

UNIVERZITET U BEOGRADU

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Milan J. Pavlović

KARAKTERIZACIJA ZVUČNOG POLJA U
PROSTORIJAMA PRIMENOM MULTIFRAKTALNE
ANALIZE

Doktorska disertacija

Beograd, 2018.

UNIVERSITY IN BELGRADE

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Milan J. Pavlović

ROOM SOUND FIELD CHARACTERIZATION USING
MULTIFRACTAL ANALYSIS

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2018.

Mentori:

1. dr Irini Reljin, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
2. dr Miomir Mijić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

1. dr Dragana Šumarac Pavlović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
2. dr Jelena Čertić, docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
3. dr Andreja Samčović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet
4. dr Ana Gavrovska, docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane:

Karakterizacija zvučnog polja u prostorijama primenom multifraktalne analize

Rezime – Iz ugla akustike, svaka prostorija se može oceniti na osnovu postojanja reflektovane zvučne energije u njoj, gde se iz vremenske strukture reflektovane zvučne energije (impulsni odziv) mogu izvući parametri za opisivanje zvučne slike. Opisivanje impulsnog odziva predstavlja izazov koji još uvek nije odakvatno razrađen u literaturi. Tema ove disertacije jeste razvoj grupe alata za nelinearnu obradu signala impulsnog odziva koji omogućava automatizovanu analizu strukture impulsnog odziva prostorije u domenu Hölderovih eksponenata, singulariteta dobijenih primenom multifraktalne analize. Predložena je metodologija koja obuhvata metode za detekciju granice završetka oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorija, detekciju ranih refleksija u toj oblasti, kvantifikovanje svojstava impulsnog odziva prostorije i mogućnost akustičke klasifikacije impulsnih odziva. Primenom multifraktalne analize izvršena je analiza globalnih karakteristika signala impulsnog odziva prostorije, a sama analiza realizovana je primenom metode velikih devijacija (Large Deviation) za izračunavanje multifraktalnog spektra. Iterativnom analizom segmenata signala impulsnog odziva izračunati su njihovi multifraktalni spektri, pri čemu su posmatrane promene globalnih parametara multifraktalnog spektra u zavisnosti od pozicije analiziranih uzoraka u okviru impulsnog odziva. Utvrđena je veza između promene globalnih parametara multifraktalnog spektra i promena globalnih akustičkih karakteristika impulsnih odziva prostorije. Ovakav iterativni pristup omogućio je uvid u lokalnu raspodelu promena globalnih parametara multifraktalnog spektra koje su povezane sa lokalnim promenama u impulsnom odzivu. Na osnovu ovih zapažanja kreiran je algoritam za izdvajanje oblasti ranih refleksija. Predložena metodologije je testirana na različitim impulsnim odzivima prostorija, različitih akustičkih karakteristika. Tokom istraživanja posebna je pažnja posvećena analizi ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorije, što predstavlja značajnu temu u akustičkom dizajnu. U okviru ovog istraživanja, analizom signala impulsnog odziva u domenu singulariteta multifraktalne analize obezbeđen je precizniji uvid u lokalnu strukturu impulsnog odziva. Takav pristup

je omogućio realizaciju algoritma za detekciju ranih refleksija. Izračunavanje Hölderovih eksponenata i njihova selekcija u postupku multifraktalne analize izvršeni su u 1D i 2D domenu, pri čemu je primenjena metoda „*box-counting*“ uz korišćenje nekoliko različitih mera. Za potrebe 2D multifraktalne analize, impulsni odziv prostorije je predstavljen slikom spektrograma primenom kratkovremene Furijeove transformacije (STFT). U poslednjoj fazi istraživanja izvršena je analiza mogućnosti kvantifikovanja akustičkih svojstava impulsnih odziva na osnovu globalnih multifraktalnih parametara iz multifraktalnog spektra dobijenog metodom Velikih devijacija. Utvrđena je zavisnost vrednosti globalnih multifraktalnih parametara dobijenih iz multifraktalne analize impulsnih odziva i vrednosti difuznosti u fizičkom modelu difuznih prostorija u kojima su analizirani impulsni odzivi snimljeni. Klasterizacija impulsnih odziva iz različitih prostorija realizovana je analizom vrednosti globalnih multifraktalnih parametara što ukazuje na potencijalnu primenu pomenutih globalnih parametara za klasifikaciju impulsnih odziva. Analiza predloženih metoda izvršena je na realnim impulsnim odzivima, impulsnim odzivima snimljenim u fizičkim modelima i impulsnim odzivima generisanim u softverskim modelima. Eksperimentalni rezultati predloženog algoritma pokazali su visoku tačnost u detekciji refleksija bez obzira na geometriju prostorije, vrednosti difuznosti, vrednost apsorpcije i položaj snimanja impulsnih odziva u samoj prostoriji.

Ključne reči: akustika prostorija, impulsni odziv, multifraktalna analiza, rane refleksije, tekstura impulsnog odziva

Naučna oblast: Elektrotehnika

UDK broj: 621.3

Room sound field characterization using multifractal analysis

Summary – From the acoustic point of view, each room can be estimated based on the existence of its reflected sound energy and the parameters extracted from the temporal structure of the reflected sound energy named the room impulse response. The impulse response description is a challenge that has not yet been sufficiently elaborated in the literature. The subject of this dissertation is the development of a group of tools for impulse response nonlinear signal processing, which enable an automated analysis of the structure of the room impulse response in the domain of Hölder exponents, i.e. singularities obtained using multifractal analysis. The proposed methodology includes methods of detecting the time boundary of the end of the area of early reflections in the impulse response, detection of early reflections in that area, the quantification of the impulse response properties and finally the possibility of acoustic classification of impulse responses. Using the multifractal analysis, the global characteristics of the impulse response signal were analyzed by using the Large Deviation multifractal method of calculating the multifractal spectrum. During this analysis, the segments of the impulse response signal were analyzed iteratively by calculating their multifunctional spectrum, whereby the changes in the calculated values of global parameters of the multifunctional spectrum were monitored, depending on the analyzed segments of signal. The relationship between the changes of the global parameters of the multifractal spectrum and the changes of the global acoustic characteristics of the room impulse response was established. This approach allowed an insight into the local distribution of global parameter changes, which are associated with local changes in impulse response. Based on these observations, an algorithm for extracting the area of early reflection was created. The proposed methodology was tested on different room impulse responses, with different acoustic characteristics. During the research, special attention was devoted to the analysis of early reflections in the impulse response, which is an important topic in the room acoustic design. Within

this research, the signal analysis of the impulse response in the domain of singularity of multifractal analysis provided a more precise insight into the local structure of the impulse response. This approach enabled the development of an algorithm for the detection of early reflections. The calculation of Hölder exponents and their selection in the multifractal analysis was carried out in 1D and 2D domains, using the "box-counting" method and several different measures. For the purposes of 2D multifractal analysis, the room impulse response was represented by the spectrogram image using the short-time Fourier transform (STFT). The last phase of this research included an analysis of the possibilities of quantification of acoustic impulse response properties based on global multifractal parameters from the multifractal spectrum obtained by the Large Deviations method. The global multifractal parameters obtained from the impulse response multifractal analysis are correlated with the diffusivity indexes in the physical model of a room in which the analyzed impulse responses were recorded. The clusterization of different room impulse responses was realized by analyzing the values of global multifractal parameters, which indicates the potential application of using the global parameters for the classification of room impulse responses. The analysis of the proposed methods was carried out on realistic impulse responses, impulse responses recorded in physical models and impulse responses generated in software models. Experimental results of the proposed algorithm showed high accuracy in detection of the reflections, regardless of room geometry, diffuseness rate, absorption, and the position in the room where the impulse responses were recorded.

Keywords: early reflections, impulse response texture, multifractal analysis, room acoustics, room impulse response

Scientific field: Electrical engineering

UDK code: 621.3

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Motivacija i predmet istraživanja	1
1.2. Ciljevi istraživanja i polazne hipoteze.....	2
1.3. Organizaciona struktura disertacije.....	3
2. Akustički odziv prostorija	6
2.1. Zvučno polje u prostorijama.....	6
2.2. Impulsni odziv prostorije	7
2.3. Registrovanje i modelovanje impulsnog odziva prostorije	12
2.4. Generalizacija oblika impulsnog odziva	14
2.4.1. Direktni zvuk u impulsnom odzivu.....	15
2.4.2. Rane refleksije u impulsnom odzivu.....	17
2.4.3. Reverberacioni deo impulsnog odziva	18
2.4.4. Ambijentalna buka u impulsnom odzivu.....	20
2.5. Uticaj refleksije na subjektivni doživljaj zvuka	21
3. Multifraktalna analiza.....	25
3.1. Uvod u fraktale	25
3.1.1. Osobina samosličnosti.....	25
3.1.2. Fraktalna dimenzija.....	26
3.2. Multifraktali i njihov formalizam	28
3.3. Metode za procenu multifraktalnog spektra	30
3.4. Primena multifraktala u akustici	35
3.5. Analiza zvučnog polja prostorija pomoću multifraktala	36
4. Postupci analize zvučnog polja	40
4.1. Modelovanje direktnog zvuka i ranih refleksija.....	42
4.2. Postupci za detekciju refleksija	43
4.2.1. Metoda analize reflektograma i uvođenje pragova.....	43
4.2.2. Metoda adaptivnih pragova.....	43
4.2.3. Metoda korelacije	44
4.2.4. Metoda wavelet transformacije	45
4.2.5. 2D pristup u detektovanju ranih refleksija	45
4.3. Postupci utvrđivanja oblasti ranog dela impulsnog odziva.....	47
4.3.1. Vremenska tranzicija, <i>mixing time</i>	47

4.3.2.	Upotreba statističkih parametara u određivanju ranog dela impulsnog odziva.....	48
4.3.3.	Upotreba korelacije u određivanju ranog dela impulsnog odziva.....	48
5.	Predložene metode u postupku karakterizacije zvučnog polja	50
5.1.	Detekcija granice ranih refleksija	51
5.1.1.	Formiranje niza globalnih parametara multifraktalnog spektra	53
5.1.2.	Dodatna obrada globalnih parametara multifraktalnog spektra	58
5.2.	Detekcija ranih refleksija 1D multifraktalnom analizom	63
5.2.1.	Multifraktalna analiza – izračunavanje Hölderovih eksponenata	64
5.2.2.	Selekcija Hölderovih eksponenata i inverzno mapiranje	70
5.2.3.	Modifikacija niza Hölderovih eksponenata	73
5.3.	Detekcija ranih refleksija 2D multifraktalnom analizom	77
5.3.1.	Vizualizacija impulsnog odziva prostorija	78
5.3.2.	Multifraktalna analiza izračunavanje Hölder-ovih eksponenata u 2D domenu.....	80
5.3.3.	Modifikacija slike Holderovih eksponenata.....	81
5.3.4.	Selekcija Holderovih eksponenata i inverzno mapiranje	83
5.4.	Karakterizacija i klasifikacija impulsnih odziva pomoću globalnih multifraktalnih parametara.....	89
6.	Analiza predloženih metoda u fizičkom modelu promenljive difuznosti.....	91
6.1.	Fizički model prostorije promenljive difuznosti	91
6.2.	Utvrđene granice oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu	94
6.3.	Detektovane rane refleksije u impulsnom odzivu	110
6.4.	Efikasnost predloženog algoritma za detekciju refleksija u impulsnom odzivu.....	116
6.5.	Klasterizacija impulsnih odziva	120
7.	Analiza predloženih metoda nad bazom impulsnih odziva korišćenih tokom istraživanja	134
7.1.	Baza impulsnih odziva za testiranje predloženih metoda	134
7.1.1.	Impulsni odzivi snimljeni u fizičkom modelu prostorija.....	134
7.1.2.	Impulsni odzivi generisani u softverskim modelima prostorija	137
7.1.3.	Realni impulsni odzivi	140
7.2.	Utvrđene granice oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu	142
7.3.	Detektovane rane refleksije u impulsnom odzivu	146

7.4.	Efikasnost predložene metode za detekciju refleksija	153
7.5.	Klasterizacija impulsnih odziva	154
8.	Zaključak	161
	Literatura.....	170

1. Uvod

Svaka prostorija se iz ugla akustike, kao akustički prenosni sistem sa svojim karakterističnim zvučnim poljem, može oceniti na osnovu postojanja reflektovane zvučne energije u njoj. Vremensku strukturu reflektovane zvučne energije koja stiže u prijemnu tačku u prostoriji iz koga se mogu izvući gotovo svi parametri za opisivanje zvučne slike čini impulsni odziv. Iako je vremenska struktura impulsnog odziva svake prostorije jedinstvena, ipak postoje neke opšte, zajedničke karakteristike svojstvene svakom odzivu, bilo snimljenom u prostoriji, poput pozorišne sale, koncertne dvorane, crkve, muzički studiji, ili pak generisanom u fizičkom ili softverskom modelu. Zvučno polje u prostoriji se u okviru vremenske strukture impulsnog odziva može sagledati kroz više komponenti: direktni zvuk, jake rane refleksije, reverberacioni deo i ambijentalna buka. U sagledavanju akustičkih karakteristika prostorija i njihovih impulsnih odziva mogu se posmatrati objektivni i subjektivni parametri zvučnog polja, kao i okolnosti pod kojima se oni mere i analiziraju.

1.1. Motivacija i predmet istraživanja

Posebno je važna analiza ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorije i predstavlja značajnu temu u akustičkom dizajnu studijskih prostorija, koncertnih i operskih sala. Njihov efekat može biti pojedinačan i zbirni. Jake rane refleksije u prostorijama unose efekat koloracije, jer se koherentno superponiraju s direktnim zvukom stvarajući efekat komb filtra, a njihov zbirni efekat manifestuje se kroz oblik impulsnog odziva. Rane refleksije na specifičan način utiču na doživljaj zvuka u vidu povećanja glasnosti, razumljivosti govora, jasnoće i doživljaja širine zvučnog izvora. Metode za detekciju ranih refleksija publikovane do sada u literaturi ne obezbeđuju dovoljno precizno određivanje njihove vremenske pozicije u impulsnom odzivu.

Može se reći da je ova oblast nepotpuna i nedovoljno istražena. Pre svega, postoji veliki broj komponenti u zvučnom polju koje čine kompleksnu teksturu impulsnog odziva. Sve te komponente učestvuju u kreiranju subjektivnog

doživljaja zvuka u prostoriji, pa je samim tim teško utvrditi sve korelacije između relevantnih objektivnih i subjektivnih parametara. Zatim, razlog je i nedostatak u opštem dogovoru o preciznom definisanju pojmova za opis subjektivnog doživljaja zvuka. Takođe, tu su i fiziološke osobine čovekovog uva i način kako mozak obrađuje zvučne senzacije sluha, čime slušalac daje svoj lični individualni pečat u definisanju zvučne estetike.

Predmet ovog istraživanja je: razvoj metodologije za detekciju ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorija, kvantifikovanje svojstava impulsnog odziva prostorije, kao i mogućnost akustičke klasifikacije impulsnih odziva, a sve to na osnovu opisa lokalnih i globalnih karakteristika signala primenom multifraktalne analize.

1.2. Ciljevi istraživanja i polazne hipoteze

Cilj istraživanja je razvoj automatizovanog algoritma za detekciju naglih promena u impulsnom odzivu prostorije primenom transformacije odziva u domen singulariteta multifraktalne analize. Analizom signala impulsnog odziva u domenu singulariteta multifraktalne analize, moguće je obezbediti precizniji uvid u lokalnu strukturu impulsnog odziva. Ovakav pristup bi mogao da omogući razvoj algoritma za detekciju ranih refleksija. Globalne karakteristike signala impulsnog odziva prostorije je moguće analizirati primenom multifraktalne analize i izračunavanjem njegovog multifraktalnog spektra. Cilj istraživanja je i utvrditi korelisanost između različitih parametara multifraktalnog spektra i akustičkih karakteristika prostorije, izdvojiti oblast ranih refleksija koje igraju značajnu ulogu u formiranju subjektivnog doživljaja zvuka na osnovu izračunatih parametara multifraktalnog spektra i klasifikovati impulsne odzive prostorija.

Rad na predloženoj doktorskoj disertaciji zasniva se na sledećim hipotezama:

- 1) Primenom multifraktalne analize u obradi signala impulsnog odziva prostorije moguće je izdvojiti informacije vezane za lokalne singularitete u impulsnom odzivu koje imaju određenu vremensku raspodelu.*

- II) Spektar jednodimenzionalnog signala moguće je razmatrati kao sliku. Primenom multifraktalne analize u obradi slike spektrograma impulsnog odziva prostorija moguće je izdvojiti informacije vezane za lokalne singularitete u impulsnom odzivu koje imaju određenu vremensku i frekvencijsku raspodelu.*
- III) Parametri izvedeni iz analize globalne regularnosti signala impulsnog odziva prostorija mogu se koristiti za opisivanje impulsnog odziva, odnosno opisivanje akustičkih svojstava prostorije*
- IV) Parametri multifraktalnog spektra izvedeni na osnovu multifraktalne analize (MA) mogu se koristiti u postupku poređenja i klasifikacije signala impulsnog odziva prostorije*

Tokom istraživanja biće izvršeno opisivanje globalnih karakteristika impulsnih odziva prostorije analizom multifraktalnog spektra. Ovaj deo istraživanja bi analizirao upotrebu različitih parametara multifraktalnog spektra u izdvajanju oblasti ranih refleksija i oblasti reverberacionog dela iz impulsnog odziva prostorije. Zatim, biće predloženi postupci za detekciju refleksija u impulsnom odzivu korišćenjem multifraktalne teorije nad jednodimenzionalnim signalom, čime bi se omogućio uvid u lokalne karakteristike impulsnog odziva i njihovu korelisanost sa akustičkim osobinama same prostorije. Posebno će biti stavljen akcenat na prikaz impulsnog odziva prostorije u vremensko-frekvencijskom domenu i detektovanju ranih refleksija u 2D prikazu impulsnog odziva prostorije korišćenjem multifraktalne teorije nad dvodimenzionalnim signalom. Konačno, u poslednjem delu istraživanja biće analizirana mogućnost akustičke klasifikacije impulsnih odziva na osnovu različitih izračunatih parametara multifraktalnog spektra i predloženi različiti globalni parametri multifraktalnog spektra za klasifikaciju impulsnih odziva prostorija.

1.3. Organizaciona struktura disertacije

Disertacija je organizovana u 8 poglavlja.

U prvom poglavlju je predstavljena inicijalna motivacija za izradu disertacije i pregled definisanih ciljeva istraživanja. U skladu sa predstavljenim ciljevima postavljene su hipoteze kao smernice u toku istraživanja.

Drugo poglavlje daje pregled teorijske osnove o impulsnom odzivu prostorije, njegovoj strukturi i njegovim najznačajnijim karakteristikama.

Treće poglavlje sagledava značaj ranih refleksija u formiranju subjektivnog doživljaja zvuka u prostoriji. U ovom poglavlju su opisani neki subjektivni i objektivni parametri na koje rane refleksije imaju najveći uticaj.

