivnom domenu. Slika 2.1 ilustruje kako se ista pojava na različit način opisuju pri prelasku zvuka iz realnog, fizičkog sveta u subjektivni svet, svest slušaoca.



**Slika 2.1.** Objektivni i subjektivni doživljaj zvuka

Pojava zvuka, koji predstavlja objektivnu fizičku pobudu, u psihoakustici se označava kao „zvučni događaj“ [2]. Ovo je pojava u realnom fizičkom svetu slušaočevog okruženja. Ta fizička pobuda u prostoru oko slušaoca generišu zvučno polje koji fizički deluje na čulo sluha. Za izvor zvuka čijim radom nastaje zvučni događaj uvodi se pojam „zvučni objekat“.

Zvučni događaj deluje na čulo sluha slušaoca. Kao odziv na pojavu zvučnog događaja u svesti slušaoca nastaje zvučna slika. Pošto zvučna slika nije u domenu fizičkog sveta, da bi se napravila razlika između realne pobude i subjektivnog odziva koriste se drugačiji termini. Tako se za saznanje slušaoca o postojanju nekog zvuka u okruženju (odziv na fizičku pobudu), uvodi pojam „auditorski događaj“. Subjektivna percepcija zvučnog izvora naziva se „auditorski objekat“.

Korelacija između zvučnih događaja kao pobude i auditorskih događaja kao odziva zavisi od brojnih objektivnih i subjektivnih faktora [2]. Ovo dovodi do toga da između zvučnih i njihovih auditorskih događaja ne postoji jednoznačna korelacija, već se ona može razlikovati od osobe do osobe, pa čak i da se menja kod iste osobe u zavisnosti od subjektivnog stanja slušaoca. U psihoakustici se zbog svega toga odnos pobuda–odziv ne može karakterisati nekom egzaktnom funkcijom prenosa kao što se to radi u fizičkom domenu.

Interakcija između fizičkih karakteristika zvuka i naše percepcije tih karakteristika je delikatan i složen problem [3]. Ovaj problem zahteva kombinaciju objektivnih znanja i subjektivne mudrosti za ispravno tumačenje akustičkih osobina prostorija, kao što je u prethodnom poglavlju rečeno uključuje u sebe i nauku i umetnost. Određeni subjektivni efekti koji nastaju pri slušanju mogu se izmeriti ili barem dobro aproksimovati pomoću usvojenih objektivnih mera. Primeri nekih subjektivnih karakteristika i objektivnih parametara pomoću kojih se oni kvantifikuju dat je u tabeli 2.1

Tabela 2.1 Neke od karakteristika zvuka u subjektivnom i objektivnom domenu

Subjektivni domen	Objektivni domen
Glasnost zvuka ( <i>loudness</i> )	Intenzitet
Visina tona ( <i>pitch</i> )	Frekvencija
Boja zvuka ( <i>timbre</i> )	Spektar
Lokalizacija zvuka	Pozicija zvučnog izvora

Problem u akustici i dalje predstavlja postojanje značajne razlike između objektivnih merenja i subjektivne procene kvaliteta zvuka [3]. Ovo je posledica toga što se za opisivanje akustike koncertnih dvorana koriste brojni pridevi (kao npr. toplina, definicija, reverberantnost, punoća tona, živost, jasnoća, intimnost, itd.) koji često nemaju objektivne parametre koji ih egzaktno kvantifikuju, već na određeni način, manje ili više uspešno, određene subjektivne procene povezuju sa objektivnim merama.

### 2.1.3 Zvučno polje u prostoriji

Zvučno polje u prostorijama je značajno kao predmet istraživanja jer prostorije predstavljaju mesto gde čovek živi i obavlja svoje profesionalne aktivnosti. Akustičke specifičnosti prostorije posebno su značajne kada ona ima ulogu prenosnog sistema između zvučnih izvora i čula sluha slušaoca. Zbog toga se karakteristike zvučnog polja u prostorijama vrednuju i sa aspekta čovekovog čula sluha. Kada su prostorije mesta u kojima se zvuk koristi kao izražajno sredstvo umetnosti, onda se zvučno polje u njima vrednuje i sa aspekta estetike zvučne slike. Kao što je već više puta pomenuto, pitanje estetike inženjerskom domenu nameće jedan specifičan aspekt, jer se fizičke karakteristike zvučnog polja analiziraju kroz prizmu čovekovog subjektivnog doživljaja zvuka. Kako bi se akustička svojstva prostorije prilagodila čoveku one se akustički obrađuju. Dva su osnovna razloga za akustičku obradu prostorija: akustički komfor (zaštita od buke, zaštita privatnosti i kvalitet zvučnog signala) i estetika zvučne slike. Pri čemu je ovaj drugi razlog svakako kompleksniji.

Posmatrano sa aspekta akustičkog dizajna prostorija, razlike u zahtevima čula sluha proizilaze iz dva osnovna domena:

- iz razlika u sadržajima (zvučnim signalima) koji se slušaju u prostoriji (govor, muzika različitih struktura, neutralni zvukovi) i
- iz načina na koji se sadržaji (zvukovi) generišu („živi“ izvori zvuka ili reprodukcija u različitim formatima pomoću zvučnika).

Uz sve to, za slušaoca zvukovi mogu još biti željeni ili neželjeni (buka). Svaka kombinacija iz ovog ilustrativnog nabiranja podrazumeva drugačije akustičke karakteristike prostorije koje će čulo sluha slušaoca smatrati optimalnim. Zbog toga je za kvalitetan akustički dizajn neophodno detaljnije poznavanje nekih relevantnih aspekata mehanizma percepcije i zahteva koje čulo sluha postavlja u prostorijama raznih namena.

Razlika u doživljaju zvuka u prostoriji i u slobodnom prostoru posledica je efekata koje nameću geometrijske granice zvučnog polja. U slobodnom prostoru zvuk se kreće slobodno u svim pravcima, pa su geometrijske granice zvučnog polja određene samo

procesima slabljenja zvuka pri udaljavanju od izvora. U ovom slučaju snaga zvučnog izvora određuje prostorne gabarite zvučnog polja.

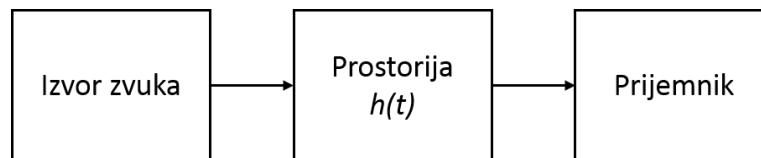
Za razliku od slobodnog prostora, u prostoriji zvučna energija ostaje prostorno „zarobljena“ u okviru graničnih površina, odnosno unutar zidova prostorije. Zbog toga su prostorni gabariti zvučnog polja u njoj uvek isti, bez obzira na zvučni izvor i njegovu snagu. Prostorija određuje geometrijske granice zvučnog polja. Uticaji više različitih faktora čine da zvučno polje u prostorijama ima složenu strukturu.

Pod prostorijom u domenu akustike podrazumevamo fizički ograničenu formu vazdušnog prostora koji je sa svih strana ovičena građevinskim pregradama (fizičkim barijerama): zidovi, pod i plafon. Upravo postojanje fizičkih barijera je ono po čemu se zvučno polje u prostoriji razlikuje od slobodnog prostora. Kao posledica velike razlike u impedansi vazduha i zidova na graničnim površinama zvuk se reflektuje, stvarajući refleksije koje zvučnu energiju zadržavaju u prostoriji. Refleksije su ono čega nema u slobodnom polju i što pravi kvalitativnu razliku u doživljaju zvuka u prostoriji. Postojanje reflektovane zvučne energije koju čine brojne refleksije predstavlja osnovnu odliku prostorije kao akustičkog prenosnog sistema. Složena struktura zvučnog polja u prostoriji ogleda se u vremenskoj strukturi reflektovane energije koja stiže u prijemnu tačku i energiji koje ove refleksije nose, tj. njihovom intenzitetu. Ova struktura se najbolje opisuje impulsnim odzivom.

## 2.2 Impulsni odziv prostorije

### 2.2.1 Izgled i karakteristike impulsnog odziva prostorije

Odziv prostorije na zvučnu pobudu posmatra se preko njenog impulsnog odziva  $h(t)$ , pri čemu se prostorija posmatra kao prenosni sistem čiji je ulaz na mestu zvučnog izvora a izlaz na mestu prijemnika [1]. Šematski prikaz prostorije kao sistem prenosa dat je na slici 2.2. Ulaz i izlaz ovakvog sistema prenosa zavisi od prostornih koordinata, pa je impulsni odziv funkcija položaja predajne i prijemne tačke. Impulsni odziv je vezan za tačno određeni par tačaka za koje je definisan. Njegova funkcija se često označava sa  $h(r, r_0, t)$ , gde je  $r$  vektor položaja prijemnika, a  $r_0$  vektor položaja izvora. Iako se na ovaj način za različite koordinate ulaza i izlaza formiraju impulsni odziv koji se u izvesnoj meri razlikuju, zbog statističkih osobina reflektovanog zvuka ove razlike nisu velike, i one se uglavnom ispoljavaju u detaljima.



**Slika 2.2.** Šematski prikaz prostorije kao prenosnog sistema sa njenim impulsnim odzivom

Uobičajeni način posmatranja impulsnog odziva prostorije je postavljanjem zvučnog izvora i mikrofona u prethodno definisane tačke. Odziv prostorije je tada definisan zvučnim pritiskom na mestu mikrofona. Impulsni odziv se dobija iz električnog signala na izlazu iz mikrofona kada se on pobudi Dirakovim impulsom emitovanim sa izvora.

Iako je bogat informacijama, impulsni odziv na osnovu koga se vrši analiza zvučnog polja u prostorijama predstavlja redukovani zapis vremenske promene zvučnog pritiska u tački gde je postavljen mikrofona. Ovo je posledica činjenice da izlaz mikrofona svodi trodimenzionalno zvučno polje na jednodimenzionalni električni signal. Ovako dobijeni signal ne sadrži podatke o prostornom odnosu komponenata odziva, tj. njihove pravce nailaska, već samo informacije o vremenu nailaska komponenti i njihovom intenzitetu. Signal snimljen mikrofonom ne može da pokaže sve karakteristike zvučnog polja u prostoriji relevantne za subjektivni doživljaj pri slušanju. Posledica ovakvih karakteristika mikrofona je određena razlika između električnog odziva na izlazu

mikrofona i realnog odziva u zvučnom polju. Ova razlika dolazi do izražaja kada se uzme u obzir činjenica da je čovek, odnosno njegovo čulo sluha, u stanju da u izvesnoj meri percipira prostornost zvučnog polja.

Impulsni odziv prostorije, ili preciznije rečeno, impulsni odziv određene putanje prenosa u prostoriji je najznačajnija objektivna karakteristika njene akustike. Neke od informacija koje impulsni odziv sadrži mogu biti utvrđene direktnim vizuelnim pregledom reflektograma (pod ovim terminom podrazumeva se grafička predstava impulsnog odziva), dok se većina objektivnih parametara izdvaja iz impulsnog odziva nekom obradom. Iskusni akustičar može saznati dosta o akustičkim kvalitetima i nedostacima prostorije samo vizuelnom inspekcijom reflektograma.

Iako je posmatranje impulsnog odziva ili njegove modifikacije veoma sugestivno ono ne daje sigurnu odluku da li će određena refleksija (ili skup refleksija) proizvesti određene subjektivne efekte [4]. U svakom slučaju dodatna obrada izmerenog impulsnog odziva je korisna i neophodna.

Impulsni odziv prostorije se može matematički predstaviti kao suma Dirakovih impulsa. Ovakvom formulom (2.1) modeluje se činjenica da je signal u prijemnoj tački superpozicija beskonačno mnogo replika originalnog signala, svake od njih određenog intenziteta  $A_n$  i zakašnjene za određeno vreme  $t_n$  u zavisnosti od puta koji prelaze [4]

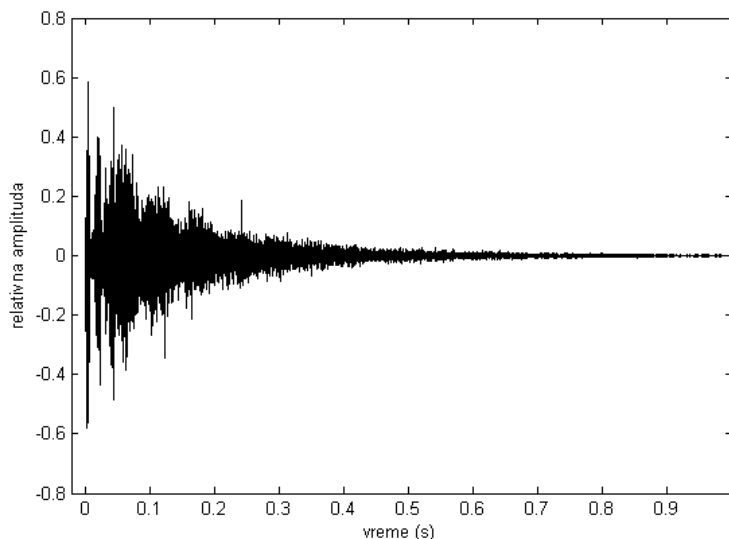
$$h(t) = \sum_n A_n \delta(t - t_n) \quad (2.1)$$

Naravno, ovo je pod pretpostavkom da su apsorpcioni koeficijenti svih zidova frekvencijski nezavisni. U realnosti Dirakov impuls se deformiše kada se reflektuje od zida, stoga reflektovani signal nije tačna replika originalnog signal već je u izvesnoj meri transformisan u nešto drugačiji signal, koji bi se prema [4] mogao nazvati refleksioni odziv površine.

Tipičan izgled jednog impulsnog odziva prostorije prikazan je na slici 2.3. Trenutak stizanja direktnog zvuka u prijemnu tačku označava početak impulsnog odziva. U odzivu se na tom mestu na vremenskoj osi pojavljuje impuls koji predstavlja direktan zvuk. Sa aspekta posmatrača koji se nalazi u prijemnoj tački vreme koje je bilo potrebno da direktan zvuk stigne od izvora nije relevantno, pa je početni vremenski trenutak u



impulsnom odzivu uvek startovan stizanjem direktnog zvuka. Sve komponente koje se u odzivu vide nakon njega, a njihov broj je kao što se i vidi na slici veoma veliki, predstavljaju razne refleksije koje su stizale s manjom ili većom gustinom u vremenu i s manjim ili većim kašnjenjem u odnosu na direktan zvuk.

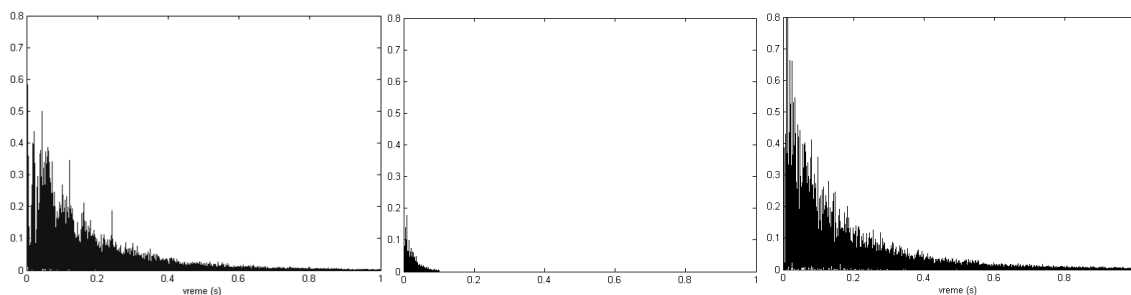


**Slika 2.3.** Izgled jednog impulsnog odziva prostorije snimljenog u koncertnoj dvorani

Karakteristična osobina impulsnog odziva u prostorijama je obvojnica koja ima prepoznatljivi monotono opadajući (približno eksponencijalan) tok koji asimptotski teži nuli. Konstantno smanjenje veličine komponenti odziva u vremenu posledica je činjenice da se energija svakog zvučnog talasa pri prostiranju kroz prostoriju smanjuje širenjem talasnog fronta, gubicima usled apsorpcije pri svakoj refleksiji na graničnim površinama i disipacijom u vazduhu.

Prikaz impulsnog odziva dat na slici 2.3. dobija se kao dijagram talasnog oblika signala sa izlaza mikrofona pri pobudi prostorije Dirakovim impulsom. Snimanje impulsnog odziva prostorija vrši se s pobudom pomoću raznih sredstava koja proizvode pucnjeve i na taj način simuliraju Dirakov impuls. Kao pobude mogu da se koriste startni pištolj, petarda, bušenje naduvanog balona, električna varnica itd. Za eventualne brze provere odziva moguće je prostoriju pobuditi i pljeskanjem rukama, s tim što je zvučna snaga takvog impulsa mala i sa neujednačenim spektralnim sadržajem pri ponavljanju. Sofisticiranije metode merenja impulsnog odziva zasnivaju se na emitovanju kompleksnih signala (sekvenca maksimalne dužine, sinusni signal čija frekvencija

prebriše čujni opseg) a impulsni odziv se izračunava odgovarajućom obradom signala snimljenog u prostoriji.



**Slika 2.4.** Impulsni odzivi nekih prostorija: koncertna dvorana (levo), režija na FDU (slika u sredini) model difuzne prostorije (desno)

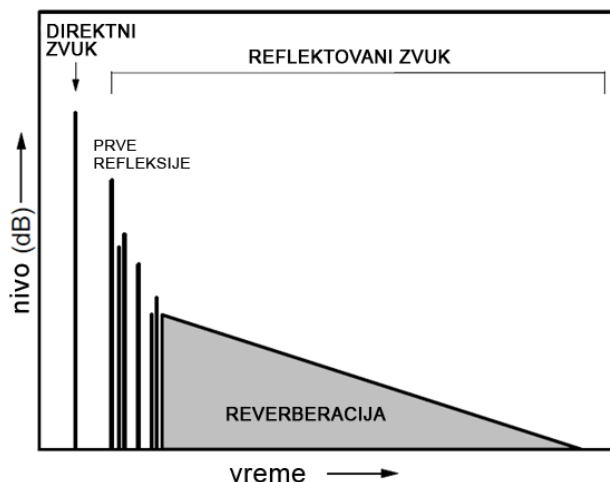
Brzina opadanja obvojnice impulsnog odziva zavisi od veličine prostorije i materijalizacije njenih unutrašnjih površina. Najveće varijacije u formi impulsnog odziva od prostorije do prostorije javljaju se u njegovom trajanju i u početnoj strukturi komponenti odmah nakon stizanja direktnog zvuka. Na slici 2.4 prikazana su tri karakteristična oblika impulsnih odziva snimljenih u tri prostorije različite po veličini, nameni i materijalizaciji unutrašnjih površina. Pokazani primeri ilustruju realne varijacije u trajanju impulsnog odziva i u strukturi komponenti koje nailaze neposredno posle direktnog zvuka.

### 2.2.2 Generalizovani oblik impulsnog odziva prostorije

Opšte, zajedničke karakteristike svojstvene svakom odzivu snimljenom u nekoj prostoriji mogu se ilustrovati generalizovanim izgled impulsnog odziva, prikazanim na slici 2.5. Ono što se uočava na prvi pogled posmatranjem ove predstave impulsnog odziva jesu tri osnovne celine: direktan zvuk, prve refleksije i reverberacioni deo. Prve refleksije i reverberacija predstavljaju reflektovani zvuk.

Direktan zvuk je onaj koji najkraćim putem dolazi od izvora do prijemne tačke. On je po svojim osobinama isti kao zvuk koji bi dolazio do prijemnika kada bi se izvor nalazio u slobodnom prostoru. Direktan zvuk nosi osnovnu zvučnu informaciju i on je uvek prisutan, bez obzira na fizičke okolnosti. Nivo direktnog zvuka koji u prostoriji stiže do prijemne tačke promenljiva je komponenta zvučnog polja koja se smanjuje sa porastom rastojanja od izvora. Direktan talas slabi sa udaljavanjem od izvora po zakonu

“6 dB”, tj. intenzitet direktne komponente zvučnog polja u prostoriji obrnuto je srazmeran kvadratu rastojanja između izvora i prijemne tačke.



**Slika 2.5.** Generalizovana forma impulsnog odziva prostorija

Svakako najznačajnija karakteristika prostorije u akustičkom smislu je da u prostorijama osim direktnog postoji i reflektovani zvuk. Pojam reflektovanog zvuka podrazumeva svu onu zvučnu energiju koja stiže u prijemnu tačku zato što joj zidovi ne dozvoljavaju da ode dalje već se refleksijama vraća i ostaje u prostoriji kružeći po njoj. Zbog konačnosti brzine prostiranja zvuka komponente koje se reflektuju od graničnih površina pre nego što stignu u prijemnu tačku manje ili više kasne u odnosu na direktan zvuk, pa odziv prostorije karakteriše “razvlačenje” energije u vremenu. Za razliku od direktnog zvuka, reflektovana zvučna energija stiže u prijemnu tačku sa svih strana zbog stohastičnosti kretanja refleksija kroz prostoriju.

Rane ili prve refleksije predstavljaju komponente koje slede neposredno posle direktnog zvuka i pri tome su dovoljno razmaknute na vremenskoj osi da se mogu prepoznati kao diskretne pojave. Zahvaljujući svom rasporedu i intenzitetu one su uvek lako prepoznatljive u impulsnom odzivu velikih prostorija, naročito u koncertnim salama i velikim sobama. U malim prostorijama impulsnog odziv je u celini sabijen u vremenu jer se refleksije brzo dešavaju zbog kratkih putanja između sukcesivnih refleksija. Zbog toga se pojedinačne prve refleksije u odzivu malih prostorija teže uočavaju.

Gustina komponenti u impulsnom odzivu sukcesivno se povećava u vremenu, tako da u vremenskom nizu refleksija nakon stizanja direktnog zvuka postoji trenutak kada njihova gustina postaje veoma velika. Tada se više ne mogu razdvojiti pojedine

refleksije kao nezavisne i prepoznatljive komponente odziva. Taj deo u kome su refleksije postale dovoljno guste naziva se reverberacioni deo, odnosno reverberacija (često u žargonu nazvan "reverberacioni rep" odziva). On se kvantifikuje obvojnicom, koja je u linearnoj razmeri eksponencijalna kriva, a kada se odziv predstavlja nivoom zvuka, onda je to prava linija. Ovaj deo odziva opisuje se strminom nagiba kao globalnim pokazateljem i izražava se brzinom opadanja nivoa zvuka u dB/s. Reverberacioni deo impulsnog odziva ne zavisi od pozicije izvora i može da se modeluje statistički.

Raspored ranih refleksija i vreme reverberacije su glavni parametri koji utiču na percepciju zvuka. Efekti koje odziv prostorije može imati na percepciju zasnivaju se na uticajima reflektovanog zvuka i njegove interakcije sa direktnim zvukom. U analizi uticaja refleksija na zvučnu sliku dva su pravca u istraživanjima: ispitivanje efekta pojedinačne refleksije na zvučnu sliku i kako utiče povećavanje broja refleksija koje stižu u nizu.

### 2.3 Uticaj refleksija na zvučnu sliku

Pojava refleksije karakteriše se s tri osnovna podatka: pravac nailaska na slušaoca, relativni nivo u odnosu na nivo direktnog zvuka i relativno kašnjenje u odnosu na trenutak stizanja direktnog zvuka. Kombinacija ova tri parametra proizvodi različite efekte na subjektivni doživljaj zvuka u prostoriji. Razmatranja uticaja refleksije na zvučnu sliku počinju od razmatranja jednostavnih okolnosti kada do slušaoca dolaze samo direktan zvuk i jedna usamljena refleksija da bi se proširila na situacije sa više različitih refleksija.

#### 2.3.1 Koherentnost direktnog zvuka i refleksije

Koherentnost refleksije sa direktnim zvukom je važna osobina refleksije zbog toga što čulo sluha na različite načine procesira koherentne i nekoherentne signale. Kada na uvo istovremeno deluje više signala, stepen njihove koherentnosti je odlučujući za ishod procesiranja zvukova u čulu sluha. Koherentnost dva signala, pa tako i direktnog i reflektovanog zvuka, uobičajeno se definiše normalizovanom kros-korelacionom funkcijom. U opštem slučaju, ova funkcija za dva signala  $x(t)$  i  $y(t)$  je [4]:

$$\Phi_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t)y(t+\tau)dt}{\frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x^2(t)dt \int_{-T}^{+T} y^2(t)dt} = \frac{\overline{x(t)y(t+\tau)}}{x_{eff}y_{eff}} \quad (2.2)$$

Ova veličina predstavlja meru sličnosti između dva signala. Kao mera koherentnosti uzima se vrednost:

$$k = \max|\Phi_{xy}(\tau)| \quad (2.3)$$

koja se naziva stepen koherencije. Dva signala su koherentna ako je  $k = 1$  za svako  $\tau$ . Signali su delimično koherentni ako je  $0 < k < 1$ . Ako je  $k = 0$ , signali su nekoherentni. Koherentnost dva signala se može ostvariti kada su signali identični tako da imaju iste talasne oblike, a različite amplitude, ili kada između njih postoji vremensko kašnjenje nezavisno od frekvencije.

Refleksija od dovoljno velike tvrde površine trebalo bi da bude koherentna sa direktnim zvukom ( $k = 1$ ), jer se tada ne menja talasni oblik signala, već samo dolazi do kašnjenja i eventualnog smanjenja amplitude. U realnim okolnostima pri refleksiji zvuka dolazi do smanjenje koherentnosti direktnog zvuka i refleksije. Ovo je posledica zavisnosti koeficijenta apsorpcije površine od frekvencije ili promene vremenskog oblika signala usled pojave difuzne refleksije.

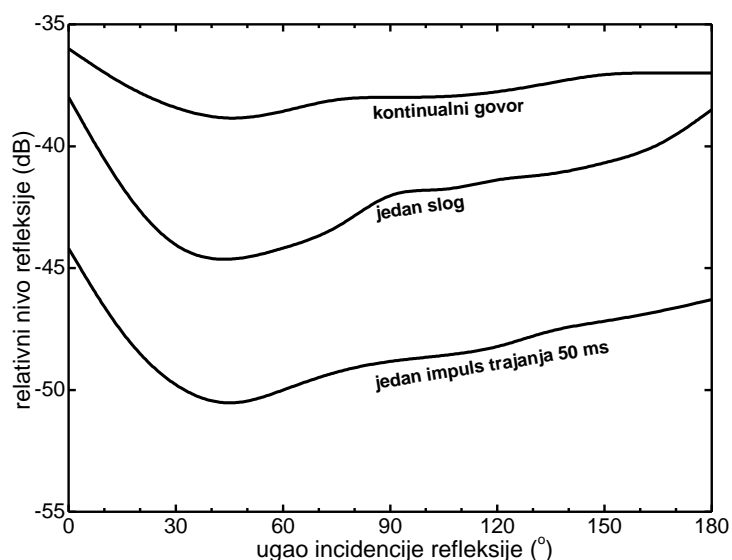
### 2.3.2 Prag primetnost koherentne refleksije

Čujnost refleksija zavisi od njihovog nivoa i pozicije u odnosu na direktni zvuk. Zbog vremenskog maskiranja u uhu za refleksije postoji neka granica primetnosti ispod koje se refleksija ne čuje, odnosno ne stvara primetne posledice u zvučnoj slici. Početak primetnosti refleksije ne znači da se ona odmah doživljava kao nezavistan auditorni događaj, to se dešava tek kada ona svojim atributima premaši prag primetnosti. Prisustvo refleksije se manifestuje u tome što ona na neki način utiče na doživljaj zvuka, odnosno zvučnu sliku, stvarajući jedinstveni auditorni događaj sa direktnim zvukom. Samo u nekim ekstremnim okolnostima refleksija se može doživljavati kao poseban auditorni događaj nezavistan od direktnog zvuka, poznatiji kao eho.

Prag primetnosti refleksije je definisan relativnim nivoom pri kome počinje da se javlja njen uticaj na zvučnu sliku. Međutim, kada će refleksija postati primetna i na koji

način će se manifestovati u zvučnoj slici, ne zavisi samo od njenog nivoa (intenziteta) već i od ostalih atributa: relativnog kašnjenja i pravca nailaska. Na proces percepcije utiču takođe i karakteristike zvučnog signala koji se sluša, pa je prag primetnosti refleksije različit za različite vrste zvukova.

Različiti dijagrami ilustruju prag primetnosti, jedna takva ilustracija preuzeta iz [4] data je na slici 2.6. Granica primetnosti je prikazana dijagramima za tri vrste zvukova različitog trajanja: kontinuirani govor, izgovoreni jedan slog i vrlo kratak impuls (tzv. „klik“) trajanja 50 ms. Prikazani dijagrami pokazuju da su refleksije lakše primetne kada se njihov pravac nailaska razlikuje od pravca nailaska direktnog zvuka (koji ima ugao nailaska od  $0^\circ$ ). Minimum na krivoj granice primetnosti pokazuje da je najveća osetljivost na pojavu refleksije kada ona nailazi pod uglom od oko  $45^\circ$  u odnosu na osu glave, bez obzira na vrstu zvučnog signala.



**Slika 2.6.** Apsolutna granica primetnosti refleksije u funkciji ugla incidencije kada nailazi u horizontalnoj ravni i kasni 50 ms (direktan zvuk nailazi na slušaoca sa nivoom 75 dB) [4]

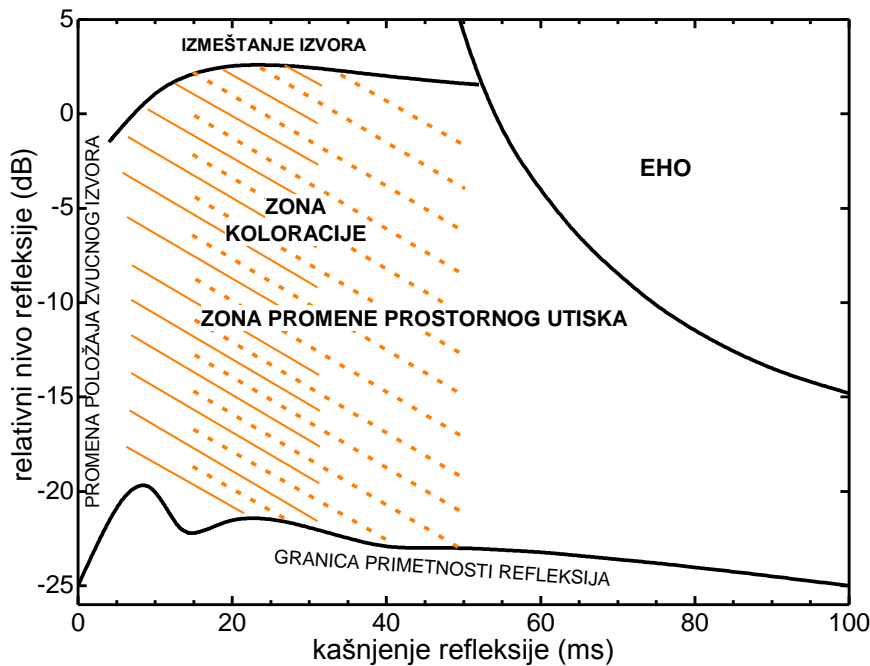
Zaključak koja proizlazi iz prikazanih dijagrama jeste da prag primetnosti zavisi od vremenskog trajanja signala. Što je trajanje signala kraće, to je prag primetnosti niži. Kod kratkog impulsa, koji traje samo 50 ms, refleksija je primetna čak i kada je 50 dB ispod nivoa direktnog zvuka. Sa produžavanjem signala prag se povisava širokopojasnu muzički signal on iznosi oko 20 dB ispod nivoa direktnog zvuka.

### 2.3.3 Mogući uticaj koherentne refleksije na zvučnu sliku

Uticaji koherentne refleksije na zvučnu sliku su brojni, i oni prvenstveno zavise od relativnog nivoa i kašnjenja refleksije u odnosu na direktan zvuk. Takođe, pravac nailaska koherentne refleksija na glavu slušaoca proizvodi određene efekte na zvučnu sliku. U zavisnosti od odnosa ova tri parametra, mogući efekti jedne refleksije na zvučnu sliku su [5]:

1. povećanje nivoa zvuka, a time i glasnosti, koje nastaje kao posledica sabiranja energije direktnog i reflektovanog talasa;
2. spektralna promena označena kao koloracija, koja nastaje superpozicijom refleksije sa direktnim zvukom (stvarajući efekat komb filtra);
3. osećaj prostornosti, često označen i kao osećaj obavijenosti zvukom (eng. *envelopment*) koji nastaje kad refleksija nailazi u horizontalnoj ravni iz bočnih pravaca koji su različiti od pravca nailaska direktnog zvuka (ako refleksija dolazi iz različitog pravca, ali u vertikalnoj ravni, ovaj osećaj se ne javlja);
4. povećavanje jasnosti zvuka, ako refleksija dolazi dovoljno brzo nakon direktnog zvuka (s kašnjenjima ne većim od 50-80 ms),
5. pojava čujnog eha (takozvani „dvostruki zvuk“) ako je kašnjenje refleksije dovoljno veliko i njen relativni nivo dovoljno visok;
6. promena utiska o položaju zvučnog izvora u prostoru ako je refleksija dovoljno jaka (takozvana „sumirajuća lokalizacija“), kada se pozicija zvučnog izvora doživljava da je negde između njegove realne pozicije i pravca iz koga dolazi refleksija.

Zbirni dijagrami koji prikazuju uticaj refleksije na zvučnu sliku u funkciji njenog relativnog nivoa i kašnjenja prikazani su šematski na slici 2.7. Slika prikazuje čujne efekte u zvučnoj slici koje proizvodi pojava jedne koherentne refleksije kada se sluša muzički signal. U slučaju drugačijeg ugla nailaska direktnog zvuka i refleksije na slušaoca krive u dijagramu bi bile nešto drugačije, ali uticaji označeni na slici 2.7. ostaju prisutni.



**Slika 2.7.** Mogući efekti koji nastaju prisustvom jedne refleksije pri slušanju muzike (slučaj kada refleksija dolazi u horizontalnoj ravni pod uglom  $40^\circ$  u odnosu na osu slušaoca) [6]

Sa slike se vidi da postoji granica primetnosti ispod koje refleksija nema uticaja na zvučnu sliku. Za slučaj muzičkih širokopojsnih signala ta granica je na oko -20 dB ispod nivoa direktnog zvuka, koja je viša od granica prikazanih na slici 2.6. Razlozi su u tome što muzički signal ima duže trajanje od impulsa i sloga, a veću ujednačenost nivoa u odnosu na govor. Granica primetnosti refleksije na relativnom nivou - 20 dB ispod nivoa direktnog zvuka određuje kriterijume za akustički dizajn prostora za reprodukciju zvuka pomoću zvučnika.

U zoni iznad granice primetnosti javljaju se različiti uticaji na zvučnu sliku u zavisnosti od relativnog nivoa i kašnjenja refleksije. Refleksije koje stižu u prvih 50 ms nakon direktnog zvuka sa relativno visokim nivoom (višim od nivoa direktnog zvuka) utiču na lokalizaciju zvučnog izvora. Auditorni događaj se tada formira u pravcu iz koga dolazi refleksija, a ne u pravcu izvora direktnog zvuka. Refleksije u ovoj oblasti (do 50 ms) i relativnim nivoom manjim od nivoa direktnog zvuka menjaju prostorni utisak koji se formira, stvarajući izvestan doživljaj prostornosti.

Kada refleksija ima kašnjenje veća od 50 ms i viši relativni nivo (gornji desni ugao dijagrama) ona se percipira kao nezavistan zvučni događaj koji sledi posle direktnog zvuka, tj. eho. To je i najdrastičniji mogući uticaj refleksije na zvučnu sliku. U nekim



okolnostima se i pojava izmeštanja izvora u pravcu dolaska refleksije (zona u gornjem levom delu dijagrama sa slike), takođe podvodi pod pojam eha, jer se i u jednom i drugom slučaju jasno čuje refleksija kao nezavistan auditorni događaj. U takvom posmatranju krive sa slike 2.7. koje pokazuju granicu izmeštanja izvora i granica eha, svode se na jednu jedinstvenu krivu [7]. Oblik i položaj ove krive zavistan je od vrste signala koji se sluša. U zoni kašnjenja manjih od 30 ms, označenoj na slici kao „zona koloracije“, koherentna refleksija menja spektralni sadržaj zvučnog signala [8]. Ona se superponira sa direktnim zvukom stvarajući efekat komb filtra.

### 2.3.4 Komb filter

Komb filter u akustici utiče na percepciju zvuka, tako što pojačava ili smanjuje pojedine harmonike, i posledično tome menja boju zvuka. Komb filter je posledica superpozicije dva signala, a kao rezultat ove superpozicije javljaju se konstruktivna i destruktivna interferencija. Odziv koji prikazuje komb filtriranje ima karakteristične pikove (konstruktivna interferencija) i nule (destruktivna interferencija) u frekventijskom odzivu. Prikazano u linearnoj frekventijskoj skali, oblik odziva izgleda kao češalj, otuda i naziv komb (eng. *comb* - češalj) filter. Nule nastaju kada dva signala nisu u fazi, odnosno kada je kašnjenje između direktnog i reflektovanog zvuka u vremenskom domenu pola talasne dužine. Frekvencija na kojoj se javlja prva nula je data sa  $f = 1/2t$  gde je  $t$  kašnjenje u sekundama. Nule se javljaju na neparnim umnošcima ove frekvencije. Rastojanje između uzastopnih nula ili pikova je  $1/t$ . Iako predstava komb filtra u linearnoj razmeri najuočljivije prikazuje njegovu karakteristiku, predstava u logaritamskoj skali više odgovara onome što čujemo.

Povećanje kašnjenja između direktnog zvuka i reflektovanih komponenti proporcionalno povećava broj konstruktivnih i destruktivnih interferencija. Kada su nule i pikovi gusto raspoređeni (usled velikog rastojanja u putanjama direktnog i reflektovanog zvuka) distorzije u spektru se teže uočavaju zato što ove guste nule i pikovi usrednjavaju čitav spektar. Efekat komb filtra je češći u akustici malih prostorija gde zbog manjeg pređenog puta refleksije stižu do slušaoca odmah nakon direktnog zvuka. U velikim prostorijama refleksije imaju veće kašnjenje što rezultuje u gušćim nulama i

pikovima komb filtra. Veličina koncertnih prostora čini ih relativno imunim na čujno primetne distorzije koje izaziva komb filter.

Jedan od načina da se proceni relativna čujnost efekta komb filtra je da se razmotre kritični opsezi ljudskog uha [3]. (to su opsezi vezani za frekvencijsko maskiranje; širina kritičnih opsega ljudskog uha zavisi od frekvencije, npr. na 1 kHz ona iznosi oko 128 Hz [9] Frekvencija komb filtra od 125 Hz odgovara kašnjenju refleksije od 8 milisekundi, pri ovoj frekvenciji dva pika upadaju u kritični opseg. Pri većim kašnjenjima širina kritičnog opsega je relativno dosta veća u odnosu na periodu pikova u komb filtru pa su efekti po auditorni doživljaj zanemarljivi (promene u odzivu koje nastaju kao posledica komb filtra ljudsko uho neće protumačiti kao promene u boji zvuka ili nešto slično). Ovo potvrđuje činjenicu da su u velikim prostorijama efekti komb filtra nečujni. Takođe, kritični opsezi su mnogo uži na nižim frekvencijama, što ukazuje da su efekti komb filtra mnogo uočljiviji na nižim frekvencijama.

Zanimljivo je da se efekat komb filtra kod stereo sistema generalno ne može opaziti iako postoji razlika u putanji zvukova koji stižu iz različitih zvučnika, a koja bi mogla da dovede do pojave komb filtra. Ovde dolazi do tzv. binauralnog potiskivanja razlike u boji zvuka, za koje ne postoji prihvaćena teorija koja objašnjava ovaj mehanizam [3].

### **2.3.5 Uticaj stepena koherentnosti refleksija na prostorne efekte**

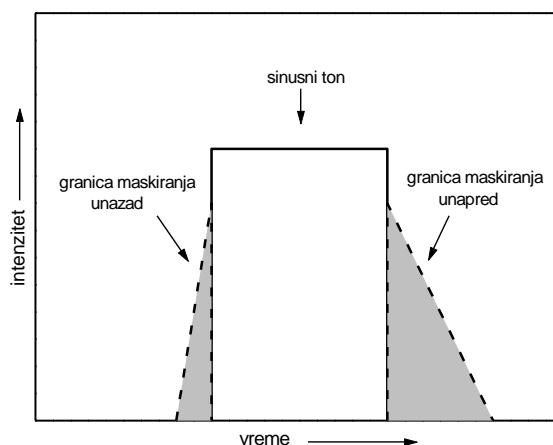
Prethodni prikaz ilustrovao je uticaj pojedinačne, koherentne refleksije na zvučnu sliku. U realnosti prilikom nastanka refleksije (odbijanjem o zid prostorije) dolazi do promene talasnog oblika zvuka pa stepen koherentnosti između direktnog zvuka i refleksija opada. Čulo sluha ima opštu osobinu da smanjenjem koherentnosti među signalima koji dolaze iz različitih pravaca menja neke dimenzije auditornog događaja [2]. Tako i smanjenje koherentnosti između direktnog zvuka i refleksije dovodi do izvesnih promena u percepciji. Najznačajnija promena koja se pri tome javlja jeste širenje auditornog događaja u prostoru. To znači da se položaj zvučnog izvora ne percipira više kao da je tačka u prostoru, već se za slušaoca njegove dimenzije šire. To znači da doživljaj zvučnog izvora postaje veći u prostoru. U literaturi iz oblasti akustičkog dizajna prostorija

ugao u kome se doživljava položaj zvučnog izvora naziva se prividna širina zvučnog izvora (ASW – *apparent source width*).

### 2.3.6 Uticaj grupe refleksija

U realnim okolnostima do slušaoca uvek dolazi više refleksija raspoređenih u vremenu, pa je percepcija auditornog događaja u prisustvu više od jedne refleksije tema od većeg značaja za akustički dizajn prostorija, ali i daleko kompleksnija. Kada do slušaoca dolazi više refleksija relativno ravnopravnih po amplitudama, uticaj svake od njih na zvučnu sliku dominantno zavisi od efekta vremenskog maskiranja. Svaka pojedinačna refleksija čini da se nakon nje prag primetnosti naredne komponente odziva pomera u skladu sa krivom vremenskog maskiranja.

Vremensko maskiranje podrazumeva da pri pobudi čula sluha nekim zvučnim stimulansom postoji izvestan period na vremenskoj osi pre i posle njegovog delovanja u kome drugi zvukovi ne mogu biti registrovani ako nemaju dovoljan intenzitet. Na slici 2.8. je prikazan princip vremenskog maskiranja. U zavisnosti od toga da li su maskirane komponente neposredno pre ili neposredno posle nailaska pobude maskiranje može biti unapred ili unazad.



**Slika 2.8.** Principijelni izgled oblika krive vremenskog maskiranja [1]

Pojava maskiranja nakon prestanka pobude, označena kao maskiranje unapred, može se objasniti vremenom smirivanja oscilacija bazilarne membrane (reverberacija uva). Da bi neka nova pobuda bila registrovana, ona mora biti jača od trenutnog stanja vibracija bazilarne membrane u procesu smirivanja. Trajanje smirivanja oscilacija zavisi od intenziteta prethodne pobude i može biti reda veličine desetina milisekundi.

Pojava maskiranja unazad znači da dolazi do ometanja percepcije zvuka koji je u uvo stigao ranije, ako on nije bio dovoljnog intenziteta da se na putu do centara u mozgu „izbori“ s nadražajem koji je stigao nešto kasnije, ali je znatno jači. Na tom putu do mozga dolazi do „preticanja“ informacija. Interval u kome se javlja ova vrsta maskiranja reda je veličine nekoliko milisekundi.

Rezultati merenja praga primetnosti refleksija pokazali su da nakon jedne refleksije relativnog nivoa -10 dB u odnosu na direktan zvuk postoji vremenski interval nakon te refleksije, koji traje oko 10 ms, u kome zbog maskiranja čulo sluha ne može da percipira eventualni nailazak narednih refleksija. Nakon tog intervala prag primetnosti počinje da se spušta i omogućava uticaj narednih komponenti odziva.

Pri nailasku više refleksija u grupi, prag primetnosti je rezultanta njihovog zbirnog dejstva na čulo sluha (bazilarnu membranu). Eksperimentalni rezultati su pokazali da bi neka među refleksijama koje stižu u grupi ostvarila primetan efekat na kvalitet zvučne slike, potrebno je da bude višeg nivoa, to jest da „iskače“ u odzivu u odnosu na okolinu. Ispitivanja su pokazala da je potrebno povećanje od oko 6 dB u odnosu na nivo okolnih refleksija da bi refleksija na neki način bila „primećena“.

Eksperimenti koji su vršeni s ciljem procene uticaja koherentnosti više refleksija na percepciju zvuka pokazali su da reakcije slušalaca na promene u koherentnosti signala nisu jednake. Zbog toga se takve pojave u percepciji mogu posmatrati samo statistički, kao i sve drugo u domenu funkcije čula sluha. Na osnovu rezultata eksperimenata može se zaključiti da se smanjenjem koherentnosti emitovanih signala smanjuje preciznost prostorne lokalizacije auditornog događaja i dolazi do njegovog rasplinjavanja u prostoru.

## 2.4 Detekcija refleksija

U prethodnom poglavlju je pokazano kako vremenska pozicija refleksija u impulsnom odzivu prostorije može da se koristi za objašnjenje različitih problema povezanih sa subjektivnim i sa objektivnim akustičkim fenomenima. Raspored, gustina i položaj ranih refleksija bitni su za procenu akustičkog kvaliteta prostorije, ali blaga nepreciznost u određivanju položaja refleksija neće dramatično uticati na promenu u percepciji boje zvuka ili prostorne impresije. Računski najjednostavniji metod za identifikaciju vremena nailaska refleksije u impulsnom odzivu je pomoću analize energetske krive. Međutim, reflektovani zvuci retko imaju isti spektar kao i direktni zvuk, uglavnom je sadržaj na visokim frekvencijama redukovano [10]. Ovo za posledicu ima da energetska kriva koja se izračunava pomoću kao što je Hamingov može dovesti do netačne procene čujnosti refleksija, a samim tim i njihove pogrešne detekcije. Poređenje refleksija detektovanih analizom energetske krive i analizom impulsnog odziva dobijenog simulacijom iste prostorije potvrđuje nedostatke korišćenja ETC krive [11].

Ispitivanje impulsnih odziva, posebno onih ograničenog frekvencijskog opsega, može biti olakšano ako se prvo uklone beznačajni detalji [4]. Ovo se sprovodi filtriranjem i „ublažavanjem“ (*smoothing*) impulsnog odziva. Ovaj proces, naravno, unosi neke proizvoljnosti u dobijeni reflektogram koje su vezane za primenjenu vremensku konstantu. Naime, ako je vremenska konstanta suviše mala impulsni odziv neće biti dovoljno „upeglan“, dok ako je prevelika važni detalji u reflektogramu će biti potisnuti. Jedan način da se izbegne ova nesigurnost je da se formira anvelopa (obvojnica) signala impulsnog odziva, korišćenjem sledeće procedure. Označimo sa  $x(t)$  reflektogram (ili bilo koji fizički signal), a sa  $\tilde{x}(t)$  njegovu Hilbertovu transformaciju, signal  $z(t)$  je definisan kao

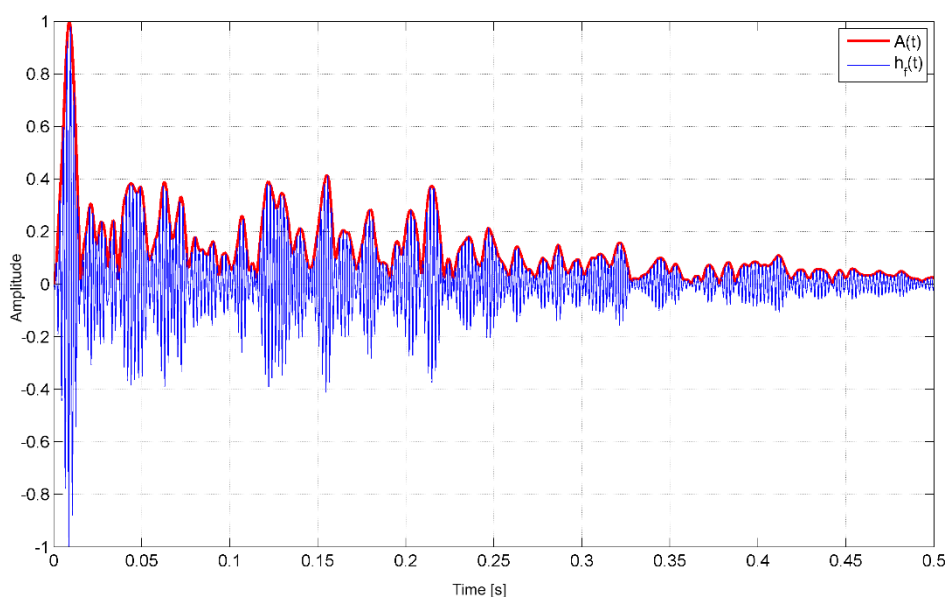
$$z(t) = x(t) + i \cdot \tilde{x}(t) = A(t) \exp[i \cdot \varphi(t)] \quad (2.4)$$

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + i \cdot \tilde{x}^2(t)} \quad (2.5)$$

gde je  $A(t)$  funkcija anvelope (EF), a  $\tilde{x}(t)$  je dobijeno pomoću Furijeove transformacije, FT.

$$\tilde{x}(t) = FT^{-1}[-i \cdot \text{sgn}(f) \cdot FT[x(t)]] \quad (2.6)$$

Anvelopa pomaže da se značajni detalji u reflektogramu vide mnogo jasnije (slika 2.9). Reflektogram se dalje može modifikovati ublažavanjem njegove anvelope kako bi se simulirala integraciona svojstva našeg čula sluha. Sama anvelopa predstavlja prečišćeni impulsni odziv, dodatno ublažavanje odnosno integracija može da se radi konvolucijom sa određenom vremenskom konstantom (u literaturi [4] je za vremensku konstantu predložena vrednost 25 ms).



**Slika 2.9.** Izgled prvih 500 ms impulsnog odziva (označeno plavom bojom) i njegove anvelope (označeno crvenom bojom) [4]

Detekcija refleksija prema ovoj metodi svodi se onda na lociranje vrhova EF koji su veći od nekog definisanog praga percepcije [12]. Uvođenje praga percepcije pojedinačnih refleksija je neophodna aproksimacija kako bi se uprostilo razmatranje jer postoji veliki broj refleksija čiji vrhova su u opsegu od 0 do -25 dB u odnosu na nivo direktnog zvuka. Nedostatak ovog metoda je u tome što se izdvajaju samo informacije o amplitudi/intenzitetu refleksija.

Jedan od načina za detekciju refleksija u impulsnom odzivu (ovde upotrebljen u svrhu određivanja zapremine prostorije) opisan u [13] je korišćenje adaptivnih pragova nalik onima koji se koriste u obradi slike. Pretpostavka je da su intenziteti ranih refleksija veći od prosečne vrednosti susednih refleksija za neki faktor  $\epsilon$ . Korišćenjem srednje vrednosti prosečna vrednost lokalnog intenziteta u trenutku  $t$  može se izračunati kao

$$\mu_{loc}(t) = \frac{1}{T_{\mu_{loc}(t)}} \int_{t-T_{\mu_{loc}(t)}/2}^{t+T_{\mu_{loc}(t)}/2} |h(\tau)| d\tau \quad (2.7)$$

gde je  $T_{\mu_{loc}(t)}$  vreme usrednjavanja. Binarni signal koji sadrži izdvojene refleksije može se onda dati izrazom:

$$h_{peaks}(t) = \begin{cases} 0, & \forall h(t) < \varepsilon \mu_{loc}(t) \\ 1, & \forall h(t) \geq \varepsilon \mu_{loc}(t) \end{cases} \quad (2.8)$$

Ovde je  $\varepsilon$  parametar koji se koristi za utvrđivanje vrednosti praga. U pomenutom radu za detekciju ranih refleksija korišćene su vrednosti  $T_{\mu_{loc}(t)} = 2 \text{ ms}$  i  $\varepsilon=2$ . Iako se za modelovane prostorije ovaj metod pokazao kao relativno uspešan, eksperimentalno dobijeni rezultati pokazali su da predloženi algoritam za većinu realnih prostorija ne omogućava dobru identifikaciju spekularnih refleksija. Osim direktnog zvuka ovaj metod uspeva da pouzdano otkrije jednu do pet prvih refleksija.