Četvrto poglavlje sadrži uvod u fraktalnu teoriju i multifraktalnu analizu. Dat je pregled teorijske osnove vezano za osobine samosličnosti, fraktalnu dimenziju, formalizam multifraktala i opis metoda za primenu multifraktalnog spektra. Takođe su opisani preduslovi za primenu multifraktala u akustici i predstavljeni neki do sada publikovani radovi u kojima je struktura zvučnog polja u prostorijama analizirana multifraktalnom teorijom.

Peto poglavlje daje pregled do sada publikovanih standardnih metoda za analizu strukture zvučnog polja u prostorijama, pre svega metoda za detekciju ranih refleksija i utvrđivanja granice između oblasti ranih refleksija i reverberacionog dela u impulsnom odzivu prostorija.

U šestom poglavlju je detaljno opisana metodologija koja je korišćena tokom istraživanja. Ovo poglavlje čine tri celine. Prvi deo je posvećen predloženoj metodologiji za utvrđivanje granice između oblasti ranih refleksija i reverberacionog dela u impulsnom odzivu prostorija primenom multifraktalne analize i korišćenju globalnih parametara u tu svrhu. Drugi deo pruža detaljan opis metoda za detekciju refleksija u impulsnom odzivu primenom Hölderovih eksponenata njihove obrade u 1D i 2D domenu. Treći deo opisuje postupak klasifikacije impulsnih odziva na osnovu globalnih multifraktalnih parametara.

U sedmom poglavlju je prvo opisana baza impulsnih odziva koja je formirana za potrebe ovog istraživanja. Potom je dat pregled rezultata testiranja predloženog algoritma tokom sve tri faze istraživanja sa odgovarajućom diskusijom: 1) utvrđivanje granice oblasti ranog dela u impulsnom odzivu; 2) detekcije ranih refleksija u impulsnom odzivu primenom multifraktalne analize u

1D i 2D domenu; 3) klasifikacije impulsnih odziva na osnovu analize globalnih multifraktalnih parametara.

Osmo poglavlje sumira najznačajnije rezultate ovog rada i izvedene zaključke. U ovom poglavlju su navedeni naučni doprinosi disertacije, a potom i smernice za buduća istraživanja u cilju poboljšanja predložene metodologije za karakterizaciju zvučnog polja u prostorijama.

2. Akustički odziv prostorija

2.1. Zvučno polje u prostorijama

Prostorija se u akustici posmatra kao zatvorena zapremina vazdušnog prostora ograničena sa svih strana masivnim građevinskim pregradama (zidovi, pod, plafon). Svaka sredina kroz koju se prostire zvuk karakteriše se akustičkom impedansom koja je definisana kao proizvod njene gustine ρ i brzine prostiranja zvuka c . Kada zvučni talas u svom prostiranju naiđe na graničnu površinu na kojoj se menja vrednost akustičke impedanse nastupa refleksija. U prostorijama postoji velika razlika između akustičke impedanse graničnih površina načinjenih od masivnih građevinskih materijala i impedanse vazduha. Gustina vazduha je samo $1,2 \text{ kg/m}^3$ a brzina prostiranja u njemu oko 340 m/s [Šumarac-Pavlović and Mijić, 2017]. Istovremeno, građevinski materijali od kojih su u zgradama napravljene pregrade, zidovi i tavanice, imaju gustinu po pravilu veću od 1000 kg/m^3 (armirani beton čak do 2.500 kg/m^3) i brzina prostiranja zvuka u njima je preko 1000 m/s . Tako je u prostorijama vrednost akustičke impedanse graničnih površina za nekoliko redova veličine veća od impedanse vazduha. Zbog toga se u prostoriji zvučna energija pri svakom nailasku talasa na granične površine reflektuje i vraća nazad, ostajući tako zarobljena u ograničenoj zapremini prostorije sve dok potpuno ne iščezne kroz razne procese koji prouzrokuju gubitke energije. Van dimenzija prostorije smatra se da zvučna energija ne postoji, pa je prostor u kome se posmatra zvučno polje isključivo unutar njenih graničnih površina.

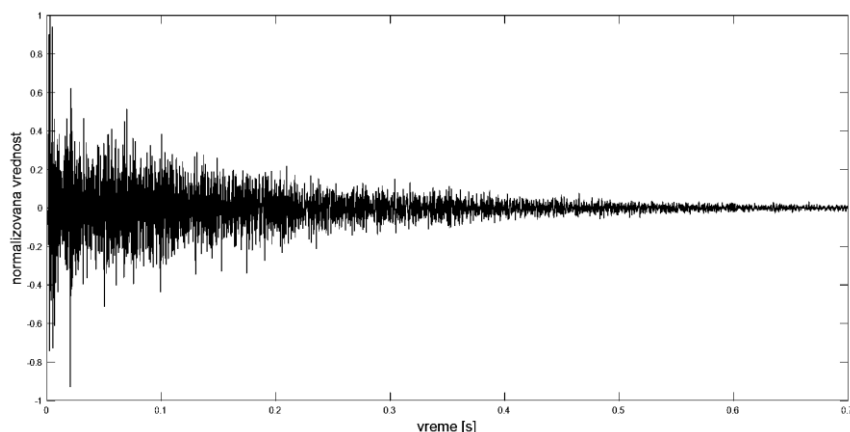
Značaj pojave refleksija je u tome što je u svakoj tački unutar prostorije zvučno polje rezultat njihovog složenog superponiranja. Iz tih razloga je zvučno polje u prostorijama vrlo kompleksno, što veoma usložnjava njegovo modelovanje i predikciju. Akustički odziv prostorije je najsloženija tema u akustici uopšte, bez sličnih primera u drugim sredinama. Zbog toga se u akustici vremenom izdiferencirala posebna podoblast nazvana akustika prostorija (*room acoustics*). Ona se bavi analizom, modelovanjem i merenjem složenog zvučnog polja koje nastaje superponiranjem brojnih refleksija. Zbog svoje kompleksnosti

takvo polje nema jednostavno analitično rešenje. Svaki oblik modelovanja razvijen u akustici podrazumeva razna početna uprošćavanja i ograničenja da bi bio ostvariv i praktično primenjiv.

Svaka prostorija je jedan akustički sistem prenosa sa svojim karakterističnim odzivom koji je predstavljen vremenskom i amplitudskom strukturom reflektovane zvučne energije. Pri svakoj refleksiji na graničnim površinama prostorije deo zvučne energije se apsorbira, što znači da prelazi u materijal pregrade. To se sa aspekta zvučnog polja u prostoriji manifestuje gubitkom dela energije. Na svakoj površini taj gubitak se kvantifikuje vrednošću koeficijenta apsorpcije α . On može imati vrednosti između 0 i 1, pri čemu vrednost 0 znači da se u procesu refleksije kompletna energija potpuno reflektuje i vraća nazad, a vrednost 1 da sva energija nestaje u graničnoj površini i ništa se ne reflektuje. Na svim realnim površinama vrednost α je između ta dva ekstrema, i po pravilu je frekvencijski zavisna. Zbog toga se refleksija zvuka od graničnih površina u prostoriji može razumeti i kao proces filtriranja. Vrednost koeficijenta apsorpcije materijala koji se javljaju na unutrašnjim površinama u prostorijama može se meriti u laboratorijskim uslovima, što je bitan preduslov za svako modelovanje zvučnog polja i predikciju.

2.2. Impulsni odziv prostorije

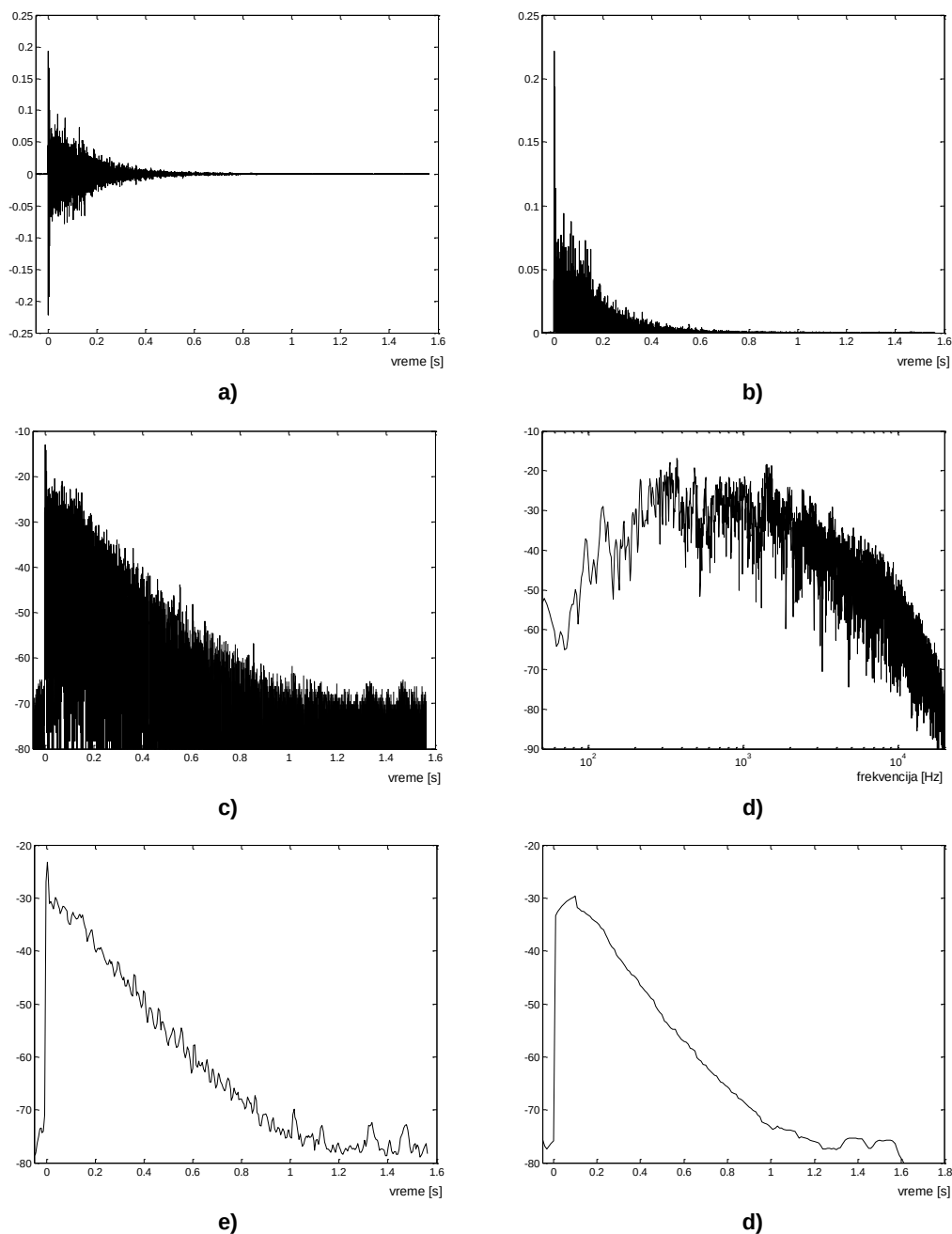
Za opisivanje prenosa zvuka između zvučnog izvora i neke tačke u prostoriji gde se nalazi prijemnik, a to može biti slušalac ili mikrofona, koristi se funkcija prenosa, najčešće u vremenskom domenu kao impulsni odziv $h(t)$. Prostorija se pri tome posmatra kao „crna kutija“, a procesi u zvučnom polju unutar nje zbirno se karakterišu impulsnim odzivom. To je signal koji svojim talasnim oblikom odslikava vremensku strukturu nailazaka zvučne energije, to jest refleksija, u prijemnu tačku kada je prostorija pobuđena Dirakovim impulsom. Takav pristup opisivanja sistema prenosa u akustici preuzet je iz telekomunikacija. U akustičkoj literaturi je kroz istoriju impulsni odziv nazivan ehogram („*echogram*“) ili dijagram refleksija („*reflection diagram*“) [Kuttruff, 2009]. Impulsni odziv u svom talasnom obliku sadrži impulse čija je amplituda srazmerna relativnoj energiji koju sukcesivne refleksije nose.



Slika 2.1. Vremenska struktura realnog impulsnog odziva jedne prostorije

Kao jedna ilustracija, na slici 2.1 je prikazan talasni oblik impulsnog odziva registrovanog u jednoj realnoj prostoriji. Vidi se da je to po svojoj prirodi bipolarni signal koji ima karakterističan monotono opadajući tok amplituda u vremenu. Prva komponenta na njegovom početku je direktan zvuk, to jest energija koja stiže do prijemnika najkraćim putem. Ubrzo nakon direktnog zvuka u impulsnom odzivu slede brojne refleksije. Na mestu prijema u prostoriji vremenska gustina pristiglih refleksija brzo se uvećava, dok se istovremeno njihova ukupna energija smanjuje u vremenu.

U postupku analize akustičkih karakteristika prostorija moguće je uočiti više različitih osobina impulsnog odziva na osnovu oblika samog odziva. Te osobine se mogu jasnije prepoznati i kvantifikovati primenom odgovarajućeg grafičkog prikaza strukture impulsnog odziva. Na slici 2.1 prikazan je njegov talasni oblik, to jest napon dobijen mikrofonom u prostoriji pri pobudi zvučnim impulsom. Međutim, iz ovakvog prikaza impulsnog odziva ne može se lako uočiti sve što je karakteristično za ponašanje same prostorije čiji se odziv analizira. Zbog toga se u analizi zvučnog polja u prostorijama koriste određene modifikacije i transformacije osnovnog prikaza odziva kako bi neke njegove karakteristike postale lakše uočljive [Mijić, 2011]. Različite forme prikaza impulsnog odziva prostorije su date na slici 2.2.



Slika 2.2. Različite forme prikaza struktura impulsnih odziva: a) osnovni bipolarni prikaz signala odziva; b) unipolarni prikaz kao apsolutna vrednost signala; c) unipolarni prikaz signala sa logaritamskom raspodelom po ordinati; d) spektralna karakteristika odziva signala; e) nivo signala nakon usrednjavanja od 10 ms f) nivo signala nakon usrednjavanja od 100 ms [Šumarac-Pavlović and Mijić, 2017].

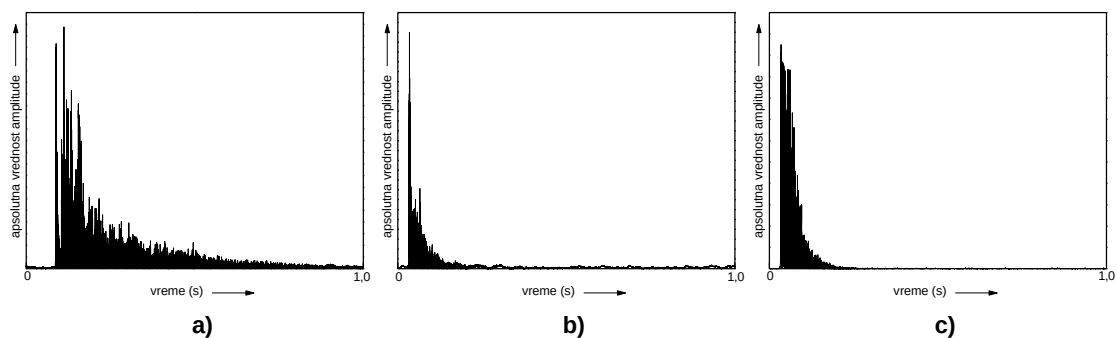
Bipolarni signal impulsnog odziva se može grafički predstaviti kao unipolarni signal primenom apsolutne vrednosti nad svim komponentama bipolarnog signala odziva. Unipolarni prikaz impulsnog odziva se potom može po ordinati

predstaviti u dve razmere: linearnoj ili logaritamskoj. Prikaz unipolarnog signala u logaritamskoj razmeri po ordinati predstavlja prikaz relativnog nivoa signala. Linearnom razmerom se postiže bolji uvid u strukturu i položaj refleksija u vremenskom domenu, kao i njihovog relativnog odnosa. Logaritamskom razmerom se struktura impulsnog odziva može posmatrati u većem rasponu amplituda. Zatim, struktura impulsnog odziva se može grafički prikazati u frekvencijskom domenu primenom Furijerove transformacije nad vremenskim signalom. Time se omogućava predstavljanje spektralnih komponenti signala po frekvencijama.

Najzad, impulsni odziv se može transformisati u domen nivoa zvuka, pri čemu se oblik odziva dobija primenom periode usrednjavanja pri izračunavanju efektivne vrednosti signala impulsnog odziva. Vremenski prozor usrednjavanja može biti različit. Uočava se da povećanje vremenske dužine periode usrednjavanja utiče na grafički prikaz odziva, u smislu da kriva obvojnice postaje više glatka i gube se na njoj određeni detalji brze fluktuacije nivoa signala. Sa druge strane, povećanje vremenske periode usrednjavanja obezbeđuje pregledniji opšti tok opadanja nivoa signala impulsnog odziva, poznat kao kriva opadanja nivoa zvuka.

Impulsni odziv po definiciji sadrži sve bitne informacije o vremenskoj i energetskoj strukturi zvučnog polja na mestu prijema u prostoriji pri zadatom položaju zvučnog izvora. Svaka prostorija ima svoj karakteristični impulsni odziv i u njemu su sadržani svi fizički uticaji na prenos zvuka kao signala između izvora i prijemnika. On na jedinstven način opisuje akustički odziv prostorije, pa predstavlja njenu svojevrsnu akustičku „ličnu kartu“. Impulsni odziv zavisi između ostalog od veličine prostorije i njenih drugih geometrijskih osobina, kao i od materijalizacije unutrašnjih površine prostorije. Strukture impulsnih odziva se međusobno najviše razlikuju u početnom delu impulsnog odziva što se ogleda u različitim intenzitetima refleksija i gustini njihove vremenske raspodele, ali i u dužini vremenskog trajanja obvojnice impulsnog odziva. Tako na primer, u velikim salama obvojnica impulsnog odziva sporije opada u vremenu, dok je u početnom delu odziva prisutno više istaknutih diskretnih refleksija. Suprotno tome, u prostorijama malih dimenzija obvojnica impulsnog odziva brzo opada u

vremenu. Kao ilustracija toga, na slici 2.3 prikazani su mogući oblici impulsnih odziva nekih realnih prostorija. To su jedna pozorišna sala, prostorija studija i jedna prosečna soba stana. Pošto je razmera duž vremenske ose ista na sva tri dijagrama, vidi se da u raznim prostorijama postoje uočljive razlike u trajanju odziva, kao i u strukturi njegovog početnog dela.



Slika 2.3 Moguće strukture impulsnih odziva u različitim prostorijama: veća pozorišna sala; b) studio za snimanje; c) soba u stanu. [Šumarac-Pavlović and Mijić, 2017]

Ulaz i izlaz prostorije kao sistema prenosa su tačke odabrane u prostoru i zadate svojim koordinatama. Na taj način je impulsni odziv prostorije u opštem slučaju funkcija položaja predajne tačke u kojoj se nalazi izvor zvuka i prijemne tačke u kojoj je prijemnik, pa se impulsni odziv može označiti i kao $h(r|r_0, t)$, gde je r vektor položaja prijemnika, a r_0 vektor položaja zvučnog izvora u nekom uvedenom koordinatnom sistemu [Šumarac-Pavlović and Mijić, 2017]. To znači da se menjanjem koordinata ulaza i izlaza, to jest menjanjem položaja zvučnog izvora i prijemnika, u jednoj prostoriji mogu formirati sistemi prenosa sa različitim impulsnim odzivima $h(t)$. Sa aspekta percepcije zvuka vremenska dimenzija stizanja zvučne energije najvažnija je karakteristika odziva prostorije, dok prostorni položaji zvučnog izvora i prijemnika ne utiču na globalnu vremensku strukturu impulsnog odziva. Promenom prostornih koordinata izvora i prijemnika menjaju se samo neki detalji u strukturi impulsnog odziva koji se u većini praktičnih okolnosti mogu zanemariti, s obzirom na statističke osobine reflektovanog zvuka.

2.3. Registrovanje i modelovanje impulsnog odziva prostorije

Registrovanje impulsnog odziva može se realizovati na dva načina: direktnom ili indirektnom metodom. Direktna metoda podrazumeva da se u prostoriji nekim zvučnim izvorom generiše impulsna zvučna pobuda što približnija Dirakovom impulsu. Tada se na izlazu iz mernog mikrofona direktno dobija talasni oblik impulsnog odziva prostorija. U akustičkom domenu impulsna pobuda je zvuk koji se subjektivno označava kao pucanj. Za takvu pobudu mogu se koristiti razna sredstva koja proizvode pucnjeve kao što su startni pištolj, petarda, električna varnica, bušenje naduvanog balona, itd.

Indirektna metoda registrovanja impulsnog odziva podrazumeva da se zvučna pobuda vrši posebno formiranim pobudnim signalima koji se reprodukuju zvučnikom. Impulsni odziv se dobija kroz odgovarajući postupak obrade upoređivanjem poslatog signala i signala dobijenog sa izlaza iz mikrofona na mestu prijema. Za indirektnu metodu neophodno je koristiti zvučnik kao izvor zvuka, što usložnjava postupak jer su neophodni odgovarajući pojačavač, kablovi za povezivanje, elektroenergetsko napajanje i slično. Zauzvrat, ovom metodom se dobija tačnija i preciznija slika impulsnog odziva, jer su u pitanju sve realni signali.

Svaka refleksija u impulsnom odzivu može se okarakterisati sa tri parametra. To su:

- zvučna energija koju pristigla refleksija nosi,
- vremenski trenutak njenog nailaska i
- pravac nailaska refleksije u prijemnu tačku definisan u nekim polarnim koordinatama.

Zbog toga potpuna predstava impulsnog odziva prostorije, osim onoga što je prikazano na slikama 2.1 i 2.3, podrazumevala bi i neke pridružene informacije o pravcima nailaska pojedinačnih komponenti zvučne energije koje stižu u prijemnu tačku. Međutim, u praksi akustike prostorija samo su prva dva parametra predmet analize. Razlog tome je u činjenici da se impulsni odziv prostorije posmatra u

domenu električnog signala koji se dobija na izlazu neusmerenog mikrofona postavljenog u odabranu prijemnu tačku.

Postoji suštinska razlika između impulsnog odziva predstavljenog talasnim oblikom električnog signala dobijenog sa izlaza iz mikrofona, kao na slici 2.1, i odziva predstavljenog zvučnim pritiskom u realnom zvučnom polju. Zvučno polje u prostorijama je trodimenzionalno jer se sastoji od brojnih refleksija koje nailaze na prijemnik sa svih strana. Svaka komponenta u talasnom obliku sa slike 2.1 nastala je stizanjem energije iz nekog pravca. Potpuna slika zvučnog polja u prostoriji podrazumeva i informacije o pravcima nailaska pojedinih komponenti zvučne energije. Nasuprot tome, na izlazu iz mikrofona dobija se jednodimenzionalni vremenski signal koji prikazuje samo vremenski i energetski odnos komponenti odziva, ali ne i prostorni. Zbog toga impulsni odziv predstavljen u električnom domenu ne može da pokaže sve karakteristike zvučnog polja u prostoriji koje mogu biti značajne za subjektivni doživljaj pri slušanju.

Činjenica je da danas postoje praktične metode za detekciju pravaca nailaska zvučne energije zasnovane na primeni mikrofonskih nizova. Međutim, u prostorijama gde gotovo istovremeno nailazi mnoštvo zvučnih komponenti prostorna rezolucija raspoloživih metoda nije dovoljna za takvu namenu, posebno na nižim frekvencijama. Takođe je važno da u svakom eventualnom trodimenzionalnom prikazu impulsnog odziva na slici predstavljenom u ravni sa naznačenim pravcima nailaska refleksija neumitno se gubi njegova vremenska dimenzija [Gover and Stinson, 2002], [Meyer and Elko, 2002].

Impulsni odziv prostorije može se modelovati sumom Dirakovih impulsa koji predstavljaju kopije direktnog zvuka. Na taj način se impulsni odziv može predstaviti izrazom:

$$h(t) = \sum_k I_k \delta(t - t_k) \quad (2.1)$$

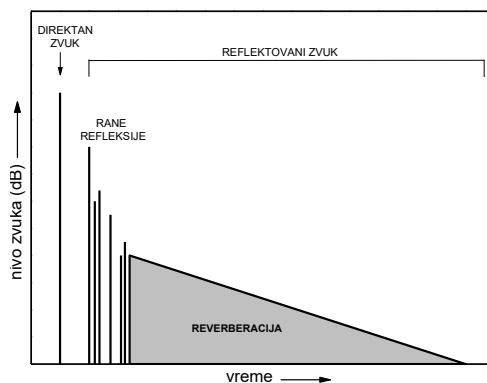
gde $\delta(t - t_k)$ predstavlja k -tu kopiju direktnog zvuka pristiglu na mesto prijema u trenutku t_k , dok je I_k intenzitet iste k -te kopije direktnog zvuka. U realnosti, oblik svake refleksije nije identična kopija direktnog zvuka, već je u određenoj meri izobličen i izmenjen u odnosu na originalni direktni zvuk. To je posledica filtriranja

pri refleksiji i eventualno prisustva reljefa na površini. Naime, na svim neravnim površinama pri refleksiji dolazi do raspršavanja zvučne energije, što usložnjava njeno kretanje po prostoriji. Najzad, na svim ivicama prisutnim u prostoriji i pogođenim zvukom javlja se difrakcija koja doprinosi dodatnoj kompleksnosti kretanja energije, a time i talasnog oblika impulsnog odziva $h(t)$.

Prilikom projektovanja i akustičkog dizajna budućih prostorija čije su namene akustički zahtevne (razne sale za izvođenje muzike, predstava, studijski prostori) bitno je u njima izvršiti modelovanje zvučnog polja i time omogućiti predikciju odziva. Modelovanje zvučnog polja predstavlja opisivanje odziva prostorije analitički i numerički kako bi se omogućila njegova predikcija i analiza. Modeli zvučnog polja predstavljaju dobar alat za tumačenje odziva u postojećim prostorijama i utvrđivanje akustičkih zahvata u prostoriji kako bi se korigovao odziv u skladu sa nekim postavljenim zahtevima.

2.4. Generalizacija oblika impulsnog odziva

Vremenska struktura impulsnog odziva prostorije prikazana na slici 2.1 jedinstvena je za svaku prostoriju. Ipak, postoje neke opšte, zajedničke karakteristike svojstvene svakom odzivu snimljenom u nekoj prostoriji. Tako se zvučno polje u prostoriji, u okviru vremenske strukture impulsnog odziva, može sagledati u nekoliko prepoznatljivih delova, što je ilustrovano na slici 2.4. Prikaz je nacrtan sa nivoom zvuka na ordinatnoj osi, za razliku od prikaza na slici 2.1 gde je na ordinati napon na izlazu mikrofona, odnosno zvučni pritisak.



Slika 2.4. Generalizovani oblik strukture impulsnog odziva prostorije [Šumarac-Pavlović and Mijić, 2017]

U početnom delu impulsnog odziva se, nakon direktnog zvuka, u opštem slučaju mogu prepoznati neke pojedinačne refleksije relativno razmaknute u vremenu. One su označene kao „rane refleksije“ i taj deo impulsnog odziva šematski je predstavljen na slici 2.4. Njihova gustina u nekim prostorijama može biti relativno mala, pa se jasno prepoznaju u odzivu, dok su u nekim prostorijama guste i ne mogu se vizuelno izdvojiti od ostatka impulsnog odziva. U kojoj meri će rane refleksije biti prepoznatljive u odzivu zavisi od veličine prostorije, njenog oblika, pozicije izvora i prijemnika u odnosu na unutrašnje površine, itd. Početni deo impulsnog odziva sa ranim refleksijama je značajan jer ima bitnu ulogu u formiranju čovekovog subjektivnog doživljaja zvučnog polja.

U daljem toku impulsnog odziva na vremenskoj osi dolazi do zgušnjavanja, pa se više ne mogu prepoznati pojedinačne refleksije, već samo energija koja stiže. Taj deo odziva označava se kao „reverberacija“ i posmatra kao globalna pojava, bez izdvajanja pojedinačnih detalja u odzivu. Sa aspekta subjektivnog doživljaja zvučnog polja poželjno je da reverberacija bude monotono opadajuća, bez prepoznatljivih iskakanja pojedinačnih refleksija.

2.4.1. Direktni zvuk u impulsnom odzivu

Direktni zvuk u impulsnom odzivu nastaje nailaskom zvučnog talasa koji od izvora do prijemne tačke u prostoriji stiže direktno, to jest najkraćim putem. Ova komponenta zvučnog polja sadrži sve originalne informacije koje je emitovao zvučni izvor. U talasnom obliku impulsnog odziva direktan zvuk je predstavljen prvim impulsom. Vremenski trenutak nailaska direktnog zvuka po pravilu se posmatra kao početak impulsnog odziva. On definiše trenutak $t = 0$, jer je za slušaoca irelevantno vreme koje je proteklo od nastaka zvuka na izvoru do trenutka njegovog stizanja.

Za direktni zvuk važe zakoni prostiranja zvučnog talasa u slobodnom prostoru, što znači da slabi sa udaljavanjem od izvora po takozvanom „zakonu 6 dB“ (nivo zvuka se smanji za 6 dB sa svakim udvostručavanjem rastojanja od izvora). Za slučaj neusmerenog tačkastog izvora zvuka takvo slabljenje se iskazuje promenom intenziteta prema izrazu [Šumarac-Pavlović and Mijić, 2017]:

$$J_D = \frac{P_a}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

gde je J_D intenzitet direktnog zvuka na rastojanju r od tačkastog zvučnog izvora, a P_a je zvučna snaga tog izvora. Isti izraz transformisan u domen nivoa zvuka je:

$$L_D = L_W - 10 \log(r^2) - 10 \log(4\pi) \quad (2.3)$$

odnosno:

$$L_D = L_W - 20 \log(r) - 11 [dB] \quad (2.4)$$

U gornjim izrazima L_D je nivo direktnog zvuka na rastojanju r od zvučnog izvora a L_W je nivo zvučne snage tog izvora. Referentna vrednost u odnosu na koju se definiše nivo zvučne snage izvora je 10^{-12} W. Ukoliko izvor zvuka ispoljava usmerenost zračenja, nivo direktnog zvuka na rastojanju r duž njegove ose usmerenosti može se iskazati izrazom:

$$L_D = L_1 - 20 \log(r) [dB] \quad (2.5)$$

gde L_1 predstavlja izmereni nivo direktnog zvuka usmerenog zvučnog izvora na jediničnom rastojanju, $r = 1$ m duž ose zračenja izvora.

U svim navedenim izrazima zanemaren je uticaj disipacije u vazduhu zato što ta pojava ima samerljiv uticaj na slabljenje zvuka tek na višim učestanostima i na rastojanjima većim od 50-100 m. To u većini okolnosti u prostorijama prevazilazi moguća rastojanja prijemnika (slušaoca ili mikrofona) od izvora zvuka. Prema tome, na manjim rastojanjima širenje talasnog fronta („zakon 6 dB“) ima presudan značaj na nivo zvuka, dok se uticaj disipacije u vazduhu može zanemariti. Kada je nezanemarljiv, uticaj disipacije se ogleda u relativnom slabljenju spektralnih komponenti na višim učestanostima, što se manifestuje koloracijom zvuka. Disipacija može na visokim frekvencijama uneti slabljenje signala od nekoliko desetina dB na rastojanju od 100 m. Na manjim rastojanjima uticaj disipacije u vazduhu može biti primetan samo na najvišim frekvencijama, u oblasti oko 20kHz.

2.4.2. Rane refleksije u impulsnom odzivu

Sve komponente na vremenskoj osi koje u impulsnom odzivu slede nakon pristiglog direktnog zvuka predstavljaju refleksije koje su stigle u prijemnu tačku sa manjom ili većom gustinom u vremenu i manjim ili većim kašnjenjem u odnosu na direktni zvuk. Među njima, refleksije koje na mesto prijemnika stižu neposredno nakon direktnog zvuka imaju u procesu slušanja poseban značaj i nazivaju se „rane refleksije“. Rane refleksije su po pravilu relativno jake po intenzitetu u odnosu na direktan zvuk, pa se zbog toga na vremenskoj osi u impulsnom odzivu izdvajaju od ostatka reflektovanog zvuka i mogu se prepoznati kao izdvojene diskretne pojave u njegovom talasnom obliku. One uglavnom nastaju reflektovanjem od mikrofona bliskih zidova, poda, plafona i slično.

Prisustvo jakih ranih refleksija može unositi razne subjektivne efekte u proces slušanja, kao što su promena doživljaja glasnosti, jasnoće i razumljivosti, pojava eha, koloracija zvuka i slično, i takvi efekti su šire objašnjeni u narednom potpoglavlju. U većini prostorija koje primaju veći broj ljudi od značaja je kako rane refleksije mogu pomoći u distribuciji zvučne energije po površini gde se oni nalaze. Naime, u auditorijumima cilj njihovog akustičkog dizajna je povećanje energije ranih refleksija i time poboljšanje jasnoće i razumljivosti govora. U konferencijskim salama gde je potrebno obezbediti jačinu, jasnoću i razumljivost govora, potrebna je umerena visina plafona kako bi njena površina bila ujedno i glavna površina odbijanja ranih refleksija i distribuiranja njihove energije po auditorijumu. Usmeravanje zvučne energije ka auditorijumu može takođe uticati na smanjenje vremena reverberacije jer je auditorijum osnovna apsorpciona površina. U nekim okolnostima rane refleksije mogu biti izvor problema, jer mogu stvoriti uslove za pojavu eha [Rossing 2007]. U takvim okolnostima potrebno ih je oslabiti ili adekvatno preusmeriti da bi se sprečile neželjene pojave

Specifičnost pojave izrađenih ranih refleksija u impulsnom odzivu je u tome što zbog talasne prirode zvuka dolazi do njihovog superponiranja sa direktnim zvukom, što dalje izaziva promenu spektra zvučnog signala koji deluje na prijemnik, to jest koloraciju, a to znači promenu boje zvuka. Ovaj efekat je poznat kao efekat češljastog ili „komb“ filtra. Promena spektra signala zavisi od faznih

stavova i odnosa amplituda spektralnih komponenti direktnog zvuka i jakih ranih refleksija. U zavisnosti od vremenskog kašnjenja rane refleksije u odnosu na direktni zvuk, tj. njihove putne razlike, superponiranje spektralnih komponenti može biti u rasponu od njihovog poništavanja do sabiranja. Na frekvencijama na kojima je njihova putna razlika neparni umnožak polovine talasne dužine, dolazi do protivfaznog sabiranja i slabljenja superponiranih spektralnih komponenti. U realnosti se uvek manifestuje slabljenje, a ne i totalno poništavanje spektralnih komponenti, jer rana refleksija prelazi duži put od direktnog zvuka, reflektuje se od granične površine i samim tim gubi energiju. Sa druge strane, na frekvencijama na kojima je njihova putna razlika celobrojni umnožak talasne dužine, rana refleksija i direktni zvuk su u tom slučaju u fazi i tada dolazi do sabiranja njihovih spektralnih komponenti.

2.4.3. Reverberacioni deo impulsnog odziva

Reverberacioni deo odziva predstavlja osnovnu karakteristiku zvučnog polja u prostorijama i sadrži svu preostalu reflektovanu zvučnu energiju koja kruži prostorijom i dospeva u prijemnu tačku. Za reverberacioni deo odziva je karakteristično da reflektovana zvučna energija stiže u prijemnu tačku sa svih strana i predstavlja stohastičku pojavu. Ovaj deo impulsnog odziva može se posmatrati samo statistički, na čemu se zasniva Sabinova teorija koja pretpostavlja da je zvučno polje dovoljno difuzno i homogeno i gde su u svakoj tački podjednako verovatni svi pravci nailaska refleksija i sve vrednosti njihovih faza kretanja [Šumarac-Pavlović and Mijić, 2017]. Pošto je brzina prostiranja zvuka konačna, komponente koje se više puta reflektuju od graničnih površina pre nego što stignu u prijemnu tačku, manje ili više kasne u odnosu na direktni zvuk. To se u impulsnom odzivu manifestuje njegovim razvlačenjem u vremenu. Broj reflektovanih komponenti u ovom delu impulsnog odziva, tj. njihova gustina na vremenskoj osi je veoma velika. Zbog toga se pojedinačne refleksije u njemu ne mogu prepoznati, već samo kroz njegovu globalnu vremensku strukturu, to jest reverberaciju.

Reverberacioni deo u strukturi impulsnog odziva posmatra se kroz njegovu obvojnici koja ima monotono opadajući tok. Postoji nekoliko razloga opadanja

energije odziva u vremenu. Osnovni razlog je smanjivanje energije zvučnog talasa usled širenja talasnog fronta („zakon 6 dB“). Drugi razlog su gubici pri reflektovanju talasa od graničnih površina usled apsorpcije. Najzad, izvestan efekat na reverberacioni proces ima i disipacija u vazduhu. Za razliku od direktnog zvuka, refleksije duže putuju kroz prostoriju i pri tome prelaze duže putanje na kojima počinje da bude samerljiv uticaj disipacije. Obvojnica impulsnog odziva u linearnoj predstavi amplituda ima eksponencijalno opadajući tok, kao što se vidi na slici 2.1, dok je u slučaju kada se odziv prikazuje nivoom zvuka opadanje linearno, kao na slici 2.4.

Reverberacioni deo impulsnog odziva se opisuje strminom njegovog nagiba. Ona se može kvantifikovati brzinom opadanja nivoa zvuka izraženo u dB/s. Međutim, istorijsko nasleđe je veoma davno uvelo veličinu koja se naziva vreme reverberacije. Ono je po definiciji vremenski interval za koji nivo zvuka u prostoriji tokom reverberacionog procesa opadne za 60 dB. Vreme reverberacije ima različite vrednosti u prostorijama, i kreće se od nekoliko desetih delova sekunde, na primer u akustičkim obrađenim studijskim prostorijama, do reda veličine 10 s u velikim crkvama i akustički neobrađenim velikim halama.