Detekciju koherentnih i nekoherentnih refleksija moguća je i ispitivanjem stepena korelacije refleksija sa direktnim zvukom. U radu [14] opisana je detekcija refleksija pomoću korelacije. Prema ovom istraživanju identifikovane su tri oblasti u početnom delu impulsnog odziva (refleksije koje se javljaju u prvih nekoliko milisekundi nakon direktnog zvuka utiču na lokalizaciju zvučnog izvora, oblast od 30-50 ms utiče na fuziju, prepoznavanje tonova, dok refleksije koje nastupaju nakon 60 ms odgovorne su za eho i ambijent). Koherentnost refleksija sa direktnim signalom različito utiče na percepciju refleksija u ove tri oblasti. Kao mera koherentnosti refleksija korišćena je korelacija koja pokazuje sličnost između signala. Za refleksiju koja je samo zakašnjena kopija direktnog zvuka stepen korelacije je blizak 1, kako se menja oblik i trajanje refleksija usled odbijanja o zid prostorije, stepen korelacije se menja. Ovo istraživanje se ograničilo samo na detekciju jedne dominantne refleksije.

Korišćenje direktne komponente impulsnog odziva kao osnove za proveru u algoritmu za pretragu podudarnosti („*matching pursuit algorithm*“) predloženo je u radu [15]. Opravdanje za korišćenje ovog algoritma leži u pretpostavci da postoji visoki stepen korelacije između direktnog zvuka i impulsnog odziva prostorije. Impulsni odziv prostorije se ovde posmatra kao superpozicija kopija direktnog zvuka emitovanih istovremeno od strane izvora i filtriranih u refleksijama od površina. U prostorijama

nepравilnog oblika energija se nakon određenog perioda vremena (vreme mešanja) podjednako raspoređuje u prostoriji. Stoga, se i za broj nailazaka pretpostavlja da eksponencijalno raste s vremenom. Međutim, nije testirano u kojoj meri su refleksije čija su vremena pristizanja detektovana, ujedno i prve refleksije od značaja u impulsnom odzivu.

Činjenica da se nakon svake refleksije od površine prostorije menja „oblik“ refleksije i ona sve manje liči na direktni zvuk otežava detekciju refleksija u metodima koji su zasnovani na stepenu korelacije refleksija s direktnim zvukom. U literaturi su zato predloženi i postupci [16,17] koji za potrebe korelacije modifikuju direktnu komponentu zvuka kako bi poboljšali detekciju refleksija čiji se oblik razlikuje u odnosu na direktni zvuk ili se preklapaju sa drugim refleksijama. Modifikovanje direktnog zvuka se radi menjanjem oblika direktne komponente zvuka u vremenu. Predložene modifikacije navodno smanjuju broj sporednih (manje bitnih refleksija).

Kako bi se obezbedila preciznija detekcija refleksija predloženi su i metodi koji jednodimenzioni signal impulsnog odziva transformišu u vremensko-frekvencijski domen. U više istraživanja korišćena je *wavelet* transformacija za detekciju refleksija. Ograničenja koja ima spektrogram (vezano za rezoluciju..) u analizi signala impulsnog odziva prostorije mogu da se prevaziđu korišćenjem kontinualne *wavelet* transformacije (CWT) koja ima osobinu da važne informacije o signalu koncentriše u određene regione. Dekompozicija impulsnih odziva korišćenjem kompleksnih *wavelet*-a predložena je u radu [18,19].

Za rešavanje problema lociranja prvih refleksija u binauralnim impulsnim odzivima upotrebljene su kontinualna i *cross-wavelet* transformacija [20]. Za veštačke impulsne odzive ovaj metod se pokazao dosta preciznim i pronalazi skoro sve rane refleksije prvog i drugog reda. Kao potvrdu uspešnosti autori navode da predloženi algoritam precizno lokalizuje najmanje 6 refleksija prvog reda. Međutim, performanse sa realnim impulsnim odzivima nisu procenjene jer tačne lokacije svih refleksija nisu poznate.

Spektralni sadržaj refleksija je uzet u obzir u metodu koje su isti autori predložili [21,22] a koji kombinuje kontinualnu *cross-wavelet* transformaciju i jedan od postupaka



segmentacije za detekciji prvih refleksija. Pojedinačne refleksije se lokalizuju u vremenu i frekvenciji pomoću kontinualne *cross-wavelet* transformacije (XWT) izmerenog binauralnog impulsnog odziva. Metod dosta precizno može da segmentira refleksije iz simuliranih impulsnih odziva, ali procena u impulsnim odzivima iz realnih prostorija nije zadovoljavajuća. Ovo je posledica toga što i pre vremena mešanja gustina refleksija raste pa ima sve više preklapanja između refleksija u vremenskom i frekvencijskom domenu što dovodi do problema u segmentaciji refleksija i njihovoj detekciji. Pitanje granica analize refleksija u binauralnom impulsnom odzivu prostorije autori ostavljaju otvoreno, pošto je refleksije moguće segmentirati samo do vremena mešanja nakon čega zvučno polje postaje manje ili više difuzno.

Još jedna od mogućih opcija za detekciju refleksija u impulsnom odzivu predstavlja analiza energije pomoću vremenskih prozora kratkog trajanja. Činjenica da je prosečan protok energije u difuznom polju jednak nuli [4] može da se koristi za detekciju refleksija, ako bi se one malo slobodnije posmatrale kao ravanski talas a reverberacija kao difuzno polje. Najjednostavniji način za detekciju da li određeni prozor sadrži refleksiju je da se poredi njegova energija sa energijom njegove okoline, tj. korišćenjem lokalnih i globalnih prozora [23,24].

Statistički pristup u određivanju vremena nailaska refleksija u impulsnom odzivu može da prevaziđe probleme sa energetsom analizom korišćenjem statistika impulsnog odziva koje su višeg reda. Reverberacija je deo impulsnog odziv gde su refleksije takve da se signal zvučnog pritiska može smatrati stohastičkom funkcijom sa normalnom raspodelom i srednjom vrednošću nula [25,26, 27]. Stepenu u kome deo impulsnog odziva ima normalnu raspodelu može da se koristi za određivanje početka reverberacije. Prisustvo normalne raspodele može da se meri prosečnom fluktuacijom efektivne vrednosti impulsnog odziva ili kurtozismom. Metod koji je zasnovan na analizi lokalnog kurtozisa predložen u [11] koristi statističke metode za identifikovanje regiona u impulsnom odzivu gde raspodela nije normalna. Vremenska rezolucija lokalnih vrednosti kurtozisa, koja direktno utiče na preciznost detekcije refleksija, zavisi od opsega (prozora) na kome se kurtozismom proračunava. Duži prozori ublažavaju finu strukturu koju ima impulsni odziv, dok kratki prozori takođe umanjuju vrednost lokalnog kurtozisa.

Korišćenje dva prozora različite dužine za izračunavanje kurtozisa dalo je dobre rezultate na ispitivanim impulsnim odzivima iz simuliranih i realnih prostorija. Veličina prozora na kojima se radi statistička analiza povezana je sa gustinom refleksija i frekvencijom odabiranja, metod se pokazao pouzdan za gustine koje su manje od 1 refleksije po ms.

Kao što je već pomenuto u literaturi [2,4,28] impulsni odziv većine realnih prostorija ne sastoji se samo od 4 ili 6 značajnih refleksija već od mnogo više i sve one u određenoj meri utiču na način kako slušalac doživljava zvuk u prostoriji. Zato su i neophodni bolji algoritmi za detekciju ranih refleksija u impulsnom odzivu.

## 2.5 Subjektivni i objektivni akustički parametri

U većini slučajeva krajnji konzument akustike je slušalac koji hoće da uživa u sadržaju koji se izvodi/reprodukuje u prostoriji. Taj slušalac ne zahteva da vreme reverberacije po svaku cenu ima određene vrednosti na različitim frekvencijama niti insistira na tome da zvučna energija na njegovom sedištu ima određenu distribuciju pravaca. Umesto toga on očekuje da prostorija sa svojom akustikom podržava sadržaj koji on sluša. Da bi akustički dizajner zadovoljio zahteve prosečnog slušaoca mora da zna vezu između fizičkih svojstava zvučnog polja i subjektivne impresije slušaoca. U svrhu ovoga, definisan je skup fizičkih parametara koji su manje ili više korelisani sa određenim aspektima subjektivnog doživljaja prilikom slušanja.

Izdvajanje značajnih parametara fizičkog zvučnog polja i ispitivanje njihove važnosti u prošlosti je bilo, i još uvek je, predmet brojnih istraživanja. Nažalost rezultati ovih istraživanja ne formiraju nedvosmislenu sliku, nasuprot onome što smo navikli u potpuno fizičkim delovima akustike. Ovo se pripisuje nedostatku generalno prihvaćenog rečnika za opisivanje subjektivnih impresija i velikom uticaju psiholoških osobina na čulo sluha, uključujući i način na koji se čujne senzacije obrađuju u mozgu. Ovo se takođe može pripisati i navikama slušalaca i u krajnjoj meri njihovoj ličnoj estetici.

Akustika prostorija doživela je veliki razvoj od vremena Sabina koji je definisao prvi akustički parametar, vreme reverberacije. Ovaj napredak se svakako ogleda i u broju akustičkih parametara kojima se danas opisuju prostorije sa akustičkog stanovišta. Tabela u nastavku, preuzeta iz [29], u kojoj je data lista akustičkih parametara pokazuje koliko se parametara pojavilo u poslednjih 100 godina. U zavisnosti od toga šta primarno kvantifikuju i kako se izračunavaju ovi parametri se mogu grupisati i prema tri kriterijuma: vreme, energija ili prostornost [30].

Tabela 2.2. Hronološka lista akustičkih parametara

Godina	Parametar	Autor	Kriterijum
1922	Reverberation Time	Sabine	vreme
1930	Reverberation Time Eyring	Eyring, Norris	vreme
1933	Reverberation Time Milingtone	Milingtone, Sette	vreme
1953	D50-Definition	Thiele	energija
1953	D80 -Definition	Thiele	energija
1959	Reverberation Time Fitzroy	Fitzroy	vreme
1960	SDI, Surface Diffusivity Index	Haan, Fricke	prostorni
1960	SI, Spatial Impression	Baron, Marshall	prostorni
1961	Signal-to-noise ratio	I. Lochner ; Y Burger	
1962	Br, Brilliance	Beranek	vreme
1962	Timbre, BR	Beranek	vreme
1962	Texture	Beranek	vreme
1965	R -reverberance	Beranek	
1965	Hallmas	Shultz	energija
1965	Steepness	Schroeder	vreme
1966	Hallabstand	Reichardt, Schmidt	energija
1967	ASW, apparent source width	Marshall	
1968	BQI, Binaural Quality Index	Keet	
1970	EDT, Early Decay Time	Jordan	vreme
1971	T <sub>s</sub> Center Time	Kurer R.	energija
1971	LF, Lateral Fraction	Baron, Marshall	prostorni
1971	Alcons	Peutz	
1973	K, Korrelationsgrad	Gottlob	prostorni
1974	C50, Clarity 50, speech	Reichard Y Abdel Alim	energija
1974	C80-Clarity 80, music	Reichard Y Abdel Alim	energija
1974	IACC, Interaural Cross Correlation	Schroeder/ Ando	prostorni
1975	Inversion Index	Jordan	vreme
1976	Reverberation Time, Kuttruff	Kuttruff	vreme
1976	G-Strenght	Lehmann	energija
1976	S-Spectral Density	Eyshold	energija
1979	ITDG	Davis	vreme
1980	STI, Speech Transmission Index	Steenek, Houtgast	
1980	C7-direct sound level	Ahnert	
1980	Lateral efficiency	Jordan	prostorni
1982	Rise Time	Jordan	
1982	EEB, Early Energy Balance	Jordan	energija
1983	ITDG2	Ando	vreme

1985	RASTI, Rapid Speech Transmission Index	Steenek, Houtgast	
1986	EK speech	Dietsch	
1986	EK music	Dietsch	
1988	RECC, Reflective Energy Cumulative Curve	Toyota	vreme
1989	LFC, lateral fraction coefficient	Kleiner	prostorni
1989	EEL, Early Ensemble Level	Gade	
1995	LEV, Listener Envelopment	Bradley, Soloudre	
1999	Reverberation Time Neubauer	Neubauer	vreme
2004	[1-IACC <sub>E3</sub> ]	Beranek	

Kao što je već pomenuto, tokom 20. veka predložen je veliki broj parametara za objektivnu karakterizaciju akustičkih svojstava prostorije. Nemaju svi pobrojani parametri podjednaku težinu i univerzalnu promenljivost. Standard ISO 3382 [31] je ovaj skup parametara sveo na pet, za slušaoca bitnih, subjektivnih aspekata sa njihovim odgovarajućim objektivnim parametrima: nivo zvuka, reverberantnost, jasnoća, očigledna širina zvučnog izvora i obavijenost zvukom.

## 2.6 Difuznost

### 2.6.1 Difuzno zvučno polje

U akustici prostorija difuzno zvučno polje igra ulogu standardnog polja [4]. Ono je od posebne važnosti za celokupnu akustiku prostorija, jer zvučno polje u realnim prostorijama može sasvim dobro da se aproksimira zvučnim poljem sa uniformnom distribucijom zvuka po pravcima. Iako zvučno polje u koncertnim salama nije kompletno difuzno, zbog prisutnih nepravilnosti u obliku realne prostorije uspostavljeno zvučno polje i njegova struktura usmerenosti uvek više liči na difuzno polje nego na ravanski talas. Pojedinačni ravanski talas se retko kad sreće u realnim situacijama, i u određenom smislu difuzno zvučno polje se može smatrati komplementom ravanskom talasu.

Stacionarno zvučno polje se naziva difuznim ili izotropnim ako njegova raspodela po pravcima (*directional distribution*) ne zavisi ni na koji način od pozicije u prostoriji (odnosno, ima istu vrednost u svim pravcima). U difuznom zvučnom polju (bar u stacionarnim uslovima) gustina energije je ista u svim tačkama i protok energije je isti u svim pravcima [32,33]. Ovo je idealizovano zvučno polje koje se u realnim uslovima

dostiže u manjoj ili većoj meri. Posmatrano kroz prizmu ravanskih talasa može da se kaže i da se difuzno zvučno polje sastoji od beskonačno mnogo nekorelisanih ravanskih talasa različitih amplituda i faza, čiji su intenziteti ravnomerno raspodeljeni u odnosu na pravac. Rezultantni akustički intenzitete je stoga jednak 0.

Na osnovu prethodno izrečenog očigledno je da difuzno zvučno polje neće biti uspostavljeno u prostorijama čiji zidovi imaju tendenciju da koncentrišu reflektovanu zvučnu energiju u određene delove prostorije. Nasuprot tome, prostorije koje imaju izrazito nepravilan oblik doprinose uspostavljanju difuznog zvučnog polja tako što neprekidno vrše redistribuciju energije u svim mogućim pravcima [4]. Posebno efikasne u ovome su prostorije sa akustički „grubim“ zidovima, tj. sa nepravilnostima od kojih se zvučna energija raspršava (*scatter*) u širokom opsegu pravaca.

Iskustvo sa različitih problema u akustičkom dizajnu je pokazalo da je difuznost efikasan alat za kontrolu akustičkog odziva prostorije [34]. Značaj pojma difuznog zvučnog polja ogleda se i u tome što je ono neophodan preduslov za analizu pomoću statističke teorije. Statistička teorija podrazumeva postojanje difuznog i homogenog zvučnog polja, što je ispunjeno ako:

- u svakom trenutku u svaku tačku prostora dolazi mnoštvo talasa koji su prethodno prešli različite puteve, pa zbog toga imaju različite amplitude i faze,
- i svi pravci nailaska talasa i sve vrednosti njihovih faza podjednako su verovatni.

U realnim okolnostima ovi preduslovi nisu uvek zadovoljeni, pa je i tačnost u primeni statističkog modela povezana sa tim. Ako je zvučno polje difuzno i homogeno, intenzitet reflektovanog zvuka po čitavoj prostoriji je konstantan. Izuzetak je samo u neposrednoj blizini izvora, gde će uvek direktan zvuk biti dominantan [35].

### **2.6.2 Definicije difuznog zvučnog polja**

Još od prvih radova Beraneka (*Music acoustics and architecture*, [36]) brojni subjektivni termini su uvedeni kao važni faktori za procenu akustičkog kvaliteta prostora u kojima se izvodi muzika. U istraživanjima koja su usledila razvijene su različite objektivne mere koje su korelisane sa ovim prvobitno predloženim atributima. Međutim, difuzija je ostala bez objektivne mere koja je opisuje uprkos brojnim pokušajima da se definiše mera difuznosti zvučnog polja.

Sabinova definicija difuznog stanja u prostoriji podrazumeva da su ispunjeni sledeći uslovi: da je trajanje rezidualnog zvuka isto u svim delovima prostorije, da je približno nezavisno od pozicije izvora i da je efikasnost apsorbera u normalnim uslovima nezavisna od pozicije.

Definicija koju nudi Beranek kaže da je zvučno polje difuzno ako se u bilo kom trenutku, zvuk „kreće“ po prostoriji podjednako u svim pravcima. Kutruf u svojem objašnjenju [37] kaže da je zvučno polje difuzno ako su amplitude uniformno raspodeljene po svim pravcima nailaska zvuka tako da ista količina energije pristiže po jedinici vremena i površine. Takođe, pretpostavlja da su faze slučajno raspodeljene tako da se interferencija može zanemariti. Šulc (*Schultz*, [38]) koji je pokušao da objedini različite definicije daje sledeće uslove za difuzno zvučno polje: uniformna gustina ukupne energije u svim tačkama prostorije, jednaka verovatnoća protoka energije u svim pravcima i superpozicija beskonačno mnogo ravanskih talasa svih mogućih faza i pravaca prostiranja. Na osnovu definicija Beraneka, Kutrufa i Šulca mogu da se formulišu kriterijumi pomoću kojih može da se proceni difuznost zvučnog polja:

- a) Amplituda dolaznih talasa je ravnomerno raspoređena iz svih dolaznih uglova
- b) Jednaka energija pristiže iz svih pravaca tokom određenog perioda vremena
- c) Odnos faza dolaznih talasa je slučajno raspoređen tako da se uticaj faze može zanemariti

### **2.6.3 Metode za procenu difuznosti**

Difuzno zvučno polje je pojam koji se često koristi (i pretpostavlja) u standardnim akustičkim merenjima. Međutim, do danas još uvek nije potvrđeno da li je difuzno zvučno polje samo po sebi parametar akustičkog kvaliteta ili je samo stanje koje osigurava validnost jednostavnih reverberacionih formula koje su u opštoj upotrebi [4]. Ova dilema je najviše posledica toga zato što je direktno merenje difuzije komplikovano i zahteva dosta vremena. Shodno tome, ne postoji puno dostupnih podataka o difuziji, prikupljenih u koncertnim ili nekim drugim velikim halama. Najviše napora u istraživanjima je bilo usmereno na kvantifikovanje uniformnosti zvučnog polja u reverberacionim komorama za potrebe merenja apsorpcije. Manje rada je bilo usmereno ka ispitivanju strukture zvučnog polja u malim prostorijama kao što su studiji

i režije. Ovo je delom i posledica toga da je dosta teže ostvariti difuzno polje u malim prostorijama. Ipak, eksperimentalno je potvrđeno da se i malim prostorijama uniformnost zvučnog polja može značajno unaprediti korišćenjem difuzora. Efekti difuznih refleksija su dvojaki, prostorno širenje i vremensko razvlačenje.

Difuznost kao parametar kojim bi se kvantifikovalo prisustvo difuznog zvučnog polja još uvek traži svoju pravu definiciju i način merenja (meru), uprkos mnoštvu predloga i pokušaja. U nastavku je dat pregled najznačajnijih metoda za procenu difuznosti zvučnog polja.

### 1) Frekvencijska neregularnost/nepravilnost

U ovoj metodi, pretpostavlja se da se difuznost zvučnog polja u prostoriji može utvrditi merenjem neregularnosti frekvencije. Istorija ovog metoda počinje istraživanjima koja su se bavila merenjem prenosne karakteristike prostorije kontinuiranim menjanjem frekvencije tona koji se emituje sa zvučnika. Ova ideja [39] podrazumeva korišćenje mere frekvencijske nepravilnosti,  $F_v$  (*Frequency Irregularity*) izražene u dB/Hz. Na predloženi kriterijum ( $F_v$ ) utiče geometrija prostorije i njena apsorpcija, pa shodno tome  $F_v$  može biti mera difuznosti zvučnog polja u prostoriji. Mera  $F_v$  je izračunata iz prenosne karakteristike prostorije merene u opsezima od po 25 Hz. Eksperimentalni rezultati su pokazali da prostorije nepravilnog oblika daju glatku, relativno ravnu krivu, dok prostorije koje su u osnovi pravougaone i sa dva „čvrsta“ neobrađena zida imaju krive sa jednim ili dva jaka pika. Ove nepravilnosti u obliku krive posledica su različite gustine modova (sopstvenih učestanosti) prostorije.

Istraživanje sa ovim predmetom delimično je nastavljeno u radu [40] testiranjem ponašanja pojedinih parametara (prostorna i frekvencijska varijacija vremena reverberacije, nepravilnosti u opadanju nivoa zvuka i obliku krive opadanja) kada se u prostoriju unesu difuzori i apsorberi. Varijacija krive slabljenja posmatrana u intervalima od po 50 Hz je pokazala da je ona mnogo ravnija i bez velikih varijacija kad su difuzori prisutni u prostoriji.

## 2) Merenja usmerenosti u zvučnom polju

Direktni način da se izmeri difuzija zvučnog polja svakako je utvrđivanje (prostorne) distribucije protoka zvučne energije. Distribucija energije je funkcija prostornih koordinata pod uslovom da je polje stacionarno, i ona se može utvrditi skeniranjem po svim pravcima sa usmerenim mikrofonom dovoljno velike ugaone rezolucije. Usmereni mikrofoni uključeni u svim mogućim pravcima u difuznom zvučnom polju trebalo bi da da isti izlaz nezavisno od pravca u kome je usmeren. Kao kvantitativna mera izotropnosti zvučnog polja u radu [41] uvedena je „usmerena difuznost“ (*directional diffusion*), definisana formulom:

$$d = (1 - m/m_0) \cdot 100\% \quad (2.9)$$

ovde su  $m$  i  $m_0$  prosečna apsolutna devijacija intenziteta zvuka izmerenog po svim pravcima u prostoriji i anehoičnoj komori, respektivno. Parametri  $m$  i  $m_0$  se izračunavaju tako što se prvo izračuna srednja vrednost ( $M$ ) i prosečna devijacija ( $\Delta M$ ) nivoa zvuka po svim pravcima. Vrednost za  $m$  se onda dobija kao odnos  $m = \Delta M / M$ , a  $m_0$  na isti način ali u prostoriji bez refleksija, tj. anehoičnoj komori. Deljenje  $m/m_0$  predstavlja određenu normalizaciju, pa je prema tome u savršeno difuznom zvučnom polju  $d = 100\%$ , dok u zvučnom polju koje se sastoji od jednog ravanskog talasa usmerena difuznost postaje 0. Ova jednostavna procedura ipak ne eliminiše u potpunosti uticaj karakteristika mikrofona, stoga eksperimentalno izračunate vrednosti  $d$  su uporedive jedino kad su dobijene pomoću sličnih mikrofona. Direkciona distribucija izmerena na ovaj način za koncertne dvorane i studije u radu [41] varirala je u granicama između 35% i 75% bez neke jasne tendencije.

## 3) Korelacioni koeficijent

Indirektni način za utvrđivanje difuznosti je računanje korelacionog koeficijenta. Ovaj metod koristi činjenicu da difuzija osim podjednake prostorne raspodele refleksija podrazumeva i njihovu uniformnost. Stoga je za kvantifikovanje difuznog zvučnog polja (odnosno kao mera difuznosti) predložen korelacioni koeficijent dva zvučna pritiska izmerena u dve tačke prostorije pomoću dva razdvojena mikrofona.



$$\psi = \frac{\overline{p_1 \cdot p_2}}{\sqrt{\overline{p_1^2} \cdot \overline{p_2^2}}} \quad (2.10)$$

Na osnovu prethodne formule za korelacioni koeficijent dva zvučna pritiska, u radu [42] izveden je korelacioni koeficijent R kao mera difuznosti zvučnog polja:

$$R = \psi(r) = \frac{\sin kr}{kr} \quad (2.11)$$

Gde je k talasni broj  $2\pi/\lambda$ , a r rastojanje između mikrofona. Polje se smatra difuznim kada izmereni rezultati prikazuju blisku korelaciju sa krivom R. Svako odstupanje od ove krive, tj. izmerenih korelacionih koeficijenata znači nedostatak difuzije. Zaključak koji je proistekao iz ovog istraživanja je, da su u difuznom polju pobude dva mikrofona nezavisne jedna od druge kada se dostigne određeno rastojanje, tj. kada korelaciona funkcija postaje 0. Ovaj rezultat je potreban ali ne i dovoljan uslov za postojanje difuznog polja. Predložena mera korišćena je i u istraživanju [43]. Zaključak proistekao odavde je da, procena difuznosti postaje dosta teža kada rezultati počnu značajno da variraju u odnosu na pretpostavljeni teorijski ideal, iako predstavljanje izmerenih rezultata u odnosu na teorijsku krivu pruža izvesnu predstavu o stepenu difuznosti zvučnog polja.

#### 4) IACC

Subjektivni parametri kao što su obavijenost slušaoca zvukom (*listener envelopment*) i širina zvučnog izvora mogu da se iskoriste kao mere koje impliciraju da je difuzno polje prisutno u prostoriji.

Širina zvučne slike predstavlja važan faktor kvaliteta zvuka u koncertnim salama, pa je kao mera kvaliteta binauralnog slušanja uveden termin „očigledna širina zvučnog izvora“, (ASW). Početna istraživanja na ovu temu dovela su do zaključka da visoko koherentni signali odgovaraju subjektivnom doživljaju „užeg“ zvučnog izvora. Ova ideja iskorišćena je u [44] za uvođenje IACC parametra kao mere difuznosti zvučnog polja. Pretpostavka je da u difuznom zvučnom polju signali stižu do svakog uva po slučajnoj raspodeli što za rezultat ima nultu korelaciju između signala izmerenih na svakom uvetu. Odavde je kao mera difuznosti zvučnog polja izvedena vrednost 1-IACC. Poželjne su male

vrednosti za IACC, jer se IACC smanjuje kako se stepen difuznosti povećava. U kasnijim radovima [45] je ova mera korigovana tako što je uklonjeno prvih 80 ms iz izmerenog impulsnog odziva. Glavni razlog za ovo je zato što se impulсни odzivu prvih 80 ms sastoji od ranih i do neke mere diskretnih refleksija dok zvučno polje posle 80 ms je reverberantno polje.

### 5) Vreme mešanja

Jednaka distribucija energije u prostoriji smatra se karakteristikom difuznog polja. Pretpostavka je da će se u prostoriji sa savršeno reflektujućim zidovima nakon određenog vremena energija koju emituje izvor biti uniformno raspodeljena po prostoriji. Stoga je kao jedan od indikatora uspostave difuznog polja u prostoriji predloženo vreme mešanja (*mixing time*) prostorije [46], odnosno vreme za koje se dostiže uniformna raspodela energije. Aproksimacija vremena mešanja može biti izračunata pomoću zapremine prostorije ( $t_{mixing} = \sqrt{V}$ , izvedeno na osnovu veze između gustine modova u zvučnom polju i zapremine prostorije).

Predložene mere za procenu vremena mešanja date u [47] obuhvataju korišćenje ekstenzivne Furijerove transformacije (*extensive Fourier Transform* - XFT) i kurtozisa. Autori [47,48] prednost daju XFT kao pouzdanijem metodu. Iako vreme mešanja implicira postojanje difuznog polja, ono ne daje informacije o stepenu difuznosti.

Na bazi vremena mešanja, u radu [49] uvedena je objektivna mera nazvana ocena osetljivosti (*sensitivity rating*),  $\Gamma$ . Ovaj akustički parametar višeg reda može da se koristi za kvantifikovanje osetljivosti impulsnog odziva na promenu položaja izvora i povezan je sa stepenom difuznosti zvučnog polja. Eksperimentalno je potvrđeno u ovom radu da dodavanje difuznih elemenata u prostoriju dovodi do povećanja parametra  $\Gamma$ . Međutim, dodatna istraživanja su neophodna kako bi se potvrdila primenljivost predloženog parametra.

### 6) Šrederova frekvencija

Jedan od metoda za utvrđivanje da li je difuzno polje uspostavljeno u prostoriji je zasnovan na pretpostavkama koje je formulisao Šreder (*Schroeder*) [50]. Uzevši u obzir da je reč o (relativno) velikim prostorijama, pretpostavljeno je da iznad određene

frekvencije broj nezavisnih modova prostorije, koji su istovremeno pobuđeni, dovoljan da stvori kompleksni zvučni pritisak koji ima Gausovu raspodelu. Ova vrednost je postala poznata kao Šrederova frekvencija, a definisana je formulom:

$$f_c > 4000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.12)$$

gde je T, vreme reverberacije ( $T_{60}$ , s), a V zapremina prostorije ( $m^3$ ). Konstanta (4000) je u radu [50] revidovana na 2000.

Primenom Sabinove formule za vreme reverberacije i konvertovanjem frekvencije u talasnu dužinu, dobija se formula koja uz pomoć jedne promenljive može da izrazi ovaj prelazak iz zvučnog polja u kome dominiraju modovi u ono koje je dominantno stohastičko:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{A}{6}} \quad (2.13)$$

ovde je A, apsorbujuća površina ( $m^2$ ).

Druga pretpostavka koja je uvedena je da rastojanja između predajnika i prijemnika takvo da je „direktan prenos snage zanemarljiv“, odnosno da dominira reflektovani zvuk. Ovo rastojanje je definisano kao rastojanje difuznog polja  $r_c$ , izraženo formulom:

$$r_c = \sqrt{\frac{\ln 10^6 V}{4\pi c T}} \quad (2.14)$$

Treća Šrederova pretpostavka je da prostorija ima jednostavnu geometriju kako bi se omogućila primena teorije likova. Aproksimacijom broja refleksija koja za vreme t nakon direktnog zvuka stižu u neku tačku prostorije izveden je prosečan vremenski interval između refleksija,  $\Delta t$ . Polje se u tački merenja prema Šrederu može smatrati difuznim ako su ispunjeni uslovi da je:  $\Delta t$  manje od vremena slabljenja eha ( $T/\ln 10^6$ ) i da refleksije stižu iz mnoštva različitih pravaca. Na osnovu ovoga definisano je vreme/interval difuznog polja:

$$t_c = \sqrt{\frac{\ln 10^6 V}{4\pi c^3 T}} \quad (2.15)$$

Međutim, prema [51], upitno je koliko ovako definisano vreme  $t_c$  obezbeđuje uslove za postojanje difuznog polja kada prostorija ima složenu kombinaciju difuznih i apsorbujućih materijala.

Na osnovu pobrojanih pretpostavki Šreder je predložio sledeće uslove za nastanak difuznog polja:

$f_c$  – frekvencija iznad koje se smatra da je zvučno polje difuzno

$t_c$  – vremenski interval impulsnog odziva prostorije posle koga se polje smatra difuznim

$r_c$  – rastojanje od izvora nakon koga se pretpostavlja da u zvučnom polju dominira reverberantni (difuzni) zvuk.

Kriterijumi koje je definisao Šreder kao uslove za postojanje difuznog polja u prostoriji bazirani su na nizu uprošćavanja (podrazumevaju jednostavnu geometriju prostorije, prihvatljiv nivo preklapanja modova..). Iako ovi kriterijumi ne mogu da ukažu da li je uspostavljeno stanje difuzno oni su korisni kao indikatori tranzicije između jednostavnog i kompleksnog polja, i u širem kontekstu posmatrano potrebnih uslova za postojanje difuznog polja [52].

## 7) Vizuelna procena

Subjektivni pristup u proceni difuzije predložen je u radu [53]. Ovaj metod vrši procenu difuznosti površina u prostoriji pomoću vizuelne inspekcije. Ideja je da se primeni vizuelna procena površina u sali kako bi se ocenilo koliko difuzno zvučno polje u prostoriji može biti. Difuzne osobine neravnih površina uobičajeno se opisuju sa dva parametra. Prvi je koeficijent raspršavanja (*scattering*) koji predstavlja odnos između zvučne energije koja se reflektuje 'spekularno' kroz pojedinačne refleksije i ukupne reflektovane energije. Drugi parametar je koeficijent difuzije, koji daje informaciju o prostornoj raspodeli reflektovane energije. Iako su metodi za merenje ova dva koeficijenta standardizovani, u realnosti postoji malo situacija kada su karakteristike difuzne površine poznate.

Metod iz rada [53] definiše tri kategorije difuznosti površina u zavisnosti od dubine reljefa: veoma difuzne površine sa koeficijentom 1, prosečno difuzne površine sa koeficijentom 0,5 i slabo difuzne sa koeficijentom 0. Parametar indeks difuznosti površine (*surface diffusivity index - SDI*) se računa kao prosečna vrednost difuznosti svih površina u prostoriji, uzimajući u obzir doprinos svake pojedinačne površine srazmerno učešću u ukupnoj unutrašnjoj površini prostorije. Sastavni deo ovog metoda je i definisanje akustičkog indeksa kvaliteta (AQI) koji se kreće u opsegu od 0 do 1, a koji je izračunat kao prosečna vrednost subjektivnih ocena koje su o koncertnim salama dali muzičari i dirigenti. Utvrđeno je da korelacija između SDI (koji je zasnovan na vizualnom pregledu površina sale) i AQI (koji je dobijen kao iskustvena ocena o kvalitetu zvuka u sali) prevazilazi  $r^2 > 0,6$ . Iako je metod prilično subjektivan dobijeni rezultati pokazuju dobro slaganje u vizuelnim procenama i potencijalnoj difuznosti polja u prostoriji.

#### 8) Korišćenje multifraktala

S ciljem kvantifikovanja difuznosti zvučnog polja u prostorima relativno male zapremine u radu [54] primenjeni su multifraktali. Pretpostavljeno je, da je širina spektra singulariteta direktno povezana sa kompleksnošću impulsnog odziva, tako da što je zvučno polje u prostoriji manje difuzno spektar singulariteta je širi. U idealno difuznom polju širina spektra singulariteta bi bila 0, tj. spektar bi odgovarao monofraktalnom signalu. Kako bi se formalno kvantifikovala difuznost zvučnog polja uvedena je mera difuznosti definisana formulom:

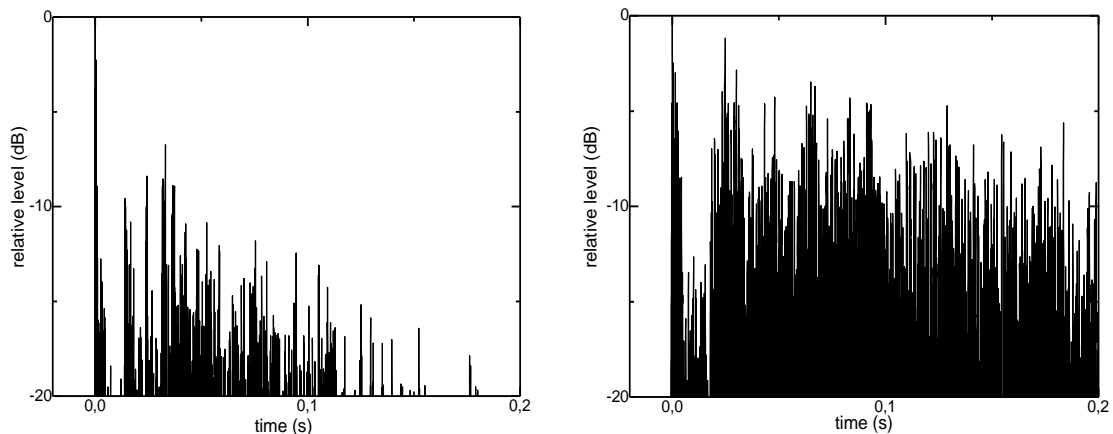
$$d_m = \frac{1}{\alpha_{max} - \alpha_{min}} \quad (2.16)$$

gde su  $\alpha_{max}$  i  $\alpha_{min}$  maksimum i minimum eksponenata u spektru. Za konfiguracije prostorije korišćene u istraživanju vrednosti parametra  $d_m$  kretale su se u opsegu od 0.68 do 2.23. Istraživanje dato u ovom radu se bavilo samo prostorijama sa relativno malim dimenzijama, nepoznato je ostalo kako će se predložena mera pokazati u većim prostorima kao što su koncertne sale.

## 2.7 Tekstura

Tekstura je subjektivni utisak koji slušalac dobija iz obrasca (rasporeda) po kome sekvenca (niz) ranih refleksija stiže do njegovih ušiju [55]. Ta subjektivna impresija koristi se kao jedan od indeksa kvaliteta zvuka koji slušalac doživljava u operским salama.

Prema Beraneku [55] dobra tekstura zahteva veliki broj ranih refleksija koje su uniformno ali ne precizno raspoređene po vremenskoj osi, bez pojedinačnih refleksija koje dominiraju u odnosu na druge. U dobrim/odličnim salama (koncertnim dvoranama) refleksije koje nailaze ubrzo nakon direktnog zvuka pristižu u manje-više uniformnoj sekvenci. U drugim (ne toliko dobrim) salama može postojati značajan interval između prvih i sledećih refleksija [55].



**Slika 2.10.** Primeri tekstura vizuelno ocenjenih kao loša (levo) i dobra (desno) tekstura

Jedini način da se utvrdi „kvalitet“ teksture na određenom mestu u sali je analiza reflektograma (dijagram refleksija, grafička predstava impulsnog odziva). Vizuelna inspekcija reflektograma predstavlja važan indeks kvaliteta zvuka u operским kućama [56]. Procena akustičkog kvaliteta operских kuća vizuelnom ocenom reflektograma uobičajeno uključuje analizu inicijalnog (početnog) vremenskog džepa ITDG i vizuelnu procenu amplitude i uniformnosti (po intenzitetu i rasporedu) refleksija u prvih 200 ms impulsnog odziva. Rezultati dobijeni na ovaj način često mogu biti vrlo subjektivni i nepouzdati jer nemaju precizne i objektivne kriterijume na kojima se baziraju. Ocene koje odavde proizilaze nemaju numeričke kvantifikatore već su uglavnom opisne. Na slici 2.10. je prikazan izgled delova impulsnih odziva, snimljenih u sali Mariborske opere pre

i nakon rekonstrukcije, koji su vizuelno ocenjeni kao impulsni odzivi sa lošom i dobrom teksturom.

Jedan od načina za kvantifikovanje tekture na određenoj poziciji slušaoca u sali je brojanje ranih refleksija u impulsnom odzivu izmerenom na toj poziciji. Brojanje značajnih refleksija (ovo praktično znači brojanje njihovih vrhova, tj. pikova u impulsnom odzivu) u početnom delu reflektograma nije uvek precizno i pouzdano merljivo. Tako, jedna refleksija može da izgleda kao da je podeljena na dve ili interferencija između dve sukcesivne refleksije može od njih da načini jednu i tako ometa objektivno brojanje. U radu [57] brojane su refleksije u prvih 80 ms impulsnog odziva na dve frekvencije za 22 koncertne dvorane. Dobijeni rezultati pokazali su da se broj refleksija (odnosno pikova refleksija) kretao u opsegu od 11-15. Ovako mali raspon dobijenih vrednosti autore je doveo do zaključka da korišćenje broja značajnih refleksija nije od velike pomoći za rangiranje akustičkog kvaliteta. Vizuelno poređenje reflektograma (prvih 200 ms) ovih istih sala se pokazalo kao korisno samo za izdvajanje najboljih od najgorih, ali ne i kao kvantitativna mera koja pruža informacije za njihovo relativno poređenje.

Iako je posmatranje reflektograma veoma sugestivno, ono ne daje sigurnu odluku da li će određena refleksija (ili skup/niz refleksija) proizvesti određene subjektivne efekte [4]. Ono što se nameće kao zaključak je da uobičajeni prikaz reflektograma retko pomaže u brojanju značajnih refleksija, i da je potrebna neka vrsta automatizacije ovog postupka. Određenim tehnikama za obradu signala impulsnog odziva, (kao što su filtriranje i „ublažavanje“ (*smoothing*)) trebalo bi da se olakša ova procedura. Uprkos tome, nepreciznost ostaje i dalje najveći nedostatak vizuelnog utvrđivanja broja refleksija u početnom delu impulsnog odziva [58].

Jedan od način da se eliminiše nesigurnost u brojanju ranih refleksija je izračunavanje funkcije anvelope, EF (eng. *Envelope Function*), pomoću Hilbertove transformacije određenog frekvencijskog opsega impulsnog odziva korišćenjem procedure opisane u [4]. U radu [56] u kome je primenjena ova metoda, EF je izračunata za opseg od  $f_L = 353$  Hz do  $f_H = 2.8$  kHz (u pitanju je filter propusnik opsega učestanosti širine 3 oktave sa centralnom frekvencijom od 1kHz [59]). Tekstura kao parametar, u ovom radu je definisana kao broj (vrhova) refleksija u prvih 80 ms nakon nailaska

direktnog zvuka koje su više od određenog praga [60, 61]. Samo informacije o amplitudi/intenzitetu refleksija se izdvajaju što je veličina koja se može izbrojati. Kao aproksimacija za kvantifikovanje teksture, autori navode, može se koristiti i „jednostavniji“ prag, npr. broj refleksija u EF koje nisu manje 15 dB relativno u odnosu na nivo direktnog zvuka [56].

Ovaj metod primenjen je na operske kuće [57] i na osnovu njega izvršeno je rangiranje sala na osnovu predloženog parametra i rezultata dobijenih subjektivnom procenom. Dobijene rezultate autori su iskoristili kao način za klasifikovanje operskih sala u tri kategorije na osnovu predloženog indeksa. Poređenjem sa rezultatima subjektivne ocene autori u [56] su utvrdili da su najbolje ocenjene dvorane imale više od 17 refleksija koje zadovoljavaju predložene kriterijume, srednje ocenjene su imale 10 - 16 vrhova refleksija, a sale sa najnižim ocenama su imale manje od 10 refleksija u prvih 80 ms impulsnog odziva (za impulsne odzive izmerene na centralnoj poziciji na glavnom podijumu).

U literaturi [62] postoji i pokušaj da se tekstura opiše pomoću fraktalne dimenzije. Predloženi postupak se bavio samo kvalitativnom analizom bez davanja kvantitativnih parametara. U pomenutom istraživanju pokušano je da se tekstura opiše pomoću tri kriterijuma izvedena iz definicije teksture prema Beraneku. Prvi kriterijum bio je veliki broj ranih refleksija, drugi da nema dominantnih refleksija a kao treći kriterijum korišćen je uslov da su refleksije uniformno i precizno raspoređene po vremenskoj osi. Dobijeni rezultati, bez zalaženja u detalje, ukazuju na mogućnost korišćenja fraktalne dimenzije za klasifikaciju impulsnih odziva sa različitim teksturama.

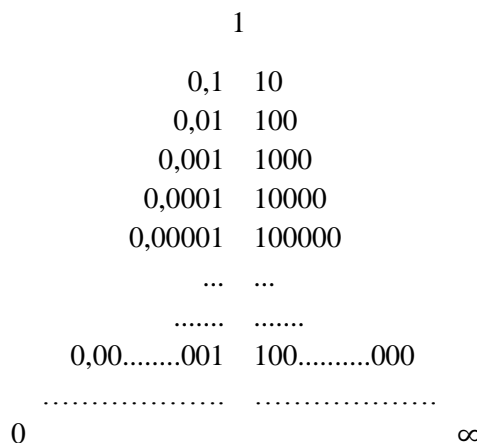
Pitanje kvantifikovanja teksture i dalje ostaje otvoreno, i bez objektivnog parametra. Zaključak oko koga su se saglasili autori koji su se do sada bavili ovim problemom je da: tekstura kao faktor u akustičkoj oceni prostorija treba da bude povoljna, što u praksi znači da na svim pozicijama u sali treba da postoji značajan broj ranih refleksija, po mogućstvu dosta lateralnih. U prvih 80 ms nakon nailaska direktnog zvuka one treba da budu ravnomerno raspoređene, adekvatnog nivoa što je moguće uniformnije amplitude [57].



### 3. Fraktali i multifraktalna analiza

#### 3.1 Uvod - pitanje mere objekta

*Kako izmeriti neki objekat?* Ovo sada predstavlja trivijalno pitanje na koje je odavno dat odgovor kroz Euklidsku geometriju uvođenjem dimenzija i mera objekata. Potreba čoveka da meri stvari oko sebe dovela je do otkrića brojeva. Ljudi su stvorili brojne sisteme da bi im pomogli da izmere objekte i utvrde njihove granice. No, da li su brojevi i klasične geometrijske mere dovoljne da opišemo sve prirodne objekte i fenomene? Naročito u slučajevima kada prirodni objekti nisu pravilnih oblika i strogo govoreći ne podležu zakonima Euklidske geometrije. Svi našem poimanju bliski objekti kreću se u opsegu veličine od 0 do  $\infty$ , u rasponu od beskonačno malih do beskonačno velikih. Negde na sredini između te dve krajnosti (sićušno i ogromno) stoji broj jedan, nalik ilustraciji decimalnog brojnog sistema datoj na slici 3.1. Od jedinice sve počinje, nijedan drugi broj zapravo ne postoji bez jedinice jer svi su izvedeni iz njega. Broj 1 govori i jednu drugu istinu, da je sve stvar mere.



**Slika 3.1.** Jedna predstava decimalnog brojnog sistema

Ako se prisetimo rasprave sa početka drugog poglavlja o poreklu zvuka (objektivnom i subjektivnom) i shvatanja nekih filozofa da je čovek mera svih stvari, onda je čovek jedinica. On prema sebi meri svet koji ga okružuje i sebe stavlja u poziciju

jedinice, u stanovište sa koga se meri veliko i malo u našem svetu. Svet koji nas okružuje je, posmatrano iz naše perspektive, u razmeri jedan na prema jedan. To je svet koji se u jednom pravcu povećava, a u drugom smanjuje bez kraja. Međutim, postoje objekti i fenomeni koji se u ovom kretanju levo i desno (smanjenju i povećanju) ne menjaju, kao da su imuni na promenu skale. Njihova struktura ostaje ista na različitim skalama uvećanja. Ove kompleksne strukture koje zadržavaju isti nivo detalja na različitim skalama uvećanja su fraktali. Za njih kao da ne postoji beskonačno malo i beskonačno veliko već imaju osobinu nepromenljive (invarijantne) skale. Delovi fraktala na jednoj skali liče na one na drugim skalama uvećanja, posmatrajući fraktale stiče se utisak kao da liče na same sebe.

Skoro svi fraktali su bar delimično samoslični, tj. poseduju osobinu samosličnosti. Ovo znači da je deo fraktala identičan celom fraktalu samo je manjih dimenzija. Decimalni sistem prikazan na slici 3.1. na različitim skalama uvećanja je sličan sebi, odnosno samosličan, ali opet to ne znači da je on fraktal. Fraktali iskazuju svojstvo samosličnosti dok obrnuto ne mora da važi, tj. da su samoslični objekti fraktali.

Fraktal je slika koja priča priču o procesu pomoću koga je nastala. Iako često izgledaju veoma komplikovano, kada su fraktali u pitanju, najčešće se radi o veoma jednostavnim procesima koji proizvode komplikovane rezultate. Princip koji leži u osnovi nastanka fraktala je da jednostavni proces koji prolazi kroz beskonačno mnogo iteracija postaje vrlo složen proces. Ako nešto ima komplikovani rezultat ne mora nužno da znači da je imalo komplikovani ulaz. Ova pretpostavka se onda može vrlo lako „zloupotребiti“ za modelovanje kompleksnih fizičkih procesa i sistema pomoću jednostavnih zakonitosti. Pa, pažnju u istraživanjima možemo da usmerimo na traganje pomoću fraktala za ovim jednostavnim procesom koji je u njegovoj osnovi.

### 3.2 Fraktalna teorija

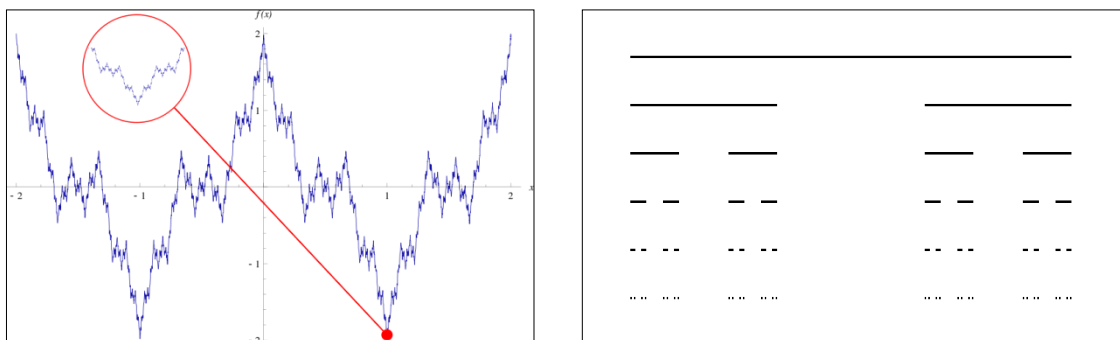
Fraktali su se pojavili kao pokušaj da se opišu prirodni fenomeni koji su se smatrali previše nepravilnim i kompleksnim za opisivanje tradicionalnom geometrijom i matematikom. Klasična geometrija je koncentrisana na pravilne i glatke objekte. Međutim, kao što je B. B. Mandelbrot primetio u [63]: *oblaci nisu sfere, planine nisu*

*konusi, obale nisu krugovi i kora drveta nije glatka kao što ni munja ne putuje pravolinijski, pa su mnogi prirodni fenomeni ostali bez dovoljno naučne pažnje zbog teškoće da se opišu na način koji je matematički dobro definisan.*

### 3.2.1 Malo parče istorije o fraktalima

Iako se Mandelbrot smatra tvorcem fraktalne geometrije njegove zasluge su zapravo manje, on je „samo“ objedinio i sistematizovao neka prethodna saznanja koja su se pojavila od sredine 19. veka. Da bi priča o nastanku fraktalne teorije bila kompletna valja se na kratko osvrnuti i na klasičnu geometriju. Razvoj geometrije kroz vekove pratio je njenu primenu. Vizuelna i praktična rešenja za svakodnevne probleme koje je ponudila geometrija vremenom su našla potporu i potvrdu u algebri.

Na bazi Njutnove i Lajbnicove matematike s kraja 17. veka Koši (*Augustin Cauchy*), Riman (*Bernhard Riemann*) i Vajerštras (*Karl Weierstrass*) su u 19. veku postavili temelje diferencijalnom računu, davanjem definicije da je kriva diferencijabilna ako u svakoj njenoj tački postoji tangenta. Uvreženo mišljenje od tada postaje da su sve krive vredne pažnje glatke i neprekidne, odnosno da imaju tangente u svim tačkama. Zato je bilo pravo iznenađenje kada je 1872. godine Vajerštras pokazao da može postojati neprekidna (kontinualna) kriva koja ni u jednoj tački nije diferencijabilna, tj. da je toliko nepravilna da u nijednoj njenoj tački nije moguće povući tangentu. Vajerštrasova funkcija ili kriva (slika 3.2. levo) može se smatrati prvim formalno definisanim fraktalom.

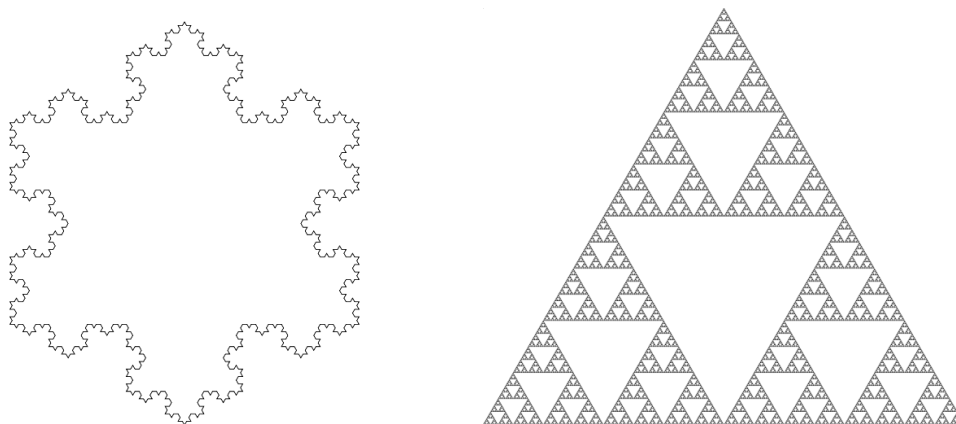


**Slika 3.2.** Izgled prvih formalno definisanih fraktala: Vajerštrasova funkcija (levo), Kantorov skup (desno) [64]

1883. god Kantor (*Georg Cantor*) je definisao beskonačan skup tačaka u jediničnom intervalu  $[0,1]$  koji iskazuje fraktalna svojstva. Ovo je, tzv. Kantorov skup, do

današnjeg dana najprostiji poznati samoslični fraktal. Kantorov skup (prikazan na slici 3.2. desno) se dobija tako što se iznova uklanja srednja trećina linije.

Nakon ovih otkrića fraktalni objekti počeli su da se nižu u godinama što su usledile. Naravno, u ovom periodu još nije bio definisan pojam fraktal već su ovi objekti dobijali nazive po svojim tvorcima. Tako je 1904. godine Von Koh (*Helge von Koch*) predstavio svoju krivu koja nema tangente, poznatu i kao Von Kohova pahuljica (slika 3.3. levo), koja je bila dosta jednostavnije konstrukcije u odnosu na Vajerštrasovu krivu. Zatim je 1915. godine poljski matematičar Sierpinski (*Wacław Sierpiński*) predstavio svoj trougao (slika 3.3. desno), a nedugo zatim i Sierpinski tepih. Iako su Von Koh i Sierpinski definisali pravila na osnovu kojih se mogu konstruisati fraktalne krive ili objekti, u to doba osobine kao što je samosličnost bile su slabo razmatrane, pa su ovi, danas vrlo popularni fraktali, u ono vreme više predstavljali kuriozitete ili kontra-primere u topologiji.

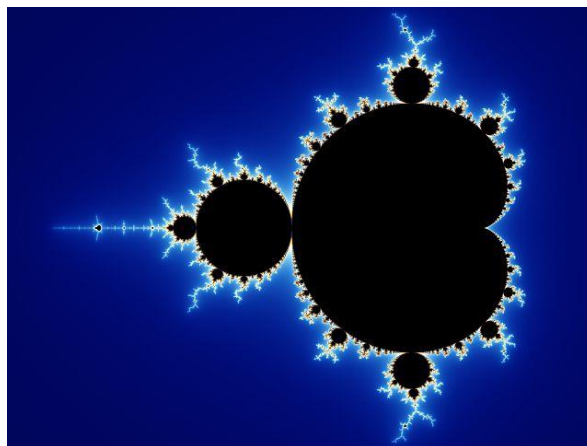


**Slika 3.3** Izgled von Kohove pahuljice (levo) i trougla Sierpinskog (desno) [64]

Hausdorf (*Felix Hausdorff*) je 1918. godine prvi predložio način za merenje Kantorovog i sličnih skupova uvodeći pojam necelobrojne dimenzije, koja je veća od topološke dimenzije, danas poznate i kao Hausdorfova dimenzija. Hausdorf je pokazao da Kantorov skup ima dimenziju  $\log_2/\log_3 = 0.631$ , i takođe je pronašao dimenzije drugih samosličnih skupova. Boks-dimenzija koja je u mnogo čemu dosta jednostavnija od Hausdorfove dimenzije pojavila se 1928. godine. Iako se iz dosadašnjeg teksta može zaključiti da postoji izvestan kontinuitet u istraživanju fraktala, dugo godina su ovi nepravilni skupovi smatrani više kuriozitetima nego redovnim pojavama, pa se mali broj matematičara bavio fraktalnim dimenzijama.

Tek 60-ih godina prošlog veka je proučavanje nepravilnih oblika počelo da se razvija na sistematičan način, pre svega zahvaljujući pojavi moćnih računara uz pomoć kojih je postalo moguće generisanje fraktala i njihova vizuelizacija. U svom poznatom radu iz 1967. godine [65] Mandelbrot je počeo da piše o samosličnosti ukazujući da je koncept dužine besmislen ukoliko se želi izmeriti neki nepravilan objekat kao što je morska obala, odnosno da dužina zavisi od izbora jedinice mere. Mandelbrot je 1975. godine prvi upotrebio reč fraktal (od latinske reči *fractus* što znači 'izlomljen') kao generalnu odrednicu za široku klasu nepravilnih objekata koji nisu mogli da se opišu tradicionalnim geometrijskim postavkama. Njegove knjige [63, 66] objedinile su pojmove o samosličnosti iz različitih oblasti nauke i matematike.

Od 1980-ih fraktali su privukli široku pažnju u svim oblastima nauke, skoro da je postala moda da se svaka naučna oblast posmatra sa fraktalnog stanovišta. Moguća primena fraktala za opisivanje prirodnih objekata je ono što je pobudilo interesovanje za njih. Tako je mnoštvo prirodnih objekata opisano kao fraktali (oblaci, izgled reljefa, razne prirodne teksture, turbulencije u atmosferi, kretanja u ekonomiji, itd.), iako nijedan od njih u stvari nije fraktal u strogo matematičkom smislu jer njihova fraktalna svojstva nestaju ako se posmatraju na dovoljno malim skalama (većim uvećanjima). Ipak, na određenom opsegu skala uvećanja oni su veoma nalik fraktalima što bi bio dovoljan motiv za njihovu analizu pomoću fraktala.



**Slika 3.4.** Izgled Mandelbrotovog skupa [64]

Svojim atraktivnim vizuelnim ilustracijama (slika 3.4) fraktali su dodatno povećali svoju popularnost. Međutim, stvarni doprinos njihove šire primene u opisivanju prirodnih fenomena ostaje i dalje predmet debate.

### 3.2.2 Samosličnost i definicija fraktala

Centralna filozofska tema fraktalne geometrije je da priroda, mada naizgled složena, pokazuje jednu fundamentalnu osobinu obično poznatu kao *samosličnost* (eng. *self-similarity*) [67]. Naime, ma kako kompleksan bio oblik i/ili dinamičko ponašanje sistema, ukoliko neko pogleda pažljivije i dovoljno maštovito, može naći oblike na jednoj skali koji liče na one na drugim skalama. Primeri su brojni, pored već navedene morske obale i mnogi prirodni objekti iskazuju takva svojstva: krošnja drveta, sistem krvotoka, nervni sistem, izgled reljefa, decimalni merni sistem, itd. Struktura je stalno ista, ali u različitim skalama.

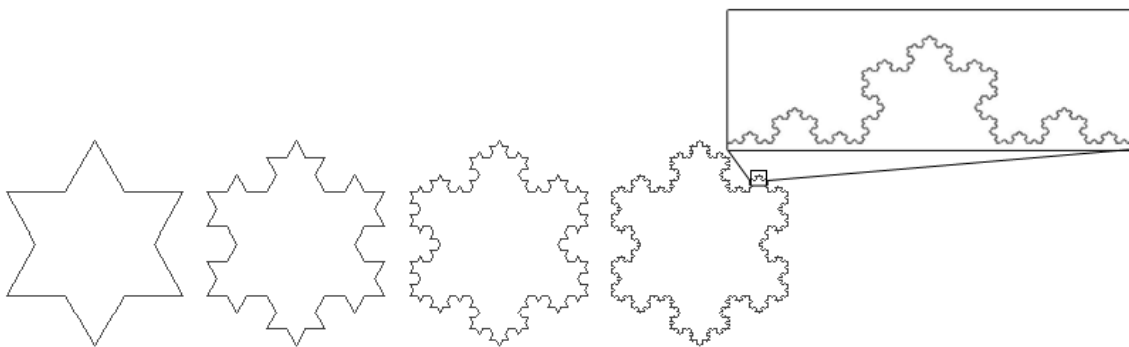
U nastavku poglavlja će se za objašnjenje fraktala i fraktalne analize, zavisno od primera kojim će biti ilustrovani ili na koji će biti primenjeni, koristiti objekti, oblici, slike ili matematički termin skup.

Pokušaji da se precizno definišu fraktali postoje od kad je ovaj termin prvi put uveden. U svom prvom radu na ovu temu [63], Mandelbrot je definisao fraktal kao skup čija je Hausdorfova dimenzija strogo veća od njegove topološke dimenzije. Ova „tehnička“ definicija koju je uveo Mandelbrot je napuštena pošto je isključivala određen broj skupova za koje je bilo očigledno da su fraktali [68]. Umesto davanja precizne definicije postignut je konsenzus da se fraktalom u nekoj formi može smatrati skup sa određenim karakterističnim osobinama. Većina fraktalnih skupova ima sledeće osobine, ali se mogu naći i fraktali koji odstupaju od pojedinih [68]:

- a) **Fraktali imaju finu strukturu.** Ovo podrazumeva da koliko god uvećavali delove slike fraktala, uvek dobijamo novu sliku koja ima istu količinu detalja, odnosno mnoštvo detalje na svim skalama uvećanja.
- b) **Fraktali poseduju osobinu samosličnosti** (tj. samoslični su u nekom smislu). Ovo znači da su fraktali iste strukture nezavisno od skale uvećanja u kojoj se posmatraju. Ovo svojstvo se naziva i *svojstvo invarijantne skale*.
- c) **Fraktali su previše nepravilni** da bi bili opisani tradicionalnim jezikom geometrije i na lokalnom i globalnom nivou. Klasične geometrijske mere kao što su npr. dužina i površina ne mogu da se primene u slučaju fraktala.

- d) **Fraktali se mogu kreirati korišćenjem jednostavne rekurzivne procedure.** Ovo podrazumeva da se uprkos kompleksnoj strukturi, fraktali mogu dobiti ponavljanjem jednostavnih šablona (primer Von Kohova pahuljica, prikazana na slici 3.5).
- e) **„Veličina“ fraktala zavisi od skale u kojoj se mere.** Zapravo, fraktali nemaju karakterističnu veličinu (dužinu, površinu...), jedino bi uzimanjem sve manje i manje jedinice mere mogla da se preciznije izmeri veličina fraktalnog objekta.
- f) **Fraktali imaju „prirodni izgled“.** Posmatrano uz malo mašte fraktali izgledaju kao oblici i strukture koje svakodnevno srećemo u prirodi.

Skup sa ovakvim osobinama naziva se fraktal. Međutim, i ovakva definicija fraktala je sama po sebi upitna, jer prema njoj fraktalom se naziva i objekat koji zadovoljava samo nekoliko od prethodno pobrojanih uslova, od kojih su neki pomalo nejasno (maglovito) koncipirani [69].

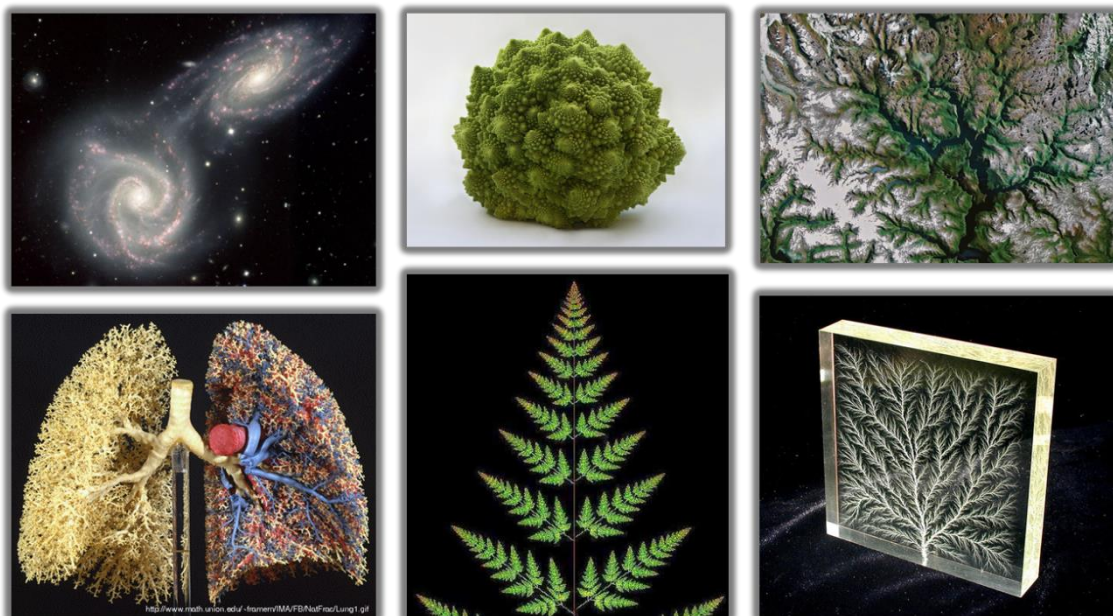


**Slika. 3.5.** Prvi nekoliko koraka u konstrukciji Von Kohove pahuljice. Prikazano uvećanje pokazuje isti stepen neregularnosti

### 3.2.3 Multifraktali

Veliki broj fraktalnih struktura može se veštački generisati primenom relativno prostih pravila, tako što se rezultati posle svake iteracije vraćaju ponovo u istu proceduru. Tako dobijene strukture iskazuju svojstvo stroge samosličnosti, odnosno pri bilo kojem uvećanju imaju istu strukturu. Stroga samosličnost podrazumeva da je neki objekat napravljen isključivo od delova koji su njegove skalirane, pomerene i/ili rotirane kopije. Strukture koje su veštački generisane korišćenjem takvih pravila nazivaju se determinističkim fraktalima (nekad se nazivaju i monofraktalima). Veštački generisani

objekti, dobijeni primenom precizno definisanih algoritama, kao što je slučaj na do sada ilustrovanim primerima, iskazuju stroga fraktalna svojstva. Fraktali koji se sreću u prirodi nisu strogo samoslični već pokazuju statističku samosličnost. Ovo znači da će uvećanje malih delova fraktala pokazati slične statističke osobine kao ceo fraktal, ali ne potpuno iste. U tim slučajevima se govori o *multifraktalima*. Razne prirodne pojave i objekti iskazuju takvo svojstvo. Neki od ovih fenomena prikazani su na slici 3.6.



**Slika 3.6.** Neki od primera prirodnih fraktala

Istraživanja u oblasti fraktalne geometrije mogu se podeliti u dva pravca. Korišćenje fraktalne geometrije u simuliranju prirodnih fizičkih objekata, pojava i sistema, a zatim njihova računarska vizuelizacija, predstavljaju jedan pravac [70]. Veliki izazov fraktalne geometrije predstavlja inverzan problem, a to je pokušaj da se pomoću nekog fraktalnog ili multifraktalnog parametra izdvoje karakteristike modela koji najbolje opisuje fizički proces. Poslednjih godina razvijeni su brojni algoritmi za izdvajanje karakterističnih fraktalnih ili multifraktalnih parametara iz posmatranog skupa podataka.



### 3.3 Opisivanje fraktalnih i multifraktalnih svojstava signala

#### 3.3.1 Dimenzija

Kao što je već rečeno metodi klasične geometrije nisu bili pogodni za izučavanje fraktala pa se javila potreba za alternativnim tehnikama. Glavni alat fraktalne geometrije je dimenzija u svim svojim oblicima [68].

Dimenziju nekog skupa (strukture) moguće je definisati na mnogo načina od kojih su neki manje neki više zadovoljavajući. Različite definicije mogu dati različite vrednosti dimenzije za isti skup, i mogu takođe imati različite osobine. Vrlo grubo rečeno dimenzija pruža opis koliko prostora zauzima/ispunjava neki skup. Dimenzija sadrži informacije o geometrijskim svojstvima skupa [68].

#### Osvrt na Euklidsku geometriju:

Prema pravilima Euklidske geometrije objekti imaju sledeće, našem poimanju bliske, Euklidske (ili topološke) dimenzije: tačka je bez dimenzije, tj.  $D_E=0$ , glatka linija ima jednu dimenziju – dužinu ( $D_E=1$ ), ravna površina ima dve dimenzije – dužinu i širinu ( $D_E=2$ ), a telo ima tri dimenzije, pa je  $D_E=3$ . Topološka dimenzija skupa/objekta je uvek ceo broj. Dimenzije objekata se mere i broičano opisuju tako što ih poredimo sa nekim usvojenim uzorkom (etalonom) mere. Međutim, prirodni objekti nisu pravilnog oblika i strogo govoreći ne podležu zakonima Euklidske geometrije. Pa, problem merenja veličine fraktala izbija u prvi plan, upravo zbog izrazito nepravilnog oblika fraktala. Kako bi se proširile mogućnosti za opisivanja složenih oblika uvedene su necelobrojne ili fraktalne dimenzije.

#### 3.3.2 Fraktalna dimenzija

Fraktalna dimenzija je osnovni analitički parametar za opisivanje struktura koje imaju tzv. skalirajuću simetriju (invarijantnost skale). Skalirajuća simetrija podrazumeva samosličnost posmatranih objekata na različitim skalama uvećanja. Fraktalna dimenzija ( $D_F$ ) numerički opisuje kako se nepravilne strukture objekta ili fenomeni repliciraju na iterativan način od malih ka većim skalama i obrnuto. Pošto je  $D_F$  broj povezan sa fraktalom koji pokazuje koliko „gusto“ fraktali prekrivaju prostor on može da se koristi

za objektivno poređenje i/ili klasifikaciju različitih fraktala. Iako postoje različite definicije fraktalne dimenzije sve one u nekoj meri zavise od merenja fraktala na različitim skalama uvećanja [69].

### **Dimenzija samosličnosti**

Za strukture koje su strogo samoslične, kao što su već pomenuti Kantorov skup, Kohova kriva, Sierpinski tepih, itd. može se odrediti tzv. *dimenzija samosličnosti*,  $D_S$ . U ovom slučaju za samoslični objekt  $S$  koji je generisan od  $N$  nepreklapajućih sopstvenih kopija, od kojih je svaka skalirana faktorom  $r < 1$ , dimenzija samosličnosti se definiše formulom:

$$D_S = -\frac{\log N}{\log r} \quad (3.1)$$

Prema ovoj relaciji za Kantorov skup ilustrovan na slici 3.2. dobija se dimenzija:

$$D_S = -\frac{\ln(2)}{\ln(1/3)} = 0,631 \quad (3.2)$$

jer se ta struktura dobija tako što se  $N=2$  dela linije ponavljaju na svakoj narednoj skali koja je  $r=1/3$  manja od prethodne. Za Kohovu krivu čiji je postupak generisanja ilustrovan na slici 3.5, za dimenziju samosličnosti dobija se vrednost

$$D_S = -\frac{\ln(4)}{\ln(1/3)} = 1,262 \quad (3.3)$$

budući da se ta struktura formira tako što se ponavlja postupak skaliranja polazne linije faktorom  $r=1/3$ , čime se dobija nova struktura, tzv. *generator*, sastavljena od  $N=4$  delova. Dimenzija samosličnosti može se izračunati i za „standardne“ geometrijske objekte (euklidskih dimenzija 1, 2, 3). Ono što je razlika između njih i fraktalnih objekata, to je da fraktali iskazuju svojstvo samosličnosti dok obrnuto ne mora da važi, tj. da su samoslični objekti fraktali. Podsetimo se i primera decimalnog mernog sistema sa početka ovog poglavlja, on jeste samosličan ali nije fraktalan.

### **Box-counting dimenzija**

Za fraktalne strukture koje nisu dobijene strogo definisanim pravilima, kao što su razne prirodne strukture i signali, fraktalna dimenzija se ne može odrediti kao dimenzija

samosličnosti na osnovu relacije (3.1). U ovim slučajevima koriste se druge metode. Svakako najjednostavniji metod za određivanje  $D_F$  je *box-counting* metoda. Metoda se zasniva na prekrivanju fraktalnog objekta  $n$ -dimenzionom mrežom nepreklapajućih bokseva čije su dimenzije ivice  $\varepsilon$ , i zatim određivanju broja nepraznih bokseva,  $N(\varepsilon)$ , koji prekrivaju posmatrani objekat. Dimenzija mreže je  $n=D_\varepsilon+1$ , što praktično znači da su boksevi u slučaju fraktalnih kriva kvadrati, dok su za fraktalne površine kocke. Fraktalna dimenzija  $D_F$  se dobija iz logaritamskog dijagrama zavisnosti  $N(\varepsilon)$  od  $\varepsilon$  za različite vrednosti dimenzija boksa. U graničnom procesu, uzimanjem sve manjih ivica bokseva, broj bokseva,  $N(\varepsilon)$ , postaje srazmeran sa  $\varepsilon^{-D_F}$ , pa se *box-counting* dimenzija fraktala dobija iz formula

$$N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D_F} \quad (3.4)$$

$$D_F = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \quad (3.5)$$

Konstanta  $D_F$  predstavlja fraktalnu dimenziju, koja je kasnije nazvana Hausdorfova ili *Hausdorff-Besicovitch* dimenzija [70]. Za veštački generisane fraktale (monofraktale) fraktalna dimenzija ne zavisi od skale, tj. ima istu vrednost nezavisno od skale na kojoj se posmatra. Nasuprot tome karakteristika multifraktala, odnosno prirodnih fraktali, je fraktalna dimenzija koja varira u zavisnosti od skale na kojoj se računa.

Relacije (3.1) i (3.5) su slične, mada je postupak izračunavanja drugačiji. *Box-counting* metod daje tačne procene za određene fraktalne dimenzije. Takođe, jednostavan je, te je izračunavanje brzo. Osim *box-counting* metoda za procenu fraktalne dimenzije koriste se i metodi bazirani na fraktalnom Braunovom kretanju (fBm) i metodi zasnovani na merenju površine [71].

### 3.3.3 Holderov eksponent

Samo fraktalna dimenzija nije dovoljna za proučavanje prirodnih pojava, već su neophodne uopštenije matematičke veličine kojima mogu da se opišu i druge karakteristike signala, a ne samo njegovo prisustvo. Većina signala ne iskazuje jednostavno monofraktalno ponašanje, koje se može izraziti jednim skalirajućim

eksponentom, već je neophodno mnoštvo skalirajućih eksponenta za pun opis skalirajućih svojstva signala, pa se mora primeniti multifraktalna analiza [72].

Multifraktalna analiza se prvo javila u Mandelbrotovim modelima multiplikativnih kaskada [63] da bi se kasnije raširila na proučavanje/analizu signala koji imaju kompleksnu strukturu. Ideja koja stoji iza multifraktalne analize je sledeća, prvo se u svakoj tački signala  $x_i$  pronađe tačkasti Holderov eksponent  $h(x_i)$ , koji opisuje signal sa lokalnog stanovišta. Nakon toga, tačke sa istim eksponentom  $h$  se grupišu u skupove,  $S_h$ . Iako ovi skupovi ne moraju imati značajne vrednosti njihova topološka dimenzija može biti od značaja, pa su glavni naponi usmereni ka izračunavanju Hausdorfove dimenzije,  $D_h$  skupa  $S_h$ , tj. spektra singulariteta signala [71].

*Box-counting* metod koji je primenjen za određivanje fraktalne dimenzije nije pogodan za opisivanje multifraktala jer on daje samo vezu između broja nepraznih bokseva i veličine bokseva, a ne uzima u obzir vrednost signala koji je obuhvaćen boksom. To bi, uprošćeno, odgovaralo brojanju novca a da pri tome ne računamo sa vrednošću pojedinih apoeni [73]. Za multifraktalne pojave uvode se mere koje su nalik nekoj vrsti "težine" za svaki od boksova. Na osnovu toga se i teorija samosličnosti za opisivanje multifraktala proširuje sa skupova na mere [74] Za karakterisanje multifraktala najpre se uvodi veličina  $\alpha$  opisana sa:

$$\alpha = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(\mu(S_i))}{\ln(\varepsilon)} \quad (3.6)$$

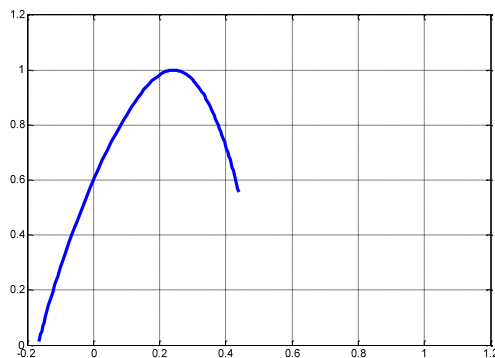
poznata kao grubi Holderov eksponent [74], gde je  $\mu(S_i)$  mera boksa, a  $\varepsilon$  dimenzija veličine boksa. Ovako definisana veličina bi odgovarala fraktalnoj boks-dimenziji posmatrane mere. Za široku klasu samosličnih mera pokazuje se da veličina  $\alpha$  uzima vrednosti iz intervala  $[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$ , gde je  $0 < \alpha_{min} < \alpha_{max} < \infty$ . Vrednost parametra  $\alpha$  je bliska odgovarajućoj fraktalnoj dimenziji posmatrane strukture, dakle, za 1D signale je raspodeljena oko vrednosti 1, za 2D signale oko vrednosti 2, itd. Parametar  $\alpha$  opisuje lokalnu regularnost strukture za koju se izračunava i on zavisi od pozicije u toj strukturi (signalu). U celokupnoj strukturi (signalu) koji se posmatra postoji mnoštvo bokseva sa istom vrednošću parametra  $\alpha$ , njihova raspodela predstavlja multifraktalni spektar.

Raspodela vrednosti parametra  $\alpha$  (multifraktalni spektar) može se dobiti brojanjem bokseva  $N_\varepsilon(\alpha)$  veličine  $\varepsilon$  u kojima Holderov eksponent ima vrednost  $\alpha$ .

$$f_\varepsilon(\alpha_i) = -\frac{\ln(N_\varepsilon(\alpha_i))}{\ln(\varepsilon)} \quad (3.7)$$

$$f(\alpha) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (f_\varepsilon(\alpha)) \quad (3.8)$$

Multifraktalni spektar opisuje globalnu regularnost strukture koja se posmatra, i on uobičajeno ima oblik parabole (ilustrovano na slici 3.7.). On se može smatrati i fraktalnom, tj. Hausdorfovom dimenzijom podskupova koje karakterišu određene vrednosti parametra  $\alpha$ . Zbog činjenice da parametri  $\alpha$  i  $f(\alpha)$  opisuju i lokalnu i globalnu regularnost procesa koji se istražuje, MF analiza se može koristiti za rešavanje različitih problema u obradi signala koji u sebe uključuju opisivanje i izdvajanje pojedinih karakteristika sakrivenih u velikoj količini podataka.



**Slika 3.7.** Izgled jednog multifraktalnog spektra dobijenog MF DFA metodom

Multifraktalnim spektrom opisuju se geometrijska ili statistička raspodela singulariteta na odgovarajućoj predstavi signala, pa on predstavlja dragoceni izvor informacija o prirodi signala.

### 3.4 Multifraktalna analiza

Uopšteno govoreći, u vremenskim serijama (nizovima koji predstavljaju vrednosti signala u vremenu) se mogu uočiti dva tipa multifraktalnih karakteristika [72]:

- a) Multifraktalne karakteristike koji su posledica široke funkcije gustine verovatnoće za vrednosti vremenskih serija. U ovom slučaju multifraktalne karakteristike ne mogu biti uklonjene mešanjem vrednosti u seriji.
- a) Multifraktalne karakteristike koje su posledica različitih dugoročnih korelacija (*long-range time correlations*) malih i velikih fluktuacija. U ovom slučaju funkcija gustine verovatnoće vrednosti u vremenskoj seriji može biti regularna raspodela sa konačnim momentima, npr. Gausova raspodela. Kada bi se vrednosti u vremenskoj seriji izmešale one ne bi više ispoljavale multifraktalna svojstva, pošto bi mešanjem bila uništena dugoročna korelacija.

U zavisnosti od toga koji se tipovi multifraktalnih karakteristika istražuju različiti metodi se primenjuju za multifraktalnu analizu. Najjednostavniji su metodi koji se koriste za karakterizaciju normalizovanih stacionarnih mera i oni podrazumevaju deljenje signala na bokseve. Međutim, ovaj multifraktalni formalizam ne daje tačne rezultate za nestacionarne vremenske serije u kojima dominiraju trendovi.

#### **3.4.1 Metode za izračunavanje multifraktalnog spektra**

Direktno određivanje spektra singulariteta realnih signala numeričkim izračunavanjem pokazalo se kao veoma teško. Stoga su definisane različite formule za izračunavanje ovog spektra koje se mogu grubo podeliti na dve klase: *box-counting* metodi i metode bazirane na *wavelet*-ima.

##### **A) *Box-counting* metode**

Metode iz ove klase su bazirane na istim principima kao i metode koje služe za procenu fraktalne dimenzije. Signal se „premreži“ sa boksovima različite veličine i normalizovana mera se izračunava za svaki boks. U ovu grupu metoda spadaju:

##### **Generalizovane fraktalne dimenzije i multifraktalni spektar**

Standardne *box-counting* tehnike se koriste za analizu skupova u okolini neke tačke. Svaki skup je opisan sa beskonačnim brojem generalizovanih dimenzija,  $Dq$ , koje se još zovu i Renijeve dimenzije [75], i sa multifraktalnim spektrom  $f(\alpha)$ . Generalizovane

dimenzije  $D_q$  se izračunavaju kao funkcije  $q$ -tog reda momenta verovatnoće, nakon toga se multifraktalni spektar može dobiti Ležandrovom transformacijom.

Zbog grešaka do kojih može da dovede Ležandrova transformacija, u literaturi [76] je definisan metod za direktnu procenu multifraktalnog spektra, koji je široko primenjivan. Svi postupci bazirani na ovom metodu imaju ograničenja koja su svojstvena za *box-counting* metod. Osim problema koji se javljaju kada boks sadrži mali broj (nekoliko) tačaka, algoritmi se karakterišu slabijim statistikama, koje su naglašene negativnim eksponentima ( $q < 0$ ), što dovodi do toga da mera divergira eksponencijalno [77].

### **„Sand box“ ili metoda kumulativne mase**

*Sand box* metoda je korisna za procenu generalizovanih fraktalnih dimenzija  $i$  za pozitivne i negativne redove momenta  $q$ . Ovaj metod se sastoji od slučajnog izbora  $N$  tačaka koje pripadaju strukturi koja se analizira, zatim se za svaku tačku broje vrednosti  $M_i(r)$  koji se nalaze unutar diska prečnika  $r$  sa centrom u ovoj tački. Generalizovane dimenzije  $D_q$  se dobijaju izračunavanjem srednje vrednosti od  $M(r)$  za različito  $r$ . Prednost ovog metoda je u tome što su boksevi centrirani u strukturi, pa nema boksova sa premalo elemenata u njima. *Sandbox* metoda predstavlja rešenje za problem sa negativnim momentima  $q$  jer dozvoljava rekonstrukciju kompletnog multifraktalnog spektra.

### **Multifraktalni spektar velike devijacije**

Kada se multifraktalni spektar procenjuje korišćenjem pomenutih metoda njegov oblik je uvek konkavan. Prednost multifraktalnog spektra velike devijacije je da on neće uvek biti konkavan, pa će manje informacija biti izgubljeno. Ovo međutim zahteva više numeričkih izračunavanja pa je ovaj metod najpogodniji za 1D domen.

### **B) Wavelet metode**

Druga grupa metoda je bazirana na *wavelet* transformaciji. *Wavelet* transformacija signala se koristi kao „oscilirajuća“ kutija (boks) za predstavljanje njegovih komponenti. Stoga nema potrebe za mešanjem signala. Neki metodi koriste

diskretnu *wavelet* transformaciju, dok su drugi bazirani na kontinualnoj *wavlet* transformaciji.

Još jednu klasifikaciju multifraktalnih spektara  $f(\alpha)$  (ali pri multifraktalnoj analizi slika) dao je Vehel [78], koji razmatra sledeće slučajeve:

- Spektar Hausdorfovih singulariteta,  $f_h(\alpha)$ , koji daje dimenziju skupa tačaka koje imaju dato  $\alpha$ . Time se dobija geometrijski opis raspodele singulariteta.
- Spektar velikih devijacija,  $f_g(\alpha)$ , daje nam podatak o verovatnoći da se nađe data vrednost  $\alpha_n$  pri rezoluciji  $n$ . Ovaj spektar nam daje probabilistički opis raspodele singulariteta. Nažalost, i  $f_h(\alpha)$  i  $f_g(\alpha)$  se teško izračunavaju na osnovu realnih podataka.
- Ležandrov multifraktalni spektar,  $f_l(\alpha)$ , se relativno lako određuje jer razmatra samo usrednjene veličine. Međutim, cena za to je da  $f_l(\alpha)$ , generalno, sadrži manje informacija jer je rezultat uvek konkavna funkcija.

Među ovim veličinama postoji uobičajena veza da je:

$$f_h(\alpha) \leq f_g(\alpha) \leq f_l(\alpha) \quad (3.9)$$

### 3.4.2 Metod histograma zasnovan na *box-counting* metodu

Metod histograma je koristan u situacijama kada je neophodno da se izdvoje određene oblasti dobijenog multifraktalnog spektra koje pripadaju tačno određenim vrednosti parametra  $\alpha$ . Grubo govoreći svi algoritmi za procenu multifraktalnog spektra pomoću histograma uključuju sledeće korake [79]:

1. Signal se podeli na delove veličine  $n$ . Za svako  $n$ , izračunaju se svi grubi Holderovi eksponenti  $\alpha_n^k$ ;
2. Izračunaju se minimalni i maksimalni grubi Holderovi eksponenti  $\alpha_n^{min} = \min_k \alpha_n^k$  i  $\alpha_n^{max} = \max_k \alpha_n^k$ ;
3. Dobijeni interval  $[\alpha_n^{min}, \alpha_n^{max}]$  podeli se na  $N$  bokseva;
4. Izračuna se broj  $N_n^k$  intervala  $I_n^k$  čije vrednosti  $\alpha_n^k$  pripadaju  $i$ -tom boksu, za  $i = 0, \dots, N - 1$ ;



5. Procena multifraktalnog spektra  $f^i$  dobija se kao linearna regresija na  $(\log n, \log N_n^i)$ .

Klasična procedura za nalaženje  $\alpha$  i  $f(\alpha)$  opisana jednačinama (3.5) - (3.8) odnosi se na proizvoljne, kontinualne funkcije u vremenu i prostoru. Prilikom utvrđivanju eksponenta  $\alpha$  i funkcije raspodele  $f(\alpha)$  u diskretnom prostoru javljaju se izvesna ograničenja i poteškoće. Ova ograničenja potiču od same veličine bokseva koja je u diskretnom prostoru celobrojni umnožak broja odbiraka. Pa, umesto formula koje važe u kontinualnom prostoru, u diskretnom prostoru imamo da se grubi Holderov eksponent definiše kao:

$$\alpha_i(t_j) = \frac{\log(\mu_i(t_j))}{\log(i)} \quad (3.10)$$

gde je  $\mu_i(t_j)$  vrednost mere u okviru posmatranog boksa veličine  $\varepsilon = i$  sa centrom u trenutku  $t_j$ . Odavde zaključujemo da procedura iz kontinualnog prostora koja zahteva da  $\varepsilon \rightarrow 0$ , nije moguća pošto je  $\varepsilon_{\min}=1$ . Štaviše,  $\alpha$  i  $f(\alpha)$  su nedefinisani ako je  $\varepsilon = \varepsilon_{\min} = 1$ . Stoga je za procenu ovih veličina neophodno prilagoditi postojeći metod. Ovo prilagođavanje se sastoji u sledećem: za različite veličine boksa izračuna se prirodni logaritam od vrednosti mere u tom boksu,  $\log(\mu_i(t_j))$ , potom se u logaritamskom dijagramu odrede odgovarajuće tačke koje se dobijaju kao odnos  $\log(\mu_i(t_j)) / \log(i)$ , da bi se konačno granična vrednost od  $\alpha_i(t_j)$  dobila kao nagib krive linearne regresije.

Izračunavanjem vrednosti  $\alpha$  za svaki odbirak ulaznog signala, odnosno svaki trenutak  $t_j$  dobijamo niz iste dužine kao i ulazni signal. Iz ovog niza može da se izračuna funkcija  $f(\alpha)$ , tako što se prvo kontinualne vrednosti Holderovog eksponenta diskretizuju u vrednosti  $\alpha_r$ :

$$\alpha_r = \alpha_{\min} + (r - 1) \Delta\alpha_r \quad (3.11)$$

gde je  $r = 1, 2, \dots, R$ , a  $\Delta\alpha_r$  je dobijeno korišćenjem uniformne podele opsega  $\alpha$  vrednosti, tj.  $\Delta\alpha_r = \Delta\alpha = (\alpha_{\max} - \alpha_{\min})/R$ . Tako dobijen niz  $\alpha$  vrednosti pokriva se boksevima celobrojne veličine  $i = 1, 2, \dots$ , ovi boksevi se zatim broje dajući vrednost  $N_i(\alpha_r)$ . Analogno postupku određivanja Holderovog eksponenta, iz skupa diskretnih

tačka u logaritamskom dijagramu  $\log N_i(\alpha_r)/\log(i)$ , i MF spektar  $f(\alpha)$  se procenjuje kao nagib krive linearne regresije.

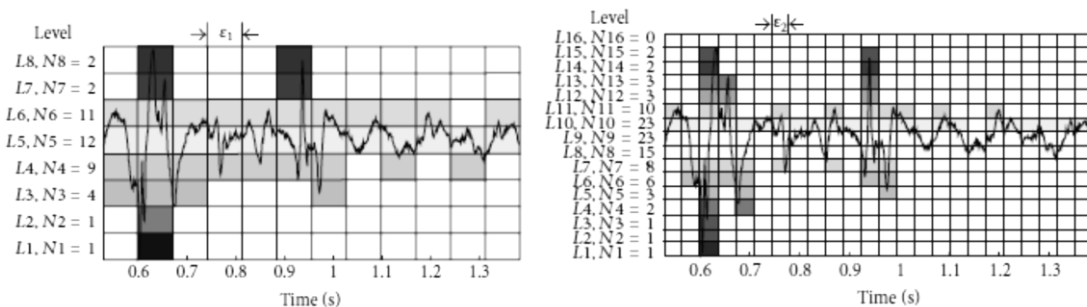
$$f_i(\alpha_r) = -\frac{\log(N_i(\alpha_r))}{\log(i)} \quad (3.12)$$

MF spektar izračunat na ovaj način predstavlja Hausdorfov dimenziju raspodele eksponenta  $\alpha$ . Za procenu vrednosti  $\alpha$  mogu se koristiti različite mere  $\mu_i(t_j)$ . Priroda problema koji se rešava utiče na izbor mere. Drugačije mere vode ka različitim Holderovim eksponentima i mogu da se koriste da proizvedu drugačije efekte na signal koji se ispituje. U ovom istraživanju metod histograma korišćen je u delu rada koji se bavio detekcijom ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorije. Za ovu svrhu kao mere korišćeni su maksimum i minimum pošto je intenzitet refleksije jedno od primarnih obeležja značajnih ranih refleksija. Ove mere su već korišćene u nekim istraživanjima za potrebe detekcije pojedinih karakteristika sakrivenih u velikoj količini [80, 81], i one se definišu na sledeći način:

$$\text{Maksimum: } \mu_i(t_j) = \max_{j \in \mathcal{E}} x(t_j) \quad (3.13)$$

$$\text{Minimum: } \mu_i(t_j) = \min_{j \in \mathcal{E}} x(t_j) \quad (3.14)$$

Ilustracija *box-counting* tehnike kao osnove histogram metoda za izračunavanja Holderovog eksponenta data je na slici 3.8. Ilustracija je data na primeru signala čija je struktura podeljena na nepreklapajuće boksove veličine  $\varepsilon$ , od kojih je svaki karakterisan merom  $\mu$ . Grubi Holderov eksponent podskupa se izračunava menjanjem veličine boksa, kako veličina boksa teži više ka 0, Holderov eksponent postaje sve precizniji.



**Slika 3.8.** Ilustracija *box-counting* metoda za različite veličine boksa: a) levo -  $\varepsilon_1 = 1/12$  i b)  $\varepsilon_2 = 1/24$ , preuzeto iz [82]

### 3.4.3 MFDFA metoda za izračunavanje MF spektra

Jednostavan tip multifraktalne analize prikazan u prethodnom poglavlju razvijen je za karakterizaciju normalizovanih, stacionarnih mera sa multifraktalnog stanovišta [70, 83]. Ovaj standardni formalizam, nažalost, ne daje baš tačne rezultate za nestacionarne vremenske serije u kojima dominiraju trendovi ili koje ne mogu da se normalizuju. Stoga su razvijeni alternativni pristupi za multifraktalnu analizu. Jedan takav metod je i multifraktalna DFA (MFDFA) predložena u [72].

MFDFA metod predstavlja generalizaciju DFA metoda za multifraktalnu analizu. DFA (skraćenica od eng. *detrended fluctuation analysis*) metoda je tehnika koja se koristi za utvrđivanje fraktalnih svojstva i detektovanje dugoročnih korelacija u nestacionarnim vremenskim serijama sa dosta šuma [84, 85]. DFA metoda je našla primenu u raznim oblastima: DNK sekvence, strukture oblaka, geologija, vremenske serije u ekonomiji, fizika čvrstog stanja, itd. Procedura za MFDFA se sastoji od pet koraka od kojih su prva tri identična konvencionalnoj DFA proceduri. Za signal  $x(t)$  koji je dat kao niz vrednosti  $x_k$  dužine  $N$  (takav da je samo zanemarljiv broj vrednosti jednak 0) postupak određivanja MF spektra bi se odvijao u sledećim etapama:

- 1) Utvrđivanje „profila“

$$Y(i) \equiv \sum_{k=1}^i [x_k - \langle x \rangle], \quad i = 1, \dots, N \quad (3.15)$$

- 2) Deljenje profila  $Y(i)$  na  $N_s \equiv \text{int}(N/s)$  nepreklapajućih segmenata jednake dužine  $s$  (skale  $s$ ). Pošto dužina niza  $N$  često nije celobrojni umnožak skale  $s$ , manji deo serije pred kraj profila koji preostane može se uključiti tako što se procedura primeni sa drugog kraja.
- 3) Izračunavanje lokalnog trenda za svaki od ovih  $N_s$  segmenta metodom najmanjih kvadrata. Za svaki segment  $v$ , gde je  $v = 1, \dots, N_s$ , se zatim utvrđuje varijansa

$$F^2(s, v) \equiv \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[(v-1)s + i] - y_v(i)\}^2 \quad (3.16)$$

Ovde je  $y_v(i)$  je odgovarajući polinom u segmentu  $v$ . Za ovu operaciju mogu se koristiti linearni, kvadratni ili polinomi višeg stepena (pa tako dobijamo različite postupke: DFA1, DFA2,..). Pošto se „*detrending*“ vremenskih serija radi

oduzimanjem polinomskih činioaca od profila, različiti stepeni DFA se razlikuju u mogućnostima za eliminisanje trendova.

- 4) Usrednjavanje na svim segmentima da bi se dobila „fluktuaciona“ funkcija  $q$ -tog reda:

$$F_q(s) \equiv \left\{ \frac{1}{N_s} \sum_{v=1}^{N_s} [F^2(s, v)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (3.17)$$

Indeks  $q$  može imati bilo koju realnu vrednost, osim 0. Za  $q=2$ , dobija se standardna DFA procedura. Predmet interesovanja je, kako generalizovana „fluktuaciona“ funkcija  $F_q(s)$  zavisi od vremenske skale  $s$  za različite vrednosti  $q$ . Stoga, se koraci 2 – 4 ponavljaju za nekoliko skala  $s$ . Očigledno je da će se  $F_q(s)$  povećati sa povećanjem  $s$ , i da zavisi od reda  $m$  za DFA.  $F_q(s)$  je definisana samo za  $s \geq m + 2$ .

- 5) Utvrđivanje skalirajućih svojstva „fluktuacione“ funkcije analiziranjem zavisnosti  $F_q(s)$  u odnosu na  $s$  u logaritamskom dijagramu za različite vrednosti  $q$ . Ako je vremenska serija  $x_i$  (posmatrani signal) dugoročno korelisana po eksponencijalnom zakonu (*long-range power-law correlated*), funkcija  $F_q(s)$  se za velike vrednosti povećava po stepenom/eksponencijalnom zakonu:

$$F_q(s) \sim s^{h(q)} \quad (3.18)$$

Generalno eksponent  $h(q)$  može da zavisi od reda  $q$ . Za stacionarne vremenske serije  $h(2)$  je identično već pomenutom *Hurst*-ovom eksponentu  $H$  [83, 85]. Pa je stoga funkcija  $h(q)$  nazvana generalizovani *Hurst*-ov eksponent [86].

Snaga singulariteta ili Holderov eksponent  $\alpha$  se zatim izračunava iz jednačine:

$$\alpha = h(q) + q \frac{dh}{dq} \quad (3.19)$$

A sam spektar singulariteta izračunava se pomoću Ležandrove transformacije:

$$f(\alpha) = q[\alpha - h(q)] + 1 \quad (3.20)$$

### 3.4.4 Metod velikih devijacija za izračunavanje MF spektra

Komplikovan proračun MF spektra i neophodna uprošćavanje kojim se dolazi do njega dovodi do toga da su informacije koje spektar sadrži često redukovane. Multifraktalni spektar velikih devijacija (*Large Deviation Multifractal Spectrum*)  $f_g(\alpha)$ , koristi statistički opis raspodele singulariteta. Prednost multifraktalnog spektra velike devijacije, za razliku od Ležandrovog spektra, je da on neće uvek biti konkavan, pa je manje informacija izgubljeno [87]. MF spektar velikih devijacija definisan je formulom [88]:

$$f_g(\alpha) := \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log_2 N_n^\varepsilon(\alpha) \quad (3.21)$$

Slobodnije tumačenje ove jednačine govori da ona izražava nivo eksponencijalnog opadanja funkcije  $N_n^\varepsilon(\alpha)$ , koja predstavlja broj dijadičkih intervala koji imaju grubi tačkasti Holderov eksponent  $\alpha_n^k$  blizak Holderovom eksponentu  $\alpha$  sa preciznošću  $\varepsilon$ , kada rezolucija  $n$  teži beskonačnosti. Ovakav spektar blizak je definiciji druga dva spektra: Hausdorfovom spektru definisanom kao Hausdorfova dimenzija skupova tačaka koje imaju isti Holderov eksponent, i Ležandrovom spektru zasnovanom na Ležandrovoj transformaciji takozvanog Renijeovog eksponenta  $\tau(q)$  za  $q$ -ti moment mere. Spektar velikih devijacija daje statistički opis mere, za razliku od Hausdorfovog spektra  $f_h$  koji daje geometrijski opis. Iako je u nekim slučajevima  $f_h = f_g = f_l$ , uobičajena veza među ovim veličinama data je jednačinom (3.9). Procena spektra velikih devijacija pomoću metoda histograma daje dobre rezultate u određenim slučajevima dok za kompleksnije situacije nije toliko dobra procena [79, 89]. Za potrebe ovog istraživanja MF spektar dobijen metodom velikih devijacija koristiće se kao dodatni način za razmatranje karakteristika impulsnog odziva u situacijama kad je za tumačenje dobijenih rezultata neophodno više informacija. Za ove potrebe MF spektar velikih devijacija izračunava se uz pomoć Fraclab-a [87], softvera realizovanog kao programski dodatak za Matlab.

## 4. Baza impulsnih odziva korišćenih u istraživanju

Analiza impulsnih odziva koja je predmet ovog istraživanja ima za cilj da pokaže primenljivost multifraktalne analize za karakterizaciju impulsnih odziva prostorija, i da ustanovi korelaciju između akustičkih osobina prostorije i pojedinih parametara kojima se opisuju fraktali. Da bi se jednom takvom analizom došlo do rezultata koji mogu da potvrde ove korelacije neophodno je da se postavljene pretpostavke dokažu na dovoljno velikom broju impulsnih odziva prostorija različitih akustičkih karakteristika.

Za potrebe istraživanja formirana je baza impulsnih odziva koja sadrži više od 140 impulsnih odziva generisanih na različite načine. Ovi impulsnih odzivi pokrivaju širok opseg tipova prostorija koje se razlikuju po geometriji, nameni i akustičkim svojstvima. U cilju postizanja raznovrsnosti u tipovima prostorija koje čine bazu korišćeno je nekoliko različitih metoda za generisanje impulsnih odziva:

1. Impulsnih odzivi snimljeni u fizičkim modelima prostorija
2. Impulsnih odzivi dobijeni softverskom simulacijom
3. Impulsnih odzivi snimljeni u realnim prostorijama

Prva grupa impulsnih odziva korišćena je za ispitivanje na koji način se uticaj apsorpcionih i difuznih materijala u prostoriji može kvantifikovati kroz multifraktalnu analizu impulsnih odziva. Pomoću druge grupe impulsnih odziva ispitivana je mogućnost za kvantifikovanje uticaja geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv putem multifraktalne analize. Impulsnih odzivi snimljeni u realnim prostorijama korišćeni su za potvrdu dobijenih rezultata i eksperimentalno definisanih hipoteza, kao i da se ispita primenljivost predloženog metoda u realnim slučajevima.

Raznovrsnost u analiziranim impulsnih odziva ima za cilj proveru primenljivosti predloženog postupka za analizu u različitim (graničnim) situacijama i da stvori pretpostavku za korišćenje statističkog pristupa u obradi rezultata. Tabela 4.1 daje pregled broja i tipova korišćenih impulsnih odziva.

Tabela 4.1 Pregled broja i tipova impulsnih odziva korišćenih u istraživanju

Tipovi impulsnih odziva (po grupama)	Karakteristike od interesa	Broj IO
<b>1. Fizički modeli prostorija</b>		
Fizički model reverberacione komore	apsorpcija, položaj prijemnika	12
Fizički model difuzne prostorije	difuznost	18
Fizički model subotičkog pozorišta	apsorpcija i difuznost	8
<b>2. Računarski simulirane prostorije</b>		
Paralelopipedne forme sa različitim proporcijama stranica	uticaj geometrijske forme i sketering koeficijenta	21
Paralelopiped sa deformisanim stranicama	uticaj geometrijske forme i sketering koeficijenta	15
Modeli realnih prostorija (crkve)	uticaj geometrijske forme	13
<b>3. Realne prostorije</b>		
Pozorište BDP	opšte akustičke karakteristike, položaj prijemnika	11
Pozorište Boško Buha	opšte akustičke karakteristike, položaj prijemnika	13
Studiji i režije	opšte akustičke karakteristike	13
Crkve	opšte akustičke karakteristike	11 (81)
Koncertne i operске sale	opšte akustičke karakteristike	4
Ukupno:		139 (209)

## 4.1 Fizički modeli prostorija

### 4.1.1 Pojam, principi modelovanja i načini snimanja

Analiza pomoću fizičkih modela prostorija, napravljenih u nekoj smanjenoj razmeri, predstavlja jednu od najstarijih a ujedno i najzahtevnijih metoda korišćenih u istraživanju i projektovanju [90]. Fizički modeli prostorija nastali su iz potrebe da se sazna nešto više o prostiranju zvuka u prostoriji dok je ona još uvek u fazi dizajna, odnosno nije izgrađena. Zahvaljujući svojoj sličnosti sa originalnom prostorijom, fizički modeli omogućavaju simulaciju ponašanja zvuka u realnim prostorijama.

Pod pojmom fizičkog modela neke prostorije u akustici se podrazumeva maketa njene unutrašnjosti, napravljena tako da su joj sve dimenzije određene deljenjem originalnih dimenzija sa  $n$ , to jest u razmeri 1: $n$ . U analizi na fizičkim modelima prostorija uobičajeno se koriste faktori skaliranja od 10 do 50 (to jest u razmeri 1:10 do 1:50). Ove razmere proizilaze iz konačne veličine modela koga treba napraviti i sa kojim nakon toga treba manipulirati.