Svaka namena prostorija nameće neku optimalnu vrednost vremena reverberacije, što je potrebno obezbediti akustičkim dizajnom. Tako na primer, za velike sale koje su namenjene izvođenju muzike, poželjno je obezbediti vreme reverberacije u intervalu 1,5-2 s. U pozorišnim salama gde je prvenstveno važno ostvariti dovoljnu jačinu i razumljivost govora poželjna vrednost vremena reverberacije je oko 1 s. Najzad, u studijskim prostorijama vrednost vremena reverberacije treba da bude 0,3-0,4 s, zavisno od veličine i njihove konkretne namene.

Posebna tema u analizi zvučnog polja u prostorijama je granica između dela odziva sa ranim refleksijama i reverberacionog dela. U literaturi je ta tema obrađivana sa različitim pristupima, gde su analizirani uslovi pod kojima su pojedinačne refleksije u impulsnom odzivu čujno prepoznatljive i kada njihova subjektivna percepcija nestaje. U frekvencijskom domenu Šreder je na osnovu

talasnog modela zvučnog polja definisao graničnu frekvenciju iznad koje se više ne mogu uočiti rezonantni modovi prostorije [Kuttruff 2009]:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.6)$$

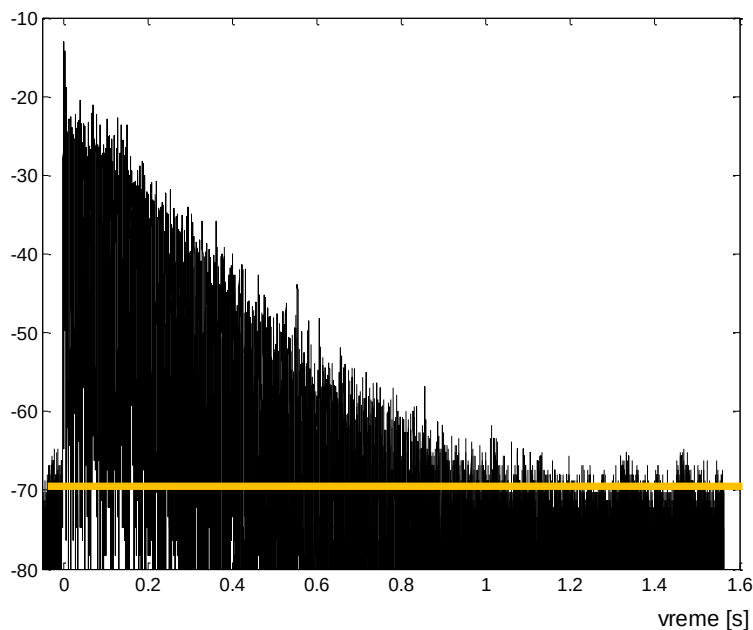
gde T predstavlja vreme reverberacije, a V zapremina prostorije.

U vremenskom domenu granica je vremenski trenutak u trajanju impulsnog odziva nakon koga postaje teško uočiti pojedinačne refleksije. Struktura odziva se u njegovom daljem toku može posmatrati samo statističkim modelom. Zbog toga se definiše vreme tranzicije kao vreme koje protekne od trenutka nailaska direktnog zvuka do trenutka kada refleksije počinju da se preklapaju u tolikoj meri da je posmatranje anvelope impulsnog odziva bitnije od posmatranja njene detaljne strukture. Može se reći da granica između oblasti sa ranim refleksijama i reverberacionog dela predstavlja trenutak u kome se menja tekstura impulsnog odziva.

2.4.4. Ambijentalna buka u impulsnom odzivu

Pored željenog zvučnog izvora u prostoriji mogu postojati i drugi, „parazitski“ izvori koji takođe stvaraju svoje zvučno polje i deluju na prijemnik. Ambijentalna buka je posledica postojanja velikog broja parazitskih zvučnih izvora čiji zvuk sa raznih strana dospeva u prostoriju, kroz građevinske pregrade, otvore, instalacije, prozore i vrata, itd. S obzirom da potiče od udaljenih izvora i dospeva sa raznih strana, buka u prostoriji u statističkom smislu ima odlike reflektovanog zvuka. Na slici 2.5 ilustrovana je posledica prisustva ambijentalne buke u impulsnom odzivu. Prikazan je jedan odziv predstavljen nivoom zvuka.

Na slici je označen nivo ambijentalne buke koji postoji tokom čitavog trajanja impulsnog odziva i nakon prestanka signala. Vidi se da nivo ambijentalne buke određuje upotrebljiv dinamički opseg signala odziva, pa je pri njegovom registrovanju važno da pobudni signal ima dovoljno veliki intenzitet.



Slika 2.5. Ilustracija uticaja nivoa buke na dinamiku signala impulsnog odziva; žuta linija označava nivo ambijentalne buke u prikazanom signalu odziva [Mijić, 2011]

2.5. Uticaj refleksije na subjektivni doživljaj zvuka

Pokazano je da impulsni odziv formiraju direktni zvuk i niz refleksija koje su se prethodno jednom, ili više puta reflektovale od graničnih površina. Svaka refleksija se u impulsnom odzivu karakteriše svojim intenzitetom (nivoom zvučnog pritiska) i vremenskim kašnjenjem u odnosu na trenutak stizanja direktnog zvuka. Pošto je čulo sluha osetljivo i na pravac nailaska zvuka potrebno je svaku refleksiju u impulsnom odzivu opisati dodatnim parametrom kojim se definiše smer njenog nailaska u prijemnu tačku. Najzad, pri svakoj refleksiji zvuka od zidova prostorije dolazi do promene njegovog spektralnog sadržaja, a time i do promene njenog talasnog oblika. Na taj način refleksija prestaje da bude potpuna kopija direktnog zvuka [Kuttruff 2009].

U literaturi su opisani mogući subjektivni efekti koje pojava refleksije može prouzrokovati u zvučnoj slici [Rossing, 2007]. To su:

- promena glasnosti, to jest porast jačine zvuka usled sabiranja energija refleksije i direktnog zvuka;

- povećanje jasnoće zvuka ukoliko je kašnjenje refleksije dovoljno malo da se stapa sa direktnim zvukom;
- povećanja osećaja prostornosti zvučne slike ukoliko su uglovi nailaska direktnog zvuka i refleksije različiti u horizontalnoj ravni; ukoliko su ti uglovi različiti u vertikalnoj ravni, nastaje samo efekat promene boje, to jest koloracija zvuka, bez uticaja na osećaj prostornosti;
- pojava eha, pod uslovom da refleksija kasni više od 50 ms i da ima dovoljno visok nivo; za velika kašnjenja, reda 200 ms, eho se može javiti i pri niskom nivou refleksije;
- koloracija zvuka pri kašnjenjima refleksije u odnosu na direktni zvuk ispod 30 ms;
- promena u lokalizaciji izvora zvuka (doživljaju položaja zvučnog izvora u prostoru) ukoliko je nivo refleksije poredljiv sa nivoom direktnog zvuka.

Pobrojani efekti zavise takođe od spektralnih i vremenskih karakteristika zvučnog signala koji se sluša, pa u opisanim pojavama postoje razlike ako se sluša govor, muzika brzog ritma, muzika sporog ritma, udari, itd. Tako na primer, eho se mnogo lakše detektuje kod muzike bržeg ritma, dok je pri slušanju muzike sporijeg ritma slušalac senzitivniji na koloraciju, to jest promenu boje zvuka.

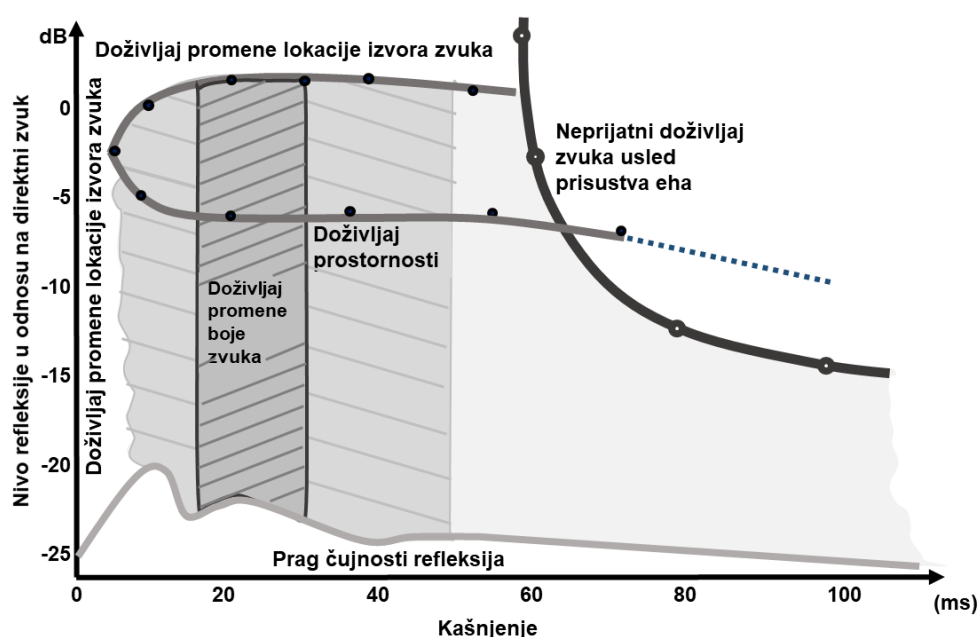
Sve navedene pojave su ilustrovane na slici 2.6, gde je grafički prikazana zavisnost doživljaja jedne refleksije od njenog vremenskog kašnjenja i relativnog nivoa u odnosu na komponentu direktnog zvuka [Rossing, 2007]. Dijagram je formiran na osnovu eksperimenta u kome je zvučna pobuda bila muzički signal koji je dolazio do slušaoca u visini njegove glave, dok je refleksija nailazila u horizontalnoj ravni pod uglom 40° u odnosu na osu glave slušaoca.

Sa prikazane slike se mogu izvući sledeći zaključci:

- Donja granica praga primetnosti refleksije je oko -20 dB i nezavisna je od kašnjenja refleksije u odnosu na direktni zvuk.
- Refleksija oslabljena za više od 20 dB u odnosu na direktni zvuk je nečujna u celom vremenskom opsegu kašnjenja.
- U gornjem desnom uglu dijagrama sa slike 2.6. nalazi se region

primetnosti eha, počev od 60 ms kašnjenja pa na više. Sa povećanjem kašnjenja refleksije prag nivoa detekcije eha naglo opada.

- Prikazana je zona nivoa i kašnjenja refleksije kada se javlja utisak prostornosti, odnosno širenja oblasti iz koje se primećuje nailazak zvuka. Za kašnjenja refleksije ispod 30 ms, nastaje doživljaj promene boje, to jest koloracija, kao posledica delovanja komb filtra.
- Ukoliko nivo test refleksije postane veći od nivoa direktnog zvuka, na slici je to relativni nivo iznad 0 dB, pri čemu je kašnjenje posmatrane refleksije ispod 50 ms, tada nastupa doživljaj prostornog pomeraja smeru nailaska direktnog zvuka u odnosu na stvarni položaj izvora zvuka.



Slika 2.6. Efekti pojave jedne refleksije pri slušanju muzičkog signala; refleksija nailazi u horizontalnoj ravni, pod uglom 40° u odnosu na osu slušaoca [Rossing, 2007]

Opisani efekti se odnose na mogući uticaj jedne izolovane refleksije koja stiže nakon direktnog zvuka. U složenoj strukturi impulsnog odziva realnih prostorija samo neke refleksije u njemu mogu stvarati navedene efekte u percepciji zvuka. Koja među njima će ostvariti neki od efekata zavisi od njenog

neposrednog okruženja u signalu odziva, pa je proces formiranja zvučne slike u prostorijama veoma složen proces.

3. Multifraktalna analiza

3.1. Uvod u fraktale

Veliki broj fizičkih sistema ima tendenciju sličnog ponašanja na različitim skalama posmatranja. Ideja o opisivanju prirodnih fenomena proučavanjem zakona statističkog skaliranja datira s početka prošloga veka. Tokom šezdesetih godina, poljski matematičar i fizičar *Benoit B. Mandelbrot* je prvi upotrebio pridev "fraktalni" da bi ukazao na objekte čija složena geometrija ne može biti okarakterisana klasičnom celobrojnomo dimenzijom i uvodi pojam fraktalni skup (eng. *fractal sets*) koji u opisivanju ponašanja neke strukture uzima stepen regularnosti same strukture [Mandelbrot, 1977]. *Mandelbrot* je na neki način objedinio prethodne teorije nastale sredinom 19. veka, kao što su: 1) mogućnost postojanja kontinualne krive koja nije diferencijabilna ni u jednoj tački, *Theodor Weierstrass* (1815-1897); 2) uvođenje pojma necelobrojne dimenzije, koja je veća od topološke dimenzije, *Felix Hausdorff* (1869-1942); 3) definicija Kantorovog skupa (*Cantor Set*), beskonačnog skupa tačaka u jediničnom intervalu $[0,1]$ koji iskazuje fraktalne osobine, *Georg Cantor* (1845-1918).

Glavna osobina fraktalne geometrije jeste njena sposobnost da opiše nepravilan ili fragmentiran oblik prirodnih karakteristika kao i druge složene predmete koje tradicionalna Euklidska geometrija ne analizira. Ovaj fenomen se često izražava zakonima statističkog skaliranja u prostornom ili vremenskom domenu i uglavnom se karakteriše na osnovu stepenog zakona ponašanja realnog fizičkog sistema. Ovaj koncept omogućava jednostavno geometrijsko tumačenje i često se sreće u različitim oblastima, kao što su geofizika, biologija, fluidna mehanika, zatim analiza slike, pogotovu analiza medicinske slike, video saobraćaj i sl.

3.1.1. Osobina samosličnosti

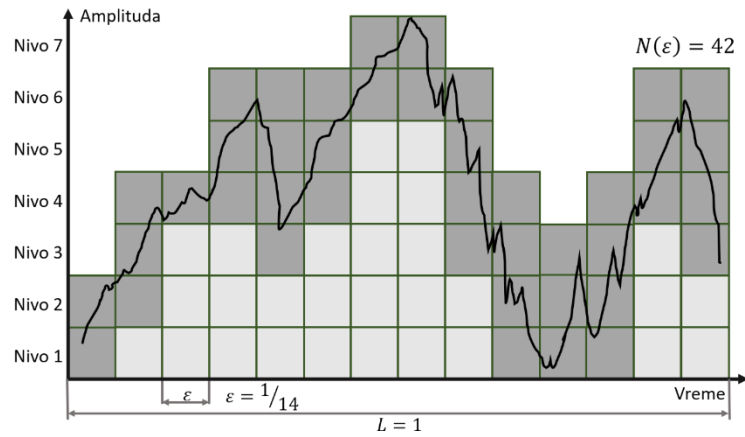
Najzaslužnijim za razvoj fraktala i multifraktala smatra se Mandelbrot koji je definisao novu geometriju prirode [Mandelbrot and Ness, 1968] [Mandelbrot, 1983]. Fraktalna geometrija se zasniva na ideji da naizgled kompleksni i složeni

oblici u prirodi pokazuju, jednu fundamentalnu osobinu poznatu kao samosličnost [Reljin and Reljin, 2002]. Samosličnost se ogleda u tome da manji delovi strukture koji čine celinu, mogu biti uvećani, tj. skalirani pri većim skalama, a da ostanu isti ili statistički slični, sa istom količinom detalja, u poređenju sa celinom, tj. celom strukturom objekta. Drugim rečima, samosličnost se definiše kao svojstvo u kojem se podskup neke celine, kada je uveličano do veličine celine, ne razlikuje od celine [Mandelbrot, 1967]. Ma kako kompleksan bio oblik i/ili dinamičko ponašanje sistema, ukoliko se pogleda pažljivije, mogu se naći oblici na jednoj skali koji liče na one na drugim skalama uvećanja. Takva struktura je slična u različitim skalama. Ovakvi primeri su brojni: morska obala, građa nervnog sistema, decimalni brojni system, strukture biljaka (paprat, karfiol), oblaci... Svojstvo samosličnosti je jedna od osobina fraktala na osnovu koje se kaže da neki skup, oblik ili pojava poseduje fraktalna svojstva. Postoji mnoštvo radova o fraktalnoj i multifraktalnoj teoriji i njenoj primeni u različitim oblastima. Fraktalni oblici ili signali su karakterisani sledećim svojstvima: nemaju karakterističnu dužinu, poseduju svojstvo samosličnosti i mogu se okarakterisati necelobrojnou fraktalnom dimenzijom [Peitgen et al., 2004].

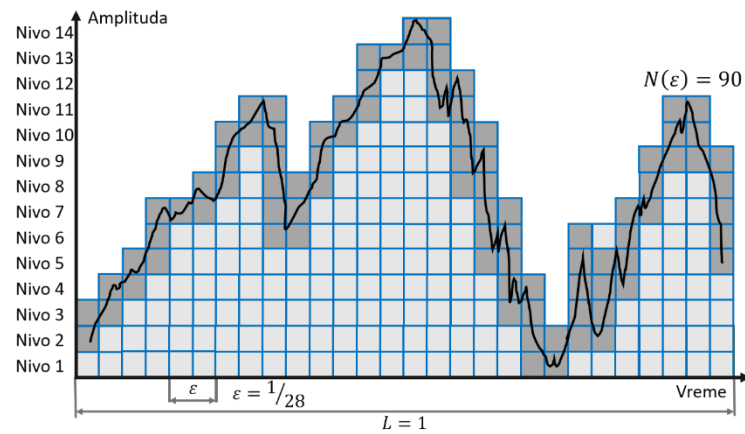
3.1.2. Fraktalna dimenzija

Fraktali su suviše nepravilnog oblika da bi mogli biti opisani klasičnom geometrijom i dimenzijama, poput dužine, površine ili zapremine. Oni se opisuju posebnom fraktalnom dimenzijom (Hausdorfova dimenzija, D_f) koja je po pravilu veća od klasične topološke dimenzije. Necelobrojna fraktalna dimenzija, D_f , opisuje u kojoj meri se neregularna struktura nekog objekta ili fenomena iterativno ponavlja u postupku promene skale posmatranja tih struktura [Mandelbrot, 1983] [Peitgen et al., 2004].

Postoje različite metode za procenu fraktalne dimenzije struktura, tj. fraktala, a najpoznatija je „*box-counting*“ metoda ili metoda pokrivanja [Russel et al., 1980], [Mandelbrot, 1983]. Ova metoda podrazumeva da se posmatrana fraktalna struktura skupa W u n -dimenzionalnom prostoru pokriva sa n -dimenzionalnim boksevima radijusa ε i potom broje boksevi koji su popunjeni strukturom, tj. boksevi koji nisu prazni, $N(\varepsilon)$, slika 3.1.



a)



b)

Slika 3.1. Ilustracija *box-counting* metode, a) dimenzija boksa $\varepsilon = 1/14$; b) dimenzija boksa $\varepsilon = 1/28$

$N(\varepsilon)$ predstavlja meru popunjenosti bokseva posmatranim fraktalnim skupom W . Boksevi predstavljaju kvadrate stranice ε u slučaju jednodimenzionalnog (1D) signala ili kocke stranice ε u slučaju dvodimenzionalnih (2D) signala [Reljin and Reljin, 2002].