Koncept fizičkog modela je baziran na principu dinamički sličnih sistema. Ovaj princip govori da dva sistema mogu biti konstruisana da budu različiti u veličini, ali slični u svakom drugom pogledu [90, 91, 92]. Ovo znači da postoji jednakost u procesima koji se odvijaju u zvučnom polju u realnoj prostoriji (originalu) i zvučnog polja u fizičkom modelu te prostorije. Uslovi za zadovoljenje dinamičke sličnosti dva različita akustička sistema zasnivaju se na postizanju jednakosti osnovnih fizičkih zakonitosti [93]. Za fizički model prostorije koji je skaliran faktorom  $1/n$  treba da budu zadovoljeni sledeći uslovi:

- sve dimenzije u modelu su smanjene u razmeri  $1/n$ ,
- sva vremena između refleksija su smanjena u odnosu  $1/n$ , pošto brzina zvuka ostaje nepromenjena i u opštem slučaju je ista u originalu i u modelu,
- veličina svih fizičkih dimenzija i talasne dužine u originalu i u modelu zadovoljavaju uslov:

$$\frac{l_O}{l_M} = \frac{\lambda_O}{\lambda_M} = n \quad (4.1)$$

(indeks  $O$  označava parametre u originalu, a  $M$  u fizičkom modelu.) Ova relacija obezbeđuje da se svi procesi na graničnim površinama u ta dva sistema odvijaju na jednak način.

- Pošto je brzina prostiranja zvuka konstanta, talasna dužina mora biti smanjena u odnosu  $1/n$ , pa iz formule (4.1) dobijamo da frekvencije u modelu moraju biti povećane za  $n$  puta

$$\frac{f_M}{f_O} = n \quad (4.2)$$

Ovo praktično znači da model mora da se pobuđuje frekvencijama koje su  $n$  puta veće od frekvencija u originalu kako bi uslov sličnosti zvučnog polja bio zadovoljen. Ovako dobijeni impulsi odziv ima vremensku osu koja je komprimovana  $n$  puta, pa je prilikom tumačenja akustičkog odziva neophodno sa istim faktorom ekspandovati vremensku osu.

- apsorpcija vazduha treba da ima vrednosti  $n$  puta veća od one koje se primenjuje na originalnim frekvencijama



- Svaka površina u modelu treba da ima isti koeficijent apsorpcije na frekvenciji  $f_M$  kao odgovarajuća površina na originalnoj frekvenciji  $f_O$ :

$$\alpha_{Mi}(f_M) = \alpha_{Oi}(f_O) \quad (4.3)$$

- ako se akustičke impedanse površine modela preko proširenog frekvencijskog opsega učine jednakim impedansama odgovarajućih površina u prostoriji pune veličine, preko normalnog frekvencijskog opsega, sledi da će vreme reverberacije biti smanjeno u odnosu  $1/n$  [91];

Zahtevani stepen akustičke sličnosti prostorije i njenog fizičkog modela zavisi od vrste informacija koju pokušavamo da dobijemo iz eksperimenata koji se izvode u modelu. Ako je cilj proučavanje samo inicijalnog dela impulsnog odziva (prvih 100 ili 200 ms u originalnoj vremenskoj razmeri), može biti dovoljno da se obezbede samo dve različite vrste površina u modelu, reflektujuće (napravljene od metala, stakla, gipsa, drveta, itd.) i apsorbujuće (npr. sунđer). Apsorpcija vazduha može biti zanemarena u ovom slučaju ili se njeni efekti mogu numerički kompenzovati. Drugačija je postavka ako se posmatraju duži reflektogrami, kao što je npr. slučaj kada hoćemo da stvorimo utisak slušanja iz auditorijuma. U ovom slučaju snimljena muzika ili govorni signal se u modelu puštaju ubrzani za faktor  $n$  [4].

Pošto rad sa fizičkim modelima podrazumeva rad sa transponovanim ( $n$  puta višim) frekvencijskim opsegom za merenje se mora koristiti oprema koja omogućuje rad sa frekvencijama  $n$  puta višim od audio opsega. Osim truda koji se mora uložiti u izradu posebnog modela prostorije, za merenje u modelima neophodna je i nestandardna opreme. Jedan od razloga složenosti akustičkih ispitivanja na fizičkim modelima sala je problem adekvatne zvučne pobude [90]. Uzevši u obzir razmere koje se koriste pri skaliranju modela, neophodno je da zvučni izvor koji će biti korišćen generiše dovoljno jaku pobudu na  $n$  puta višim frekvencijama od realnosti. Jedan od uobičajenih načina zvučne pobude, koji se koristi u takvim okolnostima, je kontrolisani električni varničar. On stvara impulsnu pobudu, tačnije pucanj, i kao takav prikladan je za snimanje impulsnih odziva u fizičkim modelima. Mikrofon koji se koristi za snimanje ovakve pobude, takođe treba da bude odgovarajuće osetljivosti. Ovako zabeležen impulsni

odziv snimljen u modelu vraća se u originalni frekventijski opseg sa dodatnom korekcijom disipacije u vazduhu.

#### 4.1.2 Fizički model reverberacione komore

Model reverberacione komore korišćen u istraživanju je kopija standardne reverberacione prostorije koja se nalazi u Institutu za ispitivanje materijala u Beogradu [94]. Ovaj fizički model, prikazan na slici 4.1, napravljen je u razmeri 1:10 u odnosu na original.



**Slika 4.1.** Model reverberacione komore u razmeri 1:10 za merenje koeficijenta apsorpcije materijala koji se koriste za izradu modela [94]

Model je izrađen od debelog stakla i ima odgovarajuće pokretno postolje, čime je omogućeno njegovo postavljanje na različitim mestima u laboratoriji. Ovaj model se koristi za merenje koeficijenta apsorpcije materijala koji se primenjuju u izradi raznih fizičkih modela.

Za snimanje impulsnih odziva pripremljene su konfiguracije sa različitim količinama apsorpcionog materijala u komori. Osnovna konfiguracija je prazna reverberaciona komora (konfiguracija na slici 4.1.) koja ima najmanji stepen apsorpcije. U drugim konfiguracijama je postepeno povećavana količina apsorpcionog materijala, na ovaj način je napravljeno 6 različitih konfiguracija prostorije. Kao apsorpcioni materijal korišćen je sunđer. Korišćene su dve različite pozicije za snimanje impulsnih odziva, simbolično nazvane „blizu“ i „daleko“ što ukazuje na njihovu relativnu udaljenost

od pozicije pobude. Model je uvek pobuđivan u jednoj tački. Na ovaj način je dobijeno 12 različitih impulsnih odziva koji prikazuju kako se menja akustički odziv prostorije dodavanjem apsorpcionog materijala i promenom položaja prijemnika u prostoriji.

#### 4.1.3 Fizički model difuzne prostorije

Fizički model difuzne prostorije je paralelopipednog oblika, izrađen je za potrebe ispitivanja uticaja difuznosti prostorije na njen akustički odziv [34]. Model je skaliran u razmeri 1:10, i njegove unutrašnje dimenzije su 80x60x47 cm. Model se sastoji od metalnog rama i pokretnih stranica (koje po potrebi mogu da se skidaju). Pripremljena su dva skupa stranica sa različitim karakteristikama. Osnovni set čine ravni paneli, koji predstavljaju konfiguraciju sa minimalno mogućom vrednošću sketering koeficijenta. Dodatni skup stranica je pripremljen sa difuznim površinama napravljenim pomoću specijalnog reljefa. Korišćenjem različitih kombinacija stranica sa drugačijim svojstvima menjaju se karakteristike prostorije. Model sa svim ravnim i svim difuznim stranicama prikazan je na slici 4.2 (jedna stranica je otvorena).

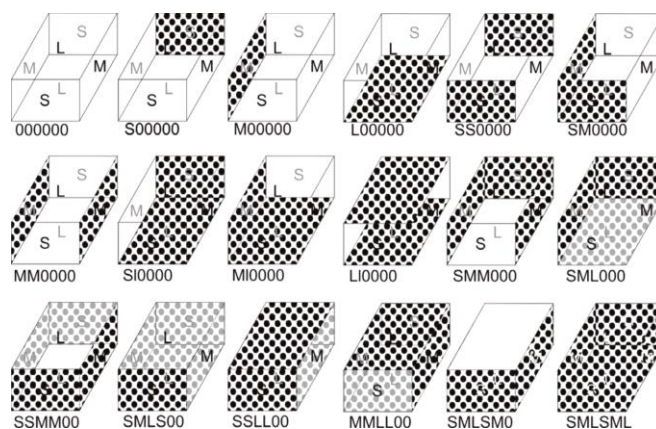


**Slika 4.2.** Izgled modela prostorije sa ravnim i difuznim stranicama [34]

Stranice su napravljene od drvenih tabli debljine 2 cm. Površina je prekrivena sa tri sloja laka kako bi se minimizovala poroznost drvene površine. Reljef je napravljen postavljanjem specijalno pripremljenih drvenih polulopti prečnika 2 cm, za koje u literaturi postoje podaci o mogućim vrednostima sketering koeficijenta [95]. U literaturi [95] je pokazano da sketering koeficijent reljefne forme realizovane na ovaj način zavisi od gustine polulopta na površini. Pri gustini kada je 50% površine pokriveno poluloptama sketering koeficijent se kreće u granicama od 0 do 0.7, u zavisnosti od frekvencije.

Eksperiment je realizovan pomoću 18 različitih kombinacija stranica u modelu, sa različitim brojem i pozicijom difuznih i ravnih stranica. Slika 4.3. šematski prikazuje sve konfiguracije modela. Šrafirane stranice na slici 4.3. grafički predstavljaju difuzne površine na modelu prostorije, a simbol od 6 karaktera predstavlja oznaku kombinacije ravnih i difuznih stranica. Simbol „0“ označava ravnu stranu, a slova L, M i S označavaju difuzne površine na pozicijama, velike, srednje i male stranice prostorije, respektivno.

Količina difuznih površina u modelu za različite konfiguracije opisana je vrednošću indeksa difuznosti površine, SDI. Vrednost SDI je izračunata za svaku analiziranu konfiguraciju predstavljenu na slici 4.3. Ravnim površinama je dodeljen sketering koeficijent 0, a difuznim površinama 1. Promenom konfiguracije modela dobija se relativno ravnomerna raspodela indeksa difuznosti u rasponu od 0 do 1. Vrednost indeksa difuznosti je 0 u modelu sa svim ravnim stranama, dok model sa svim difuznim površinama ima vrednost indeksa jednaku 1. Izračunate vrednosti SDI za sve kombinacije površina u modelu su date u tabeli 6.2.

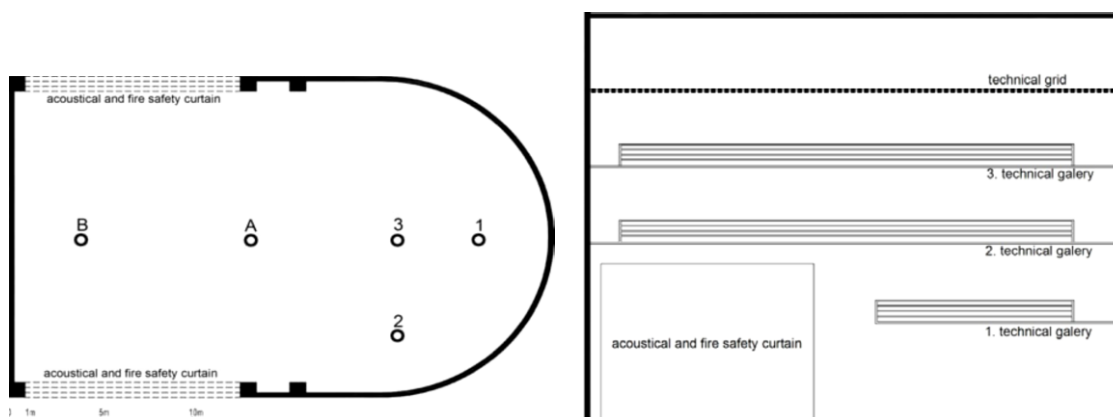


**Slika 4.3.** Prikaz različitih konfiguracija modela (šrafirane površine označavaju stranice sa difuznim reljefom) [34]

Model je pobuđen sa impulsom generisanim uz pomoć varničara [96] sa spektrom dovoljno širokim za merenje u modelu skaliranom u odnosu 1:10. Impulsni odziv je snimljen standardnim mikrofonom za merenje u fizičkim modelima. Gornja granična frekvencija je oko 80 kHz. Signali su snimljeni sa učestanošću odabiranja od 192 kHz. Povratkom u originalni frekvencijski opseg i kompenzovanjem disipacije u vazduhu, obezbeđeni su uslovi za analizu impulsnog odziva u opsegu do 1/3 oktave opsega na 6.3 kHz.

#### 4.1.4 Fizički model subotičkog pozorišta

Fizički model subotičkog pozorišta predstavlja umanjenu kopiju sale Narodnog pozorišta u Subotici. Oblik ove sale u osnovi i poprečnom preseku prikazan je na slici 4.4. Dimenzije sale su 29x18m u osnovi, a njena visina iznosi oko 22m. Ukupna zapremina sale je oko 10000 m<sup>3</sup>. Tehnička (tehnoška) mreža na 18 m visine od poda definiše vidljivi deo sale. Iznad ove mreže nalazi se mehanička oprema za scensku tehnologiju. Otvaranjem i zatvaranjem akustičkih i protivpožarnih zavesa može da se menja veličina i oblik prostora. Sala nema fiksni auditorijum već u osnovi ima ravan pod po celoj površini osnove koji, uz pomoć platformi smeštenih na oba kraja, može formirati različite varijante auditorijuma. Sve analize predstavljene u ovom radu će koristiti impulsni odziv konfiguracije sa potpuno ravnim podom.



**Slika 4.4.** Osnova i poprečni presek sale subotičkog pozorišta; pozicije zvučnog izvora (A i B) i prijemnika (1, 2 i 3) označene na osnovi sale [97]

Fizički model subotičkog pozorišta napravljen za analizu akustičkog odziva sale [97] je skaliran u razmeri 1:10. Kao rezultat ovog skaliranja veličina modela je 3x2x2 m. Sam model je napravljen iz tri dela koji kada se sklope daju celu salu. Spoljašnji izgled modela i dela njegove unutrašnjosti prikazani su na slici 4.5. Verifikovanje adekvatnosti modela i akustičke sličnosti sa salom pozorišta samo je delimično moguće jer je u trenutku nastanka rada sala izgrađena samo od golog betona bez ikakvih intervencija na površinama i dodatnom obradom osnovne geometrijske forme.



**Slika 4.5.** Izgled fizičkog modela Subotičkog pozorišta [97]

Za potrebe istraživanja snimljeni su impulсни odzivi na različitim pozicijama prijemnika i zvučnog izvora i sa različitim kombinacijama apsorpcionih i difuznih materijala u modelu.

Osnovne vizuelne karakteristike sale i ograničenja u akustičkom dizajnu definišu dizajnerski i arhitektonski zahtevi, pa su tako i ispitivani impulсни odzivi za konfiguracije prostorije koje odgovaraju ovim zahtevima. Na osnovu ovih zahteva (ograničenja) načinjene su intervencije u modelu i definisane su konfiguracije za koje su snimljeni impulсни odzivi. Ove intervencije su uključivale sledeće:

1. Dodavanje efikasnog apsorpcionog materijala na površinama iznad tehničke rešetke
2. Dodavanje efikasnog apsorpcionog materijala na gornjim delovima zidova, između druge galerije i tehničke mreže, duž cele sale
3. Na donje dve galerije pod je napravljen od čvrstog materijala koji predstavlja horizontalnu reflektujuću površinu ka podu
4. Na donjim delovima zakrivljenog zida dodat je reljef od betona
5. Betonski reljef dodat je i na zadnjem zidu sale između otvora za zavese
6. Dodatni reljef sa višom vrednošću sketering koeficijenta je dodat na svim površinama s reljefom

## 4.2 Softverski modeli prostorije

Softverski alati rade digitalnu simulaciju propagacije zvuka u prostoriji i na taj način omogućavaju jeftinije, brže i efikasnije dobijanje impulsnih odziva u odnosu na merenja u fizičkim modelima. Softverski modeli omogućavaju da se na jednostavan način variraju relevantni akustički i geometrijski parametri prostorije za koje se uvede pretpostavka da mogu imati uticaja na odziv. Stoga se softverski modeli primenjuju u dosta situacija za ispitivanje različitih problema u akustici prostorija.

Postoje dva metoda za simulaciju zvučnog polja: rej-trejsing metod i metod likova. Oba ova metoda zasnovana su na pravilima geometrijske akustike, tj. na primeni zakona po kojima se od površina odbijaju spekularne i difuzne refleksije [4]. Iako postoje izvesna ograničenja nametnuta samim principima ovakvog modelovanja, rezultati dobijeni na ovaj način mogu sa dovoljnom tačnošću poslužiti kao indikator mogućih korelacija između geometrijskih karakteristika prostorije i njenog akustičkog odziva [98].

U ovom istraživanju akcenat kod impulsnih odziva generisanih pomoću softverskih modela bio je na ispitivanju uticaja geometrijskog oblika na dobijeni multifraktalni spektar impulsnog odziva. Za potrebe istraživanja korišćeno je više različitih modela: jednostavne geometrijske forme, modeli sa izrazito nepravilnim stranicama i modeli kompleksnih oblika poput realnih pozorišnih sala i crkava. Na ovaj način je postignuto da jedan broj prostorija u bazi softverskih modela ima geometrijske oblike kakvi se mogu javiti u realnim zgradama, dok ostale imaju s praktičnog aspekta sasvim hipotetičke forme. Pomoću ovih impulsnih odziva stvoreni su preduslovi da se impulsnih odzivi prostoriji analiziraju sa multifraktalnog stanovišta u funkciji parametara kojima se opisuju geometrijske karakteristike prostorije.

Modelovanje zvučnog polja u softverskim modelima prostorije vršeno je primenom rej-trejsing simulacije. Za simulaciju je korišćen softverski paket ODEON. Pri analizi u svakoj prostoriji zvučni izvor je postavljan u centralnoj zoni unutrašnje zapremine, malo pomeren iz centra simetrije. Zvučni zraci su emitovani uniformnom raspodelom iz izvora u slučajnim pravcima. Zraci su zatim praćeni u okviru zadatog vremenskog intervala koji odgovara trajanju impulsnog odziva, odnosno vremena reverberacije.

U okviru ovog rada analiza je izvedena za nekoliko oblika hipotetičkih geometrijskih oblika, kao i za modele crkvenih prostora.

#### 4.2.1 Modeli paralelopipednih prostorija različitih proporcija

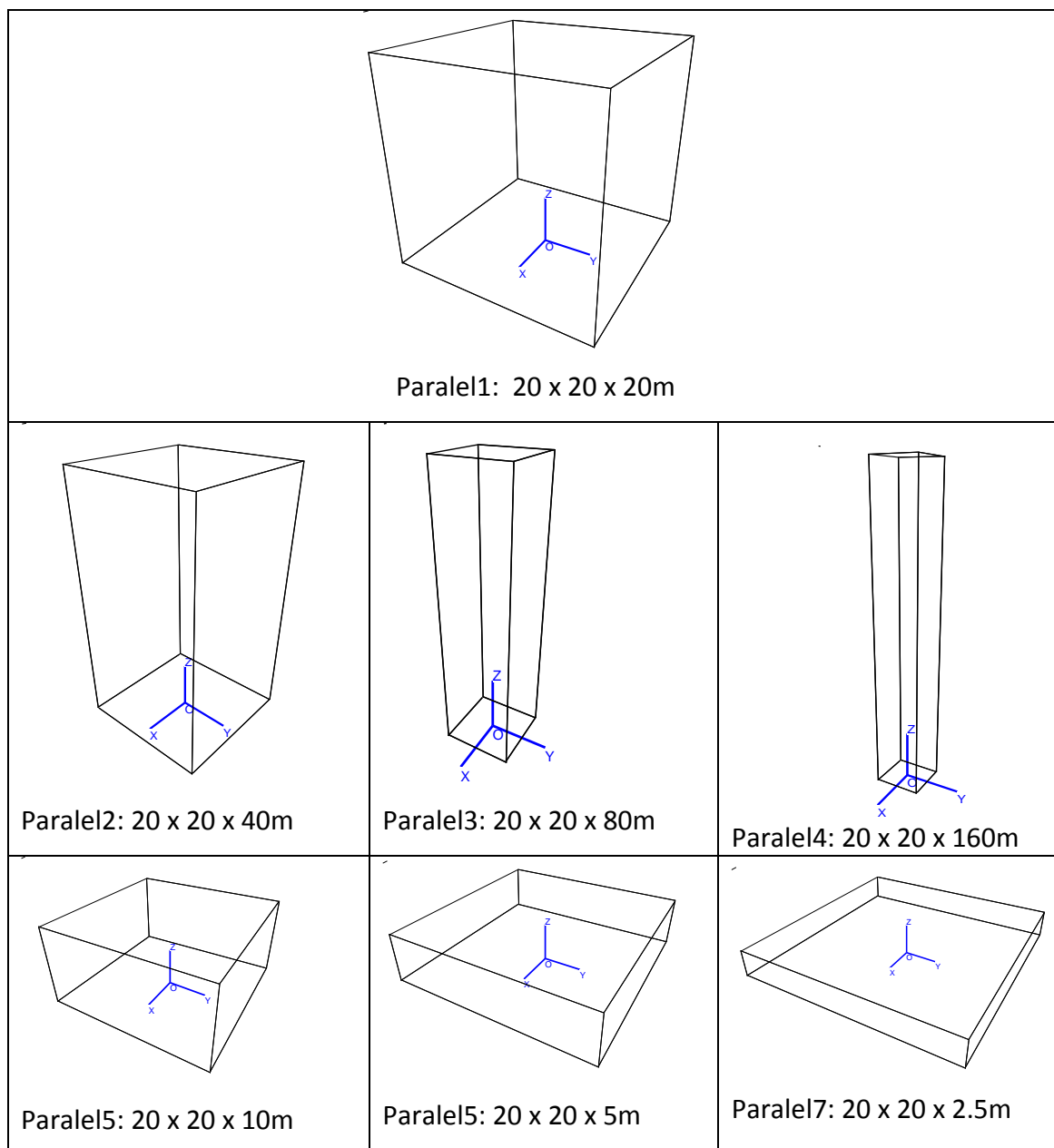
Jedna grupa modela formirana je od paralelopipednog modela istih stranica (kvadar) koja je modifikovana na dva načina. Prvi skup modela nastao je transformacijom proporcija na takav način da su formiran izduženi modeli (tipa hodnika), tako što su četiri stranice modela povećavane u tri koraka. Drugi skup modela nastao je tako što su četiri stranice modela skraćivane takođe u tri koraka. Na ovaj način formirani su modeli sa velikom disproporcijom dimenzija što kao posledicu ima promenu uslova za postizanje difuznog polja. Simulacija u svim modelima podrazumevala je uniformno raspoređen koeficijent apsorpcije unutrašnjih zidova, dok je koeficijent difuznosti površina (sketering koeficijent) uniformno variran sa vrednostima 0.2, 0.5 i 0.9.

Analiza objektivnih parametara impulsnog doziva u posmatranim modelima [98] pokazala je da vrednosti vremena reverberacije određene na osnovu simuliranog impulsnog odziva odstupaju od statistički očekivanih vrednosti izračunatih po Sabinovoj formuli. Odstupanja su posledica različito ostvarenog stepena difuznosti polja. U tabeli 4.2 prikazana su procentualna odstupanja simuliranih u odnosu na statistički očekivane vrednosti vremena reverberacije za sve posmatrane paralelopipedne modele za različite koeficijente difuznosti unutrašnjih površina.

Tabela 4.2. Odstupanja simuliranih od statističkih vrednosti T60 (pozitivne vrednosti odstupanja pokazuju veće simulirane od statističkih vrednosti)

	Sc=0.2	Sc=0.5	Sc=0.9
Paralel1	+3%	+10%	+5%
Paralel2	-2%	+5%	+5%
Paralel3	-8%	0	+3%
Paralel4	-10%	-2%	1%
Paralel5	-6%	+3%	+3%
Paralel6	-10%	-2%	1%
Paralel7	-25%	-25%	-2%





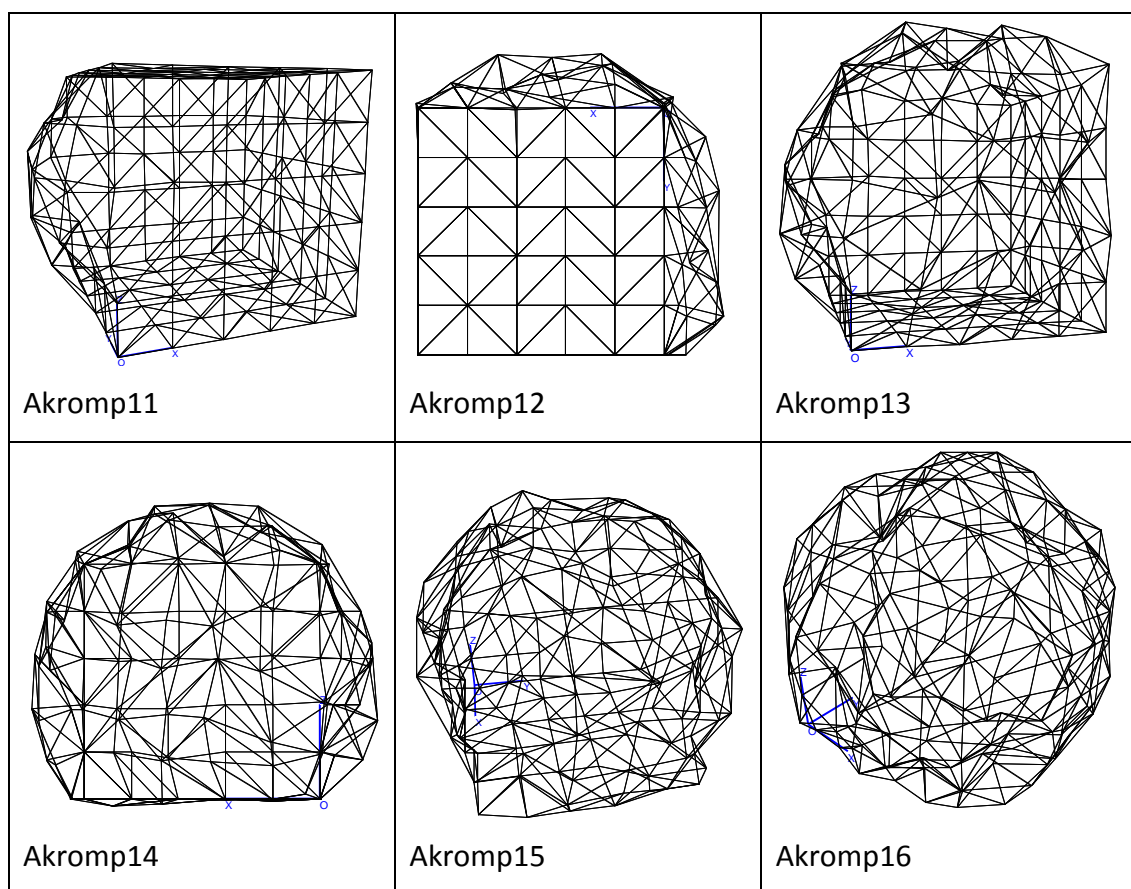
**Slika 4.6.** Izgled softverskih modela paralelopipednih prostorija različitih proporcija [98]

#### 4.2.2 Modeli nepravilnih formi izvedeni iz paralelopipedne forme

Druga grupa modela nastala je takođe transformacijom pravilnog istostraničnog paralelopipeda tako što je sukcesivno stranica po stranica dobijala sitnoizlomljenu nepravilnu formu. Na ovaj način povećavana je difuznost svake površine. I ovaj skup modela analiziran je na isti način kao i prethodni. U tabeli 4.3 data su odstupanja simuliranih od statistički očekivanih vrednosti za sve analizirane konfiguracije. Izgledi samih modela prikazani su na slici 4.7.

Tabela 4.3. Odstupanja simuliranih od statističkih vrednosti T60 (pozitivne vrednosti odstupanja pokazuju veće simulirane od statističkih vrednosti)

	Sc=0.2	Sc=0.5	Sc=0.9
Akromp11	+5%	+12%	+5%
Akromp12	+5%	+13%	+6%
Akromp13	+6%	+14%	+6%
Akromp14	+6%	+15%	6%
Akromp15	+19%	+23%	+15%
Akromp16	+10%	+18%	+9%

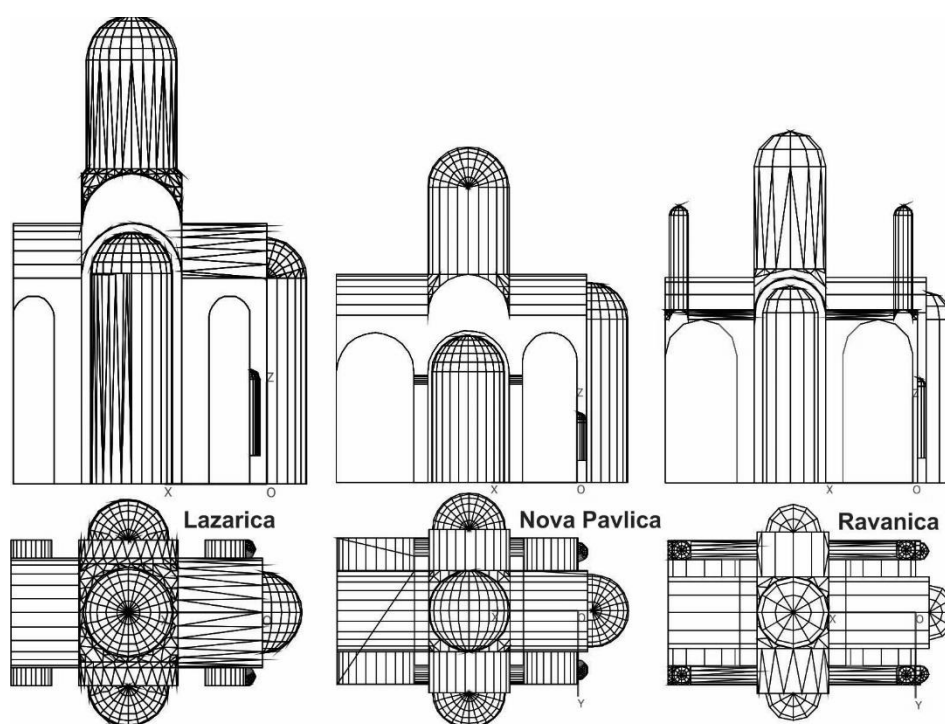


Slika 4.7. Izgled softverskih modela prostorije paralelopipednih prostorija sa izlomljenim stranicama

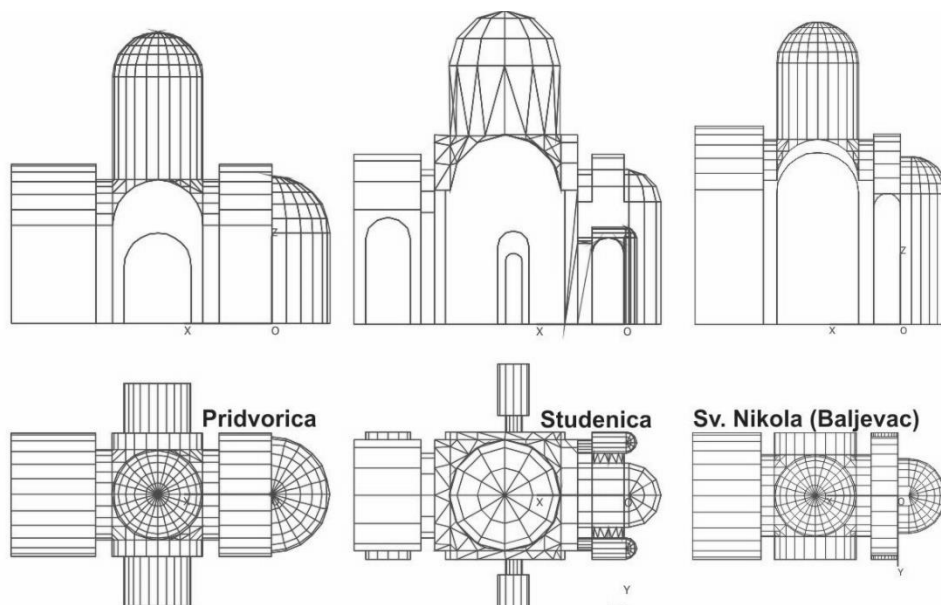
### 4.2.3 Modeli crkava

Modeli crkava u kojima je izvršena simulacija impulsnog odziva pripadaju moravskom, raškom i vizantijskom stilu gradnje. Ovi modeli preuzeti su iz istraživanja u kojima su analizirane razlike u objektivnim parametrima akustičkog odziva u odnosu na različite stilove gradnje [99]. Analizirani modeli prikazani su na slikama 4.8. (moravska stilska grupa), 4.9 (raška stilska grupa) i 4.10 (vizantijska stilska grupa).

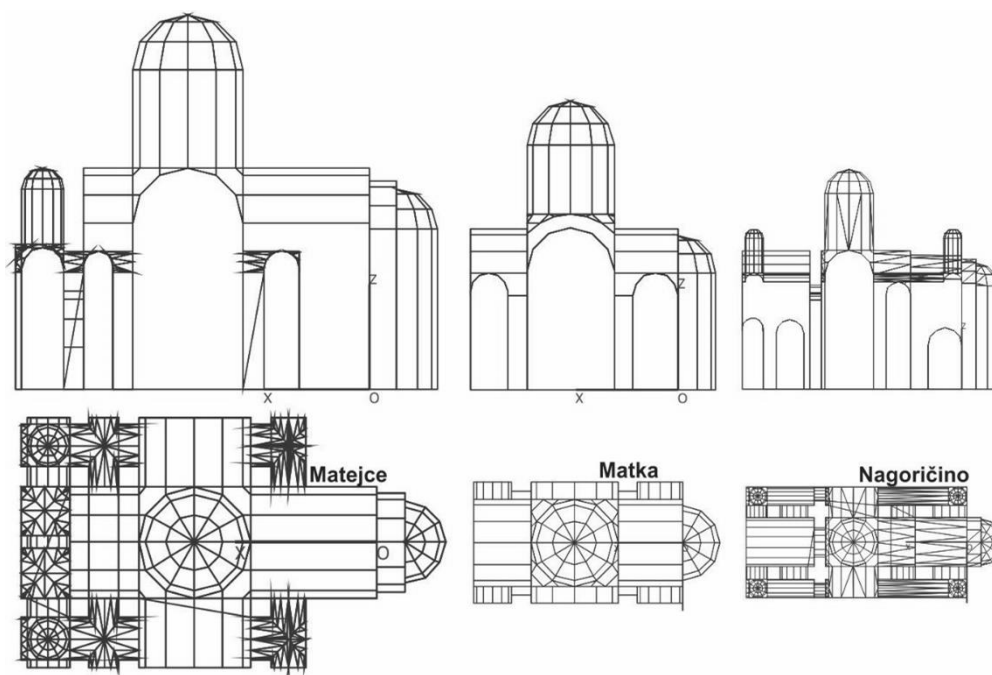
Impulsni odzivi koji su analizirani za potrebe ovoga rada simulirani su za poziciju izvora ispred oltara i poziciju prijemnika u centralnom delu prostora.



Slika 4.8. Izgled modela crkava iz moravske stilske grupe [99].



Slika 4.9. Izgled modela crkava iz raške stilske grupe [99]



Slika 4.10. Izgled modela crkava iz vizantijske stilske grupe [99]

### 4.3 Realne prostorije

Impulsne odzive snimljene u realnim prostorijama sačinjava više grupa impulsnih odziva snimljenih u različitim realnim prostorijama i na različitim pozicijama u okviru ovih prostorija. Četiri grupe prostorija su korišćene u istraživanju:

- pozorišne sale
- studiji i režije
- crkve
- koncertne i operске sale

Svaka od ovih grupa odslikava posebnosti koje ovi tipovi prostorija imaju u akustičkom smislu. Različiti zahtevi konzumenata akustike ovih prostorija odražavaju se i na oblik i karakteristike impulsnih odziva snimljenih u ovim prostorijama.

Kao primer pozorišnih sala analizirani su impulsni odzivi snimljeni u dva beogradska pozorišta: "Beogradsko dramsko pozorište" i dečije pozorište "Boško Buha". Posmatrani su impulsi odzivi snimljeni u klasičnim pozicijama za analizu akustičkih karakteristika sa izvorom na bini i prijemnim mestima na reprezentativnom uzorku pozicija duž sredine gledališta i bočno.

U kategoriji studijskih prostora analizirani su impulsni odzivi u većem broju studija koji su u dužem periodu prikupljeni u Laboratoriji za akustiku u okviru njenog projektantskog delovanja u ovoj oblasti.

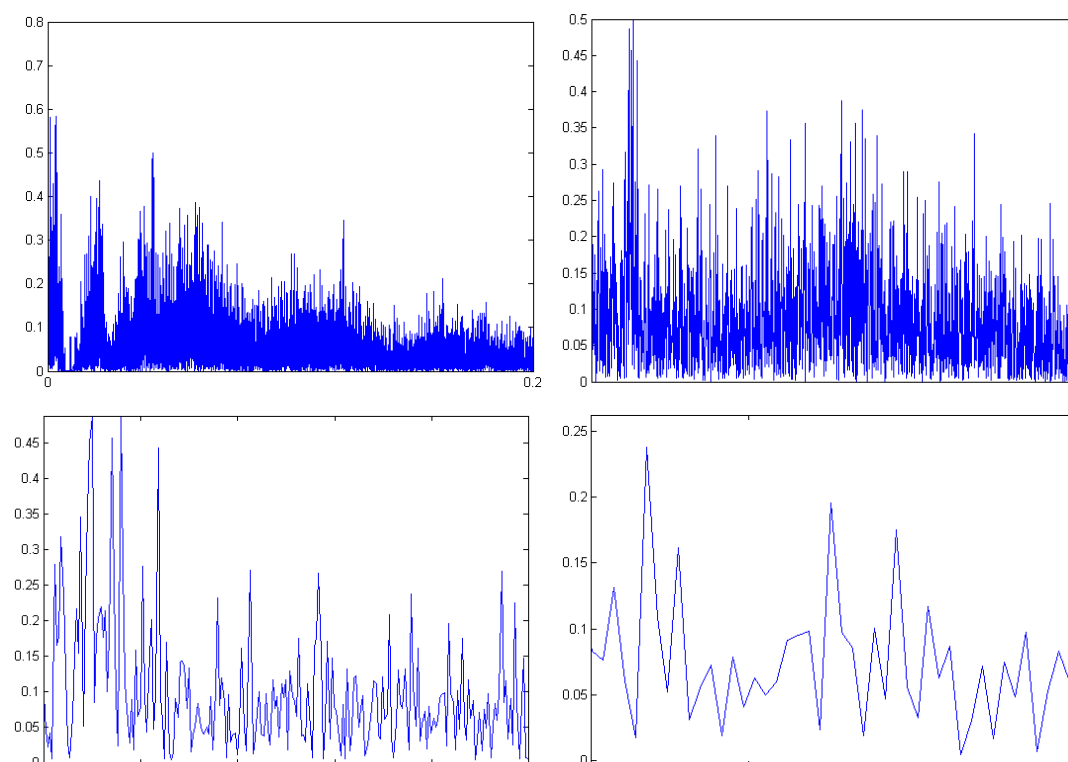
Pored analize simuliranih impulsnih odziva u modelima crkava prikazanih u prethodnom poglavlju, analizirani su i izmereni impulsni odzivi snimljeni na terenu. I ovi podaci preuzeti su iz arhiva laboratorije.

Kategorija koncertnih i operskih prostora analizirana je na osnovu impulsnih odziva pre i posle akustičkog renoviranja Opere u Mariboru [100] i Opere u Ljubljani. U ovoj kategoriji analiziran je i impulsni odziv poznate operске sale u Beču, *Musicverein* koji je preuzet sa interneta.

## 5. Detekcija ranih refleksija pomoću multifraktala

### 5.1 Pretpostavke za primenu multifraktala u analizi impulsnog odziva prostorijske

Da bi signal bio analiziran fraktalnim metodama on ne mora biti fraktal u formalnom smislu, tj. ne mora da zadovoljava sve one neophodne uslove potrebne da bi se neka struktura smatrala fraktalom. Ipak, neke od karakterističnih osobina kojima su definisani fraktali mogu se pronaći u signalu impulsnog odziva: fina struktura, samo-sličnost u nekom smislu, kompleksna struktura koja je posledica nepravilnosti na lokalnom i globalnom nivou a koja se teško opisuje jezikom tradicionalne geometrije, itd. Ove osobine se mogu uočiti i na slici 5.1. koja prikazuje uvećanje dela impulsnog odziva.



**Slika 5.1.** Izgled impulsnog odziva na nekoliko različitih skala uvećanja u rasponu od 200 ms (slika gore levo) do 1 ms (slika dole desno)

Osim ovih vizuelnih osobina, sam postupak nastanka impulsnog odziva predstavlja dodatni motiv za primenu fraktalne teorije u analizi impulsnog odziva. Fizički

proces u kome se formira signal impulsnog odziva prostorije ukazuje na to da, uz određene aproksimacije, impulсни odziv i njegovi delovi mogu da se posmatraju kao signal koji poseduje osobinu samosličnosti (iako je ona ovde uglavnom statistička, a u manjoj meri geometrijska). Samosličnost ovde nastaje refleksijama koje predstavljaju replike direktnog zvuka, samo pristigle sa kašnjenjem i izvesnim slabljenjem. Uvek kad prirodni objekti i pojave nemaju striktno fraktalno ponašanje (već njihova fraktalna dimenzija varira sa skalom uvećanja) multifraktali se nameću kao logičan izbor za nastavak takve analize. Multifraktalna analiza se bavi analizom, karakterizacijom i klasifikacijom nepravilnih mera, kapaciteta i funkcija. Regularnost (odnosno, neregularnost) mere koja se koristi za analizu signala putem multifraktala sadrži informacije o procesu koji je generiše. Ove informacije manifestuju se kroz raspodelu Holderovih eksponenata, tj. multifraktalni spektar koji shodno tome poseduje određene informacije o strukturi zvučnog polja unutar prostorije.

Karakteristične vrednosti multifraktalnog spektra i parametri dobijeni primenom fraktalne teorije mogu da opišu signal impulsnog odziva sa globalnog stanovišta i samim tim pruže informacije o prostoriji kao složenom trodimenzionalnom sistemu prenosa. Nema puno parametara koji egzaktno kvantifikuju signal sa multifraktalnog stanovišta, više su to u pitanju raspodele i transformacije nekoliko osnovnih parametara. Grubo, ovi parametri mogu da se podele prema tome da li opisuju lokalne ili globalne karakteristike signala, objekta ili pojave koja se analizira. Način primene multifraktalne analize određuju cilj i željeni rezultati istraživanja. Koji od ovih parametara će se koristiti zavisi od toga da li je cilj segmentacija ili klasifikacija. Kada želimo da izdvojimo određene delove (lokalne karakteristike) signala onda je u pitanju segmentacija i tada se računaju lokalni Holderovi eksponenti. Nasuprot tome klasifikacija se radi na osnovu globalnih opisa signala, pa je kod nje suština u izračunavanju multifraktalnog spektra ili drugih globalnih parametara.

U nastavku (narednim poglavljima) biće pokazano kako lokalna i globalna regularnost signala impulsnog odziva i parametri izvedeni iz analize ove regularnosti mogu da se koriste za opisivanje impulsnog odziva i detekciju pojedinačnih „pojava“ u njemu.

## 5.2 Rane refleksije kao mera teksture impulsnog odziva

Na tragu već pomenute definicije teksture date u poglavlju 2.7 i metoda za njeno objektivno opisivanje, prvi pokušaj za karakterizaciju teksture pomoću multifraktala usmeren je na detekciju ranih refleksija koje formiraju teksturu.

Detekcija ranih refleksija je značajna i još uvek otvorena tema u akustici prostorija. Do sada razvijeni metodi za analizu impulsnog odziva i izdvajanje lokalnih karakteristika ne uspevaju da otkriju sve refleksije od značaja i kvantifikuju teksturu impulsnog odziva. Uzevši u obzir činjenice navedene u prethodnim poglavljima zaključuje se da rane refleksije imaju veoma veliki uticaj na doživljaj zvuka u prostoriji. Već je u više navrata pomenuto da su osnovne karakteristike refleksija njihov intenzitet, vreme nailaska nakon direktnog zvuka i pravac odakle dolaze. Kombinacija različitih vrednosti ovih parametara proizvodi različite efekte na subjektivni doživljaj zvuka u prostoriji, pa je identifikovanje refleksija od značaja kompleksan problem. Ono što problem detekcije refleksija čini težim, odnosno otežava validaciju dobijenih rezultata, je to što tačan položaj ranih refleksija od značaja nije poznat. Zato je procena uspešnosti svakog predloženog metoda za detekciju subjektivna, zavisna od impulsnih odziva na kojima se testira i načina na koji su tražene refleksije identifikovane.

Istraživanja koja su se do sada bavila detekcijom refleksija mogu se grubo podeliti u zavisnosti od toga da li se bave vremenskom ili prostornom lokalizacijom refleksija. Vremenska lokalizacija podrazumeva identifikovanje trenutka nailaska refleksije u poziciju prijemnika, dok se prostorna odnosi na određivanje pravca iz koga refleksija nailazi. Predmet istraživanja u ovom radu je lokalizacija refleksija u vremenskom domenu, odnosno određivanje položaja ranih refleksija u impulsnom odzivu.

Svi metodi za detekciju u većoj ili manjoj meri koriste saznanja vezana za uticaj refleksija na doživljaj zvuka u prostoriji. Zato je razumevanje percepcije refleksija (detaljno obrađeno u poglavlju 2.3) neophodno za automatizaciju njihove detekcije. Do sada poznate činjenice govore da rane refleksije koje imaju uticaja na zvučnu sliku moraju da zadovoljavaju određene kriterijume. Neke od pretpostavki i do sada poznatih saznanja koja su razmotrena prilikom kreiranja metoda za detekciju refleksija pomoću



multifraktala su sledeće:

- stepen koherentnosti refleksije sa direktnim zvukom je važan za ishod procesiranja zvuka u čulu sluha;
- teorijski posmatrano, refleksija od dovoljno velike tvrde površine trebalo bi da bude koherentna sa direktnim zvukom, jer se tada ne menja talasni oblik signala, već samo dolazi do kašnjenja i eventualnog smanjenja amplitude;
- čujnost refleksija zavisi od njihovog nivoa i pozicije u odnosu na direktni zvuk, tj. postoji neka granica primetnosti ispod koje se refleksija ne čuje;
- granica primetnosti ispod koje refleksija nema uticaja na zvučnu sliku je na oko -20 dB ispod nivoa direktnog zvuka (za muzički signal);
- kada do slušaoca dolazi više refleksija relativno ravnopravnih po amplitudama, uticaj svake od njih na zvučnu sliku dominantno zavisi od efekta vremenskog maskiranja;
- rezultati merenja praga primetnosti refleksija pokazali su da nakon jedne refleksije relativnog nivoa -10 dB u odnosu na direktan zvuk postoji vremenski interval nakon te refleksije, koji traje oko 10 ms, u kome zbog maskiranja čulo sluha ne može da percipira eventualni nailazak narednih refleksija;
- pri nailasku više refleksija u grupi, prag primetnosti je rezultanta njihovog zbirnog dejstva na čulo sluha (bazilarnu membranu). Ispitivanja su pokazala da je potrebno povećanje od oko 6 dB u odnosu na nivo okolnih refleksija da bi refleksija na neki način bila „primećena“.

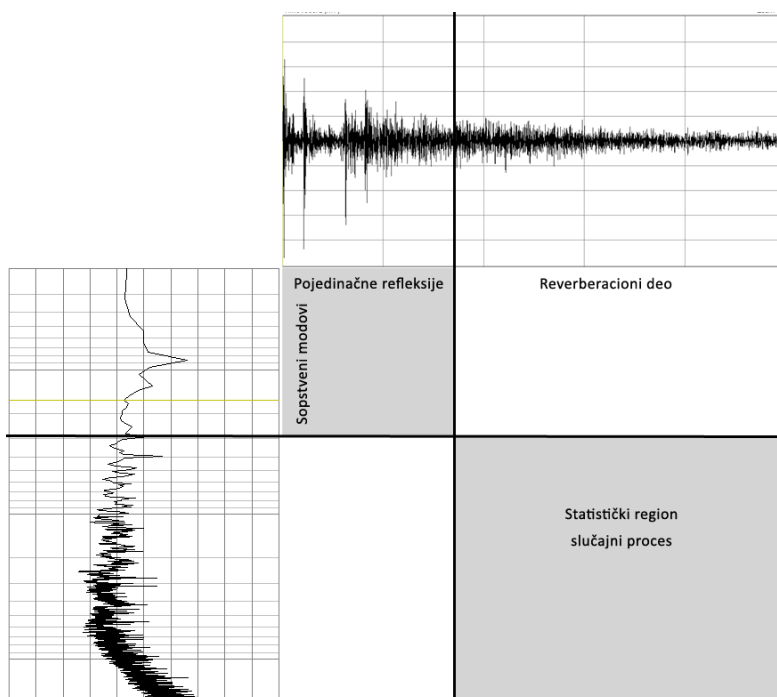
Pitanje koje se neminovno postavlja prilikom detekcije refleksija u svrhu opisivanja teksture je: kako odrediti refleksija od značaja? Teorijska razmatranja na ovu temu sugerišu da u obzir treba uzeti:

- vremensku integraciju i efekat binauralnog maskiranja ljudskog čula sluha [60], kao i
- prag apsolutne percepcije (aWs) pojedinačne refleksije u zavisnosti od vremena kašnjenja u odnosu na direktni zvuk (eksperimentalni rezultati na ovu temu dati su u radu [61],

uz podsećanje, da prema Beraneku [55] dobra tekstura zahteva veliki broj ranih

refleksija koje su uniformno ali ne precizno raspoređene po vremenskoj osi, bez pojedinačnih refleksija koje dominiraju u odnosu na druge.

Oblast gde se javljaju rane refleksije i gde je njihov uticaj dominantan je početni deo impulsnog odziva. Za analizu teksture impulsnog odziva i uticaja ranih refleksija najčešće se koristi prvih 80, 100 ili 200 ms impulsnog odziva, kao oblast u kojoj su prisutne rane refleksije. Ove granice se najčešće koriste u istraživanjima u kojima su ispitivane koncertne dvorane, sale i veće prostorije. Naravno da je u manjim prostorijama impulsni odziv kraći, pa se za utvrđivanje oblasti od interesa za detekciju refleksija nameće pretpostavka da se ona računa relativno u odnosu na vreme reverberacije. Na osnovu formula i objašnjenja datih u 2. poglavlju granica do koje u signalu impulsnog odziva mogu da se uoče pojedinačne pojave može se predstaviti u vremensko-frekvencijskom domenu, slika 5.2.