Granična vrednost $N(\varepsilon)$, kada ε teži nuli, podleže stepenom zakonu:

$$N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D_f} \quad (3.1)$$

i fraktalna *Hausdorff-Besicovitch* dimenzija se izračunava kao

$$D_f = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(N(\varepsilon))}{\ln(\varepsilon)} \quad (3.2)$$

Glavni nedostatak izračunavanja *Hausdorff-Besicovitch* dimenzije u izrazu (2) jeste upotreba složenih metoda. Zbog toga su razvijene različite numeričke metode, algoritmi koji aproksimiraju izraz (2) i pojednostavljaju izračunavanje fraktalne dimenzije. Međutim, to vrlo često dovodi do dobijanja različitih vrednosti fraktalnih dimenzija iste fraktalne strukture u zavisnosti od korišćenog algoritma za izračunavanje izraza (2). Sve metode za izračunavanje *Hausdorff* dimenzije se mogu podeliti u tri grupe [Lopes and Betrouni, 2009]: 1) grupa *box-counting* metoda; 2) grupa „*fractional Brownian motion*“ metoda; 3) grupa „*area measurement*“ metoda.

Veliki broj fraktalnih struktura se može veštački generisati primenom relativno prostih pravila tako što se rezultati posle svake iteracije vraćaju ponovo u istu proceduru. Takve strukture iskazuju stroga fraktalna svojstva koja se kvantifikuju odgovarajućom fraktalnom dimenzijom, istom u svim skalama uvećanja. Takve strukture su strogo samoslične i nazivaju se monofraktalima [Lopes and Betrouni, 2009]. Monofraktalima se smatraju strukture poput Kantorovog skupa, Kohove krive, Sierpinski tepiha [Mandelbrot, 1983], [Evertsz and Mandelbrot, 1992]. Fraktalnu analizu je pogodno primeniti u karakterizaciji neregularnih krivih i površina, kao i u opisivanju objekata ili fenomena koji su iskazani kroz dva krajnja stanja: crno - belo, 0 - 1, tačno – netačno [Vehel 1998].

3.2. Multifraktali i njihov formalizam

Prirodni objekti i pojave su daleko kompleksniji i ne iskazuju tako stroga fraktalna svojstva, čak i kada jesu samoslični. Prirodni objekti i pojave za razliku od veštačkih, mogu imati samo statističku samosličnost, za čije opisivanje se uvodi pojam mere, μ . Prirodni fraktali imaju različitu fraktalnu dimenziju pri različitim skalama uvećanja, tj. njihova samosličnost se ne može opisati samo jednom vrednošću mere, već skupom mera $\sum \mu_i$ za različite skale [Vehel, 1998], [Vehel and Tricot, 2004], [Evertsz and Mandelbrot, 1992]. Takve pojave predstavljaju multifraktale. Multifraktalima se smatraju strukture koje su sačinjene od velikog broja fraktalno homogenih podskupova gde je svaki podskup izražen odgovarajućom fraktalnom dimenzijom. Kod monofraktala postoji jedna mera, μ ,

kojom se pojava opisuje nezavisno od skale uvećanja. Kod multifraktala posmatra se set mera, $\sum \mu_i$, kojima se opisuje statistički ista pojava u različitim skalama [Harte, 2001]. Ako neka pojava iskazuje svojstva samosličnosti, koja u različitim skalama uvećanja nisu ista mada jesu slična, onda se govori o multifraktalima [Reljin and Reljin, 2002].

Niz mera kojim se opisuju multifraktali se iskazuje multifraktalnim spektrom, tj. spektrom singulariteta. Iz multifraktalnog spektra je moguće izvući i lokalne i globalne informacije vezane za regularnost podataka koje opisuju neku pojavu [Vehel, 1998]. Tačnije, prvo se multifraktalna svojstva strukture iskazuju necelobrojnim eksponentom α , poznatim kao *Hölder*-ov eksponent, koji lokalno opisuje singularnost date strukture. Nakon izračunavanja Holderovih eksponenata lokalno, posmatra se njihova raspodela globalno, izražena multifraktalnim spektrom, $f(\alpha)$. Multifraktalni spektar opisuje globalna svojstva posmatrane strukture ili pojave. Na osnovu para $(\alpha, f(\alpha))$ može se opisati signal sa lokalnog i globalnog stanovišta. Male vrednosti α označavaju signal koji se lokalno slabo menja. Male vrednosti $f(\alpha)$ označavaju da je pojava koja ima lokalnu vrednost α slabo verovatna, i obratno, za veliko $f(\alpha)$ je pojava veoma verovatna [Riedi, 1999].

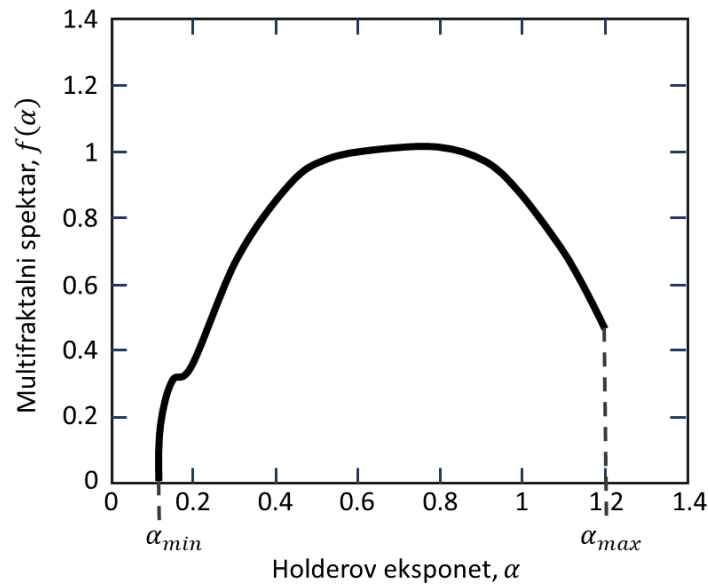
Multifraktalni formalizam definiše izraz za izračunavanje spektra [Lopes and Betrouni, 2009]:

$$f(\alpha) = \inf_q (q \cdot \alpha - \tau(q) + c) \quad (3.3)$$

pri čemu $q \in R$, c je konstanta, dok $\tau(q)$ predstavlja particionu funkciju. Parametar q predstavlja stepen momenta neke mere μ i daje uvid u detaljniju analizu različitih regiona neke mere singulariteta koji se posmatraju. Ukoliko je momenat $q > 1$ analiziraju se regioni sa velikim promenama, odnosno velikim singularitetima. Sa druge strane, ukoliko je $q < 1$, analiziraju se regioni malih promena i malih singulariteta [Lopes and Betrouni, 2009], [Zajić, 2014]. Izraz (3.3) je teško primeniti nad realnim signalima i zbog toga se često pribegava aproksimativnim metodama u izračunavanju multifraktalnog spektra, kao i alternativnim načinima opisivanja multifraktalne strukture. S tim u vezi, uvodi se Ležandrova transformacija (*Legendre transform*):

$$\begin{aligned}\tau(q) &= q \cdot h(q) - f(\alpha) \\ \alpha(q) &\cong \frac{d\tau(q)}{dq}\end{aligned}\quad (3.4)$$

gde $f(\alpha)$ predstavlja fraktalnu dimenziju skupa $E(\alpha)$ koji ima monofraktalnu strukturu i koji predstavlja skup Hölder-ovih eksponenata α , vrednosti unutar opsega $[\alpha, \alpha + \Delta\alpha]$, q je stepen momenta, dok $\tau(q)$ predstavlja partionu funkciju. $\alpha \rightarrow f(\alpha)$ predstavlja konveksnu funkciju čiji maksimum odgovara Hausdorff-ovoj dimenziji D_h . Za striktno fraktalne objekte ili pojave (monofraktale) sve tačke imaju istu vrednost eksponenta, pa je multifraktalni spektar tačka. Kod prirodnih fraktala postoji raspodela vrednosti, takva da funkcija $f(\alpha)$ ima oblik parabole, odgovarajuće širine $[0 < \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max} < \infty]$, prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2. Prikaz multifraktalnog spektra $f(\alpha)$, za realni impulsni odziv dobijen uz pomoć programa Fraclab

3.3. Metode za procenu multifraktalnog spektra

Opis multifraktalnih svojstava može se vršiti na razne načine. Generalno se sve metode za aproksimaciju multifraktalnog spektra mogu podeliti u dve grupe: grupu metoda koje se baziraju na „*box-counting*“ metodu (metoda preklapanja) i grupu metoda koje se oslanjaju na *wavelet*-e, tj. na diskretnu i kontinualnu wavelet transformaciju [Lopes and Betrouni, 2009]. Između ostalog je u [Lopes and Betrouni, 2009] navedeno da se standardne „*box-counting*“ tehnike koriste u

analizama skupa tačaka strukture gde je svaki skup opisan beskonačnim brojem generalizovanih dimenzija, Dq , poznatim kao Renijeve dimenzije stepena q .

U [Vehel, 1998] je dat uvod u multifraktalnu analizu slika i multifraktalni spektri su klasifikovani u 3 grupe: 1) multifraktalni spektri Hausdorff singulariteta - $f_h(\alpha)$, koji skupu tačaka sa istim vrednostima Hölder-ovog α daje odgovarajuću dimenziju i time geometrijski opisuje raspodelu singulariteta; 2) multifraktalni spektri velikih devijacija - $f_g(\alpha)$, koji utvrđuju verovatnoću da se nađe vrednost α_n pri rezoluciji n i time statistički opisuje raspodelu singulariteta; 3) Ležandrov multifraktalni spektar - $f_l(\alpha)$, kod koga se razmatraju samo usrednjene vrednosti α . Među ovom veličinama multifraktalnih spektara postoji veza da su:

$$f_h(\alpha) \leq f_g(\alpha) \leq f_l(\alpha) \quad (3.5)$$

Prilikom analize multifraktala primenom „*box-counting*“ metode, posmatra se određena struktura S (skup podataka), koja se deli na nepreklapajuće bokseve (podskupove podataka) S_i stranica ε , tako da važi $S = \bigcup_i S_i$. Svaki boks (podskup) je karakterisan nekim iznosom mere $\mu(S_i)$. Mera podskupa datog uzorka predstavlja funkciju koja podskupu daje određenu vrednost, izraženu kroz veličinu, verovatnoću ili intenzitet. Merom se prikazuje lokalna neregularnost posmatrane veličine u podskupu, tj. opisuje se varijacija broja tačaka posmatrane veličine po boksevima. Izbor mere koja će se računati zavisi od prirode problema, jer različite mere utiču na dobijanje različitih vrednosti Holderovih eksponenata, pa samim tim mogu proizvesti različite efekte na strukturu koja se ispituje.

Za iznos mere $\mu(S_i)$ posmatranog skupa podataka mogu se koristiti različite vrednosti: maksimum, minimum, suma i devijacija. Za lokalno opisivanje multifraktala uvodi se, tzv. grubi Hölder-ov eksponent [Evertsz and Mandelbrot, 1992]:

$$\alpha_i = -\frac{\ln(\mu(S_i))}{\ln \varepsilon} \quad (3.6)$$

pri čemu je α_i grubi Holderov eksponent podskupa S_i , a njegova granična vrednost, kada $\varepsilon \rightarrow 0$:

$$\alpha = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\alpha_i) \quad (3.7)$$

U izrazu (3.6) uzimaju se u obzir samo oni boksevi koji imaju izmerenu određenu meru, pri čemu se mera može iskazati kao verovatnoća da se izračunata mera nalazi unutar posmatranog boksa. Vrednost parametra α zavisi od položaja u strukturi i opisuje lokalnu regularnost strukture. Takođe, varijacija izmerene mere menja se sa stepenim zakonom (*power law*) u odnosu na promenu dimenzije bokseva [Pavlov and Anishchenko, 2007]:

$$\mu(S_i(\varepsilon)) \approx \varepsilon^{\alpha_i} \quad (3.8)$$

Čest je slučaj da, kada se posmatra čitava struktura podataka, postoji veliki broj podskupova unutar strukture, odnosno tačke u graničnom procesu, gde parametar α ima istu vrednost. Poželjno je utvrditi raspodelu parametra α u celoj strukturi pomoću funkcije $f(\alpha)$ koja se naziva multifraktalni spektar. Spektar je definisan funkcijom $f(\alpha)$, koja prikazuje raspodelu bokseva čiji Hölder-ovi eksponenti imaju vrednost unutar zadatog opsega $\alpha + d\alpha$:

$$f_\varepsilon(\alpha_i) = -\frac{\ln(N_\varepsilon(\alpha_i))}{\ln \varepsilon} \Rightarrow f(\alpha) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} f_\varepsilon(\alpha_i) \quad (3.9)$$

$N_\varepsilon(\alpha_i)$ u izrazu (3.9) predstavlja broj podopsega S_i zadate strukture unutar kojih je izračunata mera vrednosti α_i . Multifraktalni spektar $f(\alpha)$ izračunat na ovaj način predstavlja Hausdorff-ovu dimenziju raspodele α .

Na „box-counting“ metodi je zasnovan metod histograma koji je pogodan u pronalaženju regiona multifraktalnog spektra sa tačno određenim vrednostima parametra α [Ristić, 2016]. Nakon deljenja signala na bokseve dimenzije ε i izračunavanja svih vrednosti α_ε^n za svako ε , utvrđuje se maksimalna i minimalna vrednost eksponenta $\alpha_\varepsilon^{max} = \max_n \alpha_\varepsilon^n$ i $\alpha_\varepsilon^{min} = \min_n \alpha_\varepsilon^n$. Potom se zadati interval $[\alpha_\varepsilon^{min}, \alpha_\varepsilon^{max}]$ podeli na bokseve N i utvrđuje broj N_ε^n intervala I_ε^n čije vrednosti α_ε^n pripadaju i -tom boksu, za $i = 1 \dots N - 1$. Na kraju se multifraktalni spektar određuje kao linearna regresija na $(\log(\varepsilon), \log(N_\varepsilon^i))$. U mnogim radovima je primenjena multifraktalna analiza sa procenom multifraktalnog spektra metodom histograma [Reljin and Reljin, 2002], [Stojic et al., 2006], [Reljin et al., 2006], [Reljin et al., 2008], [Stojic and Reljin, 2010].

Metoda koja daje multifraktalni spektar koji nije konveksnog oblika, i koja pruža više detalja sa manje gubitaka informacija u raspodeli singulariteta jeste metoda velikih devijacija [Vehel, 1996], [Barral and Gonçalves, 2011]. U [Vehel, 1996] je definisan izraz za procenu multifraktalnog spektra metodom velikih devijacija:

$$f_g(\alpha) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log_2 N_n^\varepsilon(\alpha) \quad (3.10)$$

Izrazom (3.10) utvrđuje se broj dijadičkih intervala $N_n^\varepsilon(\alpha)$ koji imaju grubi tačkasti Holderov eksponent koji teži Holderovom eksponentu α sa preciznošću ε , kada rezolucija n teži beskonačnosti.

Metoda velikih devijacija se primenjuje prvenstveno u analizi 1D signala [Broniatowski and Mignot, 1995], [Touchette and Beck, 2005]. Procena multifraktalnog spektra metodom velikih devijacija u analizi slike je vršena u [Abadi and Grandchamp, 2006].

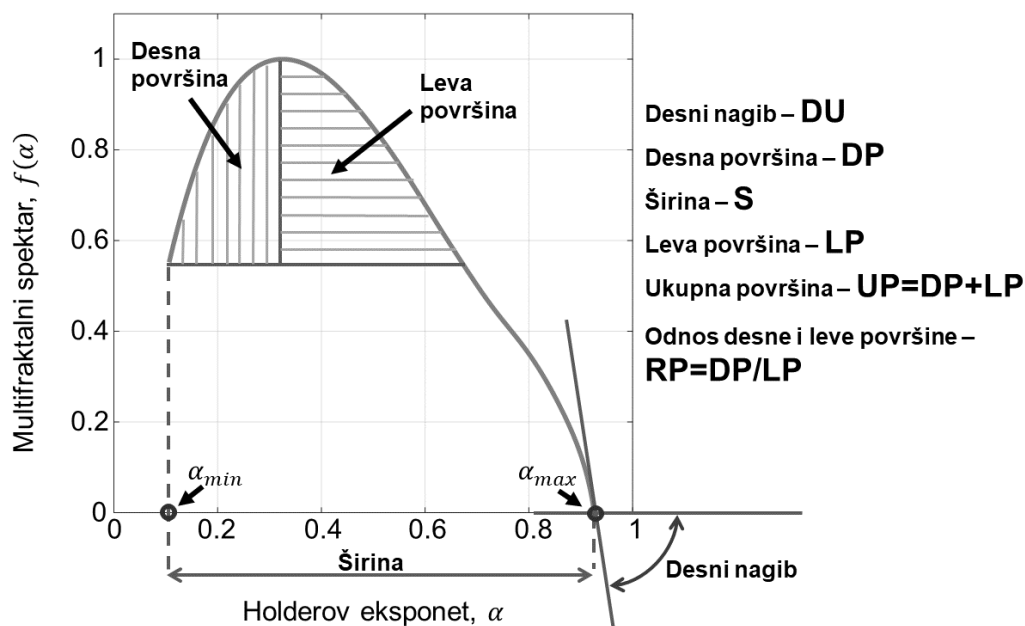
Za opisivanje globalnih karakteristika signala često se koriste globalni multifraktalni parametri koji se izračunavaju iz multifraktalnog spektra velikih devijacija [Vehel, 1996]. Neki od tih parametara su: širina krive multifraktalnog spektra, desni nagib krive multifraktalnog spektra, širina multifraktalnog spektra, desna, leva i ukupna površina, kao i odnos desne i leve površine multifraktalnog spektra. Globalni multifraktalni parametri koji su korišćeni u ovom istraživanju ilustrovani su na slici 3.3, a opisuju sledeća svojstva signala:

Desna površina se iskazuje kroz desni deo širine krive multifraktalnog spektra i njene visine. Desni deo širine ukazuje na ukupni broj singulariteta sa desne strane u odnosu na maksimum, što bi značilo što je manja širina, manje je singulariteta, odnosno nedostaju oni viši singulariteti (fina varijacija nedostaje) i struktura je regularnija. Kada je površina manja to znači da je $f(\alpha)$ koji su tu raspoređeni je manje, pa i verovatnoća raspodele signala po tim singularitetima manja. Zbog toga se koristi i širina, ali i visina krive spektra (završetak pogotovo) koja ulazi u tu površinu. $F(\alpha)$ se posmatra kroz površinu koja je definisana širinom desno od maksimuma krive i visinom krive (površina ispod krive).

Desni nagib pod kojim se završava spektralna kriva sa desne strane ukazuje na to kako se ponaša sistem na krajnjim singularitetima intervala nad kojim je iscrtan spektar. Ti singulariteti predstavljaju najmanje varijacije u čitavom tom sistemu. Najčešće, određene anomalije u signalu koje se mogu okarakterisati kao fine varijacije signala, mogu se posmatrati kroz ugao, koji tangenta na krivu u α_{max} zaklapa sa apcисom, kao što je označeno slici 3.3. Veličina tog ugla se nekada koristi i u klasifikaciji pojava [Gavrovska, 2013], [Zajić, 2014].