**Slika 5.2.** Podela impulsnog odziva na oblasti od interesa u vremensko-frekvencijskom domenu

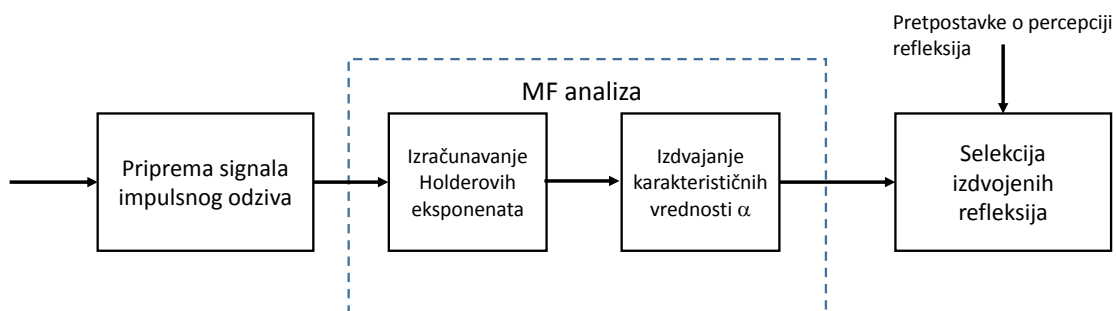
Vremensko-frekvencijski domen sa slike 5.2 podeljen je na četiri oblasti. U gornjem levom uglu nalazi se oblast u kojoj mogu da se u vremenskom domenu uoče pojedinačne refleksije, a u frekvencijskom rezonantni modovi. Ovo je oblast u kojoj se javljaju efekti koje ljudsko čulo sluha doživljava kao neprijatne. Nasuprot tome u donjem desnom uglu nalazi se oblast u kojoj se ne mogu uočiti pojedinačne pojave, a impulsni

odziv može se smatrati u potpunosti statističkim procesom. Veličina prostorije utiče na granicu između ovih oblasti, povećanje zapremine prostorije dovodi do povećanja vremena  $t_{stat}$  (granica između oblasti u vremenskom domenu) i smanjenja  $f_{schr}$  (granica između oblasti u frekvencijskom domenu), i obrnuto. Ovo dovodi do toga da u velikim koncertnim salama rezonantni (sopstveni) modovi nisu relevantni za tumačenje ali je uticaj pojedinačnih refleksija značajan, dok je u malim prostorijama obrnut slučaj.

Uzevši u obzir prethodno navedeno i činjenicu da se dobra tekstura postiže dovoljnom uniformnošću energije refleksija u prvih 200 ms impulsnog odziva, kao oblast od interesa za detekciju refleksija u ovom radu koristiće se prvih 200 ms impulsnog odziva (za koncertne sale i velike prostorije, dok je za male prostorije ispitivanje vršeno na prvih 100 ms).

### 5.3 Metod za detekciju refleksija

Multifraktalna analiza se već koristi u brojnim oblastima za klasifikaciju i izdvajanje nekih karakteristika signala sakrivenih u velikoj količini podataka. Varijacije u intenzitetu refleksija i regularnosti strukture impulsnog odziva mogu da definišu multifraktalnu raspodelu. Ove varijacije se uočavaju u vrednostima Holderovih eksponenata. Budući da visoke vrednosti Holderovog eksponenta ( $\alpha$ ) ukazuju na tačke u kojima se menja regularnost signala, njihovo prisustvo moglo bi da se iskoristi za izdvajanje ranih refleksija u impulsnom odzivu. Postupak detekcije bi se onda mogao uprošćeno posmatrati kao proces izdvajanja određenih vrednosti parametra  $\alpha$  iz dobijenog spektra s ciljem detekcije traženih lokalnih karakteristika. Blok šema koja prikazuje predloženi postupak za detekciju ranih refleksija data je na slici 5.3.

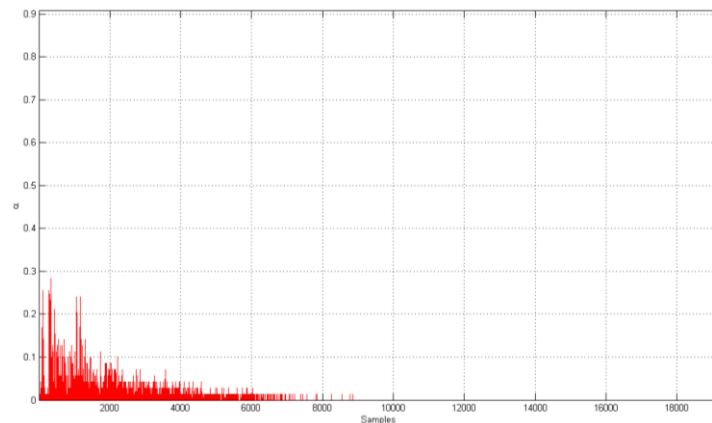


**Slika 5.3.** Blok šema metoda za detekciju ranih refleksija pomoću multifraktala

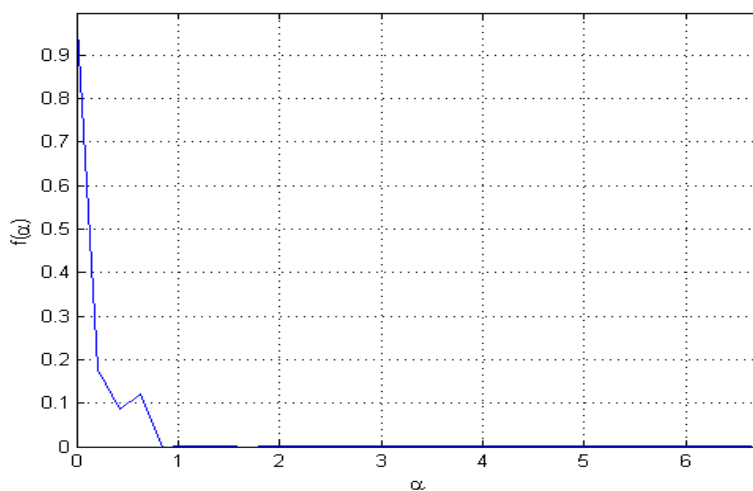
Za potrebe MF analize u ovom delu istraživanja korišćen je metod histograma, a sam algoritam realizovan je kodom napisanim u Matlab-u. Ovaj algoritam, osim mogućnosti računanja raspodele Holderovog eksponenta  $\alpha$  za dati signal i prikaza njegovog multifraktalnog spektra,  $f(\alpha)$ , pruža i mogućnosti prikaza rezultata inverznog postupka. Naime, moguće je zadati određeni opseg ( $\alpha_d - \alpha_g$ ) u raspodeli vrednosti Holderovog eksponenta iz MF spektra, i ustanoviti koji delovi signala su odgovorni za formiranje tog opsega vrednosti parametra  $\alpha$ .

Za izračunavanje vrednosti Holderovih eksponenta koristi se metod histograma opisan u poglavlju 3.4.2. Ono što je preduslov da predloženi postupak može da se iskoristi za detekciju refleksija je neka vrsta transformacije koja omogućava mapiranje vrednosti signala impulsnog odziva u odgovarajuće vrednosti  $\alpha$  i  $f(\alpha)$ .

Impulsni odziv prostorije opisuje se jedno-dimenzionom realnom i bipolarnom funkcijom  $x(t)$ , sa diskretnim vrednostima (odbircima) u vremenu, od kojih je svaka karakterisana diskretnom vrednošću K-tog nivoa,  $x(t)=x(t_k)=k*\Delta x$ ,  $k=0,1,2, \dots,(K-1)$ . Niz Holderovih eksponenta izračunatih metodom histograma (prema formuli 3.10) je niz, iste dužine kao i ulazni signal, ispunjen sa vrednostima  $\alpha(t_k)$  koje se 1-na-1 preslikavaju na odgovarajuće odbirke u signalu impulsnog odziva. Primer niza Holderovih eksponenta izračunatih za jedan impulsni odziv prikazan je na slici 5.4. Iz ovog niza vrednosti  $\alpha(t_k)$  izračunava se funkcija  $f(\alpha)$ , prikazana na slici 5.5, a koja prikazuje raspodelu vrednosti  $\alpha$ . Kao mera za izračunavanje Holderovih eksponenta iskorišćen je maksimum,  $\mu_i(t_j) = \max_{j \in \mathcal{E}} x(t_j)$ . Analizom dobijenog MF spektra vidi se da postoje opsezi vrednosti Holderovih eksponenta koji su grupisani u određene oblasti.



**Slika 5.4.** Prikaz Holderovih eksponenta izračunatih za jedan impulsni odziv

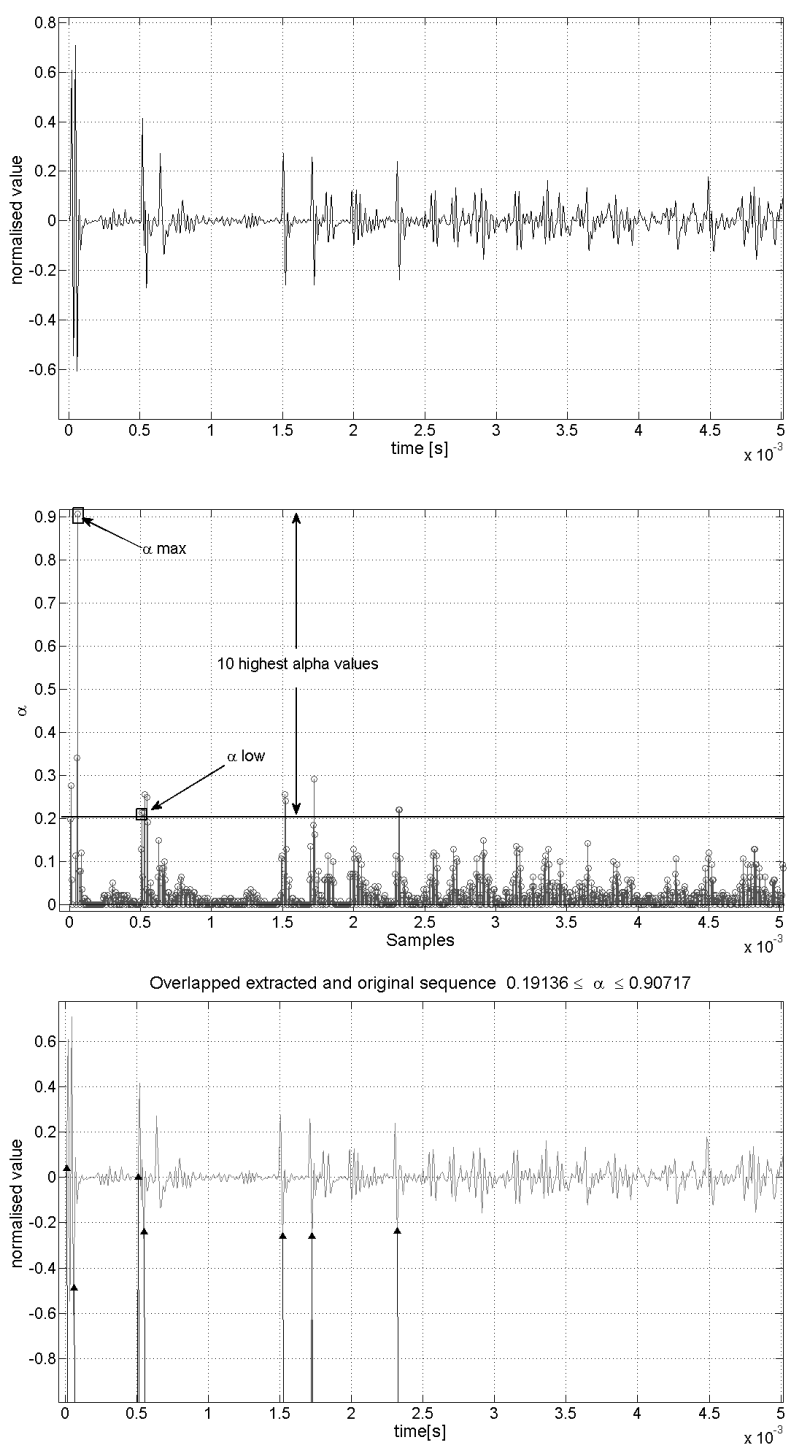


**Slika 5.5.** Izgled raspodele Holderovih eksponenta (MF spektar)

Delovi impulsnog odziva u kojima se menja lokalna regularnost signala uočavaju se u vrednostima Holderovog eksponenta izračunatih za te delove signala. Refleksije koje povezuju iste, odnosno slične vrednosti (određeni opseg) Holderovog eksponenta mogu da ukazuju na neke specifične karakteristike zvučnog polja u prostoriji. Cilj je onda inverznim postupkom izdvojiti ove vrednosti iz multifraktalnog spektra. Selekcija izdvojenih refleksija se može raditi na više načina:

- Prosto izdvajanje samo po intenzitetu
- Izdvajanje na lokalnom nivou (prozor u okolini refleksije)
- Selekcija korišćenjem dodatnih psihoakustičkih kriterijuma vezanih za percepciju refleksija

Slika 5.6 prikazuje najjednostavniji način za izdvajanje refleksija, prostim odabirom najvećih vrednosti Holderovog eksponenta.

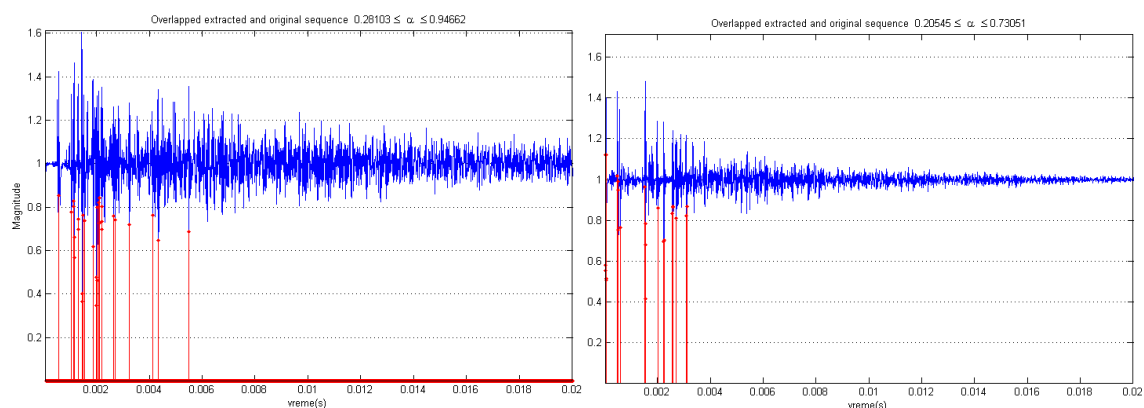


**Slika 5.6.** Ilustracija postupka izdvajanja refleksija izborom najvećih vrednosti Holderovih eksponenta za opseg  $0.191 < \alpha < 0.907$ : izgled impulsnog odziva (slika gore), raspodela Holderovog eksponenta i izdvajanje željenog opsega  $\alpha_d - \alpha_g$  (slika u sredini), oznake detektovanih refleksija nakon selekcije (slika dole) [101]

Polazeći od toga da visoke vrednosti eksponenta  $\alpha$  ukazuju na tačke gde se značajno menja regularnost signala, tj. na singularitete u njegovoj strukturi, napravljena

je paralela sa ranim refleksijama kao tačkama u impulsnom odzivu koje se na određeni način mogu smatrati tačkama singulariteta. Oдавde proističe pretpostavka da visoke vrednosti ukazuju na rane refleksije od značaja (to mogu biti koherentne, istaknute, usamljene refleksije) u impulsnom odzivu. Određeni opseg vrednosti eksponenta  $\alpha$  bi onda trebalo da obuhvati refleksije koje spajaju iste ili slične karakteristike a koje bi posledično trebalo da budu odgovorne za pojedine fenomene u akustici prostorije. Kao opseg ( $\alpha_d - \alpha_g$ ) od interesa izabrane su najveće vrednosti Holderovog eksponenta  $\alpha$ , pa se za gornju granicu opsega uzima maksimalna vrednost eksponenta  $\alpha$  u raspodeli,  $\alpha_g = \alpha_{max}$ . Donja granica opsega vrednosti za  $\alpha$  bira se u zavisnosti od toga koliko refleksija želimo da detektujemo. U primeru sa slika 5.6 opseg je izabran tako da obuhvata 10 najvećih  $\alpha$  vrednosti.

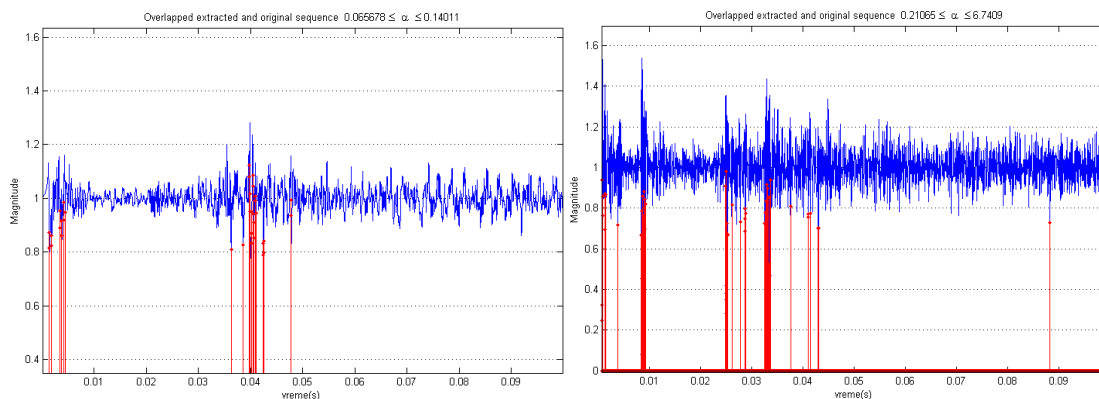
Na sledećim slikama prikazani su rezultati detekcije refleksija na primeru pojedinih impulsnih odziva korišćenih u istraživanju. Na slici 5.7 prikazani su rezultati detekcije za impulsne odzive snimljene u modelu reverberacione komore dobijeni uz pomoć predloženog algoritma. U pitanju su impulsni odzivi snimljeni u dve pozicije mikrofona (jedna blizu i jedna dalje od izvora zvuka) sa različitim sadržajem apsorbujućih materijala u prostoriji. Dobijeni rezultati pokazuju različitu strukturu detektovanih refleksija u ova dva slučaja kao posledicu različito modelovanih akustičkih karakteristika prostorije.



**Slika 5.7.** Detekcija refleksija kod impulsnih odziva snimljenih u modelu prostorije: signal „daleko sa 7 apsorbera“ (slika levo), signal „blizu sa 1 apsorberom“ (slika desno)

Na slici 5.8 prikazana je detekcija refleksija u slučaju impulsnog odziva snimljenog u sali Mariborskoj operi pre i posle akustičke obrade. Sala Mariborske opere je akustički obrađena kako bi se poboljšala njena akustička svojstva, ove intervencije su upravo za

cilj imali poboljšanje teksture impulsnog odziva. Rezultati ilustrovani na slici 5.8. prikazuju promenu rasporeda ranih refleksija nakon akustičke obrade prostorije koja se ogleda u ravnomernijoj raspodeli, većoj gustini i bogatijoj strukturi impulsnog odziva, što sve skupa dovodi do unapređenja teksture. Rezultati detekcije refleksija u neku ruku ovo i potvrđuju.



**Slika 5.8.** Detekcija refleksija na primeru impulsnih odziva snimljenih u sali Mariborske opere: pre adaptacije (slika levo), nakon adaptacije (slika desno)

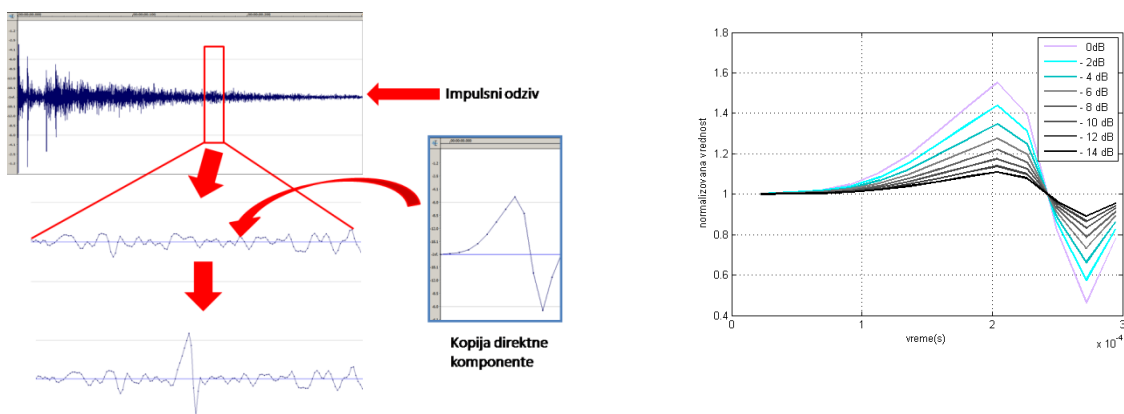
#### 5.4 Verifikovanje rezultata – uspešnost detekcije koherentnih refleksija

Prilikom razvoja algoritma za detekciju refleksija težnja je bila usmerena ka automatizovanju samog postupka detekcije. Kako bi se ocenila verodostojnost dobijenih rezultata neophodno je izvršiti procenu efektivnosti predloženog algoritma za detekciju, tj. da li je i u kojoj meri moguće detektovati sve tražene refleksije u impulsnom odzivu. Optimalna detekcija bi značila detekciju svih refleksija od interesa u impulsnom odzivu, uz minimalnu detekciju nekih drugih refleksija koje nisu od značaja.

Procena uspešnosti predloženog algoritama zahteva poznavanje tačnog položaja svih traženih refleksija u impulsnom odzivu. Međutim, zbog nepouzdanosti njihovog prepoznavanja, ocena predloženih postupaka detekcije izvršena je pomoću veštački ubačenih kontrolnih (testnih) refleksija. Osnovna ideja za procenu uspešnosti metoda za detektovanje koherentnih refleksija je da se ispita, da li je moguće i pod kojim uslovima detektovati kontrolnu refleksiju, CR (*control reflection*), koja je umetnuta na određenim mestima u signal impulsnog odziva. Ovaj postupak ilustrovan je na slici 5.9. Kao



kontrolne refleksije korišćene su oslabljene kopije direktnog zvuka, FI (*first impulse*). Prilikom izdvajanja direktne komponente vodilo se računa da bude izdvojena samo jedna perioda tog signala kako bi u potpunosti odgovarala direktnom zvuku. Kopija izdvojene direktne komponente je potom unošena u impulsni odziv u definisanim vremenskim trenucima u svom originalnom obliku ili prethodno oslabljena za određeni nivo kao na slici 5.9. Nakon svakog slabljenja proveravano je da li se tako umetnuta kontrolna refleksija u impulsnom odzivu može detektovati ili ne.



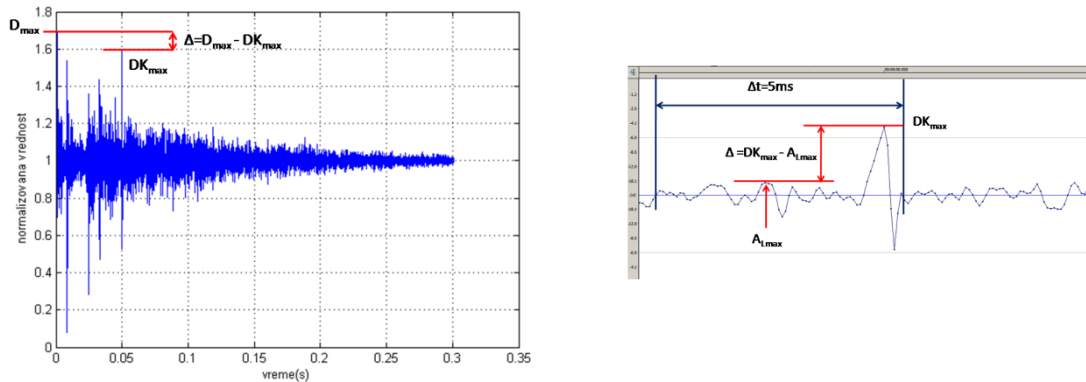
**Slika 5.9.** Prikaz umetanja kopije direktne komponente u impulsni odziv (slika levo), izgled kopija direktnog zvuka sa različitim slabljenjem (slika desno)

Kao što je već pomenuto detekcija refleksija se radi tako što se iz određenog opsega vrednosti eksponenta  $\alpha$  inverznim putem dobijaju komponente ulaznog signala odgovorne za nastanak ovog opsega. Postupak detekcije kontrolnih refleksija u impulsnom odzivu prema navedenom postupku ispitivan je za različite slučajeve (kopije direktnog zvuka na različitim pozicijama u impulsnom odzivu i različita slabljenja samih kopija). Kontrolne refleksije su smanjivane do nivoa kada prestaje njihova detekcija, i ta vrednost nivoa CR je zabeležena kao  $L_{CR}$ . Takođe, zabeležena je i vrednost nivoa lokalnog maksimuma  $L_{LOC}$  za deo impulsnog odziva širine 5ms u okolini gde je umetnuta kontrolna refleksija. Kao parametri za ocenjivanje uspešnosti detekcije kontrolne refleksije u impulsnom odzivu, korišćeni su:

- Maksimalna razlika vrednosti direktne komponente impulsnog odziva i nivoa kontrolne refleksije za koju je detekcija moguća ( $L_{FI}-L_{CR}$ ), ilustrovano na slici 5.10. levo. Ova vrednost pokazuje koliko je nivo kontrolne refleksije  $L_{CR}$  umanjen u odnosu na nivo direktnog zvuka  $L_{FI}$ , u trenutku kada prestaje njena

detekcija

- Minimalna razlika vrednosti umetnute refleksije i lokalnog maksimuma dela impulsnog odziva gde je umetnuta kontrolna refleksija ( $L_{CR}-L_{LOC}$ ), ilustrovano na slici 5.10 desno. Ova vrednost pokazuje koliko se nivo kontrolne refleksije  $L_{CR}$  razlikuje od nivoa lokalnog maksimuma  $L_{LOC}$  u trenutku kada prestaje detekcija.

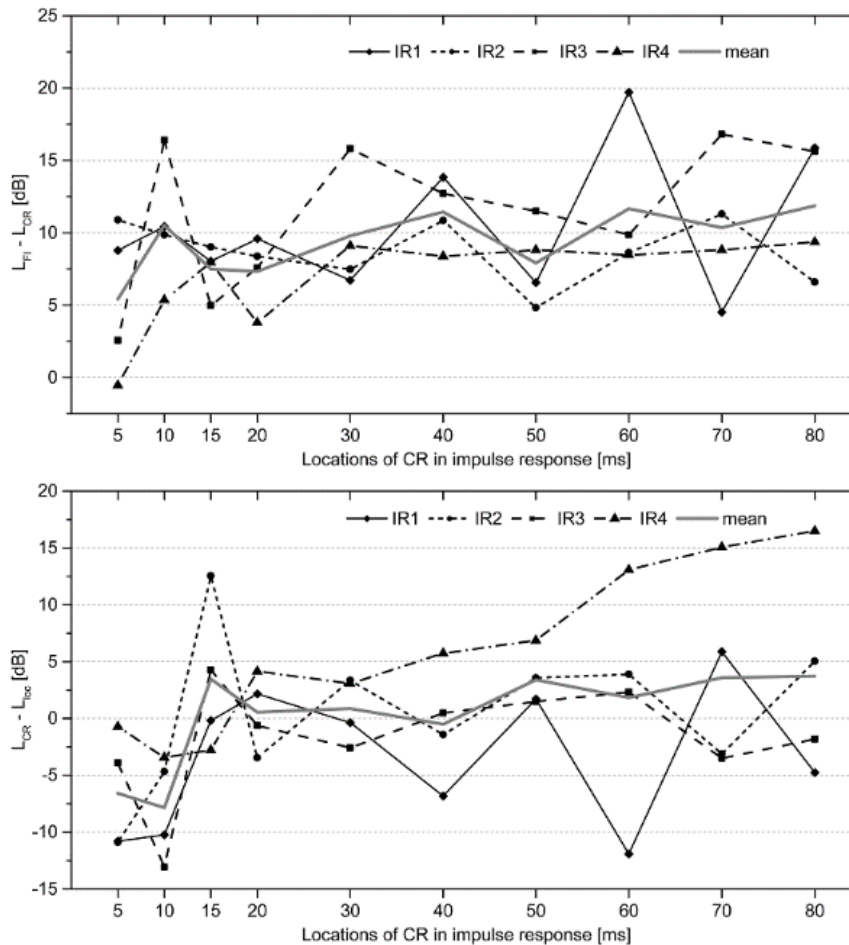


**Slika 5.10.** Parametri za ocenjivanje uspešnosti detekcije: razlika vrednosti direktne komponente impulsnog odziva i nivoa umetnute refleksije (slika levo), razlika vrednosti umetnute refleksije i lokalnog maksimuma (slika desno)

Procena uspešnosti detekcije refleksija predloženom metodom proveravana je na dva tipa impulsnih odziva:

1. realni impulsni odzivi snimljeni u velikim koncertnim dvoranama (Mariborska i Ljubljanska opera),
2. impulsni odzivi snimljeni u laboratorijskim uslovima - u fizičkom modelu reverberacione komore.

Pozicije (vremenski trenuci) u impulsnom odzivu u kojima su umetane kontrolne refleksije su u opsegu od 5 do 100 ms. Na slici 5.11. prikazani su rezultati procene uspešnosti predloženog algoritma za detekciju kontrolnih refleksija u ispitivanim impulsnim odzivima. Dijagrami prikazuju granicu kada prestaje detekcija kontrolne refleksije koja je umetana na različitim pozicijama u signale impulsnog odziva. Siva podebljana linija prikazuje srednju vrednost dobijenih rezultata.



**Sl. 5.11.** Rezultati procene uspešnosti predloženog metoda za ispitivane impulsne odzive: maksimalna razlika nivoa u odnosu na direktni zvuk,  $L_{FI} - L_{CR}$  (slika gore), i minimalna razlika nivoa u odnosu na okolinu,  $L_{CR} - L_{LOC}$  (slika dole) [101]

Dobijeni rezultati prikazani na slici 5.11. ( $L_{FI} - L_{CR}$  dijagram) pokazuju da je moguće detektovati kontrolne refleksije koje su umanjene i do 20 dB u odnosu na direktni zvuk, pod uslovom da su mu slične. Rezultati prikazani na donjoj slici ( $L_{CR} - L_{LOC}$  dijagram) pokazuju da nivo kontrolnih refleksija može da bude znatno manji od njihove okoline a da one ipak bude detektovane. Iako grafici prikazani na slici 5.11. pokazuju različite granice detekcije za različite pozicije kontrolnih refleksija u impulsnom odzivu, one se ne mogu koristiti kao zaključci o uopštenim granicama do kad je moguća detekcija korišćenjem predložene metode. Dobijeni rezultati su jako zavisni od lokalnog oblika signala na mestima gde su umetnute kontrolne refleksije. Naime, kontrolna refleksija koja se detektuje rezultat je mešanja oslabljene kopije direktnog zvuka sa signalom impulsnog odziva na mestu gde se kopija postavlja. U njihovom sabiranju dolazi do neminovne deformacije ubačene kopije, pri čemu se menja njen oblik i intenzitet. Ova

deformacija presudno utiče na mogućnost detekcije umetnute komponente. Dakle, detekcija kontrolnih refleksija pomoću multifraktala u početnom delu impulsnog odziva ne zavisi od njihovog položaja na globalnom nivou (gde se kontrolna refleksija nalazi na vremenskoj osi) već uglavnom (ako ne i isključivo) od lokalnog oblika signala gde se kontrolna refleksija umeće. To se može pokazati ako bi se postupak detekcije kontrolnih refleksija sproveo u finijoj rezoluciji (kontrolne refleksije su umetane na 2 ms, umesto na 10 ms). Ovako dobijeni rezultati za granice detekcije uopšte ne prate globalno kretanje granice za period gde su umetane kontrolne refleksije, već bi se moglo reći da imaju „slučajni“ karakter kada je pozicija refleksija u pitanju. Odavde proizilazi da se granica detekcije može najobjektivnije proceniti kao srednja vrednost dobijenih rezultata za dati vremenski period. Dijagrami srednje vrednosti dobijenih rezultata (označeni sivom bojom) pokazuju da se uz pomoću predloženog algoritma detektuju kontrolne refleksije koje su u proseku oslabljene za više od 10 dB i koje su u nivou ili niže od lokalnih maksimuma na mestima gde su umetnute. Takođe, dijagram srednje vrednosti pokazuje da je u početnom delu impulsnih odziva veća selektivnost predložene metode za detekciju kao posledica toga što su ovde rane refleksije ređe i izraženije.

### 5.5 Unapređenje postupka za detekciju

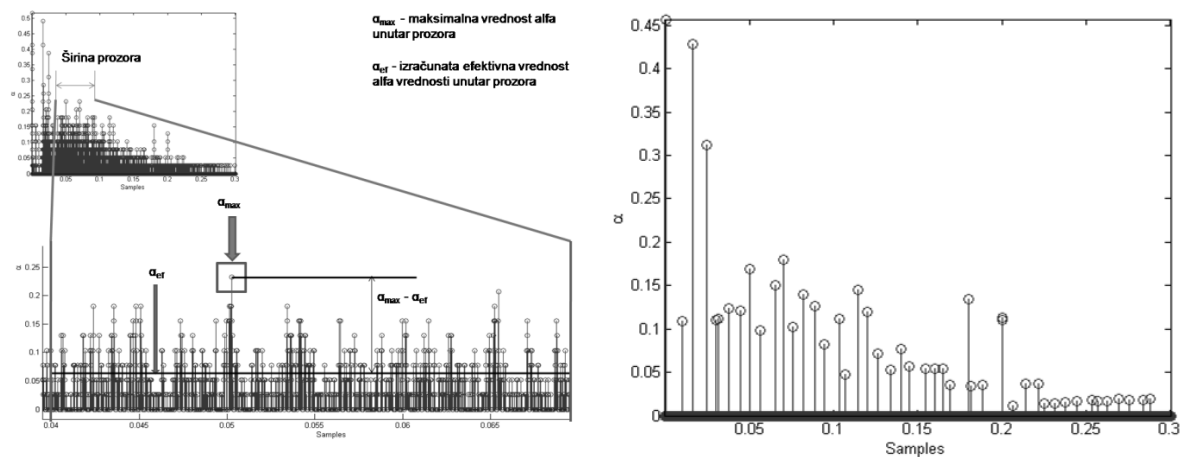
Kako bi se unapredio predloženi kriterijum za izdvajanje refleksija uvodi se dodatna obrada raspodele Holderovog eksponenta. Cilj je da se u raspodeli Holderovog eksponenta potisnu one vrednosti parametra  $\alpha$  koje bi predstavljale pogrešnu detekciju. Do pogrešne detekcije dolazi zato što prosto izdvajanje po intenzitetu ne uzima u obzir složene efekte koji nastaju pri slušanju, kao što su maskiranje, uticaj više relativno bliskih refleksija, njihova korelisanost sa direktnim zvukom, itd. Modifikacija postupka izdvajanja željenih vrednosti Holderovog eksponenta išla je u nekoliko pravaca.

Prvi pokušaji usmereni su ka tome da se ne koristi isti prag izdvajanja eksponenta  $\alpha$  za celu dužinu impulsnog odziva već da se on definiše za pojedinačne segmente kako bi se uzeo u obzir lokalni uticaj refleksija. Ovo praktično znači da se za izdvajanje refleksija u samoj raspodeli vrednosti eksponenta  $\alpha$  koristi prozor, širine određeni broj odbiraka na vremenskoj osi, koji se pomera bez preklapanja preko vrednosti  $\alpha$  u

raspodeli. Prilikom svakog pomeranja prozora izračunava se maksimalna vrednost  $\alpha_{\max}$  unutar prozora, i ako je ta vrednost značajno veća od ostalih vrednosti unutar prozora prema nekom zadatom kriterijumu, ona se izdvaja. Rezultat ovakvog postupka je modifikovana raspodela  $\alpha$  vrednosti, nad kojom se primenjuje već opisani postupak sa izdvajanjem opsega najvećih  $\alpha$  vrednosti. Na osnovu ovih vrednosti se zatim vrši detekcija refleksija u impulsnom odzivu.

Širina prozora koji se koristi za izdvajanje eksponenata  $\alpha$  određuje se tako da obezbedi detekciju pojedinačnih refleksija, ali i da uzme u obzir efekat maskiranja koji pojedinačna refleksija ima u svojoj okolini. Ovo praktično znači da se širina prozora može kretati u opsegu od 1-10 ms.

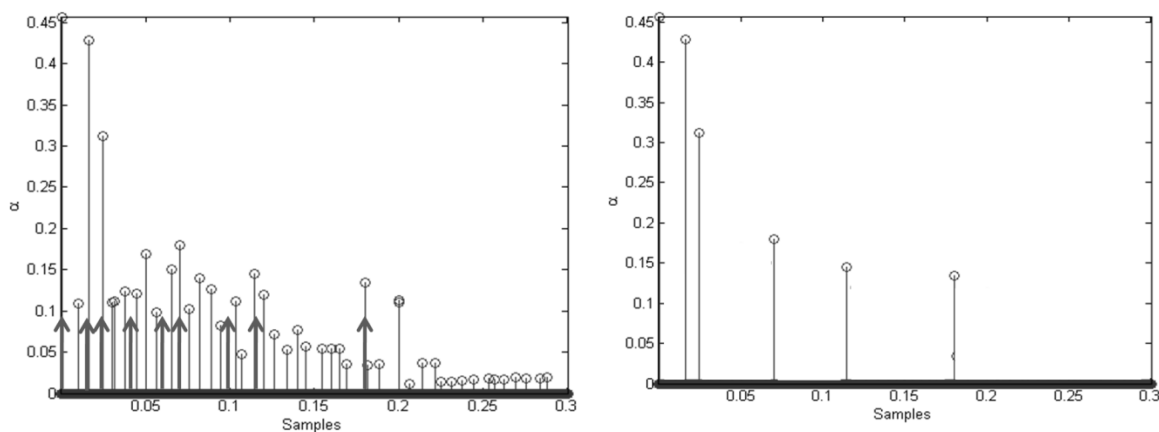
Kao kriterijum za izdvajanje pojedinačnih vrednosti iz raspodele Holderovih eksponenata unutar prozora mogu da se koriste: razlika u odnosu na efektivnu ili srednju vrednost eksponenata izračunatu unutar prozora ili razlika u odnosu na apsolutnu vrednost izračunatih eksponenata u okolini definisanoj širinom prozora. Vrednost ove razlike svakako treba da uzme u obzir pragove percepcije i maskiranja pojedinačne refleksije eksperimentalno određene u psihoakustici, a koji se kreću u granicama do 6 dB. Ilustracija ovog postupka kada se izdvajanje vrednosti Holderovih eksponenata vrši na osnovu efektivne vrednosti izračunate unutar prozora određene dužine data je na slici 5.12.



**Slika 5.12.** Postupak izdvajanja Holderovih eksponenata unutar prozora određene dužine kada se kao kriterijum koristi razlika u odnosu na efektivnu vrednost

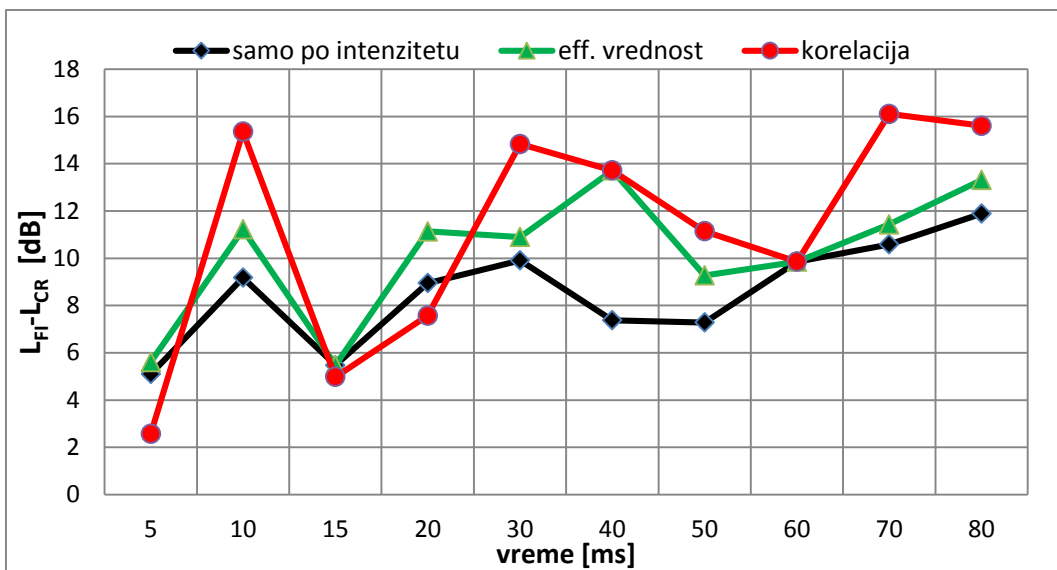
Jedan od načina kako se može dodatno unaprediti detekcije refleksija je i uključivanje koeficijenata korelisanosti izračunatih između direktnog zvuka i refleksija u

impulsnom odzivu kao kriterijuma za izdvajanje vrednosti Holderovog eksponenta od interesa. Na ovaj način bi se akcenat stavio na detekciju koherentnih refleksija. Kako bi se istakle koherentne refleksije, u dobijenoj raspodeli koeficijenata korelisanosti zadržavaju se koeficijenti korelisanosti koje imaju velike vrednosti. Na osnovu tih zadržanih koeficijenata, modifikuju se vrednosti Holderovog eksponenta tako da se izdvajaju one vrednosti  $\alpha$  koje u vremenu odgovaraju položajima određenih koeficijenata korelisanosti, ilustrovano na slici 5.13. Na ovaj način bi se u konačnom postupku detektovanja refleksija u impulsnom odzivu prednost dala refleksijama koje su u većoj meri korelisane sa direktnim zvukom.



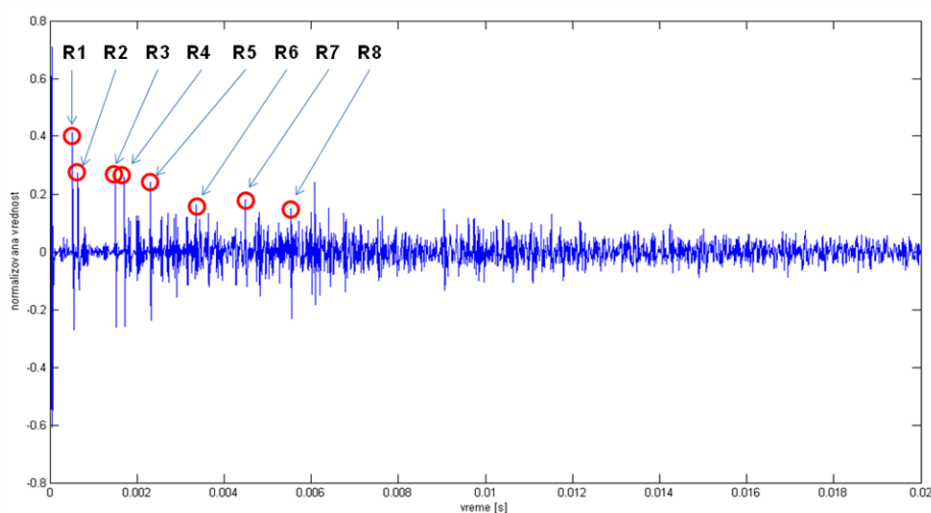
**Slika. 5.13.** Ilustracija postupka modifikacije raspodele vrednosti Holderovog eksponenta korišćenja koeficijenata korelisanosti direktnog zvuka i refleksija

Verifikacija predloženih postupaka za modifikovanje osnovnog metoda za detekciju refleksija potvrđuje unapređenje rezultata predloženog metoda za detekciju. Na slici 5.14. prikazano je poređenje rezultata procene uspešnosti predloženih algoritama na primeru detekcije kontrolnih refleksija. Dijagrami prikazuju granicu kada prestaje detekcija kontrolne refleksije koja je umetana na različitim pozicijama u signal impulsnog odziva.



**Slika 5.14.** Poređenje rezultata procene uspešnosti predloženih modifikacija osnovnog algoritma pomoću parametar ( $L_{FI}-L_{CR}$ ), na primeru detekcije kontrolnih refleksija za jedan signal impulsnog odziva [102]

Dobijeni rezultati pokazuju unapređena postignuta sa predloženim modifikacijama osnovnog algoritma za detekciju koji selekciju refleksija radi samo pomoću intenziteta. Granice do kojih se detektuju refleksije pomerene su u proseku za više od 5dB. Korišćenjem ovih modifikacija moguće je detektovati i refleksije slabijeg intenziteta koje su korelisane sa direktnim zvukom. Slika 5.15. i tabela 5.1. daju ilustraciju jednog mogućeg poređenja predloženih algoritama na primeru detekcije realnih refleksija u impulsnom odzivu.



**Slika 5.15.** Prikaz relevantnih ranih refleksija identifikovanih golim okom na primeru jednog impulsnog odziva

Rezultati pokazuju da su predloženi algoritmi za unapređenje osnovnog metoda za detekciju u stanju da detektuju više refleksija. Rezultati dati u tabeli 1. pretpostavljaju da su refleksije koje su identifikovane golim okom reprezentativne za poređenje. Problem kod vizuelne inspekcije je to što se posmatra samo intenzitet refleksija, a nešto što nije toliko lako uočljivo u impulsnom odzivu je oblik ovih refleksija i njihova struktura. Upravo to je mesto gde je intervencija sa multifraktalnog stanovišta neophodna kako bi pomogla ispravnu detekciju ranih refleksija od interesa.

Tabela 5.1. Ilustracija poređenja rezultata detekcije za predložene modifikacije na primeru realnih refleksija

Predloženi metod	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	Ukupan broj detektovanih refleksija
samo po intenzitetu	x	x	x	x	x	.	.	.	5
Eff. vrednost	x	.	x	.	x	x	x	x	6
korelacija	x	.	x	x	x	.	x	x	6

## 5.6 Mogućnosti i nedostaci predloženog postupka za detekciju refleksija

Automatizacija postupka detekcije ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorije treba da predstavlja dodatni alat u oceni akustičkih svojstva prostorije. Metod za detekciju ranih refleksija pomoću multifraktala, zasnovan na raspodeli Holderovih eksponenata, u stanju je da opiše signal sa lokalnog stanovišta i na taj način izdvoji tražene komponente impulsnog odziva. Ova metoda ne posmatra samo intenzitet ranih refleksija već i njihovu koherentnost, pretpostavljajući da signal ima osobinu samosličnosti.

Rezultati koji su dobijeni korišćenjem multifraktala za detekciju ranih refleksija demonstriraju mogućnost za njihovu primenu. Rezultati pokazuju da u slučaju realnih impulsnih odziva ovaj metod detektuje određeni broj refleksija koje odgovaraju onima koje se mogu prepoznati vizuelnim putem na dijagramu impulsnog odziva. Prednost ove metode je što je u stanju da pronade i one rane refleksije koje golim okom nisu lako uočljive uzimajući u obzir brzinu promene intenziteta signala na pozicijama ranih



refleksija. Pretpostavka da su refleksije koje se detektuju slične u toj meri da se one mogu smatrati koherentnim potvrđena je na primeru detekcije kontrolnih refleksija.

Performanse ostvarene sa realnim impulsnim odzivima je teško proceniti pošto tačne pozicije svih ranih refleksija od značaja nisu poznate. Rezultati dobijeni prilikom detekcije kontrolnih refleksija ubačenih u impulsni odziv pokazuju da njihova detekcija zavisi od ishoda mešanja sa signalom „podloge“ prilikom umetanja u impulsni odziv. Srednje vrednosti pragova detekcije onda najbolje kvantifikuju mogućnosti predložene metode za detekciju. Ovako dobijeni rezultati idu u prilog činjenici da kada su prirodni multifraktali u pitanju možemo da govorimo samo o statističkoj samosličnosti

Kako bi se poboljšali rezultati detekcije refleksija predložena su unapređenja multifraktalne metode. Osnovni pravci u kojima je unapređivan metod usmereni su ka umanjenu pogrešnih detekcija (*false positive*) i naglašavanju jakih refleksija. Kako bi se pospešila detekcija koherentnih refleksija korišćen je i koeficijent korelacije između direktnog zvuka i refleksija za selekciju vrednosti Holderovih eksponenata izračunatih za signal impulsnog odziva.

Rezultati predloženih unapređenja pokazuju da je za poboljšanje preciznosti neophodno uzeti u obzir dodatne faktore prilikom selekcije Holderovih eksponenata koji ukazuju na rane refleksije. Faktori koje svakako treba uzeti u obzir su: relativan položaj refleksija u odnosu na druge/susedne refleksije, kao i subjektivni doživljaj zvuka u prostori.

Rezultati dobijeni korišćenjem modifikovanih metoda za detekciju refleksija pomoću multifraktala pokazuju da su predloženi metodi u stanju da detektuje kontrolne refleksije koje su oslabljene i do 15 dB u odnosu na original. U slučaju detekcije realnih refleksija predloženi metodi detektuju većinu traženih refleksija. Pretpostavka da rane refleksije povezuje zajednički parametar (opseg vrednosti Holderovog eksponenta) iako opravdana zahteva dalja poboljšanja. Neke potencijalne mogućnosti predstavljene su u ovom radu. Uključivanje dostignuća psihoakustike u definisanju kriterijuma za odbacivanje, odnosno detektovanje ranih refleksija predstavlja zadatak za buduća istraživanja na temu primene multifraktala za detekciju ranih refleksija.

## 6. Kvantifikovanje globalnih karakteristika impulsnog odziva primenom multifraktala

### 6.1 Opisivanje impulsnog odziva pomoću multifraktalnog spektra

U uvodnim poglavljima ovog rada kao otvorene teme u analizi impulsnog odziva, pored karakterizacije teksture impulsnog odziva, identifikovane su i detekcija ranih refleksija, utvrđivanje stepena ostvarene difuznosti zvučnog polja i određivanje granice gde počinje reverberacioni deo impulsnog odziva. Za procenu, karakterizaciju i kvantifikovanje ovih osobina sa multifraktalnog stanovišta neophodna je globalna analiza impulsnog odziva ili njegovih delova. Tekstura se u tom kontekstu može smatrati globalnom karakteristikom impulsnog odziva prostorije, koja je posledica njegovih lokalnih osobina definisanih rasporedom, gustinom i intenzitetom (jednom rečju strukturom) refleksija.

Kao što je već pomenuto u poglavlju 2.6 difuznost je ostala bez objektivne mere koja je opisuje uprkos brojnim pokušajima da se definiše mera difuznosti zvučnog polja. Na osnovu dosadašnjih istraživanja i definicija difuznosti, kao neophodni preduslovi za formiranje (nastanak) difuznog zvučnog polja definisane su sledeći kriterijumi:

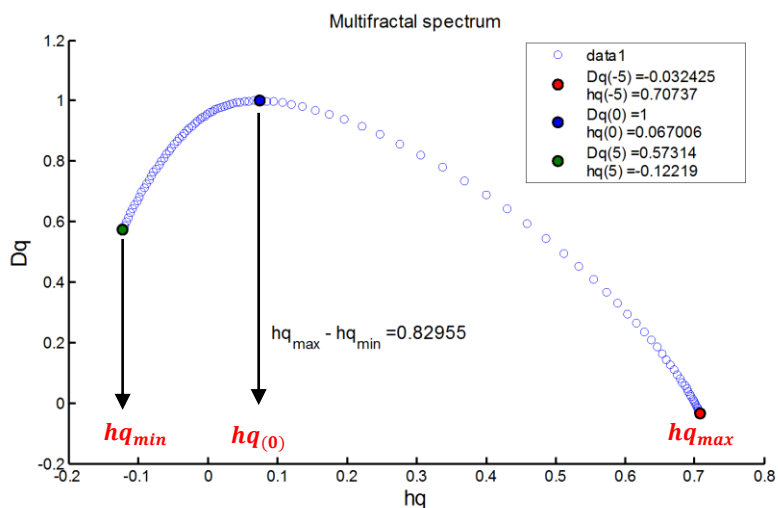
- a) Amplituda dolaznih talasa je ravnomerno raspoređena iz svih dolaznih uglova
- b) Jednaka energija pristiže iz svih pravaca tokom određenog perioda vremena
- c) Odnos faza dolaznih talasa je slučajno raspoređen tako da se uticaj faze može zanemariti

Ovo praktično znači da impulsni odziv prostorije u kojoj je formirano difuzno zvučno polje mora da bude takve strukture koja će odražavati ove kriterijume, a to svakako podrazumeva kompleksnost koja se teško opisuje do sada korišćenim metodama.