Leva površina odgovara velikim varijacijama amplituda signala, a desna površina malim varijacijama. Obe površine, leva i desna, ako su veće, veći je broj singulariteta, samim tim i veća multifraktalnost. U levom delu bi trebalo da se posmatraju nagle relativne promene, u desnom delu fine relativne lokalne varijacije strukture.

Odnos desne i leve površine je mera simetričnosti. Zasebno desni, odnosno levi deo ukazuju na dva potpuno suprotna efekta unutar signala. Ukupna površina ispod krive multifraktalnog spektra ukazuje na generalno multifraktalna svojstva koja poseduje posmatrani signal. Šire krive odgovaraju izrazito multifraktalnim procesima. Što je spektar uži, to je pojava bliža monofraktalnom spektru.



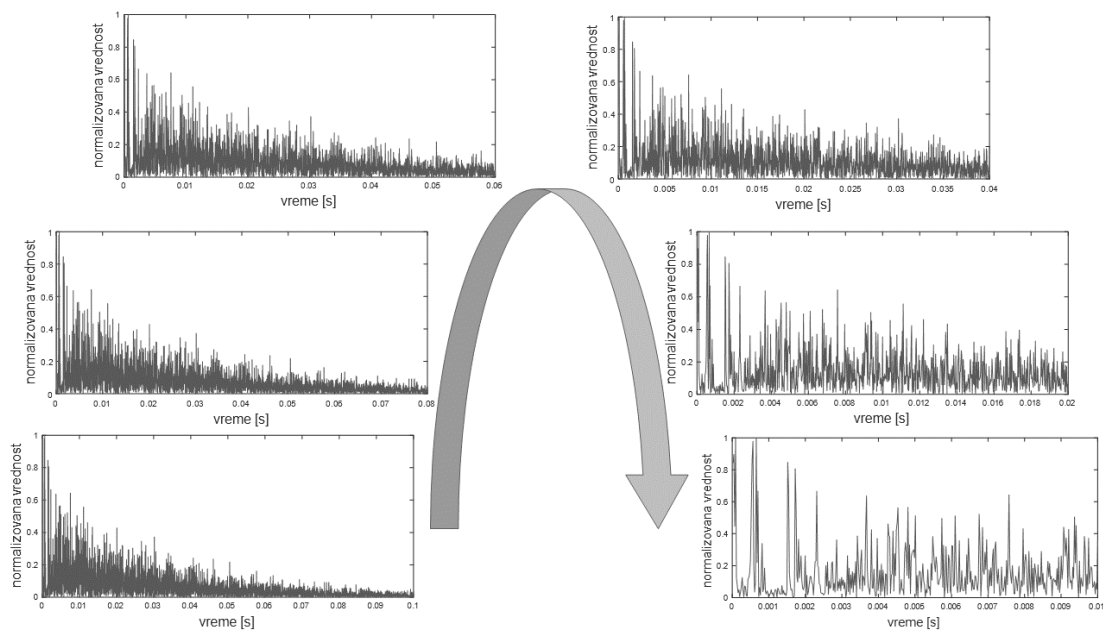
Slika 3.3. Ilustracija globalnih parametara multifraktalnog spektra $f(\alpha)$, za realni impulsni odziv dobijen uz pomoć programa Fraclab, metoda velikih devijacija

3.4. Primena multifraktala u akustici

Lokalna i globalna analiza akustičkog impulsnog odziva prostorija nekom od metoda za izračunavanje multifraktalnih singulariteta, a potom i procene multifraktalnog spektra, predstavlja novinu u domenu akustike.

Signal ne mora da bude „fraktal“ da bi bio efikasno analiziran „fraktalnim metodama“ [Reljin and Reljin, 2002]. Pitanje koje se postavlja, nije da li je impulsni odziv prostorije fraktal, već kakva su lokalna svojstva signala i da li postoji jednostavan, geometrijski ili statistički, globalni opis ovih svojstava uz pomoć fraktala. Drugim rečima, u kojoj meri je moguće primeniti saznanja fraktalne i multifraktalne teorije za analizu impulsnog odziva prostorije.

Osnova za primenu multifraktala u analizi impulsnog odziva prostorije proizilazi iz pretpostavke da je akustički impulsni odziv signal koji poseduje osobinu samosličnosti i predstavlja kompleksnu strukturu koja je posledica nepravilnosti na lokalnom i globalnom nivou, pa kao takva teško da se može opisati tradicionalnom geometrijom. Svojstvo samosličnosti impulsnog odziva je prikazano na slici 3.4. gde je struktura signala impulsnog odziva uvećavana više puta, počev od vremenske dužine signala u trajanju od 1 s, pa sve do 0.1 s.



Slika 3.4. Ilustracija različitih skala uvećanja strukture signala impulsnog odziva u rasponu od 1s do 0.1s

Stepen statističke samosličnosti kod prirodnih objekata i prirodnih pojava ukazuje na variranje fraktalne dimenzije pri različitim skalama uvećanja, što predstavlja potvrdu za moguću multifraktalnu analizu nad tim istim objektima i pojavama, u ovom slučaju nad impulsnim odzivima prostorija. Do ovog zaključka o posedovanju svojstva samosličnosti se dolazi ukoliko se posmatra sam postupak nastanka impulsnog odziva.

Proces formiranja impulsnog odziva je proces beskonačnog kopiranja direktnog zvuka kroz svaku refleksiju koja nastaje pri susretu zvučnog talasa sa zidovima prostorije. Refleksija zvučnih talasa utiče na reflektovane komponente menjajući ih u većoj ili manjoj meri tako da nakon svake refleksije od zidova ili objekata unutar prostorije i superponiranja reflektovanih komponenti sa drugim refleksijama, reflektovane komponente sve manje liče na direktni zvuk. Prve refleksije pokazuju najveći stepen sličnosti sa direktnim zvukom jer su u najmanjoj meri deformisane brojnim odbijanjem o zidove (koja dovode do apsorpcija i skateringa) i maskirane drugim refleksijama. Ova sličnost refleksija sa direktnim zvukom opada sa formiranjem sukcesivnih reflektovanih komponenti u impulsnom odzivu, da bi u reverberacionom delu impulsnog odziva usled velike gustine refleksija ove komponente u potpunosti prestale da budu uočljive.

Posedovanje ovih multifraktalnih karakteristika omogućava da klasifikovanje i kvantifikovanje mera koje opisuju regularnost / neregularnost signala impulsnog odziva i koje sadrže informacije o procesu koji je generiše, bude postignuto multifraktalnom analizom. Lokalne i globalne informacije o strukturi zvučnog polja unutar prostorije, a samim tim i o samoj prostoriji kao zvučnom sistemu prenosa, mogu da se iskažu kroz raspodelu Holderovih eksponenata i multifraktalni spektar. U zavisnosti od cilja istraživanja, multifraktalna analiza se primenjuje na odgovarajući način.

3.5. Analiza zvučnog polja prostorija pomoću multifraktala

Mali broj radova je publikovano na ovu temu do sada. Impulsni odziv prostorija je prvi put okarakterisan kao signal koji poseduje svojstvo samosličnosti u [Loutridis, 2009]. Impulsni odziv se može posmatrati kao multifraktalni signal i

okarakterisati spektrom singularnosti. Loutridis je u tom radu posvetio pažnju analizi difuznog zvučnog polja, (četiri različite konfiguracije difuznog zvučnog polja) u kome refleksije nisu u jakoj korelaciji sa originalnim direktnim zvukom, niti sa ranim refleksijama. Step en korelacije je ugrađen u strukturu zvučnog polja, ali nije trivijalan za identifikaciju. Pokazano je da se uniformnost zvučnog polja u prostoriji može proceniti analizom varijacija položaja multifraktalnog spektra, da je širina spektra naročito direktno povezana sa složenošću strukture impulsnog odziva, odnosno sa njenom difuznošću.

Inicijalno istraživanje o mogućoj primeni multifraktalne analize na kvantifikovanje akustičkih karakteristika impulsnih odziva različitih prostorija je objavljeno u [Pavlovic and Ristic, 2011]. Analizirani su realni impulsi odzivi velikih prostorija (opere, kongresne sale) i njihove karakteristike su opisane posmatranjem oblika multifraktalnog spektra i nekih njegovih globalnih parametara (pozicija maksimuma multifraktalnog spektra α_0 , vrednosti α_{min} i α_{max} u spektru singulariteta, kao i širina spektra $d = \alpha_{max} - \alpha_{min}$). Utvrđeno je da navedeni parametri spektra singulariteta mogu ukazivati na određene „anomalije“ u strukturi impulsnog odziva prostorija. U ovom radu je multifraktalni spektar određen metodom velikih devijacija (*Large deviation*) uz pomoć fraclab softverskog paketa, koji je razvijen od strane INRIA (*Institut national de recherche en informatique et automatique*) [Vehel and Legrand, 2004].

Mogućnost kvantifikovanja pojava u akustici prostorija koje do sada nisu imale zadovoljavajuću meru je eksperimentalno proverena multifraktalnom analizom i u disertaciji [Ristić, 2016]. Multifraktalni spektar je ovog puta računat metodom MFDFA (*Multifractal Detrended Fluctuation Analysis*) i metodom histograma. Pri karakterizaciji tekture primenom multifraktalne analize analizirala se i lokalna i globalna regularnost signala. Potvrdilo se da se kroz multifraktalni spektar mogu izraziti difuznost uspostavljenog zvučnog polja i tekstura impulsnog odziva u prostoriji. Takođe je u [Ristić, 2016] utvrđena mogućnost klasifikovanja prostorija na osnovu tri globalna parametra multifraktalnog spektra (simetričnost, širina i pozicija maksimuma multifraktalnog spektra).

Lokalna regularnost signala impulsnog odziva je analizirana u [Ristić et al., 2013] gde je predložen algoritam za detekciju ranih refleksija u impulsnom odzivu primenom multifraktalne analize, zasnovane na „*box-counting*“ metodi i histogram metodi za izračunavanje multifraktalnog spektra. U ovom radu je upotrebljen inverzan metod čija suština jeste da na osnovu selektovanog opsega vrednosti Hölder-ovih eksponenata $\alpha_{d2}-\alpha_{d1}$ iz ukupnog opsega raspodele Hölder-ovih eksponenata, ustanovi koji delovi signala su odgovorni za formiranje tog selektovanog opsega vrednosti parametra α . Polazeći od pretpostavke da visoke vrednosti parametra Hölder-ovog eksponenta α ukazuju na lokalne relativno visoke promene signala u impulsnom odzivu, koje bi mogle odgovarati koherentnim ranim refleksijama, autori su težili selekciji i izdvajanju upravo tih visokih vrednosti parametra α . Efikasnost algoritma je proverena ubacivanjem kontrolne refleksije (kopija direktnog zvuka) na određenim vremenskim pozicijama u impulsnom odzivu signala i sa određenim koracima slabljenja, a potom utvrđivanjem da li je predloženim algoritmom ubačena kontrolna refleksija detektovana ili ne. Takođe treba napomenuti da je u ovom radu detekcija ranih refleksija vršena multifraktalnom analizom nad impulsnim odzivom prostorija u 1D domenu.

Detekcija ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorija primenom multifraktalne analize u 2D domenu je predstavljena u [Pavlović et al., 2016]. Izračunavanje Hölder-ovih vrednosti je vršeno 2D „*box-counting*“ metodom nad slikom spektograma impulsnog odziva prostorija. Rezultat je slika vrednosti parametara α nad kojom se potom primenjuje inverzna metoda izdvajanja opsega vrednosti parametra α koji ukazuje na relativno visoke vremenske promene vrednosti piksela slike spektograma u širem frekvencijskom opsegu, što bi odgovaralo jakim ranim refleksijama u impulsnom odzivu. Efikasnost algoritma u ovom radu je proverena na sličan način kao i u [Ristić et al., 2013]. Algoritam predložen u ovom radu daje mogućnost analize lokalne regularnosti signala u dva domena, vremenskom i frekvencijskom domenu, što dalje pomaže preciznijoj detekciji željenih refleksija.

U ovom istraživanju detekcija lokalnih događaja u signalu impulsnog odziva, tj. detekcija ranih refleksija, biće realizovana izračunavanjem lokalnih Hölder-ovih

eksponenata metodom „*box-counting*“ u 1D i u 2D domenu, a potom njihovom segmentacijom radi boljeg izdvajanja relevantnih vrednosti α koje ukazuju na refleksije od značaja. Nasuprot tome, procena granice ranog dela u impulsnom odzivu prostorija, kao i klasifikacija impulsnih odziva prostorija, biće izvršena na osnovu globalnih opisa signala, multifraktalnog spektra dobijenog metodom velikih devijacija i njegovih izvedenih globalnih parametara.

4. Postupci analize zvučnog polja

Iz impulsnog odziva se mogu izvući gotovo svi parametri potrebni za opisivanje zvučne slike u prostoriji i utvrđivanje objektivnih karakteristika akustičnosti prostorije. Treba imati u vidu da je struktura realnog impulsnog odziva jako složena usled postojanja velikog broja refleksija i da je teško utvrditi uticaj pojedinih refleksija u impulsnom odzivu na subjektivni doživljaj zvuka, zato što na subjektivni doživljaj zvuka usled prisustva jedne pojedinačne refleksije u odzivu utiče i prisustvo velikog broja drugih lokalnih refleksija u istom odzivu. Iz praktičnih razloga bilo bi dobro utvrditi da li je moguće detektovati pojedinačnu refleksiju u izmerenom impulsnom odzivu i utvrditi u kojoj meri ona ima uticaja na formiranje zvučne slike kod slušaoca, kako bi se potom ta ista refleksija uklonila ili potisnula odgovarajućim merama. Od posebnog značaja su refleksije iz ranog dela impulsnog odziva koje u dobroj meri učestvuju u formiranju zvučne slike i utiču na brojne parametre subjektivnog doživljaja, opisane u Poglavlju 2.5.

Jedna od prvih metoda za detekciju vremenskih položaja refleksija od značaja u impulsnom odzivu jeste metoda kojom se analizira energetska kriva. Reflektogram ili ehogram je jedan vid grafičkog prikaza impulsnog odziva za vizualnu analizu strukture, odnosno teksture impulsnog odziva [Kuttruff 2009]. Na osnovu vizualnog uvida u reflektogram impulsnog odziva, iskusni akustičari mogu izvući dosta informacija o akustičkim prednostima i nedostacima prostorije u kojoj je impulsni odziv snimljen.

Teksturu impulsnog odziva prostorije određuje raspodela pristiglih refleksija na mestu prijema i njihovih karakteristika, u smislu intenziteta svake refleksije u njoj, njihove vremenske raspodele, gustine raspodele i pravca nailaska. Tekstura impulsnog odziva definiše na neki način subjektivnu impresiju slušalaca [Beranek, 2003]. Tekstura impulsnog odziva se smatra dobrom ukoliko je sačinjena od dovoljno velikog broja ranih refleksija koje imaju uniformnu raspodelu, koje nisu previše međusobno razmaknute i gde se ni jedna refleksija ne ističe svojom amplitudom [Beranek, 2004], [Hidaka and Beranek, 2000], [Hidaka and Nishihira, 2002], [Kuttruff, 2009]. Jedno od pitanja koje se može

nametnuti, a čiji odgovor se krije u reflektogramu, jeste u kojoj meri je direktni zvuk podržan ranim refleksijama i kakva je njihova raspodela u vremenu. Zatim, treba imati u vidu jake i izolovane refleksije koje su dovoljno zakašnjene u odnosu na direktni zvuk mogu uticati na negativnu pojavu eha.

Uvedena je matematička procedura za kreiranje anvelope nad impulsnim odzivom, tzv. funkcija anvelope [Kuttruff, 2009]. Ukoliko je $s(t)$ signal impulsnog odziva, onda je anvelopa $e(t)$ definisana izrazom:

$$e(t) = \sqrt{[s(t)]^2 + [\check{s}(t)]^2} \quad (4.1)$$

gde $\check{s}(t)$ predstavlja Hilbertovu transformaciju signala $s(t)$:

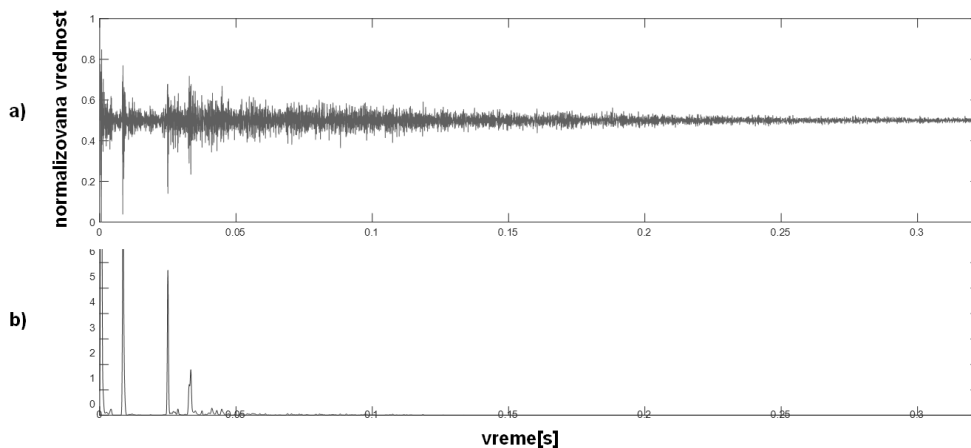
$$\check{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(t-t')}{t'} dt' \quad (4.2)$$

Najpogodniji način za izračunavanje Hilbertove transformacije jeste korišćenje spektralnih karakteristika signala. Ako je $S(f)$ rezultat Furijerove transformacije signala $s(t)$, onda Furijerova transformacija $\check{S}(f)$ signala $\check{s}(t)$ glasi:

$$\check{S}(f) = -iS(f)\text{sign}(f) = \begin{cases} -iS(f), & \text{za } f > 0 \\ iS(f), & \text{za } f < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Nakon modifikacije spektralne funkcije S , ponovnim vraćanjem u vremenski domen dobija se Hilbertova transformacija signala $\check{s}(t)$. Postoje još efikasnih metoda za izračunavanje Hilbertove transformacije u vremenskom domenu.

Na slici 4.1 prikazan je modifikovan reflektogram dobijen kvadriranjem envelope impulsnog odziva $[e(t)]^2$ iz koje se sada mogu izvući karakteristike od značaja. Ispitivanje reflektograma može biti olakšano njegovim „ispravljanjem i peglanjem“, tj. vremenskim usrednjavanjem, čime se uklanjaju nevažni ili manje bitni detalji. Vremenski koeficijent koji se tom prilikom koristi može imati različite vrednosti u zavisnosti od toga da li se želi zanemariti više ili manje detalja. Korigovanje reflektograma usrednjavanjem krive se simulira integraciono svojstvo čula sluha.



Slika 4.1. a) Prikaz normalizovanog impulsnog odiva i b) Njena kvadrirana anvelopa

Iz tog razloga se nad krivom reflektograma vrši konvolucija sa $\exp(t/\tau)$ pri čemu je τ vremenska konstanta od oko 25ms. Iako se sa prikaza reflektograma ili modifikovane krive reflektograma mogu sugestivno izvući neki zaključci, ipak ne može se sa sigurnošću tvrditi da li neka posmatrana refleksija doprinosi određenom subjektivnom doživljaju, recimo pojavi eha.

4.1. Modelovanje direktnog zvuka i ranih refleksija

Modelovanje direktnog zvuka i ranih refleksija „*image modeling*“ metodom je opisano u radovima [Allen and Berkley, 1979] i [Borish, 1984]. Autori u [Olive and Toole, 1989] su istakli da dobro poznata i prihvaćena metoda ETC (*Energy Time Curve*) merenja refleksija impulsnog odziva može uvesti greške u prikazu reflektovanog zvučnog polja u zavisnosti od načina kako je primenjena. Naime, amplitude zvučnih događaja dobijene ETC merenjem mogu da ne odgovaraju tačnom prikazu nivoa spektra signala na svim učestanostima. U radu je ukazano na problem primene Hamingovog (*Hamming*) prozora pri frekvencijskom filtriranju signala i potiskivanjem spektra na niskim i visokim učestanostima, jer to dalje doprinosi promeni u ETC izračunavanju krive impulsnog odziva. Autori su analizirali kako greške koje proističu iz ETC merenja usled promene frekvencijskog odziva signala utiču na zvučne efekte reflektovanog zvuka. Konstatovano je da su greške minimalne u situaciji kada su spektri direktnog zvuka i refleksije signala koji se porede identični.

4.2. Postupci za detekciju refleksija

4.2.1. Metoda analize reflektograma i uvođenje pragova

U analizi reflektograma, detekcija refleksija se svodi na definisanje praga percepcije, a potom lociranje vrhova reflektograma koji prelaze dati prag. Uvođenjem praga percepcije uprošćava se razmatranje strukture impulsnog odziva, budući da postoji veliki broj refleksija nivoa od 0 do -25dB u odnosu na direktni zvuk. Ovom metodom se izdvajaju samo informacije vezane za intenzitet refleksija, što predstavlja i njen glavni nedostatak.

U [Hidaka and Nishihira, 2002] funkcija anvelope je računata nad monauralnim impulsnim odzivom koji je prethodno ograničen frekvencijskim opsegom od 353Hz do 2.8kHz. Takođe je za potrebe analize predložen opseg od 0 do -25dB. Predložena metoda je primenjena nad impulsnim odzivima operskih sala koje su prethodno opisane, akustički ocenjene i rangirane u [Hidaka and Beranek, 2000]. Autori u [Hidaka and Nishihira, 2002] su uspeli da detektuju više od 17 pojedinačnih refleksija kod najbolje akustički rangiranih operskih sala, 10 do 16 pojedinačnih refleksija kod srednje akustički rangiranih operskih sala i manje od 10 pojedinačnih refleksija kod najlošije akustički ocenjenih operskih sala.

U radu [Hidaka et al., 2007], ranim refleksijama u impulsnom odzivu se smatraju sve one refleksije čije amplitude su veće od -20dB relativno u odnosu na direktni zvuk u impulsnom odzivu. Autori su u impulsnim odzivima 35 različitih sala za muzičko izvođenje izbrojali rane refleksije po navedenom kriterijumu u svakom impulsnom odzivu i dobili numeričke vrednosti od ~10 do ~100.

4.2.2. Metoda adaptivnih pragova

Kaster [Kuster, 2008] je, proučavajući procenu zapremine i geometrije prostorije na osnovu analize vremenske strukture reflektograma impulsnog odziva, predložio metod za detekciju i izdvajanje značajnih lateralnih refleksija iz reflektograma filtriranjem reflektograma lokalnom primenom adaptivnih pragova. Predloženo je izračunavanje srednje vrednosti relativnih nivoa refleksija unutar

zadatih vremenskih prozora (u radu je korišćena dužina prozora od 2ms), a potom se posmatra da li se neki odmerak refleksije u datom prozoru ističe i nadmašuje prethodno izračunatu srednju vrednost sa određenim težinskim faktorom (u radu se predlaže koeficijent=2). Ako se predloženi kriterijum zadovolji, smatra se da je time detektovana refleksija od značaja. U [Kuster 2008] se zaključuje da je metoda nepouzdana i da se ne može uniformno primeniti na sve impulsne odzive. Tačnost (poklapanje detektovanih refleksija ovom metodom i vremenskim pozicijama stvarnih bočnih refleksija od značaja) varira oko 50% i u proseku broj tačno detektovanih refleksija se kreće oko 5-10 u prvih 30ms.

4.2.3. Metoda korelacije

Metoda detekcije refleksija koja uključuje ispitivanje stepena korelacije između refleksije i direktnog zvuka je publikovano prvi put u [Noxon 1992]. Definisane su tri oblasti u impulsnom odzivu: 1) oblast neposredno nakon direktnog zvuka, prvih nekoliko ms. U toj oblasti refleksije utiču na lokalizaciju zvučnog izvora; 2) oblast 30-50ms koja utiče na prepoznavanje tonova; 3) oblast nakon 60ms u kojoj refleksije mogu biti odgovorne za eho i ambijent. Utvrđeno je da stepen korelacije refleksije i direktnog zvuka kao mera njihove sličnosti može u velikoj meri da utiče na percepciju analizirane refleksije u svakoj od prethodno navedene tri oblasti. Ovaj rad se bavio detekcijom samo jedne dominantne refleksije.

U radu [Defrance et al. 2008] analizirana je direktna komponenta impulsnog odziva za pretragu podudarnosti jer se pretpostavlja da postoji visok stepen korelacije između direktnog zvuka i impulsnog odziva. Impulsni odziv se predstavlja kao superpozicija velikog broja kopija direktnog zvuka, filtriranih u refleksijama od površina. Kao problem se pokazala činjenica da refleksije menjaju oblik nakon svakog njihovog reflektovanja od površine i da se kao takve sve teže mogu detektovati ovom metodom. Zbog toga su u radovima [Kelly and Boland, 2014], [Guillemain et al., 1996] ponuđene modifikovane verzije metode korelacije u detekciji refleksija, tako što je menjan oblik direktne komponente u vremenu i time postignuta bolja detekcija bitnih refleksija u odzivu, a smanjen broj sporednih.

4.2.4. Metoda wavelet transformacije

U više istraživanja je vršena detekcija refleksija u impulsnom odzivu prostorije korišćenjem wavelet transformacije. Iskorišćena je činjenica da kontinualna wavelet transformacija (CWT) ima osobinu da važne informacije o signalu grupiše u odgovarajuće regione. Tako su kompleksni *wavelet*-i iskorišćeni za dekompoziciju impulsnih odziva u radovima [Loutridis, 2005] i [Schönle et al., 1993].

Prostorne refleksije određenog stepena difuznosti iz prostorno-vremenske strukture impulsnog odziva su detektovane korišćenjem kontinualne wavelet transformacije iz familije *Daubechies wavelet*-a [Daubechies, 1992] u [Jeon and Imran, 2013]. Wavelet transformacija kao alternativa tradicionalnim tehnikama frekvencijske analize impulsnog odziva je predložena za analizu refleksija u [Belanger, 2005].

4.2.5. 2D pristup u detektovanju ranih refleksija

U publikovanom radu [Vesa and Lokki, 2006] je vremenska detekcija refleksija u binauralnom impulsnom odzivu vršena u 2D domenu primenom *cross-wavelet* transformacije (*XWT-cross-wavelet transform*). Ovaj rad koristi kontinualnu *cross-wavelet* transformaciju (XWT), zato što je akcenat u ovom radu bio na analizi binauralnog impulsnog odziva i postojanja korelacije dva vremenska signala, tj. levog i desnog kanala signala binauralnog impulsnog odziva. 2D domen se ogleda u analizi cross-spektrograma (rezultat dve kontinualne wavelet transformacije, transformacije levog i desnog kanalnog binauralnog signala) u domenu vremena i skala/frekvencija. Od waveleta, korišćeni su Morlet wavelet i Paul wavelet, uz konstataciju da Paul wavelet ima bolju vremensku, a lošiju frekvencijsku rezoluciju u odnosu na Morlet wavelet. Konstatovano je da najveće skale daju najlošije informacije o vremenskim pozicijama refleksija i zbog toga je korišćen samo opseg skala [2,64], što bi odgovaralo opsegu frekvencija 494-15800Hz kada je u pitanju Paul wavelet, odnosno 667-21300Hz kada je u pitanju Morlet wavelet. Dodatno procesiranje nad lokalnim maksimumima energije po skalama (sumiranje lokalnih maksimuma

po skalama i određivanje njihove maksimalne vrednosti duž skala) je izvršeno radi tačnijeg utvrđivanja vremenskih pozicija refleksija u odzivu. Predložena metoda u ovom radu je vršena nad izmerenim realnim impulsnim odzivima kao i veštački generisanim binauralnim impulsnim odzivima. Vremenski prozor posmatranja i detekcije refleksije obuhvata prvih 30ms nakon pojave direktnog zvuka u odzivu. U analizi realnog odziva, detekcija refleksija predloženom metodom se pokazala tačnim samo nad refleksijama prvog i drugog stepena. Autori smatraju da je razlog tome nedostatak informacija o tačnim pozicijama svih refleksija u izmerenom realnom odzivu čime bi se tačnost predložene metode mogla porediti. S druge strane, kada je predložena metoda testirana nad veštački generisanim impulsnim odzivima pokazala se tačnim nad gotovo svim modelovanim refleksijama u odzivu. U radu je primenjen parametar srednja kvadratna greška za utvrđivanje odstupanja rezultata detekcije refleksija od njihovih stvarnih vremenskih položaja i utvrđeno je da je ona uvek manja od 1ms.

U radovima [Vesa and Lokki, 2010] i [Vesa, 2009] se otišlo dalje sa opisanim istraživanjem u detektovanju refleksija binauralnog impulsnog odziva u 2D domenu, gde je ovog puta segmentirana slika cross-spektrograma standardnim alatima za obradu slike („watershed“ algoritam za segmentaciju slike) i izdvojeni regioni spektralne gustine snage u vremenskom i frekvencijskom domenu koji odgovaraju jakim refleksijama u binauralnom impulsnom odzivu. Tačnost izdvajanja regiona je pokazana samo u prvom delu impulsnom odzivu do isteka „mixing time“ nakon čega zvučno polje postaje manje više difuzno i gde se refleksije preklapaju i po vremenu i po frekvenciji, zbog čega ih je teško detektovati. Vesa je u svojoj doktorskoj tezi [Vesa, 2009] predložio metodu za utvrđivanje smera nailaska refleksija binauralnog impulsnog odziva na mesto prijema.

U radu [Gover et al., 2004] je analizirano utvrđivanje smera nailaska refleksija impulsnog odziva na mesto prijema, ali takođe i lociranje refleksija u vremenu i po frekvencijama. U [Roman and Woodruff, 2013] su detektovane rane refleksije metodom idealnog binarnog maskiranja, tako što je za zadati prag odnosa signal/šum (pri čemu se rane refleksije posmatraju kao korisni signal) u

vremensko-frekvencijskom prikazu impulsnog odziva izdvajani regioni ranih refleksija.

4.3. Postupci utvrđivanja oblasti ranog dela impulsnog odziva

4.3.1. Vremenska tranzicija, *mixing time*

U radu [Jeong et al., 2010] je akcenat dat na utvrđivanju vremena tranzicije u impulsnom odzivu. Autori su iskoristili aktuelnu temu u akustici prostorija koja se bavi analizom uslova pod kojima su diskretne refleksije u impulsnom odzivu čujno prepoznatljive i kada njihova percepcija nestaje. U radu je predložen parametar, vreme tranzicije t_{trans} , koji se interpretira kao vreme koje protekne od trenutka nailaska direktnog zvuka do trenutka nakon čega dolazi do velikog preklapanja refleksija i nemogućnosti posmatranja pojedinačnih refleksija kao diskretnih komponenti. Po isteku predloženog vremena tranzicije, anvelopa impulsnog odziva postaje važnija za analizu impulsnog odziva od samih detalja odziva.

Razlika u odnosu na prethodne radove koji su se bavili istom temom, jeste ta da se u ovom radu analizira uticaj apsorpcije signala u prostoriji na dužinu vremena tranzicije. Pri vršenju eksperimenta u ovom radu pretpostavljeno je da je apsorpcija uniformno raspoređena u prostoriji i nisu razmatrane pojave sketeringa, difuznosti i difrakcije. Vreme tranzicije se definiše ovde kao vreme koje protekne od trenutka nailaska direktnog zvuka do trenutka kada refleksije počinju da se preklapaju u tolikoj meri da je posmatranje anvelope impulsnog odziva bitnije od posmatranja njene detaljne strukture. Utvrđeno je da ako su ove pretpostavke ispunjene, vreme tranzicije odgovara petostrukom preklapanju refleksija, što obuhvata 25 do 35 refleksija u slučaju studija. U slučaju auditorijuma, vreme tranzicije je kraće i odgovara broju od 10 refleksija. Kada se govori o ovoj problematici, većina autora se u svojim radovima bavila analizom u vremenskom domenu da li je neka refleksija kao diskretna komponenta u određenom vremenskom trenutku čujna, ili ne. Nakon nailaska direktne komponente u impulsnom odzivu prostorije i nakon isteka određenog vremena, gustina detektovanih refleksija postaje toliko velika da ljudsko uvo više nije u

stanju da čujno razlikuje dve uzastopne refleksije zbog svog fiziološkog ograničenja u domenu vremenske rezolucije.

U radovima poput [Jot et al., 1997] i [Polack, 1993], za utvrđivanje vreme tranzicije uzimani su u obzir dodatni parametri koji opisuju prostoriju u kome je snimljen impulsni odziv kao što je njena zapremina, pa je predložen obrazac $t_{mixing} \approx \sqrt{V}$. U mnogim publikovanim radovima ovaj geometrijski parametar prostorija se ne razmatra već je za vreme tranzicije uzet konkretan vremenski trenutak od 80ms nakon nailaska direktnog zvuka.

4.3.2. Upotreba statističkih parametara u određivanju ranog dela impulsnog odziva

Granica između ranog dela impulsnog odziva i kasne reverberacije je predmet analize i u publikovanom radu [Stewart and Sandler, 2007]. U njemu su objašnjena statistička merenja i primena statističkih parametara: standardna devijacija i kurtosis za utvrđivanje vremenske oblasti u impulsnom odzivu gde se zona ranih refleksija (deterministički model odziva) postepeno (gradijentno) završava i počinje zona reverberacije (stohastički model odziva). Autori u [Stewart and Sandler, 2007] su istraživali sličnost između oblasti kasne reverberacije i Gausovog šuma, s obzirom da Gausov šum nije karakterističan za oblast ranih refleksija. Utvrdili su da primena kurtosisa za razliku od standardne devijacije, daje jasan uvid u vreme prelaska oblasti ranih refleksija u oblast kasne reverberacije, ali da je vremenski trenutak tranzicije dobijen na ovaj način znatno kraći od vremena tranzicije izračunatog korišćenjem geometrijskog parametra zapremine u prethodnim radovima. Tako na primer, u [Stewart and Sandler, 2007] je navedena sala, za koju je vreme tranzicije izračunato na osnovu zapremine $t_{mixing} = 60ms$, dok je vreme tranzicije te iste sale izračunato na osnovu kurtosisa $t_{mixing} = 19ms$.

4.3.3. Upotreba korelacije u određivanju ranog dela impulsnog odziva

Autori su u [Hidaka et al., 2007] vreme tranzicije t_L utvrdili na osnovu stepena korelacije koji je računat između energije direktnog zvuka u impulsnom

odzivu prostorije (energije u vremenskom trenutku $t = 0s$) i energije u ostalim vremenskim tačkama istog impulsnog odziva:

$$\rho(t) = \langle E(0, \omega) E(t, \omega) \rangle_{\omega} \quad (4.4)$$

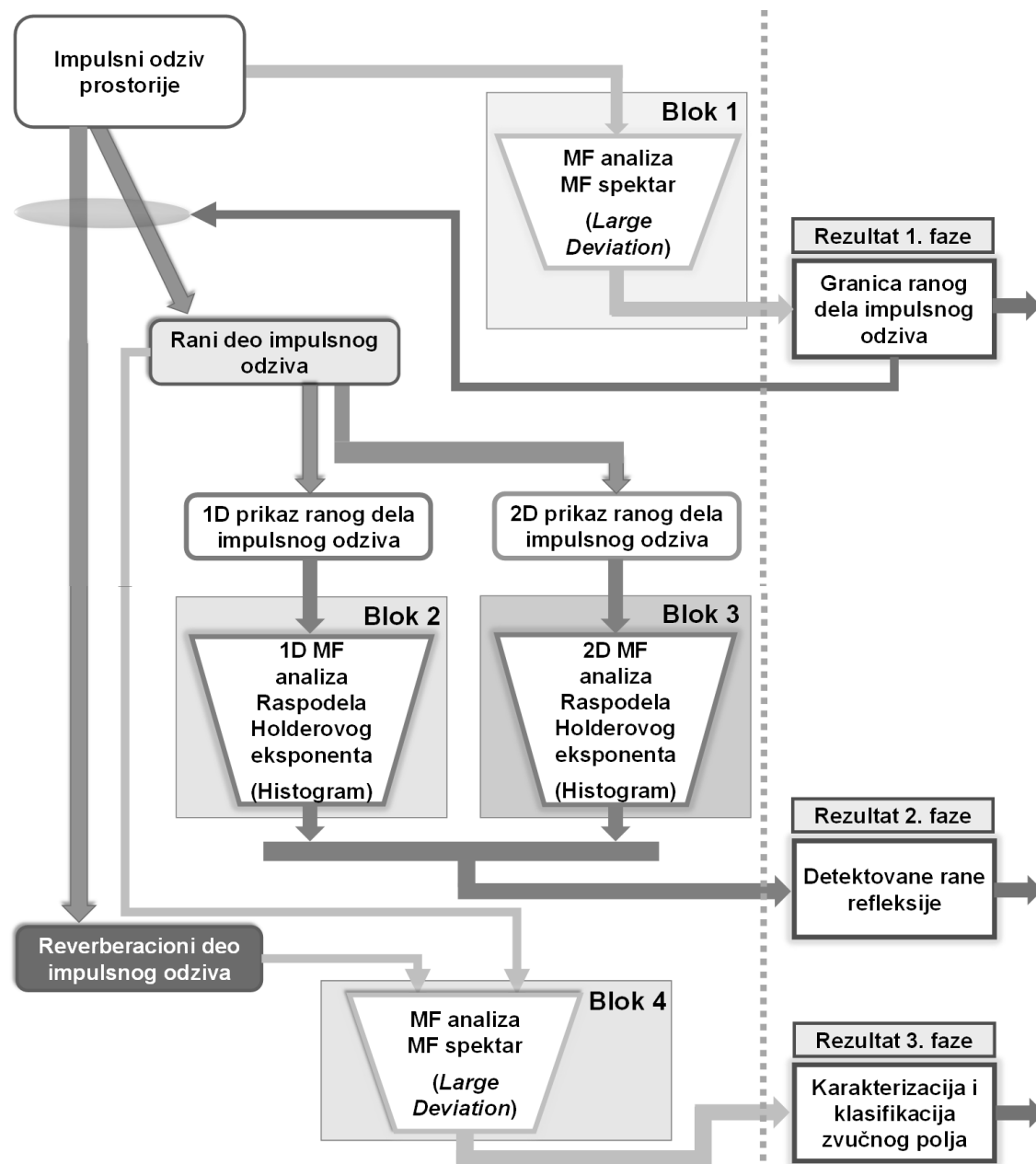
Nakon utvrđene vremenske raspodele skaliranih vrednosti korelisanosti energija u trenucima $t = 0s$ i $t = \tau$ ($\tau > 0$), utvrđen je prag koji u vremenskom domenu deli impulsni odziv na oblast sa visokim vrednostima korelacione funkcije energija (što odgovara ranom delu impulsnog odziva) i oblasti niskih vrednosti korelacione funkcije energija (preostali deo impulsnog odziva). Za vrednost praga u [Hidaka et al., 2007] je predložena vrednost stepena korelacije $\rho(t) = 1/e = 0.367$. Eksperiment je izvršen nad 35 impulsnih odziva različitih sala za izvođenje muzike. Pokazano je da su za utvrđeni prag funkcije korelisanosti, dobijena vremena tranzicije t_L u impulsnim odzivima testiranih sala između 100ms i 400ms. Takođe je pokazana zavisnost izračunatog t_L od geometrijskog oblika sale. Pokazano je da je vreme t_L duže u pravougaonim salama sa samo jednom visoko apsorpcionom površinom (površina auditorijuma). Za klasično vreme tranzicije od $t_L = 80ms$, prag korelisanosti je $\rho(t_L = 80ms) = 0.65$.