Kriterijumi pomoću kojih su definisani uslovi za nastanak/uspostavljanje difuznog zvučnog polja govore o tesnoj vezi već pobrojanih tema (teksture, detekcije refleksija i

granice oblasti ranih refleksija). Dodirna tačka ove tri teme su refleksije, odnosno njihova struktura u impulsnom odzivu koja presudno utiče na ove karakteristike (teksturu, difuznost, granicu oblasti) pa će i njihova analiza u ovom radu biti u dobroj meri zajednička. Rezultati karakterizacije teksture impulsnog odziva će dati neke odgovore i na pitanja koja se tiču već pomenute difuznosti i granice gde se završava oblast ranih refleksija. Za potrebe razmatranja i diskusije difuzno zvučno polje, odnosno impulsni odziv koji odgovara ovom polju, može se posmatrati kao jedan specifičan tip teksture, dok se granica između oblasti ranih refleksija i reverberacije može posmatrati kao tačka u kojoj se menja tekstura impulsnog odziva.

Globalne osobine impulsnog odziva mogu se sa multifraktalnog stanovišta predstaviti MF spektrom koji se opisuje svojim oblikom i karakterističnim vrednostima. U zavisnosti od postupka (metode, algoritma) koji se koristi za izračunavanje MF spektra njegov oblik i karakteristične vrednosti mogu varirati u izvesnoj meri i davati drugačije rezultate. Izgled jednog MF spektra izračunatog MFDFA metodom za prvih 200 ms impulsnog odziva prikazan je na slici 6.1.



**Slika 6.1.** Izgled MF spektra i karakteristične vrednosti dobijeni primenom MFDFA metode za prvih 200 ms impulsnog odziva

Multifraktalni spektar sa slike 6.1 dobijen MFDFA metodom je parabola kod koje se razlika između minimuma i maksimuma vrednosti  $hq$  naziva širina MF spektra. Eksponenti singularnosti  $q$ -tog reda ( $hq$ ) i odgovarajuća dimenzija  $Dq$  se označavaju kao  $\alpha$  i  $f(\alpha)$  u [72] ili  $h$  i  $D(h)$ . U ovom poglavlju biće korišćene oznake  $hq$  i  $Dq(h)$  za označavanje parametara MF spektra dobijenih MFDFA metodom. Budući da širina i oblik

multifraktalnog spektra mogu da klasifikuju širok opseg različitih signala čije strukture imaju osobinu invarijantne skale [85], MF spektar nam onda daje opseg eksponenata pomoću koga možemo da okarakterišemo strukturu impulsnog odziva.

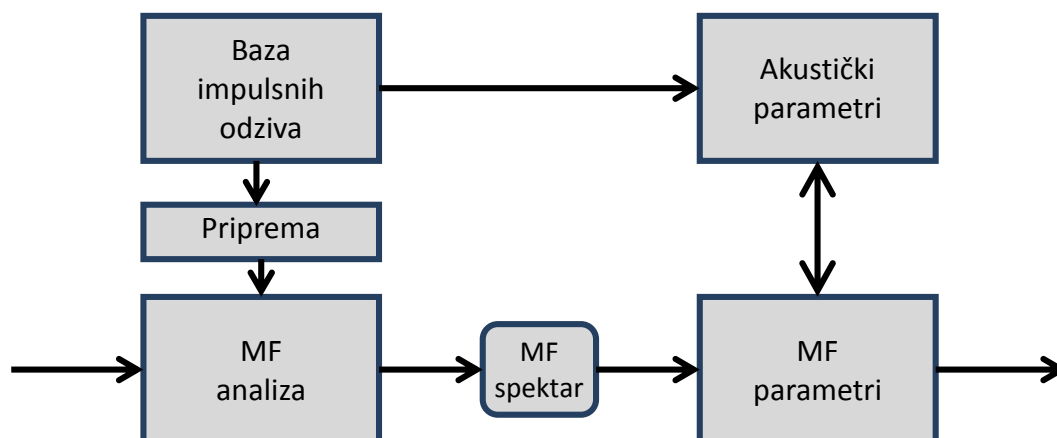
Na slici 6.1 označene su i pojedine karakteristične vrednosti koje se mogu koristiti kao parametri za kvantifikovanje svojstava impulsnog odziva. Jedno tumačenje parametara MF spektra dato je u tabeli 6.1 u nastavku.

Tabela 6.1. Karakteristični vrednosti izdvojene sa MF spektra i njihovo značenje

Korišćene oznake	Objašnjenje
$hq_{min}$ , $min\_hq$ , $\alpha_{min}$	Pozicija leve strane MF spektra Fraktalni eksponenti koji opisuju skalirajuća svojstva velikih fluktuacija
$hq_{max}$ , $max\_hq$ , $\alpha_{max}$	Pozicija desne strane MF spektra Fraktalni eksponenti koji opisuju skalirajuća svojstva malih fluktuacija
$hq_0$ , $hq\_0$ , $\alpha_0$	Pozicija maksimuma Male vrednosti $hq_0$ (grubo govoreći) ukazuju da je proces koji je u osnovi signala pravilniji. Za male vrednosti $hq_0$ proces postaje korelisan.
$\Delta hq$ , $delta\_hq$ , $\Delta\alpha$	Širina multifraktalnog spektra Širina spektra meri stepen multifraktalnosti u serijama (što je veći opseg fraktalnih eksponenata, to je bogatija struktura serija. Uži opseg prema tome znači uniformniju strukturu signala). Širina spektra govori koliko je širok opseg fraktalnih eksponenata koji se javljaju u signalu.
$\frac{(hq_{max} - hq_0)}{(hq_0 - hq_{min})}$ $\frac{(\alpha_{max} - \alpha_0)}{(\alpha_0 - \alpha_{min})}$	Simetričnost krive MF spektra Stepen simetričnosti govori koji fraktalni eksponenti su dominantniji: fraktalni eksponenti koji opisuju skalirajuća svojstva malih fluktuacija za desno iskošeni spektar ili fraktalni eksponenti koji opisuju skaliranje velikih fluktuacija za levo zakrivljeni spektar.

Kao što je već više puta pomenuto, akustička svojstva prostorije ogledaju se u kompleksnoj strukturi impulsnog odziva, pa će značenje parametara MF spektra impulsnog odziva u kontekstu karakteristika zvučnog polja u prostoriji biti eksperimentalno provereno u ovom poglavlju. Blok šema ovog dela istraživanja predstavljena je na slici 6.2. Osnovna ideja je da se proveriti korelisanost akustičkih parametara impulsnog odziva sa parametrima MF spektra, tj. da se utvrdi da li parametri

MF spektra mogu da opišu i kvantifikuju pojedina akustička svojstva prostorije izražena kroz strukturu impulsnog odziva prostorije. Kako bi se uspostavila ova veza i potvrdile pretpostavke o kvantifikovanju akustičkih karakteristika prostorije pomoću MF parametara, kreirana su okruženja u odgovarajućim modelima prostorija u kojima se u kontrolisanim uslovima mogu menjati akustička svojstva prostorije.



**Slika 6.2.** Blok šema ispitivanja globalnih svojstva impulsnog odziva pomoću MF analize

Baza impulsnih odziva formirana za potrebe ovog istraživanja opisana je u poglavlju 4. Priprema impulsnih odziva podrazumeva njihovu normalizaciju, izdvajanje delova impulsnog odziva i kreiranje istih početnih uslova za MF analizu kako bi se dobili uporedivi rezultati. MF analiza se vrši postupcima čije su teorijske osnove opisane u poglavlju 3. Multifraktalni spektar za potrebe ovog eksperimenta je dobijen korišćenjem MF DFA (*Multifractal Detrended Fluctuation Analysis*) metode koja je opisana u poglavlju 3.4. U pojedinim slučajevima provera dobijenih rezultata rađena je LD (*Large Deviation*) metodom. Akustički parametri koji su korišćeni u istraživanju dobijeni su standardnim metodama/tehnika za njihovo izračunavanje.

## 6.2 Ocena difuznosti zvučnog polja pomoću MF spektra

Nastanak difuznog zvučnog polja svakako je lakši u prostorijama sa akustički „grubim“ zidovima, tj. sa nepravilnostima od kojih se zvučna energija raspršava u širokom opsegu pravaca. Upravo ova činjenica iskorišćena je prilikom kreiranja eksperimentalnog okruženja uz pomoć koga se ispitalo u kojoj meri multifraktali mogu da kvantifikuju difuznost.

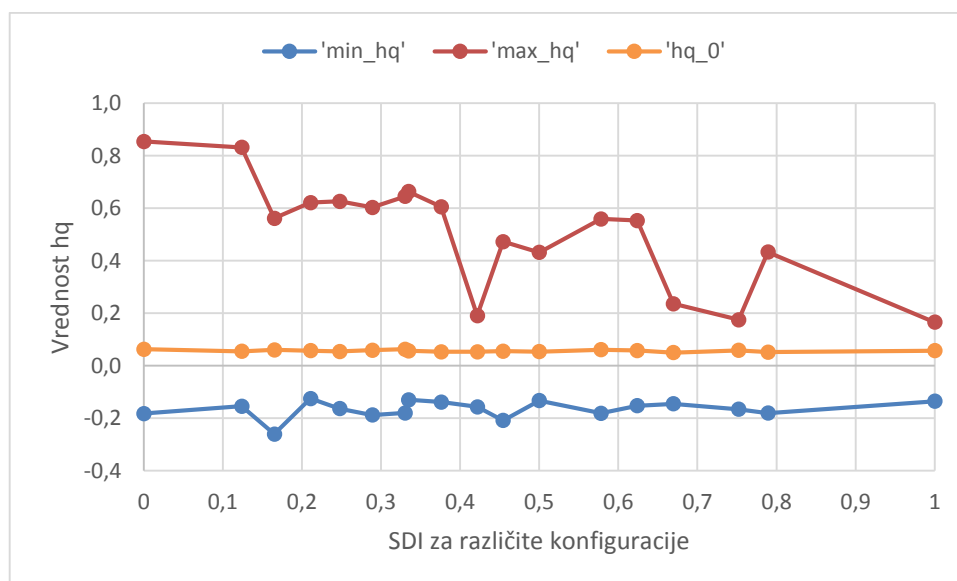
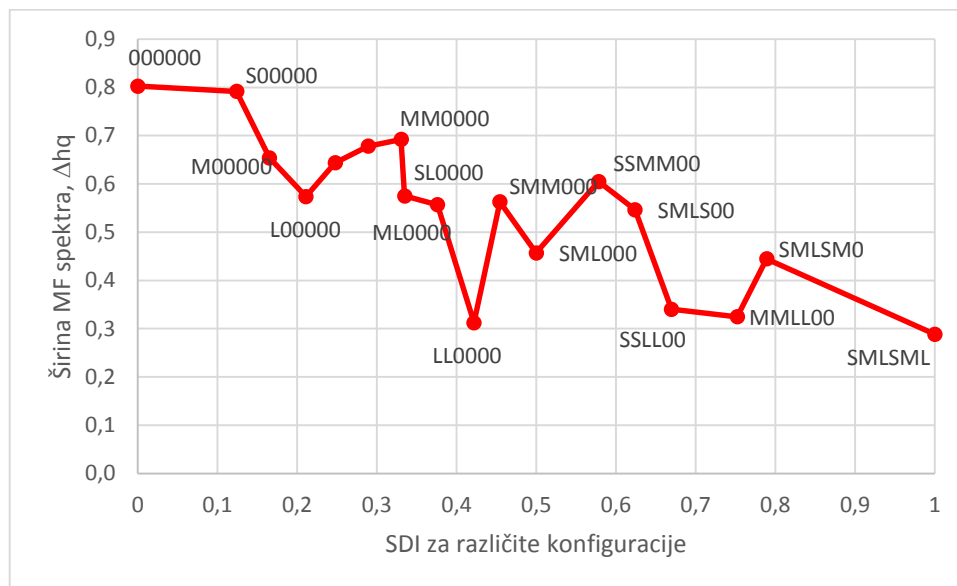
Analiza u fizičkom modelu difuzne prostoriji sprovedena je korišćenjem 18 različitih konfiguracija modela predstavljenih na slici 4.3 i opisanih u poglavlju 4.1.3. Za svaku od ovih konfiguracija snimljeni su impulсни odzivi i na osnovu njih izračunati su karakteristični akustički parametri prostorije. Pregled dobijenih akustičkih parametara dat je u tabeli 6.2. Prikazani parametri izračunati su iz impulsnih odziva čije je trajanje prethodno skraćeno na dužinu od 1s. Indeks difuznosti površine (SDI) izračunat je na osnovu veličine difuznih površina u modelu postupkom opisanim u poglavlju 4.1.3.

Tabela 6.2. Pregled karakterističnih akustičkih parametara modela difuzne prostorije izračunatih iz izmerenih impulsnih odziva za široki frekvencijski opseg

Konfig.	SDI	T30 (s)	T20 (s)	T60	EDT (s)	C80 (dB)	C50 (dB)	D50 (%)	Ts (ms)
<b>000000</b>	0	1,356	1,372	1,218	1,147	2,46	-0,42	47,60	81,625
<b>S00000</b>	0,1239	1,341	1,320	1,203	1,104	2,78	-0,46	47,33	80,437
<b>M00000</b>	0,1652	1,337	1,329	1,194	1,048	3,34	0,71	54,09	71,732
<b>L00000</b>	0,2109	1,329	1,326	1,280	1,108	2,84	-0,65	46,27	81,091
<b>SS0000</b>	0,2478	1,323	1,260	1,152	1,045	3,18	-0,10	49,40	75,012
<b>SM0000</b>	0,2891	1,202	1,148	1,082	0,944	3,70	0,18	51,03	70,512
<b>MM0000</b>	0,3304	1,269	1,182	1,018	0,952	3,30	0,57	53,26	70,095
<b>SL0000</b>	0,3348	1,229	1,126	1,017	0,973	3,55	0,09	50,53	71,795
<b>ML0000</b>	0,3761	1,181	1,092	0,998	0,937	4,26	0,98	55,64	66,432
<b>LL0000</b>	0,42179	1,253	1,190	1,077	0,963	3,59	0,16	50,90	72,029
<b>SMM000</b>	0,45431	1,136	1,087	1,028	0,929	3,86	0,60	53,46	67,057
<b>SML000</b>	0,5	1,091	1,036	0,968	0,846	4,98	1,67	59,48	60,845
<b>SSMM00</b>	0,57821	1,013	0,952	0,876	0,839	5,05	1,62	59,21	59,481
<b>SMLS00</b>	0,6239	1,053	0,989	0,897	0,817	5,27	1,57	58,92	57,810
<b>SSL000</b>	0,6696	1,103	1,002	0,934	0,881	4,57	1,70	59,65	60,555
<b>MMLL00</b>	0,7522	0,993	0,920	0,863	0,820	4,09	0,90	55,16	62,986
<b>SMLSM0</b>	0,7891	0,933	0,864	0,905	0,795	5,31	1,33	57,57	57,930
<b>SMLSML</b>	1	0,885	0,816	0,783	0,727	5,70	2,87	65,93	52,086

Na slikama 6.3 i 6.4 prikazana je promena odabranih parametara MF spektra sa promenom indeksa difuznosti površine (SDI) za različite konfiguracije modela. Prikazani

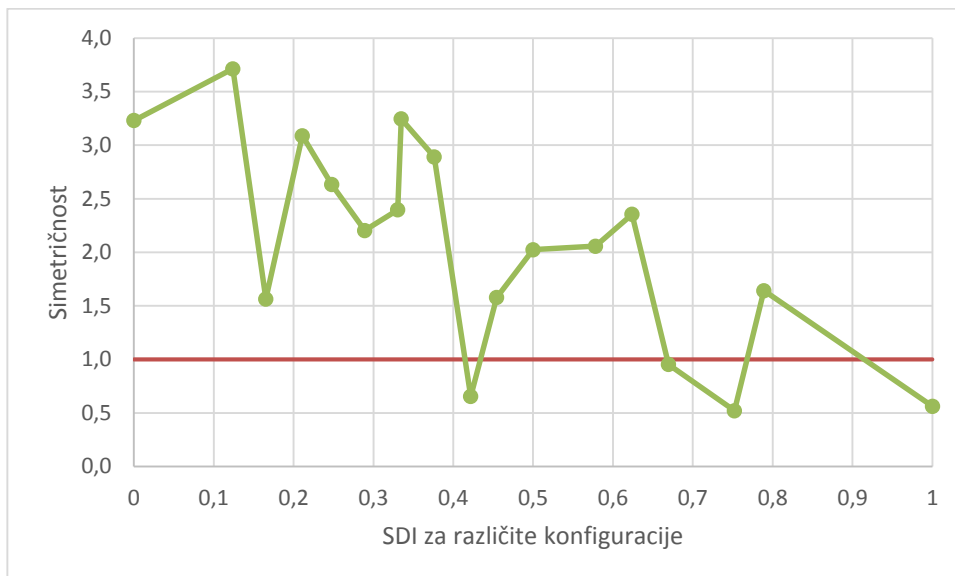
parametri izdvojeni su iz MF spektra računatog za prvih 4000 odbiraka (~200 ms) impulsnog odziva. Grafik promene širine MF spektra (slika 6.3, gore) pokazuje da se sa povećanjem indeksa difuznosti površina prostorije širina spektra smanjuje.



**Slika 6.3.** Promena parametara MF spektra sa promenom SDI modela prostorije: promena širine MF spektra (slika gore), promena  $hq_{min}$ ,  $hq_{max}$  i  $hq_0$  (slika dole)

Dijagrami prikazani na donjoj slici 6.3 pokazuju da su parametri  $hq_{min}$  i  $hq_0$  relativno stabilni sa promenom indeksa difuznosti površina u prostoriji, i da je desna strana MF spektra ( $hq_{max}$ ) ta koja reaguje na promene u difuznosti površini. Ova promena koja se ogleda u „skupljanju“ MF spektra može se videti i na slici 6.4 koja prikazuju kako se menja simetričnost spektra. Promena simetričnosti spektra sa slike 6.4

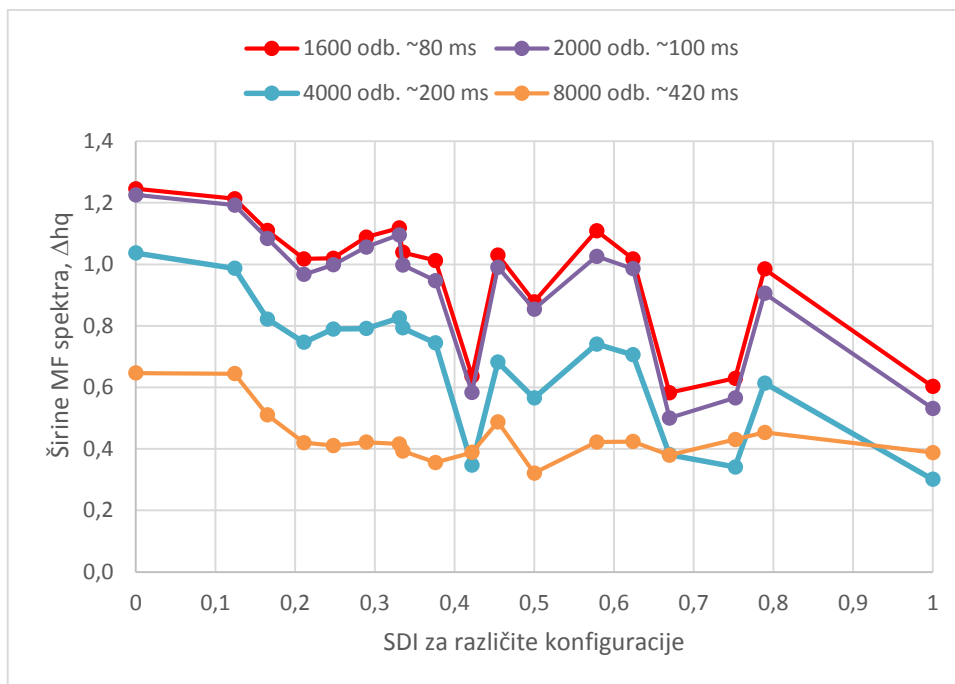
pokazuje da se simetričnost menja tako da leva strana postaje dominantnija (faktor simetričnosti  $<1$ ) u konfiguracijama prostorije u kojima su velike površine (LL) prekrivene difuznim elementima.



**Slika 6.4.** Promena simetričnosti MF spektra sa promenom SDI

Na slici 6.5 prikazana su grafici promene širine MF spektra sa promenom SDI, za slučajeve kada se za proračun MF spektra uzimaju različite dužine impulsnog odziva. Vrednosti 80, 100 ili 200 ms predstavljaju karakteristične vrednosti dužine impulsnog odziva koje se pominju u većini istraživanja kao referentne za kvantifikovanje teksture impulsnog odziva i oblasti gde prve refleksije prelaze u reverberacioni deo impulsnog odziva. Dobijeni rezultati u sva tri slučaja pokazuju sličan trend smanjenja širine spektra sa povećanjem vrednosti SDI. Radi potpunosti razmatranja na slici je prikazana i promena širine MF spektra kada se on računa za 8000 odbiraka ( $\sim 420$  ms). Dobijeni rezultati u ovom slučaju pokazuju kako na ovoj dužini impulsnog odziva slabi uticaj oblasti prvih refleksija na ukupni spektar i razlike između konfiguracija postaju sve manje posmatrano kroz širinu spektra. U nastavku ispitivanja impulsnih odziva MF spektri će u većini slučajeva biti računati za prvih 200 ms impulsnog odziva budući da je u akustici prihvaćen stav da se dobra tekstura postiže dovoljnom uniformnošću energije refleksija u prvih 200 ms impulsnog odziva.





**Slika 6.5.** Promena širine MF spektra sa promenom konfiguracije difuznih elemenata u modelu prostorije izračunata za različite dužine impulsnih odziva

Dobijeni grafici u sva tri slučaja (80, 100 ili 200 ms) imaju opadajuću tendenciju koja pokazuje da se s povećanjem difuznosti prostorije (na šta bi trebalo da ukazuju veće vrednosti parametra SDI) smanjuje širina MF spektra. Pravilnost ovog opadanja narušena je većim ili manjim odstupanjima (pikovima) u slučaju pojedinih konfiguracija modela prostorije. Ove „anomalije“ u globalnom trendu biće analizirane u nastavku ovog poglavlja, pre toga biće razmotrena veza širine spektra i SDI-a, a prema tome posredno i difuznosti.

U konfiguraciji modela prostorije sa difuznim zidovima (većim SDI) opseg eksponenata u MF spektru je relativno manji u odnosu na konfiguracije sa ravnim zidovima (manji SDI) kojima odgovara veći/širi opseg vrednosti eksponenata singulariteta. Manji opseg eksponenata posledica je uniformnije strukture impulsnog odziva sa manjim stepenom korelacije između refleksija. Konfiguracije sa ravnim zidovima zbog većeg broja „spekularnih“ refleksija i shodno tome većim fluktuacijama u impulsnom odzivu imaju širi opseg singulariteta. Dodavanjem difuznih elemenata na zidove prostorije dolazi do smanjenja broja „spekularnih“ refleksija i korelacije među njima, odnosno povećanja difuznosti zvučnog polja u prostoriji, što dovodi do smanjenja širine MF spektra.

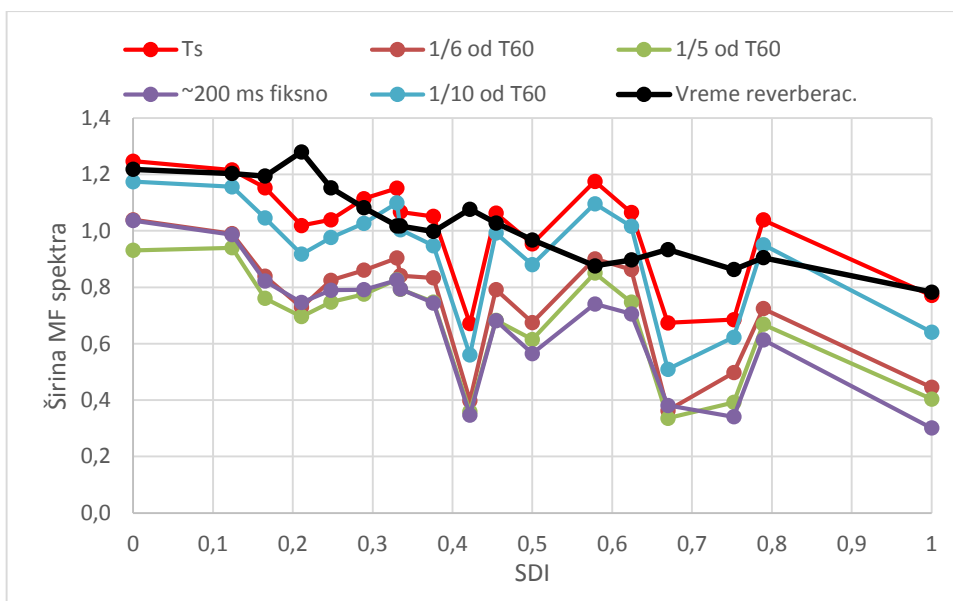
Korelacija između objektivnih akustičkih parametara izmerenih u modelu prostorije i parametara MF spektra izračunatih za prvih 200 ms impulsnog odziva data je u Tabeli 6.3. Dobijene vrednosti potvrđuju da postoji visok stepen korelacije ( $>0,8$ ) između širine spektra ( $\Delta_{hq}$ ) i indeksa difuznosti površina ( $SDI$ ). Vrednosti (podebljane) iz tabele pokazuju i da postoji korelacija između širine MF spektra i vremena reverberacije ( $T60$ ) i vremenskog težišta impulsnog odziva ( $T_s$ ). Simetričnost MF spektra takođe pokazuje značajnu korelaciju sa indeksom difuznosti površina u modelu difuzne prostorije.

Tabela 6.3. Korelacija između akustičkih i parametara MF spektara

	$SDI$	$T30 (s)$	$T20 (s)$	$T60$	$EDT (s)$	$C80 (dB)$	$C50 (dB)$	$D50 (\%)$	$T_s (ms)$
min_hq	0,25	-0,11	-0,10	-0,21	-0,21	0,24	0,10	0,09	-0,11
max_hq	-0,80	0,63	0,50	0,65	0,58	-0,55	-0,63	-0,63	0,67
delta_hq	<b>-0,81</b>	0,63	0,50	<b>0,66</b>	0,59	-0,56	-0,63	-0,63	<b>0,66</b>
Dq_min	0,75	-0,63	-0,46	-0,59	-0,50	0,46	0,55	0,55	-0,57
Dq_max	0,25	-0,09	-0,11	-0,23	-0,21	0,24	0,12	0,11	-0,11
hq_0	-0,33	0,16	0,00	0,17	0,23	-0,37	-0,19	-0,19	0,24
Sim	<b>-0,72</b>	0,61	0,48	0,60	0,52	-0,47	-0,62	-0,62	<b>0,64</b>

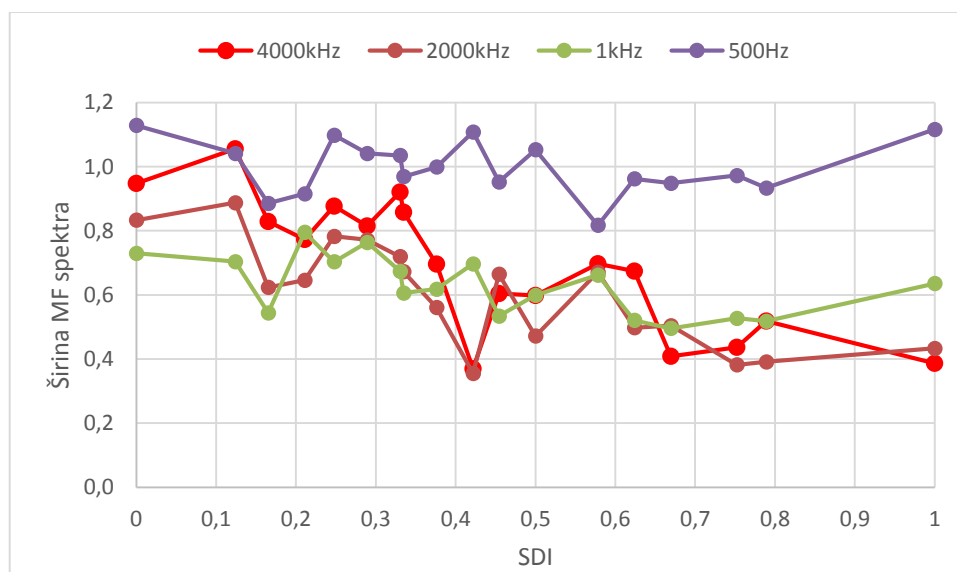
Pitanje u kojoj meri dužina impulsnog odziva za koju se računa MF spektar utiče na njegovu širinu je razlog zašto su na slici 6.5 prikazane promene širine MF spektra za tri različite dužine impulsnog odziva. Činjenica da se sa promenom karakteristika prostorije menja i vreme reverberacije bila je motiv i da se dužina impulsnog odziva koja će se koristiti u analizi odredi relativno u odnosu na vreme reverberacije. Slika 6.6 upravo i pokazuje promenu širine MF spektra kada je opseg impulsnog odziva za koji se radi MF analiza različite dužine trajanja u jedinici vremena ali iste posmatrane relativno u odnosu na karakteristične akustičke parametre kao što su vreme reverberacije i težište impulsnog odziva. Dobijeni rezultati zadržavaju opadajući trend, tj. sa povećanjem difuznosti prostorije, izraženom kroz vrednost parametra  $SDI$ , širina MF spektra se smanjuje. Poređenja radi na slici je dodat i grafik promene MF spektra kada je on računat za fiksnu dužinu impulsnog odziva od  $\sim 200$  ms, kao i vrednost vremena reverberacije,  $T60$  (grafik crne boje) za ispitivane konfiguracije. Vrednosti širine MF spektra kada se ona računa za dužinu impulsnog odziva od 200 ms pokazuju relativno malo odstupanje u odnosu na vrednosti koje se dobijaju kada se MF spektar računa za  $1/5$  vremena

reverberacije (dužina u opsegu 160-240 ms, najbliža vrednosti od 200 ms), pa će se dalja analiza raditi samo za prvih 200 ms impulsnog odziva.



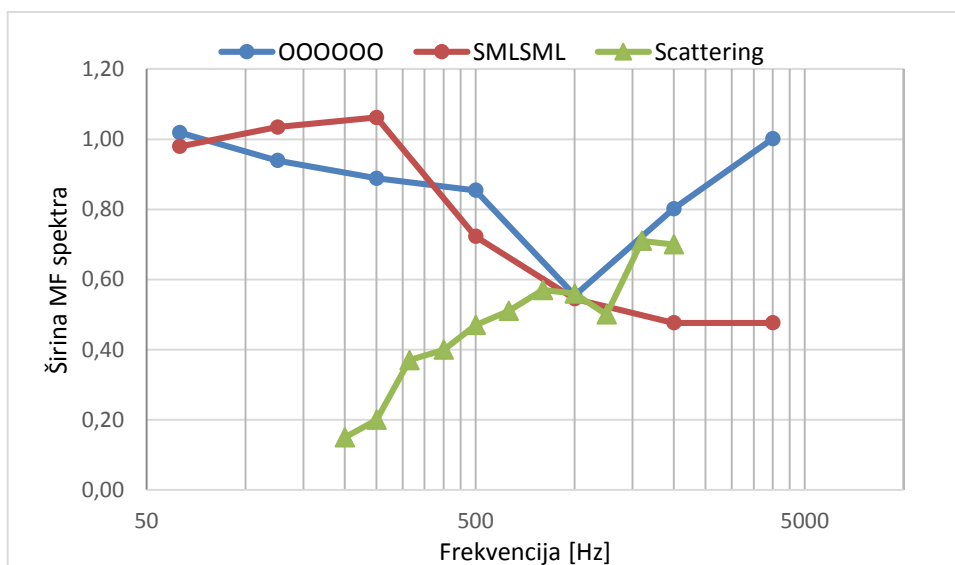
**Slika 6.6.** Promena širine MF spektra sa promenom SDI kada se dužine impulsnih odziva koje se koriste za izračunavanje MF spektra računaju u odnosu na vreme reverberacije

Promena širine MF spektra u zavisnosti od toga koji se frekvencijski opseg analizira prikazana je na slikama 6.7 i 6.8. U ova dva slučaja posmatrani su samo određeni frekvencijski opsezi (oktave) impulsnog odziva. Slika 6.7 pokazuje u kojoj meri se menja širina MF spektra impulsnog odziva kad se iz njega izdvoje samo određene oktave.



**Slika 6.7.** Promena širine MF spektra sa promenom difuznosti prostorije (SDI) za različite frekvencijske opsege izračunato za prvih ~200 ms impulsnih odziva

Slika 6.8 pokazuje da li se i kako menja širina MF spektra sa promenom frekventijskog opsega impulsnog odziva na kome se primenjuje MF analiza. Pretpostavka je da, pošto sketering koeficijent površine difuznih zidova (zbog njihovog specifičnog reljefa) raste sa povećanjem frekvencije, bi tako trebalo da se i difuznost prostorije menja po frekventijskim skalama, što bi za posledicu imalo i promenu širine MF spektra po oktavama. Ova pretpostavka je proveravana na dve karakteristične konfiguracije modela (000000 i SMLSML). Kao potvrda ove pretpostavke može da se uoči razlika između difuzne i nedifuzne konfiguracije modela.

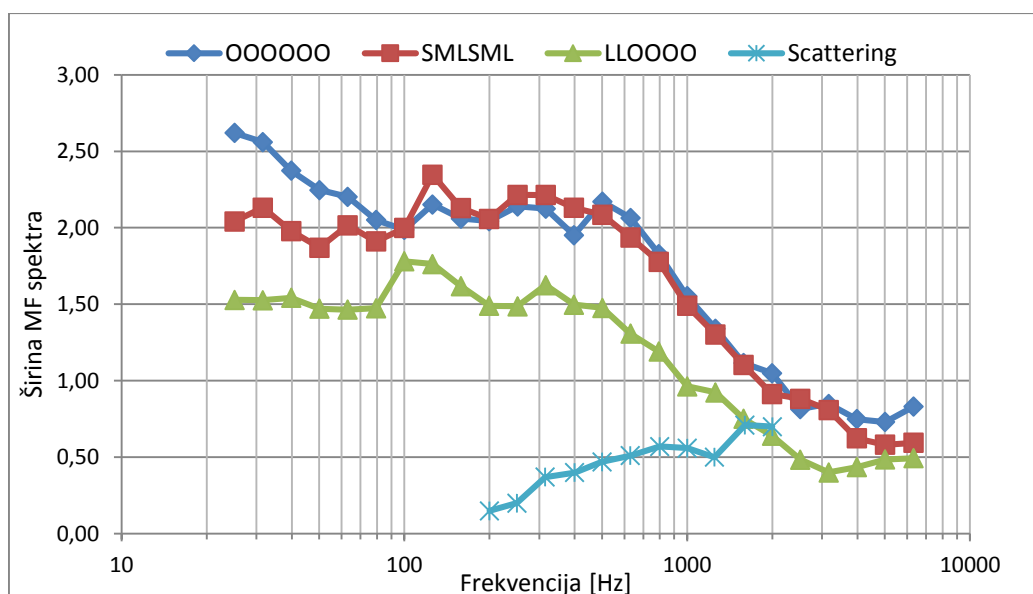


**Slika 6.8** Promena širine MF spektra u zavisnosti od frekvencije (po oktavama) za dve karakteristične konfiguracije fizičkog modela difuzne prostorije

Konfiguracija sa svim difuznim stranicama (SMLSML) pokazuje da se širina MF spektra smanjuje u opsegu od 250-4000Hz. U ovom opsegu frekvencija sketering koeficijent površine prekrivene sa drvenim polusferama raste u rasponu od 0,1 – 0,7 (odnosno povećava se efikasnost drvenih polusfera u stvaranju difuznih refleksija) što implicira povećanje difuznosti.

Promena širine MF spektra u zavisnosti od frekvencije (po tercama) za tri karakteristične konfiguracije fizičkog modela difuzne prostorije prikazana je na slici 6.9. Iako postoji jasan trend smanjenja širine MF spektra sa povećanjem frekvencije, odsustvo razlike između difuzne i nedifuzne konfiguracije modela prostorije dovodi u pitanje pretpostavku da širina spektra ukazuje na različitu difuznost. Verovatan razlog ovome je da se zbog filtriranja smanjuje opseg različitih struktura u signalu pa algoritam

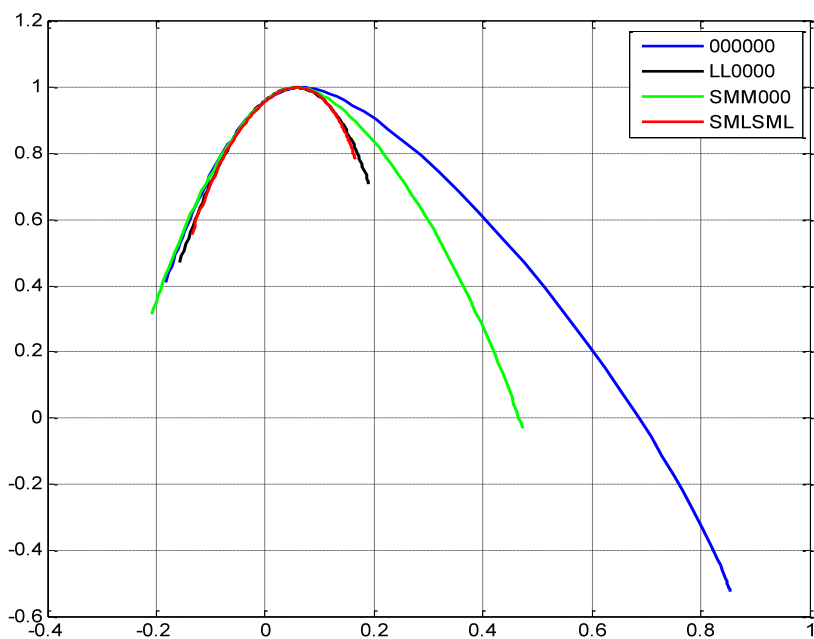
koji se koristi za multifraktalnu analizu više ne daje pouzdane rezultate, tj. gube se strukture u signalu koje bi mogle biti razmatrane sa multifraktalnog stanovišta.



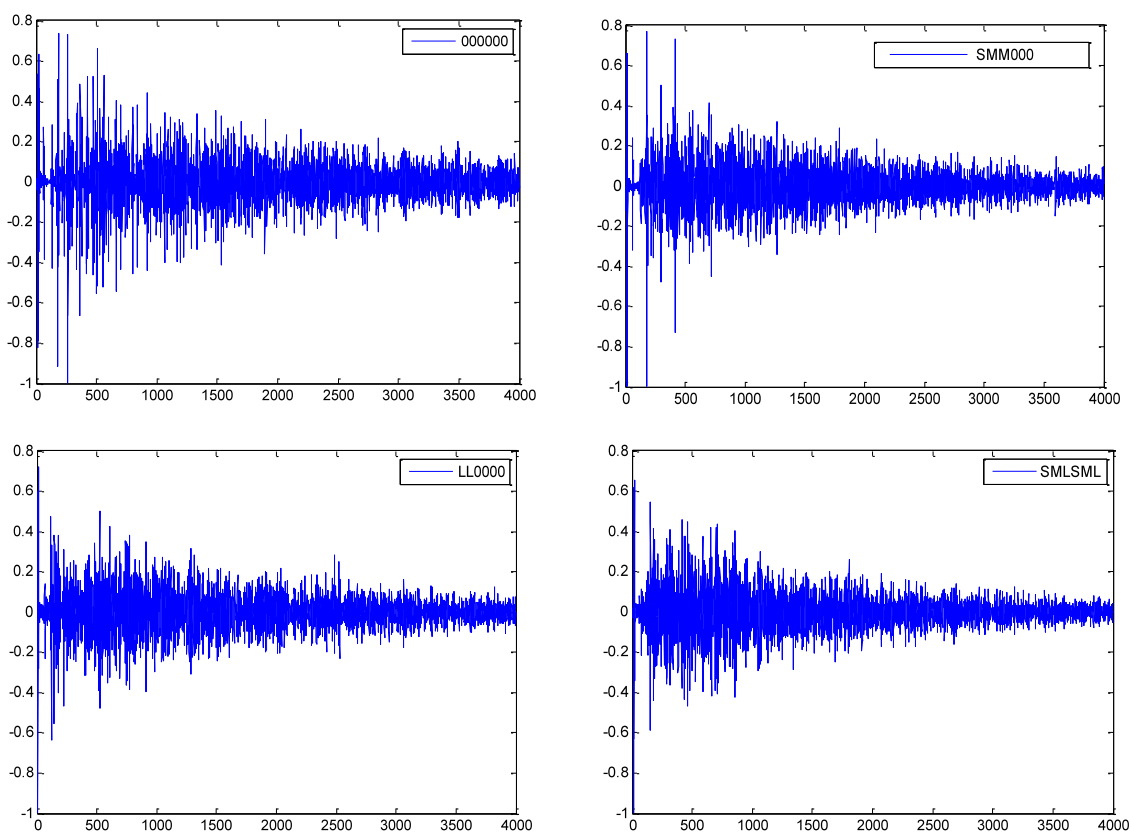
**Slika 6.9.** Promena širine MF spektra u zavisnosti od frekvencije (po trećinama oktave)

Do sada prikazani rezultati pokazuju trend smanjenja širine MF spektra sa povećanjem indeksa difuznosti površine (SDI). Ono što je na prikazanim rezultatima takođe moglo da se uoči je da u nekim konfiguracijama modela prostorije postoje značajna odstupanja od globalnog trenda. Kako bi se ispitala ova odstupanja posmatrane su 4 karakteristične konfiguracije modela prostorije, dva granična slučaja (000000 i SMLSML) i dve konfiguracije sa sličnim SDI ali značajno različitim parametrima dobijenim MF analizom, LL0000 (SDI 0.42) i SMM000 (SDI 0.45). Na slici 6.10. prikazani su izgledi impulsnih odziva za četiri karakteristične konfiguracije modela prostorije: 000000, SMLSML, LL0000, SMM000, dok su na slici 6.11. prikazani izgledi MF spektara izračunatih iz impulsnih odziva za ove konfiguracije prostorija.

Model sa konfiguracijom SMM000 se uklapa u globalni trend kretanja širine MF spektra, dok konfiguracija LL0000 značajno odstupa od ovog trenda. Zapravo, kad bi se posmatrali grafici sa slike 6.5. uočili bismo da minimumi ovog dijagrama uvek leže u tačkama koje odgovaraju konfiguracijama u kojima se na LL stranama nalaze difuzni elementi. Upoređujući to sa rezultatima sa slike 6.10 možemo da zaključimo da je za nastanak difuznog zvučnog polja (tj. da se dobije isti rezultati kao da su sve površine difuzne) dovoljno da ove dve površine budu pokrivena difuznim elementima.



**Slika 6.10.** Izgledi MF spektara za četiri karakteristične konfiguracije modela prostorije: 000000, SMLSML, LL0000, SMM000 izračunati za prvih ~200 ms impulsnog odziva



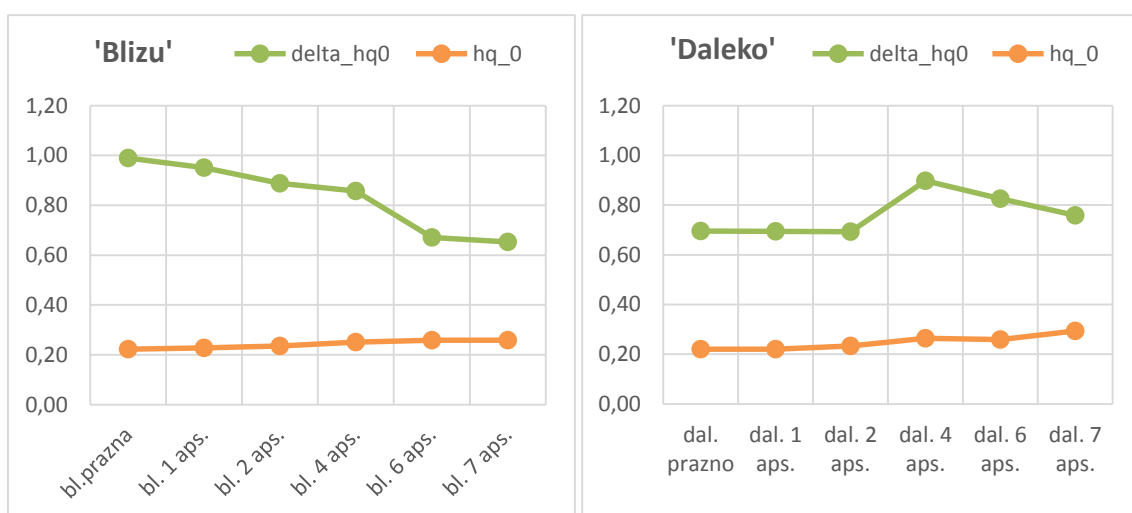
**Slika 6.11.** Izgled prvih 4000 odbiraka (~208 ms) impulsnih odziva za konfiguracije prostorije: 000000, SMM000, LL0000 i SMLSML

Ova varijacija ispitivanih parametara za konfiguracije LL0000, SMM000 otkriva da difuzni elementi na neki način menjaju protok energije u prostoriji, tako što je uticaj

velikih površina (LL) na nastanak uniformnijeg (difuznog) zvučnog polja mnogo veći nego što bi to trebalo da bude posmatrano kroz udeo njihove površine u odnosu na ukupnu površinu korišćenog modela. Izgledi impulsnih odziva za ove konfiguracije potvrđuju vizuelnu sličnost između tekstura sa konfiguracijama LL0000 i SMLSML, koje za razliku od konfiguracija nemaju izražene prve refleksije, već je energija ravnomernije raspoređena kroz impulsnim odziv. Odavde proističe da uži MF spektar ukazuje na uniformniju teksturu impulsnog odziva.

### 6.3 Kvantifikovanje uticaja apsorbera i difuzora u prostoriji na oblik MF spektra

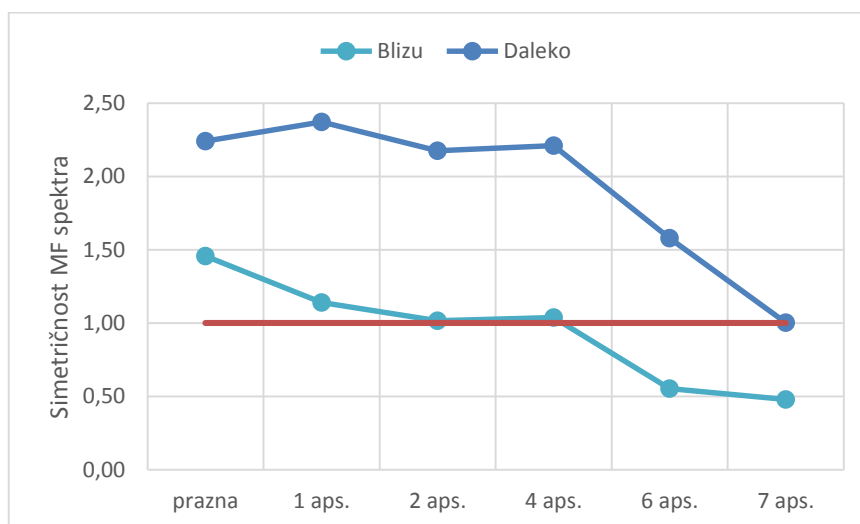
Analizom u fizičkom modelu reverberacione komore ispitivan je uticaj dodavanja apsorpcionih materijala u prostoriju na oblik multifraktalnog spektra, kao i način za kvantifikovanje promena koje nastaju u akustičkom odzivu kao posledica ovih intervencija. Za potrebe ovog eksperimenta korišćeni su impulsnim odzivi snimljeni u modelu reverberacione komore opisanom u poglavlju 4.1.2. Ukupno 12 impulsnih odziva je korišćeno, za 2 pozicije prijemnika (blizu i daleko u odnosu na izvor zvuka) sa 6 različitih konfiguracija (različita količina apsorbera u prostoriji). Promena parametara MF spektra za različite konfiguracije prikazana je na slici 6.12.



**Slika 6.12.** Promena širine i pozicije maksimuma MF spektra za različite konfiguracije fizičkog modela reverberacione komore

Grafici na slici 6.12 (levo) pokazuju promenu širine i pozicije maksimuma MF spektra za impulsne odzive snimljene na poziciji „blizu“ izvora za koje se postepeno povećavana količina apsorbujućih materijala, dok slika desno prikazuje promenu parametara za impulsne odzive snimljene na poziciji „daleko“, takođe sa postepenim povećanjem apsorpcije. Dobijeni rezultati, osim smanjenja širine MF spektra, pokazuju i da se pozicija maksimuma spektra pomera u desno (parametar  $h_{q_0}$  raste) sa povećanjem apsorpcije u prostoriji, što ukazuje na smanjenje korelisanosti u signalu, odnosno gubitak pravilnosti i determinisanosti u signalu.

Slika 6.13 daje prikaz promene simetričnosti MF spektra za ispitivane konfiguracije modela reverberacione komore. Dobijeni rezultati prikazuju/ilustruju kako pozicija na kojoj su snimani impulsni odzivi utiče na simetričnost impulsnog odziva. Impulsni odzivi snimljeni na poziciji koja je udaljenija od izvora zvuka ('Daleko') imaju velike vrednosti parametra kojim se meri simetričnost spektra, što znači da oni imaju izraženiju desnu stranu spektra na čije formiranje presudno utiču male fluktuacije u strukturi impulsnog odziva. Ove fluktuacije su posledica prvih refleksija koje u poziciju prijemnika pristižu vrlo brzo nakon direktnog zvuka zbog velike blizine stranica modela.

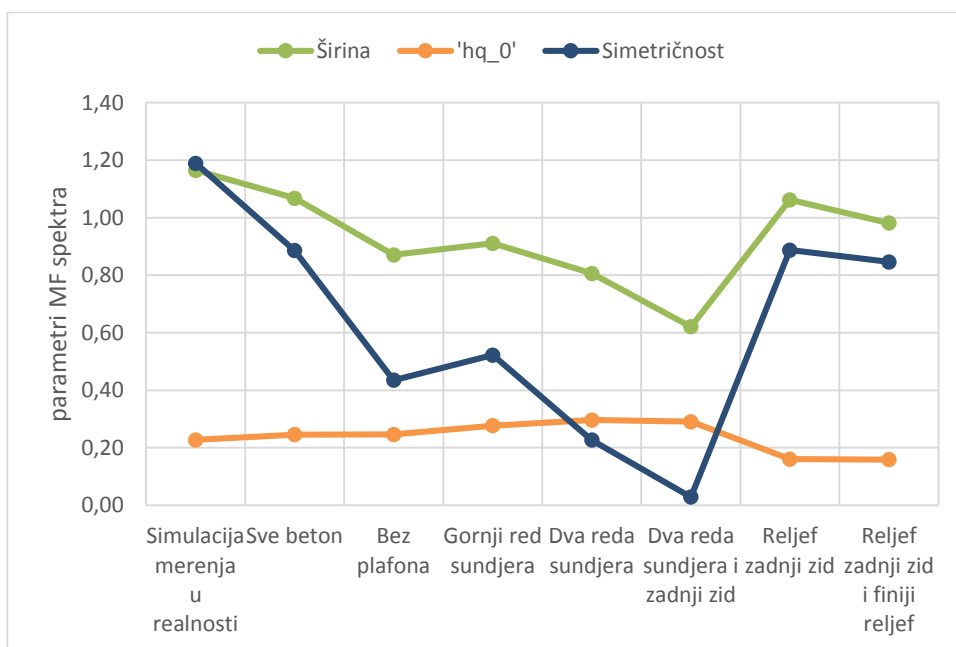


**Slika 6.13.** Simetričnost MF spektra za različite konfiguracije fizičkog modela reverberacione komore

Analiza u fizičkom modelu subotičkog pozorišta ima za cilj da prikaže kako kompleksne akustičke intervencije u prostoriji utiču na MF spektar impulsnog odziva, odnosno u kojoj meri povećanje apsorpcije i difuzije u realnoj prostoriji utiče na oblik MF spektra. Slika 6.14 pokazuje kako se menjaju parametri MF spektra izračunati u



različitim konfiguracijama fizičkog modela subotičkog pozorišta za prvih 200 ms impulsnih odziva. Ove konfiguracije (nazivi dati na x-osi) predstavljaju model prostorije u kome su dodate kombinacije apsorbirajućih i difuznih elemenata kako bi se simulirao uticaj intervencija na enterijeru na impulsni odziv prostorije, tj. akustiku.

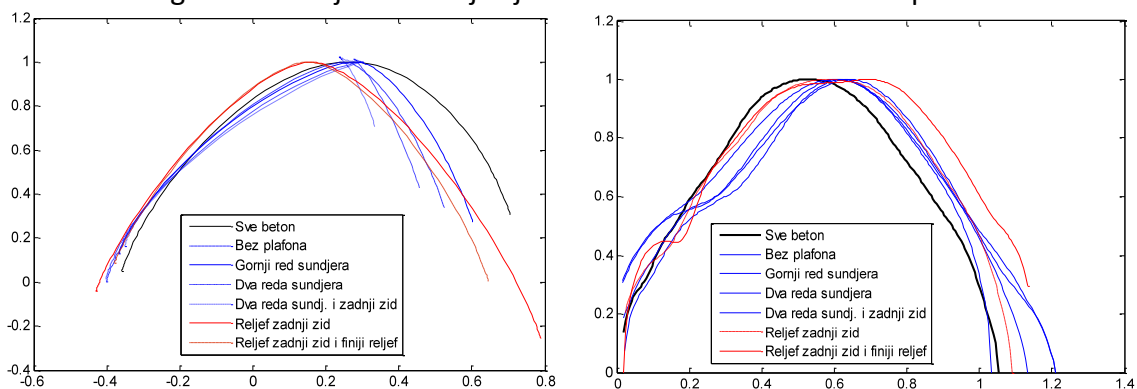


**Slika 6.14.** Promena parametara MF spektra za različite konfiguracije fizičkog modela subotičkog pozorišta izračunatih za prvih 200ms impulsnog odziva

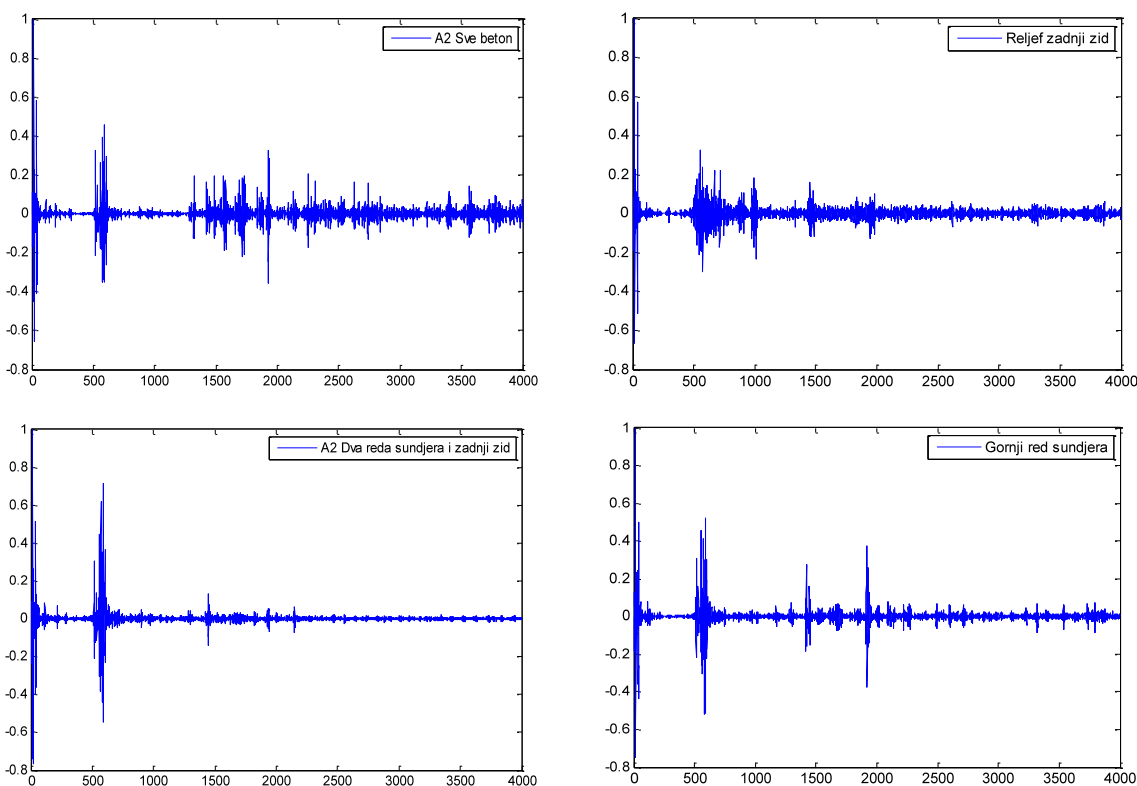
Dobijeni rezultati pokazuju kako sa dodavanjem apsorpcije opada širina MF spektra, a spektar se pomera u desno ( $hq_0$  raste, što je već primećeno i u modelu reverberacione komore). Dodavanje difuznih elemenata u prostoriji (u vidu reljefa na zidovima) dolazi do „oporavka“ širine MF spektra i vraćanja vrha spektra u levo. Ono što se neminovno zaključuje posmatrajući vrednosti konfiguracija npr. „sve beton“ i „reljef zadnji zid“, koje predstavljaju konfiguracije bez akustičke obrade (praktično goli zidovi) i akustički obrađenu prostoriju (dodati apsorberi i difuzori) je da se vrednosti posmatranih parametara ne razlikuju značajno, pa samo prosto poređenje ovih vrednosti ne bi moglo da nam da verodostojne informacije o akustici prostorije. Ovi rezultati pokazuju da je neophodan je i drugačiji pogled na MF spektar.

Na slikama 6.15 i 6.16 prikazana su izgledi MF spektara izračunatih za sve konfiguracije pomoću dve različite metode MFDFA i LD (*Large deviation*), i izgledi impulsnih odziva za karakteristične konfiguracije. Izgledi MF spektara dobijenih MFDFA metodom pokazuju da iako su vrednosti posmatranih parametara spektra sa slike 6.14

u pojedinim konfiguracijama uporedive oblik njihovih spektara se razlikuju. Dok dodavanje apsorbera dovodi do skraćivanje desne strane spektra kao posledica gubljenja određenih komponenti impulsnih odziva usled apsorpcije, intervencija sa dodavanjem difuzora u vidu reljefa utiče na povećanje bogatstva u strukturi impulsnog odziva što se manifestuje kroz širi i simetričniji MF spektar. MF spektri dobijeni LD metodom pokazuju kako se dodavanjem difuzora pojavljuje još jedan kontinuum vrednosti singulariteta koji se vidi u još jednom maksimumu u obliku spektra.



**Slika 6.15** Izgled MF spektara za različite konfiguracije fizičkog modela subotičkog pozorišta izračunatih MFDFA metodom (slika levo) i LD metodom (slika desno)

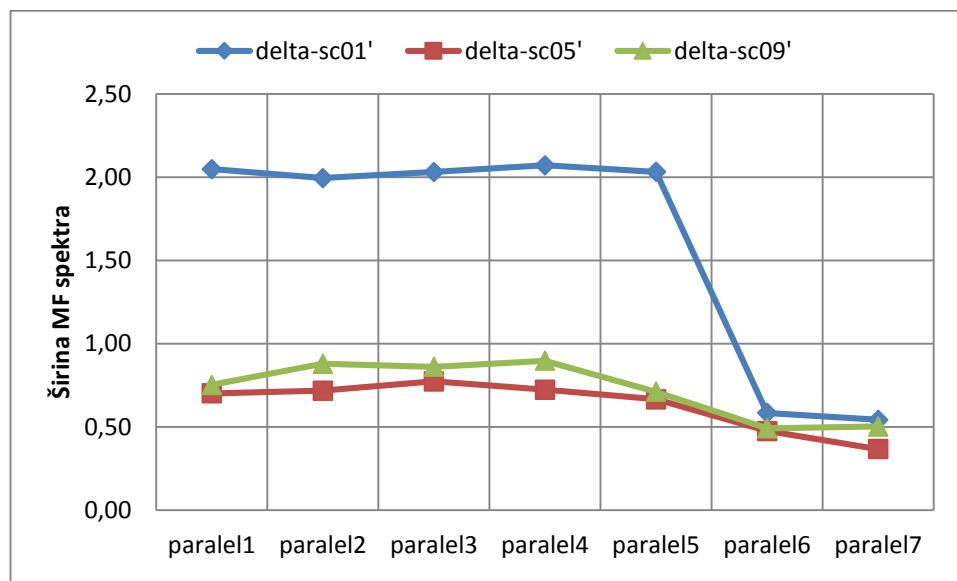


**Slika 6.16** Izgled prvih 200 ms impulsnog odziva za različite konfiguracije fizičkog modela subotičkog pozorišta (sve beton, reljef zadnji zid, dva reda sundjera i zadnji zid, gornji red sundjera)

## 6.4 Analiza uticaj geometrijskih karakteristika prostorije

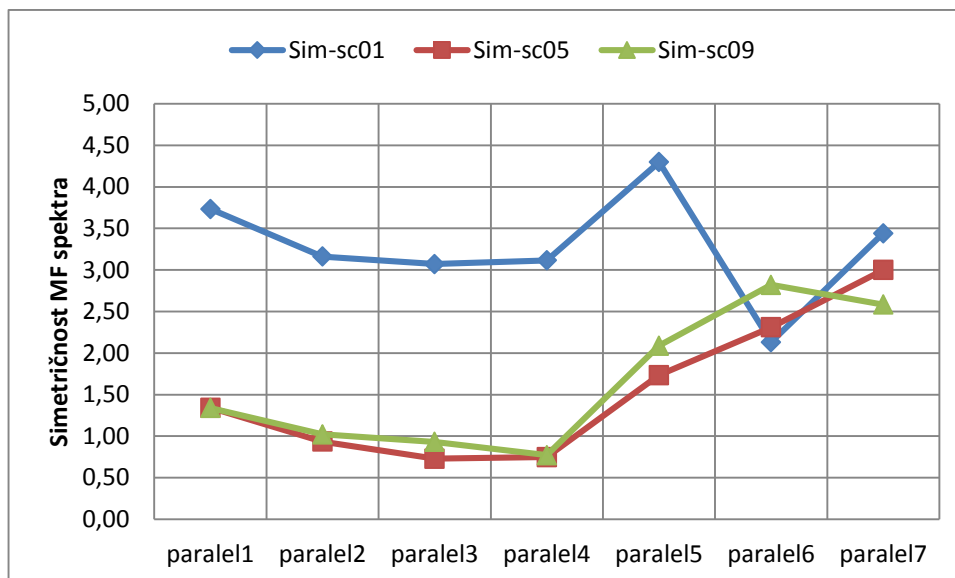
### 6.4.1 Hipotetičke geometrijske forme

Uticaj geometrijskih karakteristika prostorije na oblik i karakteristike multifraktalnog spektra impulsnog odziva ispitan je u računarski simuliranim prostorijama. Istraživanje sa simuliranim prostorijama kretalo se u dva pravca: promeni oblika prostorije i promeni karakteristika njenih zidova. Ove modifikacije su ispitivane na dva modela prostorije (opisana u poglavlju 4.2): prostorije sa paralelnim stranicama (*paralelx*) i prostorije sa nepravilnim oblikom stranica (*akrompirxx*). Slike 6.17, 6.18 i 6.19 prikazuju promenu širine, simetričnosti i pozicije maksimuma MF spektra u različitim varijacijama oblika prostorije sa paralelnim stranicama za tri različita sketering koeficijenta stranica (računato za prvih 80 ms).

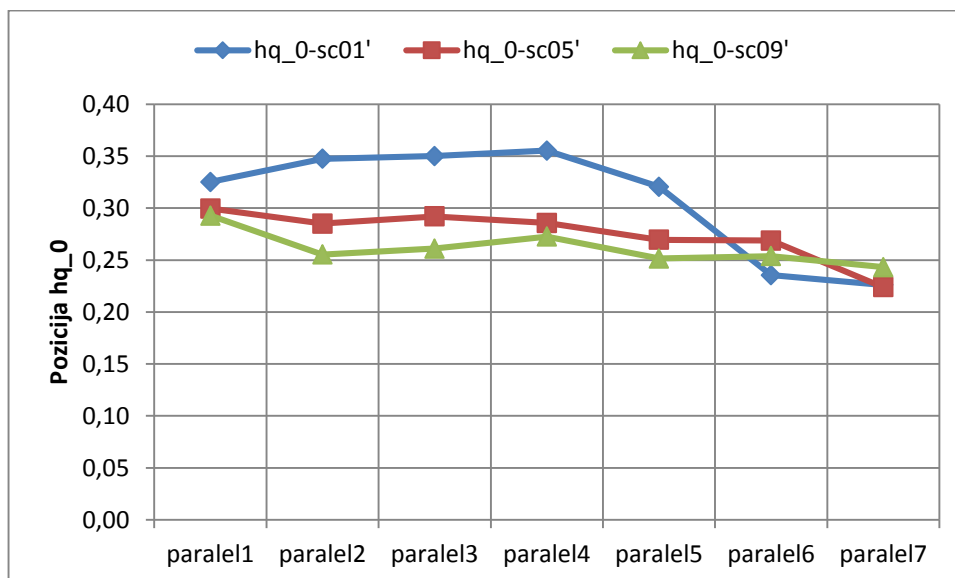


**Slika 6.17.** Promena širine MF spektra za različite konfiguracije modela sa paralelnim zidovima i tri vrednosti sketering koeficijenta površina zidova

Dobijeni rezultati na slici 6.17 pokazuju da širina MF spektra naglo opada u konfiguracijama „*paralel6*“ i „*paralel7*“. Konfiguracije „*paralel6*“ i „*paralel7*“ su modeli sa velikom disproporcijom dimenzija koja za posledicu ima promenu uslova za postizanje difuznog polja. Rezultati sa slike 6.17 takođe pokazuju da je širina MF spektra modela sa većim vrednostima sketering koeficijenta (sc05 i sc09) značajno niža, što ide u prilog tvrdnji da je u difuznom polju širina spektra manja. U tom kontekstu konfiguracije sa sketering koeficijentom sc05 i sco9 pokazuju iste ili u najmanju ruku slične karakteristike.



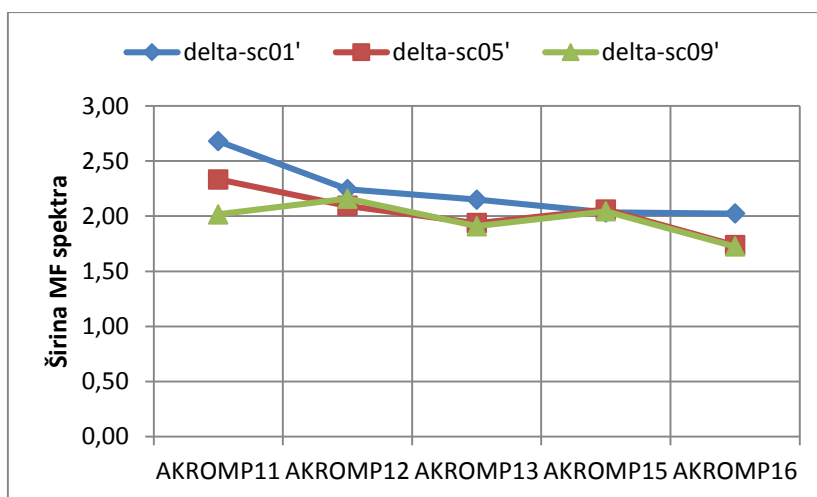
**Slika 6.18.** Promena simetričnosti MF spektra za model sa paralelnim zidovima



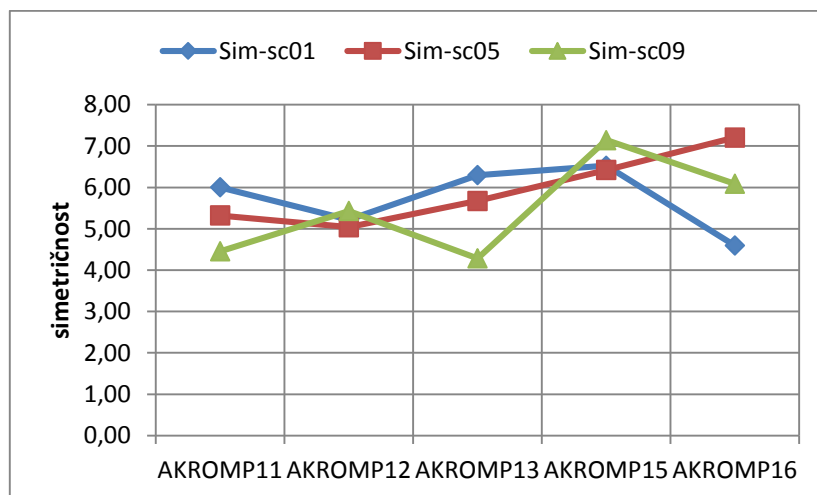
**Slika 6.19.** Promena pozicije maksimuma MF spektra za model sa paralelnim zidovima

Nagli pad širine MF spektra u konfiguracijama paralel6 i paralel7 za vrednosti koeficijenta difuznosti površina sc01 pokazuju korelaciju sa rezultatima dobijenim analizom objektivnih parametara impulsnog doziva u posmatranim modelima [98]. Naime, u ovim konfiguracijama javljaju se odstupanja između vrednosti akustičkih parametara određenih na osnovu simuliranog impulsnog odziva i statistički očekivanih vrednosti (prvenstveno vremena reverberacije) izračunatih prema Sabinovoj formuli. Ova odstupanja posledica su različitog ostvarenog stepena difuznosti polja i ona su najveća u pomenutim konfiguracijama.

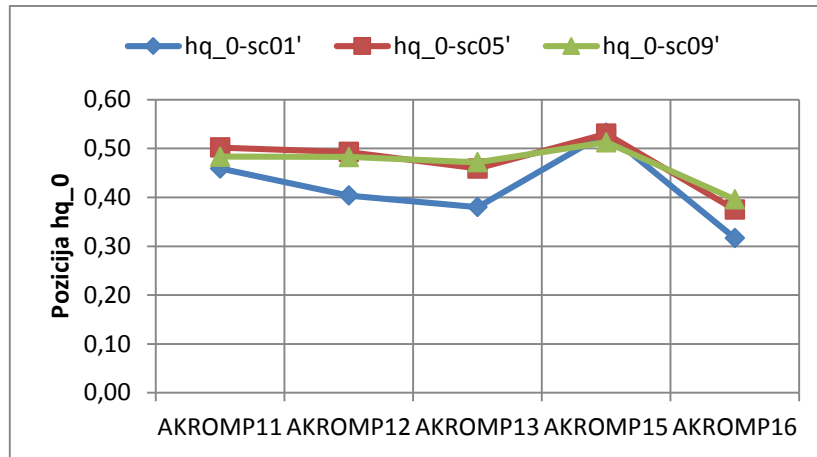
Na slikama 6.20, 6.21 i 6.22 prikazana je promena parametara MF spektra u različitim varijacijama oblika prostorije sa nepravilnim stranicama za tri različita sketering koeficijenta stranica (računato za prvih 80 ms). Ispitivani modeli prostorije kreirani su tako što su stranice modela prostorije modifikovane tako da dobiju sitnoizlomljenu nepravilnu formu. Na ovaj način povećavana je difuznost svake površine. Dobijeni oblici prostorije su takvi da se nepravilnost stranica povećava od konfiguracije „akromp11“ ka konfiguraciji „akromp16“. Rezultati promene širine MF spektra pokazuju da se širina smanjuje sa povećanjem nepravilnosti, ovo smanjenje je izraženije u modelu sa manjim sketering koeficijentom pa je uticaj nepravilnosti stranica na formiranje zvučnog polja veći.



**Slika 6.20.** Promena širine MF spektra za različite konfiguracije modela sa nepravilnim zidovima i tri vrednosti sketering koeficijenta površina zidova



**Slika 6.21.** Promena simetričnosti MF spektra za model sa nepravilnim zidovima

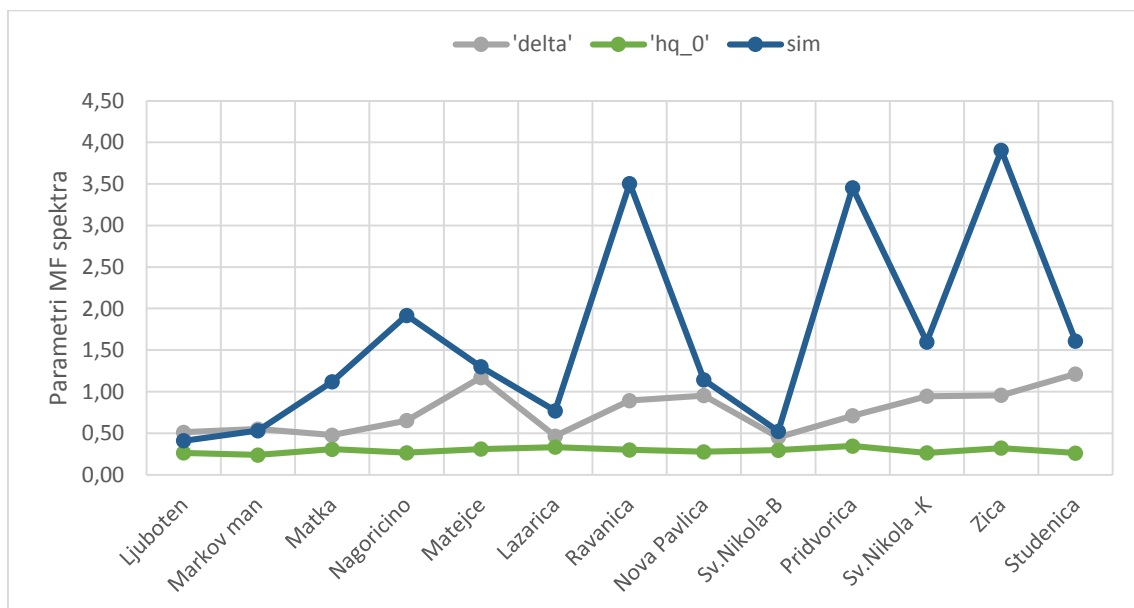


**Slika 6.22.** Promena pozicije maksimuma MF spektra za model sa nepravilnim zidovima

Dobijeni rezultati u slučaju prostorije sa nepravilnim zidovima pokazuju da više nema tolikih razlika između dobijenih karakteristika kada se ovi modeli porede prema vrednostima difuznosti površine (sketering koeficijenta). Nepravilnost stranica ispitivanih konfiguracija je takva da one same po sebi unose difuznost, tj. da se difuzno polje postiže samo promenom oblika.

#### 6.4.2 Modeli srednjevekovnih crkvi

Mogućnost za klasifikaciju prostorija složenih geometrijskih formi pomoću MF spektra ispitivana je na računarski simuliranim modelima crkvi opisanim u poglavlju 4.2. Vrednosti parametara MF spektra za ispitivane modele prikazane su na slici 6.23.



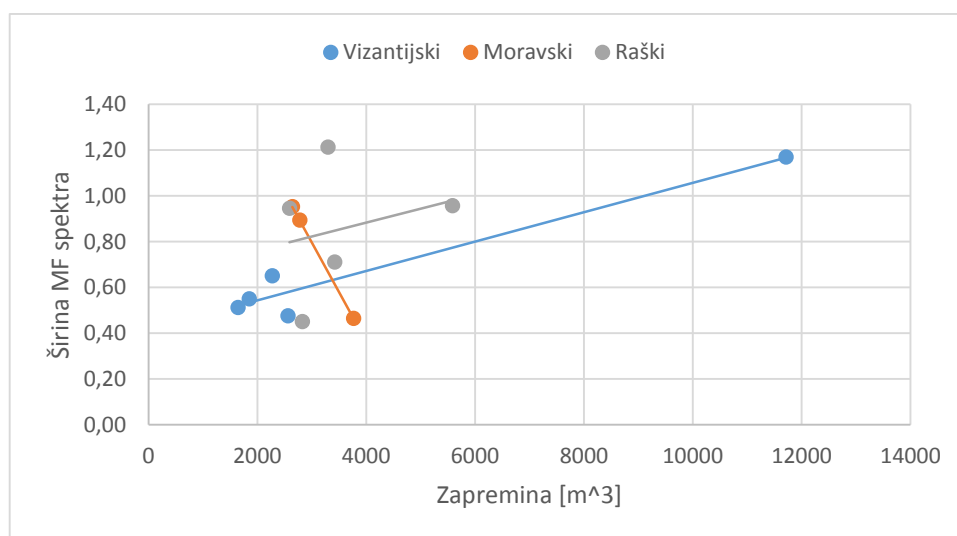
**Slika 6.23.** Vrednosti karakterističnih parametara MF spektra za impulsne odzive snimljene u računarskim modelima crkvi

Modeli crkava u kojima je izvršena simulacija impulsnog odziva pripadaju vizantijskom (Ljuboten - Matejče), moravskom (Lazarica - Nova Pavlica) i raškom stilu gradnje (Sv. Nikola Baljevac - Studenica). Parametri dobijeni MF analizom (prikazani na slici 6.23) ne pokazuju da postoji značajna veza stila i oblika MF spektra. Rezultati korelacije objektivnih akustičkih parametara i parametara MF spektra za impulsne odzive iz modela crkvi dati su u tabeli 6.4. Ovi rezultati pokazuju da postoji blaga korelacija između širine spektra (*delta\_hq*) i zapremine crkve, kao i između pozicije maksimuma spektra (*hq\_0*) i vremena reverberacije (*T30*).

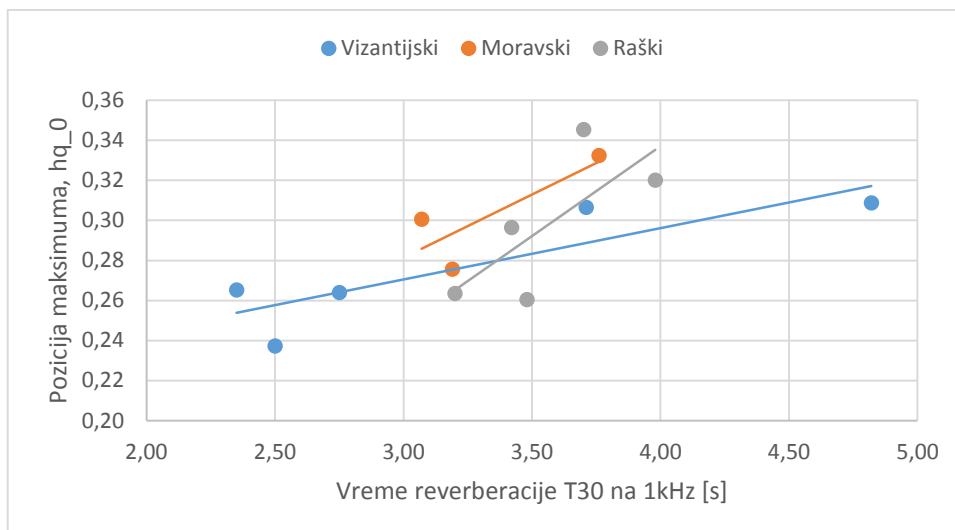
Tabela 6.4. Korelacija između akustičkih i odabranih parametara MF spektra za modele crkvi

	Zapremina	EDT (s)	T30 (s)	SPL (dB)	C80 (dB)	D50	Ts (ms)	LF80
delta_hq	<b>0,54</b>	0,16	0,40	-0,66	0,19	0,35	0,20	-0,41
hq_0	0,40	0,49	<b>0,69</b>	-0,39	-0,18	0,33	<b>0,67</b>	0,57
Sim	0,15	-0,10	0,20	-0,29	-0,02	0,12	0,04	0,45

Ostvareni stepeni korelacije predstavljaju polazište za ispitivanje zavisnosti određenih parametara MF spektra u odnosu na objektivne karakteristike prostorija za različite stilove gradnje. Slika 6.24 prikazuje zavisnost širine MF spektra od zapremine ispitivanih modela crkvi, dok slika 6.25 prikazuje zavisnost pozicije maksimuma MF spektra u odnosu na vreme reverberacije, sa poređenjem prema stilu gradnje kojem pripadaju. Prikazani rezultati i u jednom i drugom slučaju ne pokazuju da su parametri MF spektra u stanju da klasifikuju ispitivane modele crkvi.



Slika 6.24. Zavisnost širine MF spektra od zapremine modela crkve za sva tri stila gradnje



**Slika 6.25.** Zavisnost pozicije maksimuma MF spektra u odnosu na vreme reverberacije (T30) računato na 1 kHz, poređenje prema stilu gradnje

## 6.5 Analiza impulsnih odziva snimljenih u realnim prostorijama

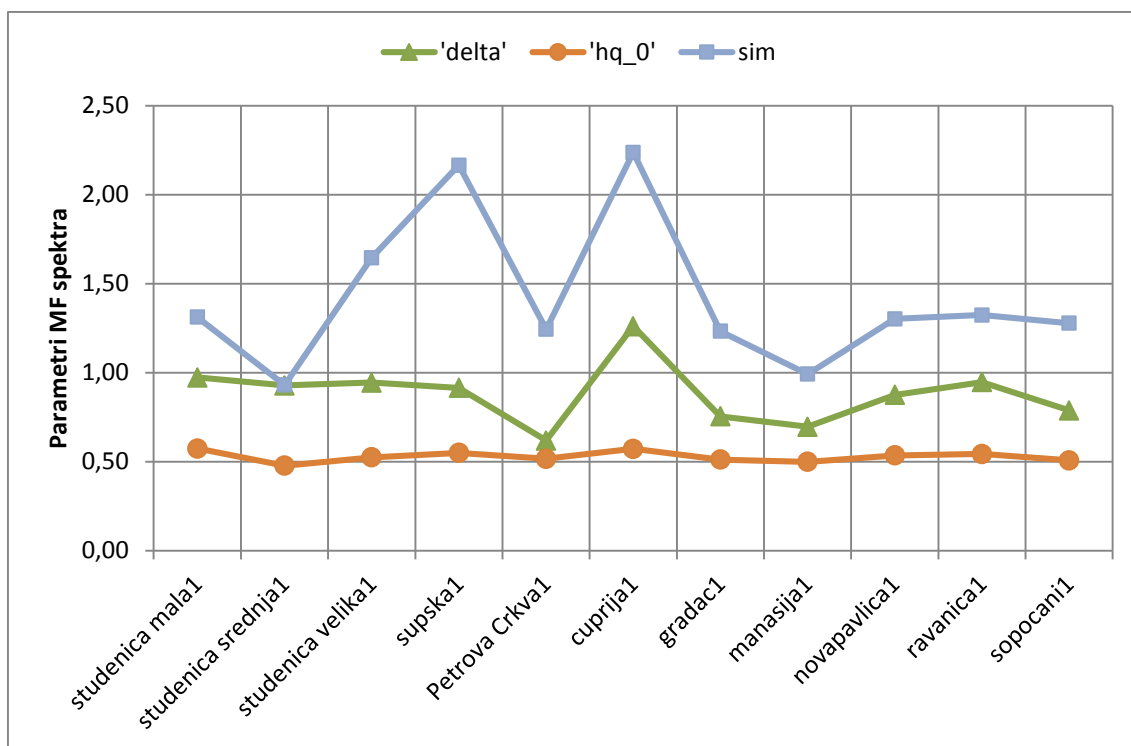
### 6.5.1 Crkve

Kao svojevrsan nastavak istraživanja iz prethodnog poglavlja analizirana je grupa impulsnih odziva snimljenih u srpskim srednjevekovnim crkvama. Generalno, crkve sa akustičkog stanovišta predstavljaju specifične prostore koje zahvaljujući svojoj globalnoj i mikrogeometriji, kao i materijalizaciji unutrašnjih površina karakteriše veliko vreme reverberacije i postojanje uslova za formiranje difuznog zvučnog polja. Uzorak na kome je ispitivana primenljivost multifraktalne analize i predloženih parametara MF spektra čini 81 impulsni odziv snimljen u 11 različitim crkvi na različitim prijemnim pozicijama.

Tri crkve (Studena, Ravanica i Nova Pavlica) koje su deo analiziranog skupa bile su i softverski modelovane, pa pružaju mogućnost za poređenje rezultata ostvarenih na impulsnim odzivima generisanim u softverskom modelu i snimljenim u realnosti.

Na slici 6.26 prikazana je promena parametara MF spektra izračunatog za prvih 200 ms impulsnog odziva za 11 različitih crkava (imena crkava data su na apscisi). Svi impulsni odzivi su snimljeni na relativno istim pozicijama u odnosu na geometriju crkve. Rezultati prikazani na slici su za poziciju izvora ispred oltara i poziciju prijemnika u centralnom delu prostora (1 u nazivu označava poziciju impulsnog odziva).





**Slika 6.26.** Promena karakterističnih parametara MF spektra za impulsne odzive snimljene u crkvama

Dobijeni rezultati pokazuju da iako se radi o različitim objektima koji pripadaju različitim stilovima gradnje parametar  $hq_0$  (pozicija maksimuma MF spektra) ima stabilan trend za sve objekte, tj. pokazuje male varijacije. Takođe, i širina MF spektra pokazuje relativno stabilnu vrednost za pojedine grupe objekata. Ono što je uočljivo u dobijenim rezultatima je da simetričnost spektra uzima vrednosti koje se preovlađujuće veće od 1.

Kako bi se ispitala korelisanost ovih parametara sa stilovima gradnje dobijeni rezultati upoređeni su i sa rezultatima ostvarenim u računarski simuliranim modelima prikazanim na slici 6.23. Ovo je bilo moguće za tri crkve čiji impulsni odzivi su bili dostupni u oba slučaja. Poređenje rezultata dobijenih za impulsne odzive iz modela i snimljene u realnim crkvama pokazuju da kada je u pitanju širina spektra postoji relativno slaganje u dva slučaja (osim studenice). Ali rezultati takođe pokazuju da je vrednost parametra  $hq_0$  značajno manja u modelima u odnosu na realne prostore što ukazuje da je veštački generisan signal pravilniji dok signal snimljen u realnom prostoru ima bogatiju teksturu sastavljena od mnoštva različitih struktura, a kao posledica

mikrogeometrija u prostoriji koje nisu adekvatno modelovane. Dobijeni rezultati i u jednom i drugom slučaju nisu uspjeli da uspostave vezu između arhitektonskih karakteristika, vezanih za stil gradnje kome pripadaju ispitivane crkve, i izračunatih parametara multifraktalnog spektra za impulsne odzive snimljene u ovim crkvama.

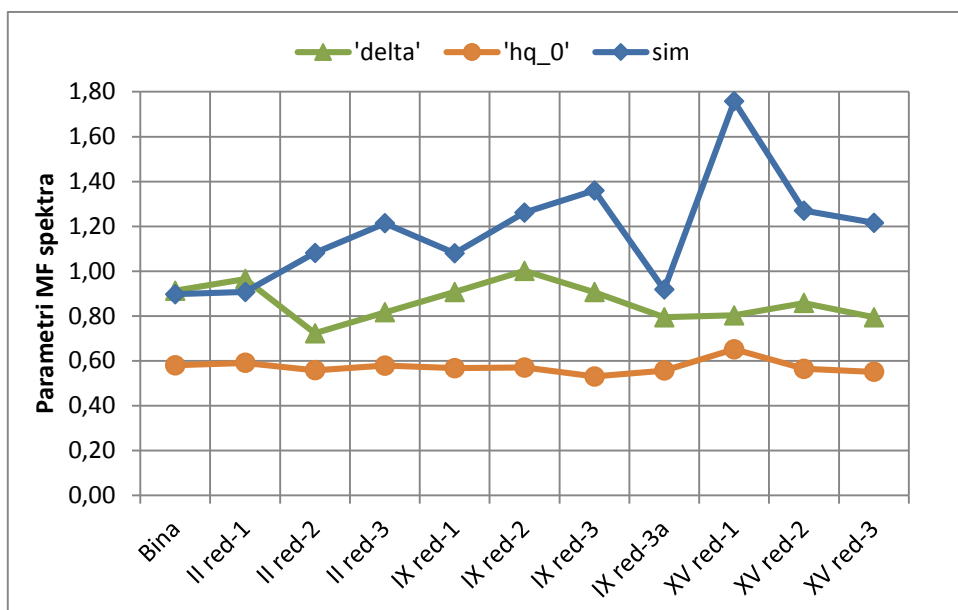
Međutim, relativno veliki broj impulsnih odziva dostupnih iz crkvi dao je mogućnost za verodostojnu statističku analizu izračunatih parametara MF spektra. Rezultati statističke analize vrednosti parametara MF spektra izračunatih za prvih 200 ms impulsnog odziva dati su u tabeli 6.5. Stabilne vrednosti parametra  $hq_0$  sa relativno malom vrednošću standardne devijacije, predstavljaju potvrdu onoga što je u ranijim analizama već zaključeno da pozicija maksimuma MF spektra predstavlja karakteristiku određenog tipa prostorije relativno nezavisnu od varijacije u geometriji i akustičke obrade.

Tabela 6.5 Statistički deskriptori osnovnih parametara MF spektra izračunatih za impulsne odzive snimljene u crkvama

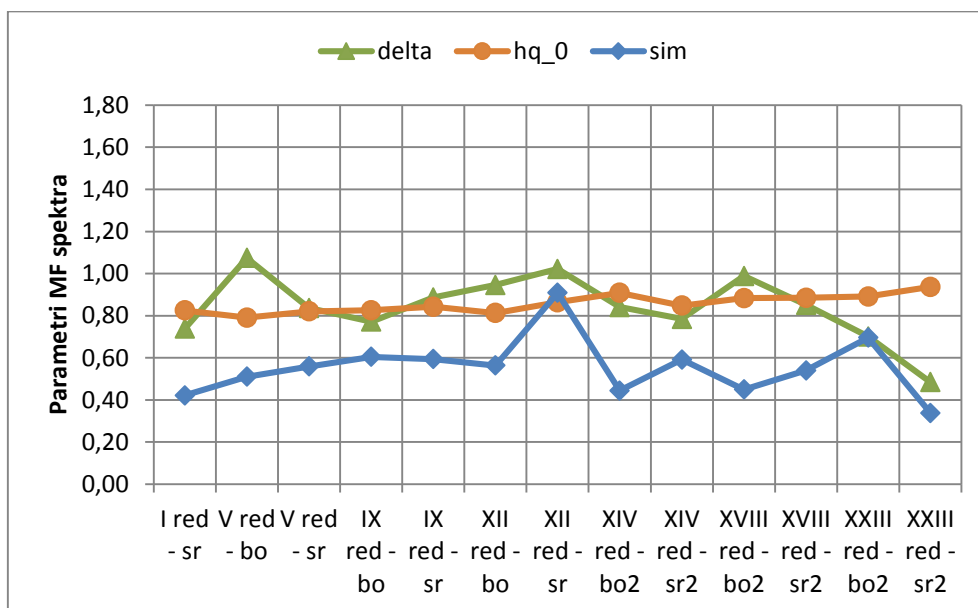
	Srednja vrednost	Medijana	Standardna devijacija	Varijansa	Kurtosis	Asimetričnost (Skewness)	Opseg	Min.	Maks.
<i>delta'</i>	0,885	0,876	0,140	0,020	-0,053	0,489	0,642	0,620	1,261
<i>hq_0'</i>	0,503	0,503	<b>0,034</b>	0,001	1,825	0,496	0,202	0,428	0,630
<i>sim</i>	1,565	1,420	0,575	0,331	0,205	0,833	2,652	0,616	3,269

### 6.5.2 Pozorišne sale

U kojoj meri pozicija prijemnika u prostoriji utiče na vrednosti parametara MF spektra analizirano je na impulsnim odzivima snimljenim u pozorišnim salama. Analiza je sprovedena na dve pozorišne sale: Beogradsko dramsko pozorište (BDP) i pozorište Boško Buha. Osim analize uticaja pozicije prijemnika u prostoriji na MF spektar impulsnog odziva, ovi signali pružaju mogućnost i za poređenje ove dve sale u akustičkom smislu Slika 6.27 prikazuje promenu dobijenih parametara MF spektra za impulsne odzive snimljene na različitim pozicijama u okviru pozorišne sale „Beogradskog dramskog pozorišta“. Slika 6.28 prikazuje vrednosti parametara MF spektra za impulsne odzive snimljene u sali pozorišta „Boško Buha“.



**Slika 6.27.** Promena karakterističnih parametara MF spektra za impulsne odzive snimljene u BDP na različitim pozicijama



**Slika 6.28.** Promena karakterističnih parametara MF spektra za impulsne odzive snimljene na različitim pozicijama u sali pozorišta Boško Buha

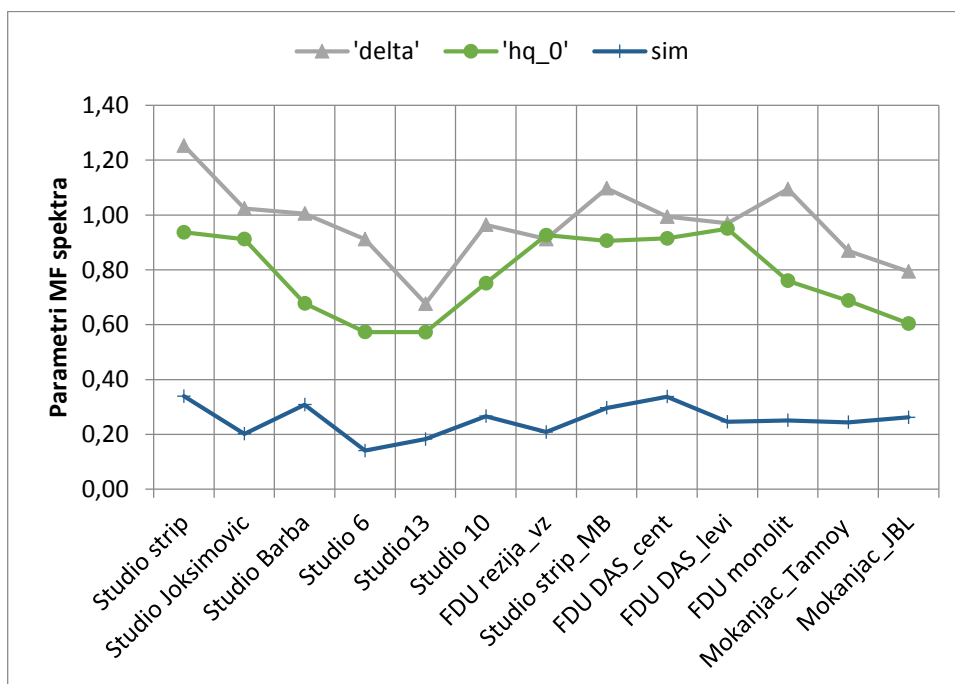
Rezultati na slikama 6.27 i 6.28 pokazuju kako širina i simetričnost MF spektra variraju s promenom pozicije u sali. Širina spektra pokazuje kratkotrajne trendove koji se manifestuju kroz naizmenično povećanje i smanjenje širine MF spektra sa udaljavanjem od bine. Simetričnost MF spektra ne prati ove trendove, međutim, ono što je uočljivo kada se poredi dijagrami simetričnosti spektra za ova dva pozorišta jesu male

vrednosti simetričnosti za pozorište Boško Buha, koje ukazuju da dominira leva strana multifraktalnog spektra. Ovo na do sada analiziranim impulsnim odzivima za velike prostorije uopšte nije bio slučaj, i može se pripisati „problematičnoj akustici“ ovog pozorišta koja je posledica specifičnog oblika zidova i koja se manifestuje kroz pojavu flater eha. Ovaj rezultat otvara prostor za uvođenje pretpostavke da se simetričnosti MF spektra može iskoristiti kao parametar na osnovu koga mogu da se detektuju nepoželjna svojstva prostorije u akustičkom smislu.

### 6.5.3 Studijski prostori i režije

Analiza impulsnih odziva snimljenih u studijskim prostorima i režijama ima za cilj da pokaže kako se akustika malih prostorija „drugačije“ namene kvantifikuje kroz parametre MF spektra.

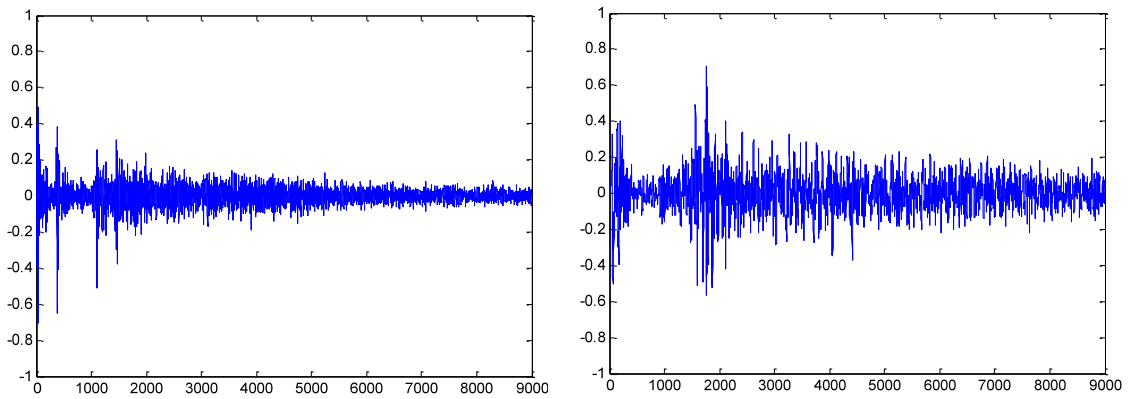
Bez zalaženja u tumačenje pojedinačnih akustičkih svojstava analiziranih prostorija u nastavku na slici 6.29. prikazane su vrednosti parametara MF spektra za korišćene impulsne odzive bez njihove detaljnije analize. Ono što se uočava sa slike, a što nije bio slučaj u do sada analiziranim impulsnim odzivima jesu male vrednosti za simetričnost MF spektra koje relativno malo variraju, dok vrednost  $hq_0$  pokazuje velike razlike između analiziranih prostora, odnosno njihovih impulsnih odziva.



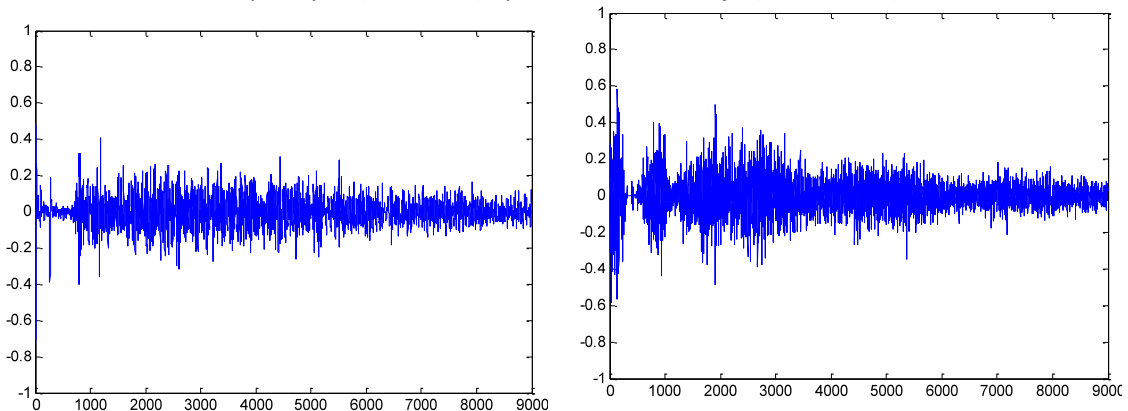
Slika 6.29. Promena karakterističnih parametara MF spektra za impulsne odzive snimljene u studijskim prostorima i režijama

#### 6.5.4 Koncertne i operske sale

Akustika koncertnih i operskih sala je svakako mesto gde je potreba za akustičkim dizajnom najizraženija. Ovo je i oblast u kojoj je najviše subjektivnih parametara definisano bez adekvatne potpore u merama koje mogu da ih objektivno kvantifikuju. U ovom delu istraživanja globalne karakteristike impulsnih odziva sa multifraktalnog stanovišta ispitivane su na primeru četiri impulsa odziva: Opere u Mariboru pre i posle akustičkog renoviranja, Opere u Ljubljani i impulsi odziv poznate operske sale u Beču (*Musicverein*). Izgledi prvih 200 ms ovih impulsnih odziva prikazani su na slikama 6.30 i 6.31. Opera u Mariboru, tj. impulsi odzivi snimljeni u njoj pre i posle rekonstrukcije su reprezentativni primeri za proveru tumačenja teksture impulsnog odziva pomoću multifraktalnog spektra, zato što je jedan od razloga za rekonstrukciju ove sale bilo upravo poboljšanje teksture što se može uočiti i na prikazanim impulsnim odzivima.

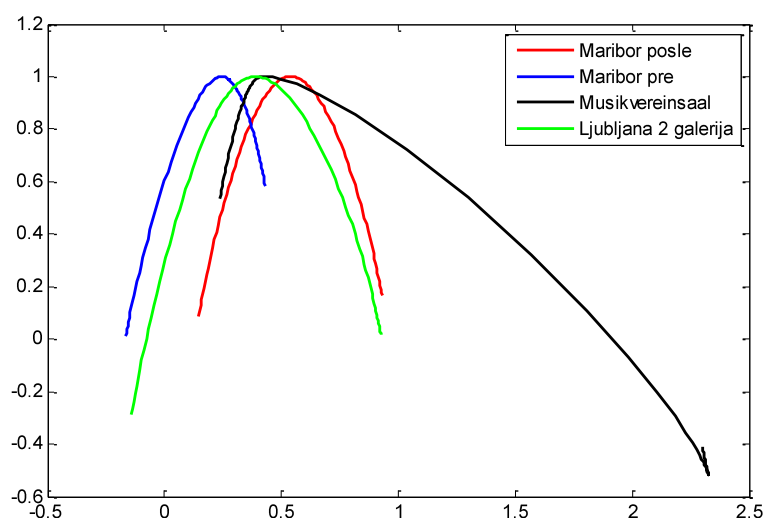


**Slika 6.30** Izgled prvih 9000 odbiraka (~200 ms) impulsnih odziva snimljenih u sali Mariborske opere pre (slika levo) i posle rekonstrukcije (slika desno)



**Slika 6.31** Izgled prvih 9000 odbiraka (~200 ms) impulsnih odziva snimljenih u sali Ljubljanske opere na poziciji 2. galerije bočno (slika levo) i sali bečke filharmonije - *Musikverein* (slika desno)

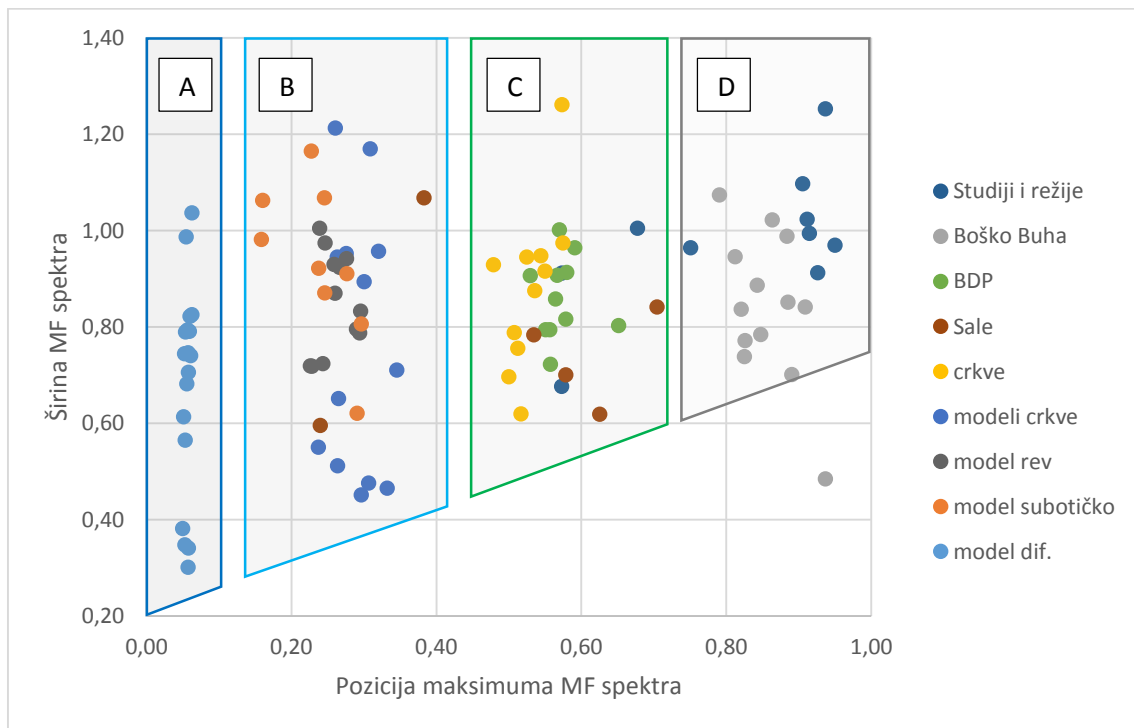
Izgled multifraktalnih spektara dobijenih za ova četiri impulsna odziva prikazan je na slici 6.32. Akustičke intervencije u sali Mariborske opere posmatrano kroz oblik MF spektra dovele su do toga da je spektar impulsnog odziva nakon rekonstrukcije pomeren u desno (povećana vrednost  $h_q_0$ ) i poboljšana je njegova simetričnost tako da on odgovara što pravilnijoj paraboli. Ove promene u multifraktalnom spektru ukazuju da je signal impulsnog odziva postao ravnomerniji i da je smanjena korelacija između direktnog zvuka i sukcesivnih refleksija (što se vidi kroz pomeranje spektra u desno). Poređenje pozicija maksimuma spektra za druge dve sale (Ljubljanska opera i *Musicverein*) pokazuje da je on sada bliži vrednostima izračunatim za ove dve sale koje se mogu uzeti kao referentne, posebno sala *Musicverein* zbog njene odlično ocenjene akustike. Intervencije koje su dovele do poboljšanja simetričnosti multifraktalnog spektra idu u prilog činjenici da je s jedne strane povećano bogatstvo različitih struktura u impulsnom odziva što je posledica većeg broja refleksija različitih karakteristika, a s druge strane su one dosta uniformnije u rasporedu, intenzitetu obliku i strukturi. Tumačenje MF spektra sale *Musicverein*, kao referentnog primera sale koja ima poželjne akustičke osobine govori nam da imperativ nije da spektar bude simetričan jer to on svakako nije. Pozicija maksimuma MF spektra u kombinaciji sa širinom spektra i njegovom simetričnošću nameće se kao kriterijum na osnovu koga bi mogla da se uspostavi veza između subjektivnog doživljaja zvuka (akustičkih karakteristika prostorije) oličenog u teksturi impulsnog odziva i multifraktalnog spektra.



Slika 6.32. Izgled MF spektra izračunatih MFDFA metodom za ispitivane impulsne odzive

## 6.6 Klasifikacija prostorija prema parametrima MF spektra

Budući da širina i oblik MF spektra mogu da klasifikuju širok opseg različitih vremenskih serija (signala) čije strukture imaju osobinu invarijantne skale, potrebno je analizirati u kojoj meri je moguće klasifikovati prostorije na osnovu tri posmatrana parametra (simetričnosti, širine i pozicije maksimuma MF spektra). Zaključak koji proističe iz rezultata eksperimenata opisanih u prethodnim poglavljima je da pozicija maksimuma MF spektra, zahvaljujući svojoj stabilnosti, predstavlja parametar koji može da pomogne u klasifikaciji prostorija. U nastavku će biti provereno u kojoj meri kombinacije parametara MF spektra ukazuju na neke osobine zajedničke za određene tipove prostorija. Zavisnost širine MF spektra u odnosu na poziciju maksimuma MF spektra za impulsne odzive koji su korišćeni u istraživanju prikazana je na slici 6.33. Rezultati pokazuju da se određeni tipovi prostorija mogu klasifikovati na osnovu vrednosti ovog parametra. Predlog jednog mogućeg načina za podelu snimljenih impulsnih odziva prema izračunatim parametrima spektra prikazan je na slici. Impulsni odzivi su grupisani na osnovu vrednosti parametra  $hq_0$ , tako što je prostor u kome su se kretale vrednosti dobijenih rezultata podeljen na 4 oblasti.



**Slika 6.33.** Poređenje impulsnih odziva snimljenih u različitim prostorijama posmatrano u odnosu na širinu MF spektra i poziciju maksimuma MF spektra

Letimičan pogled na predloženu podelu među impulsnim odzivima navodi na zaključak da makro geometrija prostorije umnogome određuje stepen difuznosti koji se može postići u nekom prostoru. Konstantnost pozicije maksimuma MF spektra za određene kategorije prostorija pokazuje da makro geometrije karakteristike određuju okvir u kome možemo očekivati varijacije u karakteristikama impulsnog odziva zavisno od promena na mikro geometrijskom planu.

U prve dve oblasti posmatrano s leve strane slike 6.33 (označene sa A i B) nalaze se impulsni odzivi snimljeni u modelima prostorija (u fizičkim modelima i računarski simuliranim prostorijama). Vrednost parametra  $hq_0$  za sve impulsne odzive snimljene u modelima prostorija je manja od 0,4.

Model prostorije koji je zavredio najviše prostora u ovom istraživanju, model difuzne prostorije, izdvojen je u posebnu oblast A, kako bi bila istaknuta specifičnost ovog okruženja kreiranog za potrebe eksperimenta. Model difuzne prostorije karakterišu vrlo male vrednosti parametra  $hq_0$  koje su skoro konstantne za sve ispitivane konfiguracije i veliki raspon vrednosti širine MF spektra. Iako je ovakvo okruženje stvorilo dobre kontrolisane uslove za eksperimentalnu potvrdu pretpostavki o vezi između difuznosti površina i širine MF spektre, mera u kojoj ono modeluje fenomene koji nastaju u zvučnom polju u realnim prostorijama ostaje pod znakom pitanja. Male vrednosti parametra  $hq_0$  (ne samo u slučaju modela difuzne prostorije već i za sve modele prostorija) govore da je signal u osnovi pravilniji (korelisaniji). Ova činjenica se može tumačiti kao potvrda ograničenja koje modeli prostorija imaju u simuliranju realnih prostorija, a to je da oni samo do izvesne mere mogu da modeluju kompleksne procese koji utiču na formiranje zvučnog polja u prostoriji. Ovo nije slučaj samo sa fizičkim modelima već i softverski simuliranim impulsnim odzivima koji su takođe svrstani u oblast B. Nezavisno od oblika prostora koji su u ovoj kategoriji bili veoma raznoliki (od neproporcionalnih paralelopipednih i izlomljenih oblika do modela realnih koncertnih sala i crkvenih prostora) MF analiza prepoznaje jedan zajednički nedostatak svih softverski simuliranih odziva. Softverska predikcija odziva, iako omogućava u izvesnom smislu simulaciju procesa na reljefnim površinama preko koeficijenta difuznosti površina, ne uključuje ostale fenomene koje prate talasnu prirodu



zvuka, a to su pre svega difrakcione pojave. Odsustvo finih promena u odzivu koje bi nastale kao posledica difrakcionih pojava prepoznaju se u predloženoj analizi, odsustvom promena na nekoj od skala poređenja.

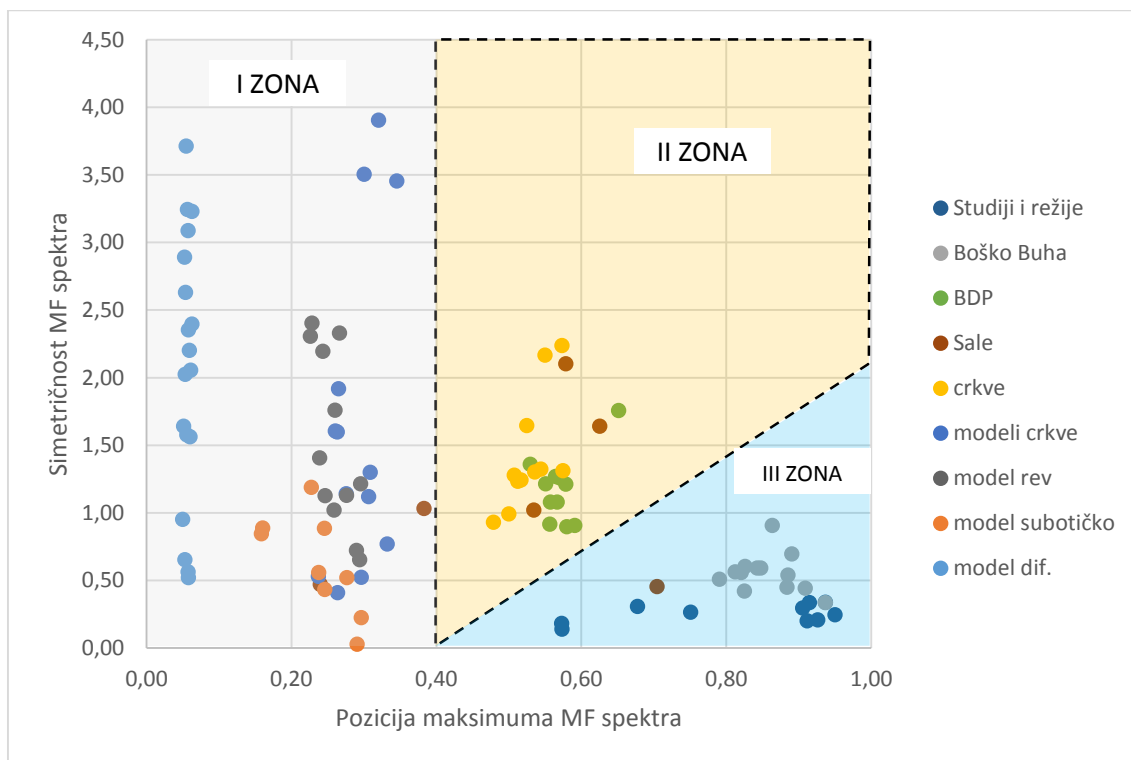
U oblasti C smešteni su impulsni odzivi za koje je vrednost parametra  $hq_0$  između 0,4 i 0,7. To su impulsni odzivi snimljeni u crkvama, sali BDP, koncertnim i operskim salama. U oblasti D nalaze impulsni odzivi snimljeni u studijima, režijama i pozorištu Boško Buha, za koje je vrednost parametra  $hq_0$  veća od 0,7. Ovakvi rezultati i klasifikacija prostorija potvrđuju razlike koje u akustičkom smislu postoje između njih. Razlika između oblasti koje odgovaraju modelima prostorija (A i B) i realnim prostorijama (C i D) osim u poziciji maksimuma MF spektra postoji i u opsegu vrednosti koji se javljaju za širinu MF spektra. Primetno je da je kod realnih prostorija ovaj opseg vrednosti manji ali da su širine spektra veće (gotovo uvek veće od 0,6), ovo je posledica veće kompleksnosti zvučnog polja u realnim prostorijama koja se manifestuju u raznovrsnim skalirajućim strukturama u impulsnom odzivu i samim tim širem MF spektru.

Na slici 6.34 prikazana je zavisnost simetričnosti MF spektra u odnosu na poziciju maksimuma MF spektra. Ovako predstavljeni rezultati multifraktalne analize impulsnih odziva, takođe pružaju mogućnost za klasifikaciju prostorija. Iako su rezultati ovakvog predloga klasifikacije istovetni rezultatima sa prethodne slike, granice u ovom slučaju preciznije razdvajaju impulsne odziva pa ovako definisane zone pružaju mogućnost za definisanje poželjnih karakteristika prostorije u multifraktalnom smislu.

Izdvojene karakteristike MF spektra mogu da se iskoriste za merenje kompleksnosti signala: tako signal sa većom vrednošću  $hq_0$ , širokim opsegom fraktalnih eksponenata (širokim MF spektrom) i sa desno zakrivljenim spektrom (simetričnost veća od 1), može se smatrati kompleksnijim od onog sa suprotnim karakteristikama. Ova kompleksnost znači bogatstvo u strukturi signala koje se sa akustičkog stanovišta može oceniti kao veoma povoljno i poželjno svojstvo prostorije.

Prostor koji zauzimaju rezultati na slici 6.34 podeljen je na tri zone. U prvoj zoni koju karakterišu male vrednosti parametra  $hq_0$  i širok raspon vrednosti za simetričnost spektra nalaze se impulsni odzivi iz modela prostorija. U drugoj zoni nalaze se impulsni odzivi izmereni u realnim prostorijama: crkvama, pozorišnim i koncertnim salama.

Analiza MF parametara pokazala je da svi ovi prostori imaju neka zajednička svojstva koja ih svrstavaju u vrlo jasno kategoriju. Crkveni prostori zbog specifične razuđene geometrije imaju preduslove da se u njima formira difuzno zvučno polje. U ovoj kategoriji našle su se i operne sale, kao i jedna akustički dobra pozorišna sala.



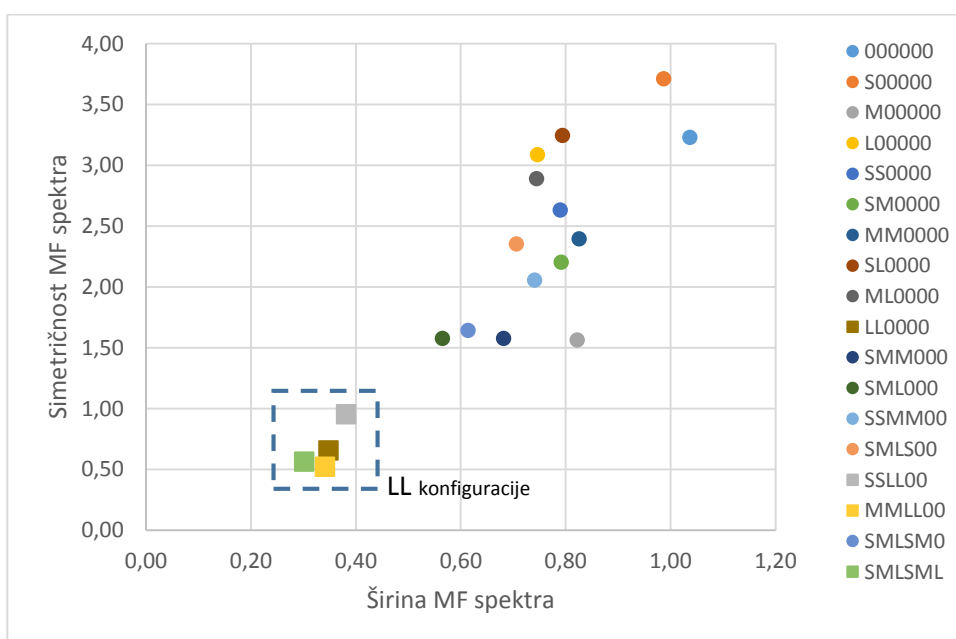
**Slika 6.34.** Poređenje impulsnih odziva snimljenih u različitim prostorijama posmatrano u odnosu na simetričnost MF spektra i poziciju maksimuma MF spektra

U trećoj zoni, slično oblasti D sa slike 6.33, našli su se studijski prostori i sala pozorišta Boško Buha. Studijske prostore, zbog specifičnih akustičkih zahteva, karakterišu visoke vrednosti pozicije maksimuma MF spektra, ali sa druge strane male vrednosti parametra koji meri simetričnost MF spektra. Ovo ukazuje da je i u slučaju vrlo svedenog impulsnog odziva moguće govoriti o vremenskoj uniformnosti raspodele energije na različiti skalama uvećanja koju karakterišu visoke vrednosti parametra  $hq_0$  ali i o odsustvu pojedinih komponenti u impulsnom odzivu kao posledica „snažne“ akustičke obrade ovih prostora a koje kvantifikuje niska simetričnost MF spektra.

Sala pozorišta Boško Buha izdvojila se iz korpusa realnih sala zbog svojih poznatih akustičkih defekata. Ova sala ima uočljiv flater eho. Specifičan nepovoljan geometrijski oblik bočnih zidova čini da se energija po prostoru kreće neuniformno duž vremenske ose što je učinio da se ova sala iako po svojim akustičkim karakteristikama pripada trećoj

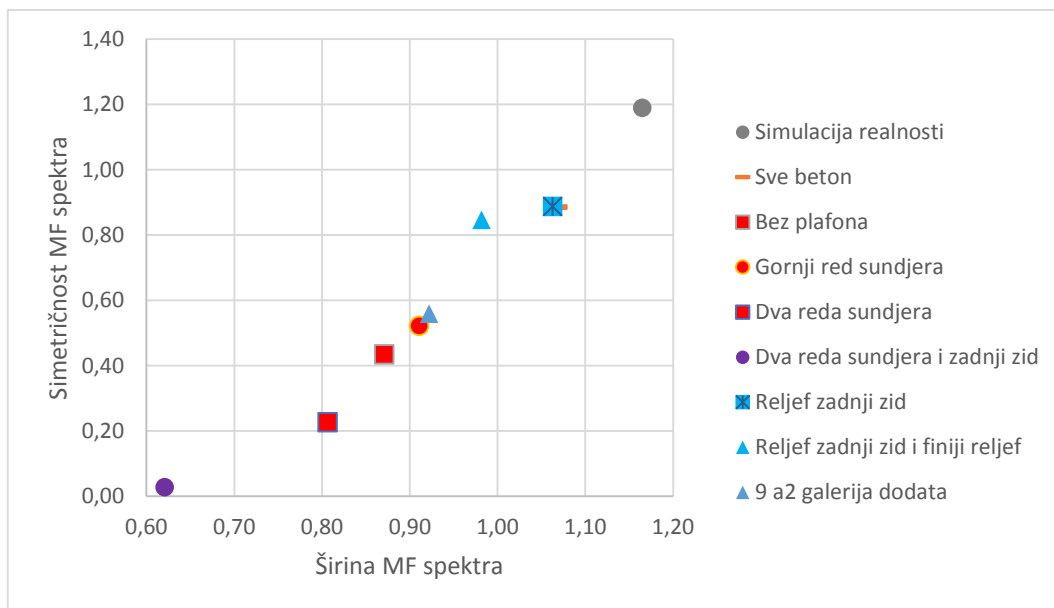
grupi iz nje izdvoji ukazujući na određeni defekt. Ovo govori u prilog pretpostavci da se za pozorišne i koncertne sale poželjna akustička svojstva, posmatrano sa multifraktalnog stanovišta, nalaze u drugoj zoni sa slike 6.34.

Na slikama 6.35 i 6.36 prikazane su karakteristike impulsnih odziva izmerenih u fizičkim modelima difuzne prostorije i Subotičkog pozorišta posmatrano u odnosu na simetričnost i širinu MF spektra. Ova dva fizička prostora karakterišu veoma stabilne male vrednosti pozicije maksimuma MF spektra (slika 6.33). U oba slučaja postoji jasna korelisanost posmatranih parametara MF spektra posmatrano u odnosu na količinu i načina apliciranja difuznih i apsorpcionih elemenata.



**Slika 6.35.** Simetričnost i širina MF spektra za impulse odzive izmerene u modelu difuzne prostorije

U slučaju fizičkog modela difuzne prostorije globalna difuznost koja je određena manjim vrednostima širine MF spektra i njegovom simetričnošću nije direktno korelisana sa SDI parametrom. Difuzni elementi koji su aplicirani sukcesivno na pojedinim stranicama ovog paralelopipednog modela imaju istu frekvencijsku zavisnost koeficijenta difuznosti koja nije jednaka na svim frekvencijama. Velika difuznost na višim frekvencijama nije dovoljan uslov da se uspostavi globalna difuznost. Otuda globalna difuznost nije direktno korelisana sa ukupnom površinom pokrivenom ovakvim difuznim elementima već se bolja difuznost postiže u slučajevima kada su difuzni elementi aplicirani samo na najvećim površinama.



**Slika 6.36.** Simetričnost i širina MF spektra za impulsne odzive izmerene u modelu subotičkog pozorišta

Konfiguracije sa neuniformnom raspodelom difuznih elemenata narušavaju ukupnu simetriju i uniformnost u prostoru koja doprinosi globalnoj difuznosti. Da bi se postigla veća difuznost, unutar limita koji su određeni samom makrogeometrijom prostora potrebno je da se na svim skalama, odnosno u svim frekvencijskim opsezima ostvari izvesna razućenost prostora. Obzirom da MF analiza u svojoj suštini analizira samosličnost na različitim skalama uvećanja, prikazani rezultati pokazuju da je MF analiza pogodna za analizu globalno ostvarene difuznosti.

## 7. Zaključak

Ostvarivanje poželjnog akustičkog kvaliteta prostorije blisko je povezano sa vremenskim oblikom impulsnog odziva. Fina vremenska i prostorna raspodela refleksija, oličena u teksturi impulsnog odziva svakako je neophodan uslov da bi prostorija imala odgovarajuća akustička svojstva. U teoriji akustike prostorija definisan je značajan broj parametara kojima se sa različitih aspekata opisuje impulsni odziv prostorije. Svi su oni načelno zasnovani na izračunavanju raspodele energije odziva u okviru njegovog trajanja i praćenju njene promene u vremenu. Međutim, postoji potreba za unapređenjem metoda analize impulsnog odziva, pre svega zbog toga što još uvek postoje informacije koje se mogu prepoznati posmatranjem zapisa talasnog oblika impulsnog odziva, a koje nemaju svoje numeričke indikatore. Tekstura je sa subjektivnog aspekta slušaoca u prostoriji veoma važna osobina impulsnog odziva, koja se opisuje samo subjektivnom ocenom na osnovu posmatranja talasnog oblika impulsnog odziva. Cilj istraživanja predstavljenih u ovoj tezi bila je primena elemenata iz multifraktalne teorije u analizi impulsnog odziva, u prvom redu multifraktalnog spektra i raspodele Holderovog eksponenta za unapređenja pojedinih mera kojima se kvantifikuje akustički odziv prostorije, a time i njen akustički kvalitet.

Akustički kvalitet, odnosno akustičke karakteristike prostorija definišu se zavisno od namene prostora. Razlike u akustičkim karakteristikama prostorija variraju u velikom rasponu vrednosti svih objektivnih parametara impulsnog odziva. Međutim, unutar svake kategorije željenih karakteristika možemo govoriti o stepenu ostvarene difuznosti, koja bi se drugačije mogla definisati kao ostvarena uniformnost u kretanju zvučne energije na svim skalama i/ili dimenzijama. Jedan od ciljeva analize impulsnih odziva pomoću multifraktalne teorije je i da opiše dešavanja u zvučnom polju koja ne moraju da se vide kroz različite energetske pokazatelje balansa u određenim delovima odziva.

Analiza impulsnog odziva sa multifraktalnog stanovišta pruža novi opšti pogled na impulsni odziv prostorije zasnovan na fraktalnoj teoriji. Posmatranje impulsnog odziva kao signala u čijoj osnovi leži proces „beskonačnog“ kopiranja direktne

komponente zvuka daje osnovu za tumačenje impulsnog odziva kao skupa samosličnih struktura nastalih refleksijom od zidova prostorije, a koje se mogu analizirati sa lokalnog i globalnog stanovišta. Analiza sa lokalnog stanovišta pomoću multifraktala usmerena je na segmentaciju određenih karakterističnih tačaka skrivenih u impulsnom odzivu, pre svega kroz detekciju refleksija i to onih koje unose koloraciju pri slušanju.

Primena multifraktala za detekciju ranih refleksija pokazuje da predložena metoda ne razmatra samo intenzitet ranih refleksija već i njihovu sličnost, što predstavlja kvalitativnu prednost u odnosu na do sada predložene metode koji su refleksije posmatrali uglavnom sa energetskog stanovišta. Algoritam zasnovan na izdvajanju određenog opsega Holderovih eksponenata detektuje strukture u impulsnom odzivu koje spajaju iste ili slične karakteristike. Detektovane refleksije u ovom kontekstu predstavljaju tačke singulariteta u kojima se regularnost menja na sličan način a koji je kvantifikovan vrednostima Holderovog eksponenta koje pripadaju zadatom opsegu. Ove refleksije definišu teksturu impulsnog odziva na drugačiji način, ne samo kroz intenzitet i korelisanost sa direktnim zvukom, već kroz pripadnost strukturama koje su prisutne na različitim skalama uvećanja.

Praktična upotrebljivost metoda za detekciju refleksija pomoću multifraktala demonstrirana je kroz detekciju određenog broja refleksija koje odgovaraju onima koje se mogu identifikovati vizuelnim putem. Nepoznavanje tačnog položaja svih refleksija odgovornih za konkretna akustička svojstva prostorije otežava davanje ocene o kvalitetu predloženog metoda. Stoga je, kao sastavni deo ovog istraživanja, za potrebe procene uspešnosti detekcije refleksija razvijen metod za proveru zasnovan na umetanju kontrolne refleksije i predloženi su odgovarajući parametri za ocenu uspešnosti.

Sličnost detektovanih refleksija u meri koja bi mogla da ukaže na njihovu koherentnost pokazana je kroz detekciju kontrolnih refleksija koje su ubacivane u impulsnog odziv. Rezultati dobijeni na ovaj način pokazuju prednosti i mane ovakvog postupka. Nedostaci se u prvom redu ogledaju u tome da detekcija koherentnih refleksija zavisi od ishoda mešanja sa signalom „podloge“ prilikom umetanja u impulsnog odziv. Prednost je što je ovaj metod u stanju da izmeri granice (pragove) detekcije. Mereno kroz srednju vrednost dobijenih rezultata granice detekcije kontrolne refleksije

kreću se i do 15 dB u odnosu na direktni zvuk.

Uključivanje pragova percepcije refleksija u postupak izdvajanje Holderovih eksponenata poboljšava selektivnost predloženog algoritma smanjujući pogrešnu detekciju i naglašavajući pojedine refleksije. Jednostavni kriterijum za detekciju refleksija koji je podrazumevao samo prosto izdvajanje najvećih vrednosti Holderovog eksponenta unapređen je tako što su prilikom selekcije refleksija u obzir uzeti dodatni faktori, kao što su relativan položaj refleksija u odnosu na druge/susedne refleksije, maskiranje i njihov uticaj na subjektivni doživljaj zvuka u prostoriji. Nakon ovakvih korekcija predloženi metodi detektuju većinu traženih refleksija u impulsnom odzivu. Pretpostavka da koherentne rane refleksije povezuje zajednički parametar (određeni opseg vrednosti Holderovog eksponenta) iako opravdana ima svoja ograničenja koja utiču na detekciju refleksija.

Analiza impulsnog odziva sa globalnog stanovišta pomoću multifraktala poslužila je za karakterizaciju globalnih karakteristika impulsnog odziva. Ovo se u prvom redu odnosi na utvrđivanje stepena postignute difuznosti zvučnog polja u prostoriji, a zatim i za kvantitativno i kvalitativno opisivanje teksture impulsnog odziva. Kvantifikovanje ovih karakteristika izvršeno je analizom parametara multifraktalnog spektra za impulsne odzive iz odgovarajuće baze formirane za potrebe ovog istraživanja.

Dobijeni rezultati pokazali su da se kao relevantni parametri multifraktalnog spektra za analizu globalnih karakteristika impulsnog odziva nameću: širina spektra ( $\Delta h_q$ ), pozicija maksimuma spektra ( $h_{q_0}$ ) i simetričnost dobijenog spektra. Dužina impulsnog odziva na kojoj se računa multifraktalni spektar ima uticaja na izračunate vrednosti njegovih parametara. Poštujući stav da je dobra tekstura definisana rasporedom refleksija u prvih 200 ms impulsnog odziva, izračunavanje multifraktalnog spektra ograničeno je na ovu dužinu.

Eksperimentalni rezultati dobijeni u fizičkom modelom difuzne prostorije potvrđuju vezu između širine multifraktalnog spektra i ostvarenog stepena difuznosti zvučnog polja u prostoriji. Iz ostvarenih rezultata proizilazi da je MF analiza pogodna za analizu globalno ostvarene difuznosti. Konkretni rezultati pokazuju da se s povećanjem difuznosti zvučnog polja širina multifraktalnog spektra smanjuje. Naravno, obrnuto ne

mora da važi, odnosno da ako je MF spektar uzak odatle proističe da je reč o difuznom zvučnom polju u prostoriji. Rezultati dobijeni u modelu difuzne prostorije pokazuju da globalna difuznost nije korelisana sa ukupnom površinom pokrivenom difuzorima i da velika difuznost na višim frekvencijama nije dovoljan uslov da se uspostavi globalna difuznost.

Eksperimentalni rezultati ostvareni u fizičkom modelom reverberacione komore pokazuju da vrednost parametra  $h_{q_0}$  (pozicija maksimuma MF spektra) raste sa dodavanjem apsorbera u prostoriju, tj. da se spektar pomera u desno, što ukazuje na smanjenje korelacije u signalu. Takođe, dolazi i do smanjenja širine multifraktalnog spektra sa povećanjem apsorpcije. Uticaj pozicije prijemnika u prostoriji vidljiv je u dobijenim parametrima multifraktalnog spektra, a kao posledica lokalizacije zvučnog polja u prostoriji koje se demonstrira vremenskim rasporedom refleksija.

Eksperimenti u fizičkom modelu subotičkog pozorišta pokazuju da tumačenje MF spektra nije jednostavno i jednoznačno kada se u prostoriji istovremeno menja apsorpcija i difuzija. Samo posmatranje karakterističnih parametara MF spektra tada nije dovoljno da da ocenu o akustičkim karakteristikama prostorije, već je neophodno i posmatranje celokupnih spektara.

Rezultati ostvareni sa impulsnim odzivima generisanim u računarski simuliranim prostorijama pokazuju kako geometrijske karakteristike prostorije i akustičke karakteristike njenih zidova utiču na oblik MF spektara. Dobijeni rezultati pokazuju da za pojedine konfiguracije promena geometrijskih karakteristika ima isti efekat kao promena sketering koeficijenta zidova prostorije i potvrđuju uticaj geometrije prostorije na strukturu impulsnog odziva. Rezultati, takođe, pokazuju uticaj geometrije graničnih površina i odnosa njihovih dimenzija na izgled MF spektra. MF analiza prepoznaje i nedostatke softverski simuliranih odziva koji su posledica odsustva difrakcionih pojava u softverskim modelima, a što za posledicu ima odsustvo finih promena u odzivu. MF analiza impulsnih odziva dobijenih softverskom simulacijom može onda da posluži i za ocenu kvaliteta samih procedura za softversku simulaciju.

Izračunavanje multifraktalnog spektra za impulsne odzive snimljene u realnim prostorijama pokazalo je kako se različite širine MF spektra dobijene za impulsne odzive



snimljene na različitim pozicijama u okviru iste prostorije mogu koristiti kao pokazatelj neuniformnosti zvučnog polja u prostoriji i detekciju određenih nepoželjnih efekta. Oblik i karakteristike spektra ukazuju na jasne razlike između prostorija (sala) sa različitim akustičkim karakteristikama. Multifraktalni spektri slični su po obliku za prostorije sličnih karakteristika, pa izdvojeni parametri MF spektra mogu da se koriste za klasifikaciju i poređenje teksture impulsnih odziva, odnosno prostorija.

Relativno stabilne vrednosti parametra  $hq_0$  u okviru prostorija sa istom makro geometrijom daju osnove za klasifikaciju prostorija. Dok pozicija maksimuma MF spektra zavisi od makro geometrije prostorije, varijacije u karakteristikama impulsnog odziva zavisno od promena na mikro geometrijskom planu izražene su u vrednostima širine i simetričnosti MF spektra. U radu je predložena podela prostorija na određene grupe prema vrednostima kombinacija parametara MF spektra. Bogatstvo u strukturi signala koje se sa akustičkog stanovišta može oceniti kao dobra tekstura, sa multifraktalnom stanovišta se vrednuje simetričnošću koja je bliska ili veća od 1, širinom MF spektra većom od 0,6 i pozicijom maksimuma spektra koja je u zavisnosti od tipa prostorije veća od 0,4 ili 0,7.

Prikazani rezultati osim novog pogleda na impulsni odziv prostorija pružaju mogućnost za kvantifikovanje stepena ostvarene difuznosti zvučnog polja, poređenje teksture impulsnog odziva i klasifikaciju prostorija. Ovi parametri mogu se koristiti kao dodatni alat u akustičkom dizajnu prostorije za ocenu njenih karakteristika, odnosno za objektivno i subjektivno vrednovanje akustičkog kvaliteta prostorija.

Ovim istraživanjem otvorene su mnoge teme. Predložena analiza pokazala je da je osetljiva na veoma važan element odziva a to je ostvarena difuznost u polju, ili uniformnost kretanja energije na svim frekvencijama. Analiza pomoću multifraktala je otvorila jedan sasvim drugačiji pogled u posmatranje impulsnog odziva i ocenu teksture koja se može definisati kao stepen uniformnost strukture impulsnog odziva na različitim skalama uvećanja. Ostaje puno prostora da se na fizičkim modelima ispita mogućnost ostvarivanja drugačijih tekstura primenom difuznih elemenata sa različitom vrednošću dimenzija i difuznosti, kao i da se bolje kvantifikuju granične vrednosti za predložene parametre.

## Literatura

- [1] M. Mijić, Uvod u akustiku, Elektroakustika.
- [2] Blauert, J., *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*, MIT Press, 1997.
- [3] F. Alton Everest, Ken C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics*, 5th edition, McGraw Hill Professional, 2009
- [4] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Spon Press, London, 5th edition, 2009.
- [5] Thomas Rossing, *Springer Handbook of Acoustics*, Springer, 2007 edition
- [6] M.F.E. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, Taylor & Francis, 1993
- [7] Meyer, E. and G.R. Schodder, "On the Influence of Reflected Sounds on Directional Localization and Loudness of Speech," *Nachr. Akad. Wiss., Göttingen, Math., Phys., Klasse Ila*, 6, pp. 31–42, 1952.
- [8] Lochner, J.P.A. and J.F. Burger, "The Subjective Masking of Short Time Delayed Echoes by Their Primary Sounds and Their Contribution to the Intelligibility of Speech," *Acta Acustica united with Acustica*, Volume 8, Number 1, 1958, pp. 1-10(10).
- [9] Moore, B.C.J. and B. Glasberg, "Suggested Formulae for Calculating Auditory-Filter Bandwidths," *J. Acoust. Soc. Am.* 74: pp. 750–753, 1983.
- [10] Sean E. Olive and Floyd E. Toole, "The Detection of Reflections in Typical Rooms", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol.37, No.7/8, July/Aug 1989.
- [11] John Usher, "An improved method to determine the onset timings of reflections in an acoustic impulse response", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 127, April 2010.
- [12] Takayuki Hidaka, „On the Objective Parameter of Texture“, *Proc. of Forum Acusticum & Internoise Sevilla 2002*.
- [13] M. Kuster, "Reliability of estimating the room volume from a single room impulse response", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 124, no. 2, pp. 982–993, 2008.
- [14] A.M. Noxon, "Correlation detection of early reflections", *Proc. Of AES 11th International Conference: Test & Measurement*, Acoustic Sciences Corporation, Eugene, Oregon, 1992. Paper Number: 11-037.
- [15] G. Defrance, L. Daudet, J.-D. Polack, "Detecting arrivals within room impulse responses using matching pursuit", *Proceedings of the 11th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-08)*, Espoo, Finland, September 2008, pp. 297–300.
- [16] Ian J. Kelly, Francis M. Boland, "Detecting arrivals in room impulse responses with dynamic time warping", *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing (TASLP)*, Vol. 22 Issue 7, pp: 1139-1147, July 2014.
- [17] P. Guillemain, R. Kronland-Martinet, "Characterization of acoustic signals through continuous linear time-frequency representations," *Proceedings of the IEEE*, vol. 84, no. 4, pp. 561–585, 1996.
- [18] S. J. Loutridis, "Decomposition of impulse responses using complex wavelets," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 53, no. 9, pp. 796–811, 2005.
- [19] M. Schönle, N. Fliege, and U. Zölzer, "Parametric approximation of room impulse responses based on wavelet decomposition," in *Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, New Paltz, NY, USA, October 1993, pp. 68–71.
- [20] S. Vesa, T. Lokki, "Detection of room reflections from a binaural room impulse response", *Proc. of the 9th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-06)*, Montreal, Canada, September 18-20, 2006.
- [21] S. Vesa, T. Lokki, "Segmentation and analysis of early reflections from a binaural room impulse responses", Technical Report TKK-ME-R-1, TKK Reports in Media Technology, Helsinki University of Technology

- [22] U. Potratz, I. Bork, T.Görne, "Designing early reflection patterns suitable for audio recordings by means of acoustic modeling", Audio Engineering Society, 118th Convention, Barcelona, Spain, 2005 May 28–31
- [23] S.Tervo, T. Korhonen, T.Lokki, "Estimation of reflections from impulse responses", *Journal of Building Acoustics*, vol. 18, no. 1, pp. 159-174, 2011.
- [24] Sakari Tervo, Jukka Pätynen, Tapio Lokki, Acoustic Reflection Localization from Room Impulse Responses, *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 98 418 – 440, (2012)
- [25] M. R. Schroeder, "Statistical parameters of the frequency response curves of large rooms," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 35, pp. 299–305 (1987).
- [26] R. Stewart, M.Sandler, „Statistical measures of early reflections of room impulse responses“, Proc. of the 10th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-07), Bordeaux, France, September 10-15, 2007.
- [27] Barry Blesser, "An interdisciplinary synthesis of reverberation viewpoints," *JAES*, vol. 49, no. 10, pp. 867–903, October 2001.
- [28] D. Havelock, S. Kuwano, M. Vorlander, *Handbook of signal processing in acoustics*. New York, Springer Science + Business Media, 2008.
- [29] R. Lacatis, A. Gimenez, A. Barba Sevillano, S. Cerda, J. Romero, and R. Cibrian, „Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 123(5):3198-3204, 2008.
- [30] M. Skålevik, "Concert Hall Parameters - a status report", BNAM 2012, Odense, Denmark 2012
- [31] ISO 3382, Acoustics – Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters (ISO, Geneva 1997)
- [32] J.S. Bradley, G.A. Soloudre, "The influence of late arriving energy on spatial impression", *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 97(4), pp. 2263–2271, (1995).
- [33] L. L. Beranek, *Acoustics*, New York, 1986
- [34] Šumarac-Pavlović D., Petrović M., „Influence of diffusivity in room on its acoustic response“, *Telfor Journal*, Vol. 2, No. 2, 92-97, (2010)
- [35] M. Mijić, Statistički model zvučnog polja u prostorijama, Elektroakustika.
- [36] L. L. Beranek, *Music, acoustics and architecture*, Wiley, 1962
- [37] M. Schroeder and K. Kuttruff, "Frequency correlation functions of frequency responses in rooms," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 34, pp. 1819–1824, 1962
- [38] T. J. Schultz, "Diffusion in Reverberation Rooms", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 16, 17-28, (1971)
- [39] R. Bolt and R. Roop, "Frequency response fluctuations in rooms," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 22, pp. 280–289, (1950).
- [40] K. Randal and F. Ward, "Diffusion of sound in small rooms," *Proc. IEEE 107B*, Vol. 107B, p. 439-450, (1960).
- [41] E. Meyer and R. Thiele, "Raumakustische untersuchungen in zahlreichen konzertsälen und rundfunkstudios unter anwendung neuerer messverfahren," *Acustica* 6, 425-444, (1956).
- [42] R. Cook, R. Waterhouse, R. Berent, and M. Thompson, "Measurement of correlation coefficients in reverberant sound fields," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 27, pp. 1072–1077, (1955).
- [43] C. G. Balachandran, "Random sound field in reverberation chambers," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 31, pp. 1319–1321, 1959.
- [44] P. Damaske, Y. Ando, "Interaural crosscorrelation for multichannel loudspeaker reproduction", *Acustica* 27, 232–238, (1972).
- [45] Hidaka, T., Beranek, L. L. and Okano, T., "Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low- and high-frequency sound level as measures of acoustical quality in concert halls," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 98, 988-1007, (1995).
- [46] J. D. Polack, "Playing billiards in the concert hall: The mathematical foundations of geometrical room acoustics", *Applied Acoustics*, Vol. 38, pp.235-244, 1993.

- [47] G. Defrance, J.-D. Polack, "Measuring the mixing time in auditoria", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 123, 3499, (2008).
- [48] G. Defrance, J.-D. Polack, "Estimating the mixing time of concert halls using the extensible Fourier transform," *Applied Acoustics* 71, 777–792 (2010).
- [49] Prislán R., Brunskog J., Jacobsen F., Jeong CH., "An objective measure for the sensitivity of room impulse response and its link to a diffuse sound field", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 136(4), pp. 1654-65, 2014.
- [50] M. R. Schroeder and K. H. Kuttruff, „On Frequency Response Curves in Rooms. Comparison of Experimental, Theoretical, and Monte Carlo Results for the Average Frequency Spacing between Maxima“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 34, 76–80, 1962.
- [51] C.-H. Jeong, F. Jacobsen, and J. Brunskog, "Thresholds for the slope ratio in determining transition time and quantifying diffuser performance in situ," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 132, pp. 1427–1435, (2012).
- [52] B.-I. Dalenbäck, M. Kleiner, and P. Svensson, "A macroscopic view of diffuse reflection," *J. Audio Eng. Soc.*, 42, 793–807 (1994).
- [53] C. Haan and F. R. Fricke, "An evaluation of the importance of surface diffusivity in concert halls," *Applied Acoustics* 51, 53–69, 1997.
- [54] S. J. Loutridis, "Quantifying sound-field diffuseness in small rooms using multifractals", *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 125(3), pp. 1498-505, 2009.
- [55] L.L. Beranek, *Concert and Opera Hall: How they sound*, Acoust. Soc. Amer., New York, 1996.
- [56] Takayuki Hidaka, „On the Objective Parameter of Texture“, *Proc. of Forum Acusticum & Internoise Sevilla 2002*.
- [57] Takayuki Hidaka and L. L. Beranek, "Objective and subjective evaluation of twenty-three opera halls in Europe, Japan and Americas", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.107 (1), pp. 368 – 383, January 2000.
- [58] L.L. Beranek, "Subjective Rank-Ordering and Acoustical Measurement for Fifty-Eight Concert Halls", *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 89 (3), pp. 494-508, (2003).
- [59] Okano T., Beranek L.L., Hidaka T., "Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.104, no. 1, pp. 255-265, July 1998.
- [60] Marshall, A. H. "A note on the importance of room cross-section in concert halls," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 5, Issue 1, pp. 100-112, 1967.
- [61] Schubert, V. P. "Die Wahrnehmbarkeit von Rückwürfen bei Musik," *Z. Hochfrequenztechn. u. Electroakust.*, 78, 230-245, (1969).
- [62] Milorad P. Paskaš, Ana M. Gavrovska, Miomir M. Mijić, and Branimir D. Reljin, "Qualitative Analysis of Texture of Room Impulse Response using Fractal Dimension", *In Proc. TELFOR 2010*, pp. 594-597, Beograd, Nov. 23-25, 2010.
- [63] Mandelbrot, Benoit B., *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Co., 1982.
- [64] <https://en.wikipedia.org/wiki/Fractal>
- [65] Mandelbrot, Benoit B., "How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension", *Science*, New series, Vol. 156: 636-638, 1967.
- [66] Mandelbrot B , „Les objets fractals: forme, hasard et dimension“, Flammarion, Paris, 1975.
- [67] Irini S. RELJIN, Branimir D. RELJIN, „Fractal geometry and multifractals in analyzing and processing medical data and images“, *Archive of Oncology*, Vol. 10(4):283-93, 2002.
- [68] Kenneth Falconer, *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*, 1990
- [69] Kenneth Falconer, *FRACTALS: A Very Short Introduction*, 2013
- [70] H.Peitgen, H.Jurgens, P.Andrews, *Chaos and Fractals*, Springer, 1992
- [71] Lopes, R., Betrouni, N., „Fractal and multifractal analysis: a review“, *Medical Image Analysis*, Vol. 13:634–649, 2009

- [72] Jan W. Kantelhardt, Stephan A. Zschiegner, Eva Koscielny-Bunde, Armin Bunde, Shlomo Havlin, and H. Eugene Stanley, „Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Nonstationary Time Series“, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 316(1), pp. 87-114, 2002.
- [73] Branimir Reljin, Irini Reljin, „Fraktalna i multifraktalna analiza signala“, TELFOR 2001
- [74] C. Evertsz, B. Mandelbrot: “Multifractal Measures”, Appendix B in H. Peitgen, H. Jurgens, P. Andrews, *Chaos and Fractals*, Springer, 1992
- [75] Renyi, A., „On a new axiomatic theory of probability“, *Acta Mathematica Hungarica*, Vol. 6(3–4), pp. 285–335. 1955.
- [76] Chhabra, A., Jensen, R., „Direct determination of the  $f(\alpha)$  singularity spectrum“, *Physical Review Letter*, Vol. 62, 1327, 1989.
- [77] Feeny, B., „Fast multifractal analysis by recursive box covering“, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 10 (9), 2277–2287, 2000.
- [78] J. L. Vehele, “Introduction to the multifractal analysis of images”, <http://www-rocq.inria.fr/fractales>, 1996
- [79] Canus Christophe, Jacques Lévy Véhel, Claude Tricot, „Large Deviation Multifractal Spectrum: Definition and Estimation“ M M Novak. *Fractals* 98, Oct 1998, Valleta, Malta. World Scientific, 1998
- [80] J. L. Véhel, P. Mignot, “Multifractal segmentation of images”, *Fractals*, World Scientific Publishing, vol. 2 (3), pp.371-378, 1994.
- [81] Stojić, T., Reljin, I., Reljin, B., „Adaptation of multifractal analysis to segmentation of microcalcifications in digital mammograms“, *Statistical Mechanics and its Applications, Physica A*, Vol. 367, pp. 494-508, (2006)
- [82] Ana Gavrovska, Goran Zajić, Irini Reljin, and Branimir Reljin, „Classification of Prolapsed Mitral Valve versus Healthy Heart from Phonocardiograms by Multifractal Analysis“, *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, Volume 2013 (2013), Article ID 376152
- [83] J. Feder, *Fractals*, Plenum Press, New York, NY, USA, 1988.
- [84] C.K. Peng, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley, and A. L. Goldberger, „Mosaic organization of DNA nucleotides“, *Phys. Rev. E* 49, 1685, (1994).
- [85] Espen A. F. Ihlen, „Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in Matlab“, *Frontiers in Physiology*, Vol. 3: 141. 2012;
- [86] Hurst, H.E., Long-term storage capacity of reservoirs. *T. Am. Soc. Civ. Eng.* 116, 770–808. (1951).
- [87] J. L. Vehele and P. Legrand, "Signal and Image processing with FraLab," in Proc. of FRACTAL04, Complexity and Fractals in Nature, 8th International Multidisciplinary Conference, Vancouver, Canada, 2004.
- [88] J. Lévy Véhel, Numerical Computation of Large Deviation Multifractal Spectrum, In CFIC96, Rome, 1996.
- [89] A. Eke, P. Hermán, J. Bassingthwaite, G. Raymond, D. Percival, M. Cannon, I. Balla, C. Ikrényi, Physiological time series: distinguishing fractal noises from motions, February 2000, Volume 439, Issue 4, pp 403-415
- [90] M. Mijić, D. Šumarac-Pavlović, „20 godina tradicije u upotrebi fizičkih modela u akustičkom projektovanju i istraživanju u Laboratoriji za akustiku ETF“, Zbornik radova 15. Telekomunikacioni forum TELFOR 2007, Beograd, 2007.
- [91] H. D. Harwood, A. N. Burd, “Acoustic scaling: General outline,” BBC Research Department Report No. 1970/13, April 1970.
- [92] D. Šumarac-Pavlović, M. Mijić, “Analiza uticaja geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv – merenja na fizičkim modelima,” LII Konferencija za ETRAN, 2008.
- [93] F. Fahy, “Foundations of engineering acoustics”, Academic press, London, 2001.
- [94] M. Mijić, Z. Perolo, “Design of reverberation chamber scaled model”, 14th ICA, Beijing, China, 3-10 septembar 1992, Proceedings, F5-9
- [95] M. Vorlander, E. Mommertz, “Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients,” *Applied Acoustics* 60, 2000.

- [96] M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, "Jednostavan impulsni izvor za merenja u fizičkim modelima," ETRAN 2009, Proceedings.
- [97] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, Filip Pantelić, Miloš Bjelić, "Acoustic Design Challenge In Totally Flexible Configuration Of Theatre Hall – Case Study", 6th Congress of Alps-Adria Acoustics Assosiation 16.-17. October 2014 Graz, Austria
- [98] D. Šumarac-Pavlović, "Uticaj geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv", doktorska disertacija, Beograd, 2007.
- [99] Miomir Vasov, "Uticaj arhitektonske forme i materijalizacije na akustički komfor pravoslavnih crkvenih objekata", doktorska disertacija, Niš, 2012
- [100] M. Mijić, D. Šumarac-Pavlović, " Reconstruction of the opera hall in Maribor – case study", International Symposium on Room Acoustics, Satellite Symposium of the 19th International Congress on Acoustics, Seville, 2007, Proceedings on CD
- [101] Dragan M. Ristić, Milan Pavlović, Dragana Šumarac Pavlović and Irini Reljin, „Detection of early reflections using multifractals,“ J. Acoust. Soc. Am. 133, EL235 (2013); <http://dx.doi.org/10.1121/1.4793767>
- [102] Dragan M. Ristić, Milan Pavlović, Miomir Mijić, Irini Reljin, „*Improvement of the Multifractal Method for Detection of Early Reflections*“, Serbian Journal Of Electrical Engineering, Vol. 11, No. 1, February 2014, DOI: 10.2298/SJEE131201002R
- [103] M. Pavlović and D. M. Ristić, „Applications of Multifractals in the Analysis of Room Impulse Response - Initial Research“, Telfor Journal Vol.3 No. 2, 2011, p 116-120

## Биографија аутора

Драган (Миливоје) Ристић рођен је 06.05.1982. године у Приштини, где је завршио основну школу и гимназију. Дипломирао је августа 2005. године на Електротехничком факултету у Београду, на Одсеку за електронику, телекомуникације и аутоматику (смер за телекомуникације). Тема дипломског рада била је: „Поређење видео кодних поступака: субјективна процена квалитета“.

Драган Ристић уписао је докторске студије на Електротехничком факултету у Београду у школској 2007/08. на модулу Телекомуникације, са руководиоцем научно-истраживачког рада проф. др Ирине Рељин. Од 2013. године руководиоца научноистраживачког рада је ванр. проф. др Драгана Шумарац Павловић.

Подручје истраживачког рада Драгана Ристића обухвата: акустику просторија, обраду мултимедијалних сигнала и информациону безбедност. Током дипломских и постдипломских студија Драган Ристић је до данас објавио укупно 18 радова из поменутих области. Добитник је награде за најбољи рад младог истраживача из области Акустике презентован на 57. ЕТРАН конференцији, одржаној јуна 2013. године на Златибору.

Од јуна 2006. године запослен је у Предузећу за телекомуникације „Телеком Србија“ а.д. Београд на позицијама инжењера за планирање ИТ безбедности и ИТ/ИСТ аналитичара. Током запослења похађао је бројне обуке и учествовао у различитим пројектима из области заштите и безбедности информација.

Прилог 1.

### Изјава о ауторству

Потписани-а ДРАГАН РИСТИК

Број уписа 5023/2007

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

"КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ТЕКСТУРЕ ИМПУЛСНОГ ОДЗИВА  
ПРОСТОРИЈА ПРИМЕНОМ МУЛТИФРАКТАЛНЕ АНАЛИЗЕ"

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 18.12.2015

Драган Ристик



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске  
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора ДРАГАН ПИСТИЋ  
Број уписа 50.23 / 2007  
Студијски програм ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ  
Наслов рада КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ТЕКСТУРЕ ИМПУЛСНОГ САЗИВА ПРОСТОРИЈА  
ПРИМЕНА МУЛТИФРАКТАЛНЕ АНАЛИЗЕ  
Ментор ПРОФ. ДР ДРАГАНА ШУНАРАЋ ПАВЛОВИЋ

Потписани ДРАГАН ПИСТИЋ

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 18.12. 2015

Драган Пистић

Прилог 3.

### Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ТЕКСТУРГ ИМПУЛСНОГ ОДЗИВА ПРОСТОРИЈА  
ПРИМЕНОМ МУЛТИФРАКТАЛНЕ АНАЛИЗЕ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

у Београду, 18.12.2015.