5. Predložene metode u postupku karakterizacije zvučnog polja

Blok šema koja prikazuje predložene metode za karakterizaciju zvučnog polja, korišćene u disertaciji, i koja obuhvata sve faze istraživanja, prikazana je na slici 5.1. Radi lakšeg razumevanja, metodologija je opisana kroz blokove 1, 2, 3 i 4, pri čemu svaki blok predstavlja jedan segment istraživanja.

Istraživanje koje je realizovano i koje se predstavlja u ovoj disertaciji, može se sagledati kroz tri faze: A) prva faza predstavlja analizu impulsnog odziva multifraktalima i utvrđivanje granice između oblasti ranih refleksija i oblasti reverberacije u vremenskoj strukturi impulsnog odziva, blok 1; B) druga faza istraživanja obuhvata detekciju ranih refleksija od značaja u prethodno utvrđenoj oblasti ranih refleksija, blokovi 2 i 3; C) poslednja treća faza istraživanja se odnosi na klasifikaciju impulsnih odziva prostorija na osnovu analize globalnih parametara multifraktalnog spektra posmatranih impulsnih odziva, blok 4.

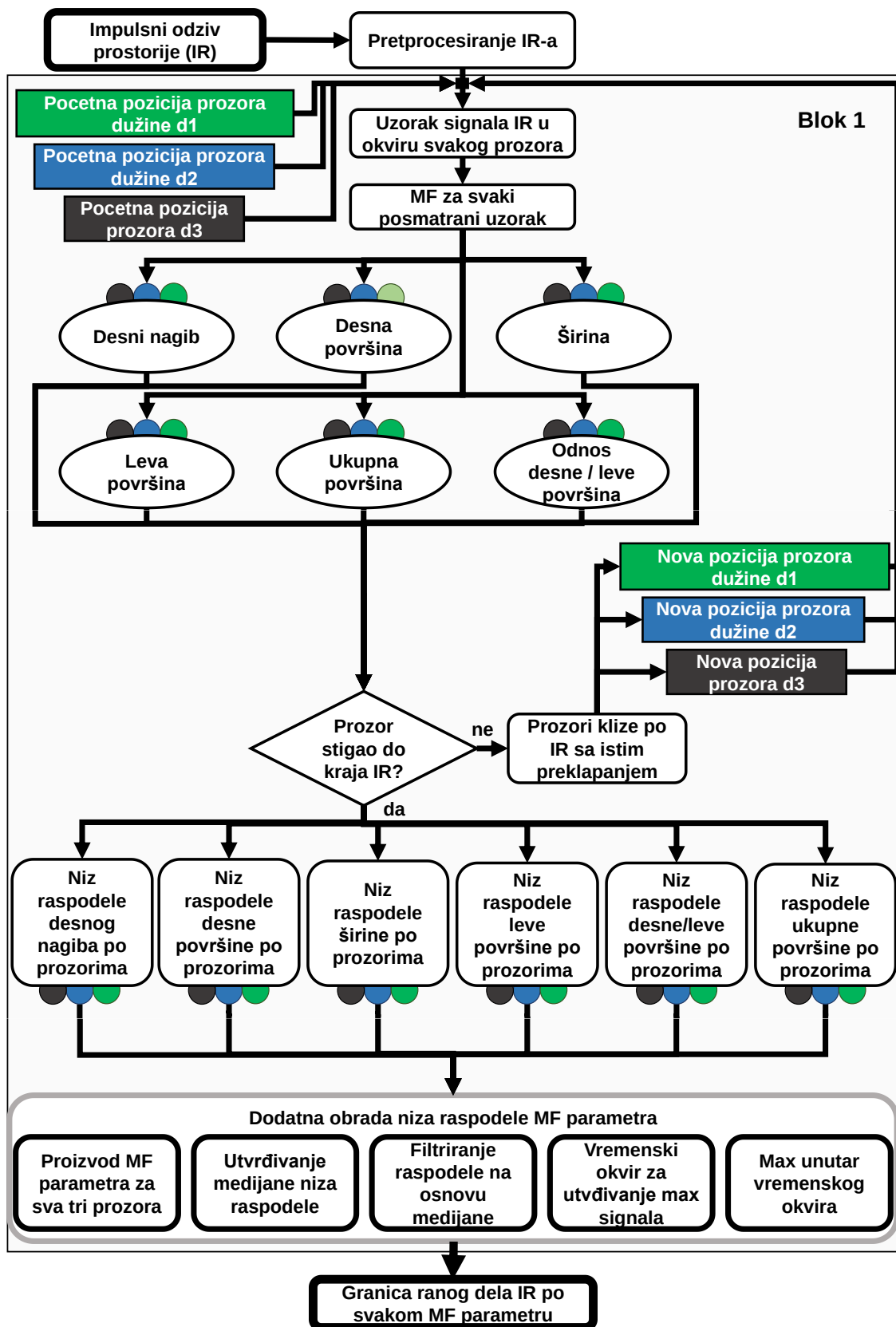
U nastavku ovog poglavlja biće detaljno opisana metoda prikazana na Sl. 5.1. kao i svi korišćeni algoritmi, Celokupan algoritam je realizovan u Matlabu.



Slika 5.1. Blok šema metodologije korišćenje u postupcima detekcije oblasti ranih refleksija, detekcije refleksija i klasifikacije impulsnog odziva prostorija na osnovu multifraktalne analize

5.1. Detekcija granice ranih refleksija

Prva faza istraživanja obuhvata razvoj postupka za utvrđivanje granice između ranog i reverberacionog dela impulsnih odziva prostorija pomoću multifraktalne analize. Detaljan pregled algoritma koji je obuhvaćen Blokom 1 sa Sl. 5.1. je dat na slici 5.2.



Slika 5.2. Blok šema postupka utvrđivanja oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorija

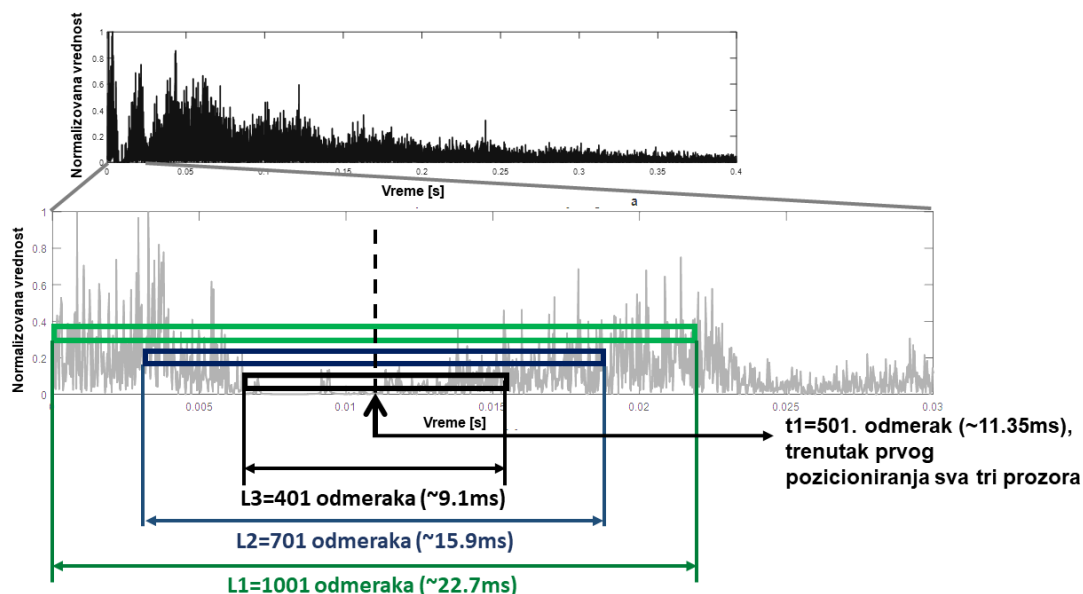
Predložena metoda utvrđuje korelaciju između izračunatih globalnih parametara multifraktalnog spektra impulsnog odziva i postojanja granice između oblasti ranih refleksija i reverberacije u impulsnom odzivu prostorije. Impulсни odzivi prostorija koji su korišćeni u ovom istraživanju su najpre normalizovani u opsegu od 0 do 1 sa srednjom vrednošću 0.5, kada su posmatrani kao bipolarни signali tokom analize, odnosno u opsegu od 0 do 1 kada su posmatrani kao unipolarni signali (apsolutna vrednost bipolarноg prikaza). Za vremenski početak svakog impulsnog odziva je određen trenutak nailaska direktnog zvuka u prijemnu tačku. Tako pretprocesiran impulсни odziv je spreman za analizu u okviru bloka 1 prikazanog na Slici 5.2.

5.1.1. Formiranje niza globalnih parametara multifraktalnog spektra

U ovoj fazi istraživanja multifraktalna analiza se ne vrši nad celim signalom impulsnog odziva, već se iterativno analiziraju delovi signala impulsnog odziva pomoću multifraktala, a potom prate promene vrednosti izračunatih globalnih parametara iz multifraktalnog spektra u zavisnosti od promene analiziranih uzoraka signala impulsnog odziva. Na ovaj način, uvidom u raspodele promene globalnih parametara se mogu posmatrati lokalne promene u impulsnom odzivu. Posmatrani delovi signala su izdvajani prozorima odgovarajućih dužina. Tačnije, korišćena su tri prozora, dužina: $L1 = 1001 \text{ odmeraka} \rightarrow \sim 22.7ms$, $L2 = 701 \text{ odmeraka} \rightarrow \sim 15.9ms$ i $L3 = 401 \text{ odmeraka} \rightarrow \sim 9.1ms$. Vremenske dužine prozora su određene u odnosu na broj odmeraka i učestanosti odmeravanja pri snimanju impulsnog odziva od $F_s = 44100Hz$. Korišćenje tri prozora različitih dužina za selekciju uzoraka impulsnog odziva nad kojima se potom izračunavaju multifraktalni spektri je učinjeno iz razloga kako bi se postiglo preciznije detektovanje željenih promena u signalu i potvrdila njihova tačnost. Na slici 5.3 je prikazan postupak odabira uzorka impulsnog odziva pomoću tri prozora različitih dužina.

Nad svakim izdvojenim delom signala impulsnog odziva, primenjena je multifraktalna analiza i izračunat multifraktalni spektar, ilustrovano na slici 5.4. Za formiranje multifraktalnog spektra izabrana je metoda velikih devijacija, jer se tom metodom može dobiti mnogo više detalja i informacija o raspodeli singulariteta.

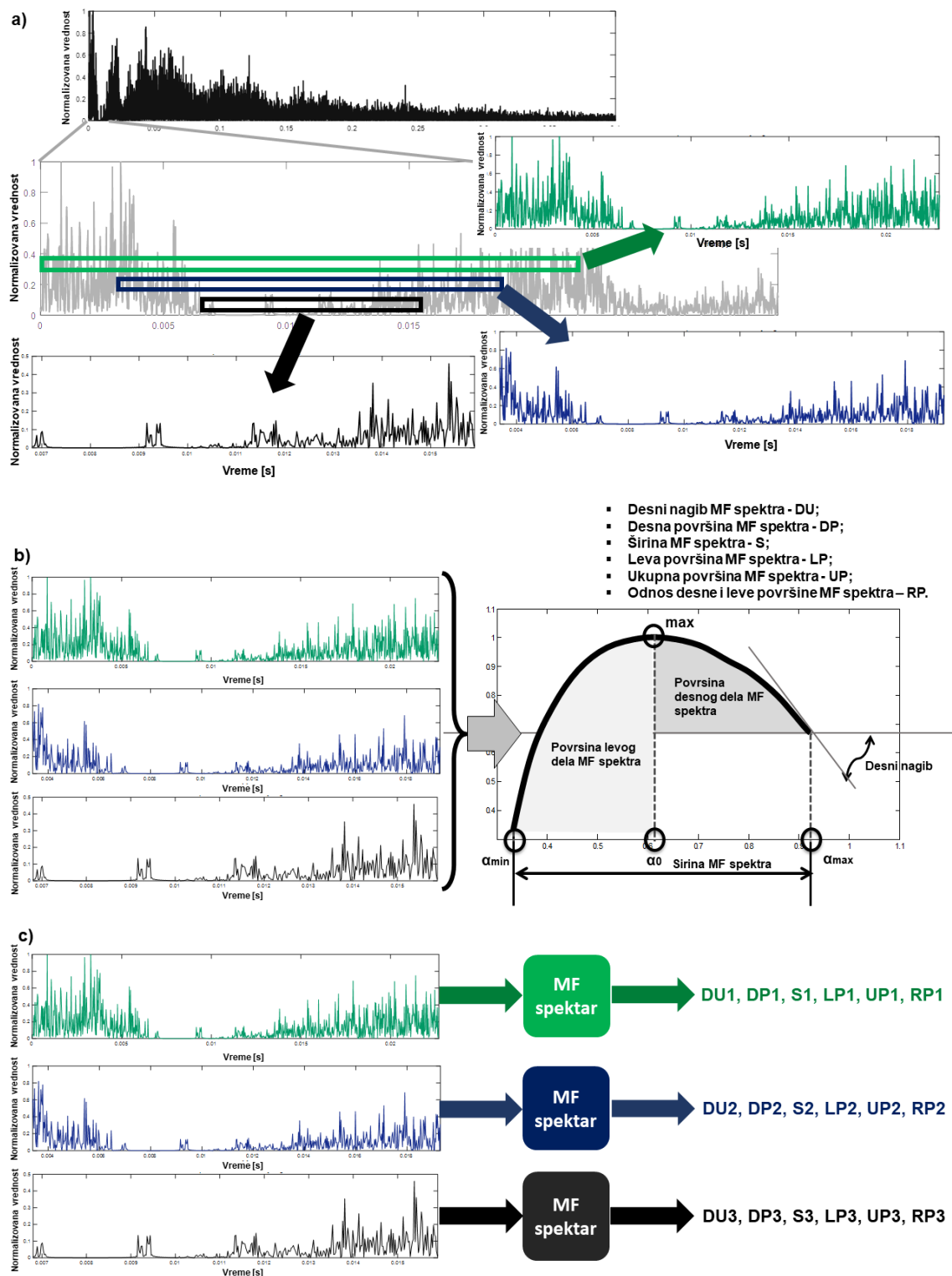
Samo izračunavanje multifraktalnog spektra je izvršeno uz pomoć softverskog paketa *FracLab* [Vehel and Legrand, 2004].



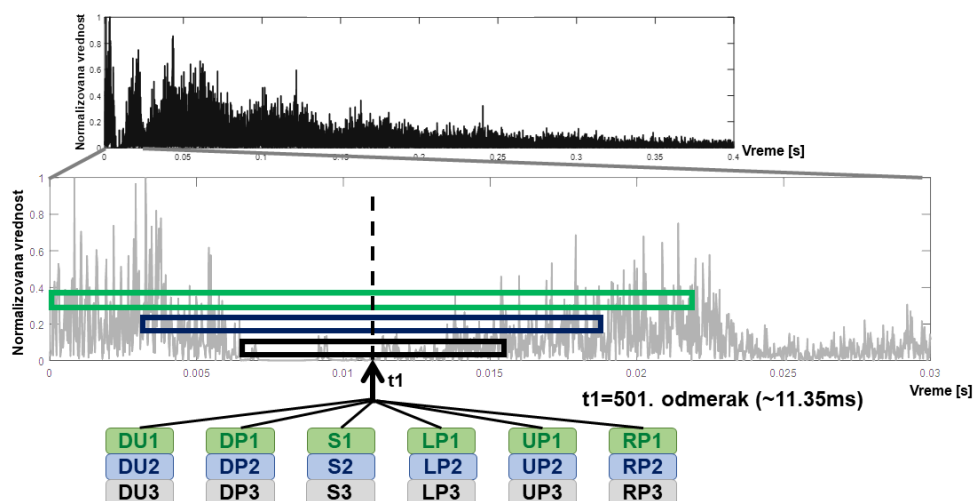
Slika 5.3. Prvo vremensko pozicioniranje tri prozora dužine $L1$, $L2$ i $L3$ u realnom unipolarnom impulsnom odzivu prostorije i selekcija „uzoraka“ odziva

Iz multifraktalnog spektra, izračunatog za izabrani „uzorak“ signala IR, se potom utvrđuju vrednosti sledećih globalnih parametara: desni nagib krive multifraktalnog spektra (DU), desna površina (DP), leva površina (LP), ukupna površina (UP) i odnos desne i leve površine (RP) multifraktalnog spektra, i konačno, širina (S) krive multifraktalnog spektra. Značenje navedenih parametara je dato u Poglavlju 3.2. Dobijene vrednosti ovih šest globalnih parametara su zapisane u vremenskom trenutku koji je jednak centralnoj vremenskoj poziciji postavljenih prozora nad kojima su „uzorci“ signala impulsnog odziva uzeti. Na slikama 5.4a, 5.4b i 5.4c je ilustrovan postupak selektovanja delova impulsnog odziva na osnovu pozicije prozora, određivanje multifraktalnog spektra nad selektovanim delovima signala, i izračunavanje šest globalnih parametara.

Izračunate vrednosti globalnih parametara DU, DP, S, LP, UP i RP sva tri multifraktalna spektra (dobijene nad selektovana tri „uzorka“ signala impulsnog odziva dužina $L1$, $L2$ i $L3$) se zapisuju u vremenskom trenutku koji predstavlja centralnu vremensku poziciju postavljenih prozora dužina $L1$, $L2$ i $L3$ nad kojima su selektovani uzorci, slika 5.5.

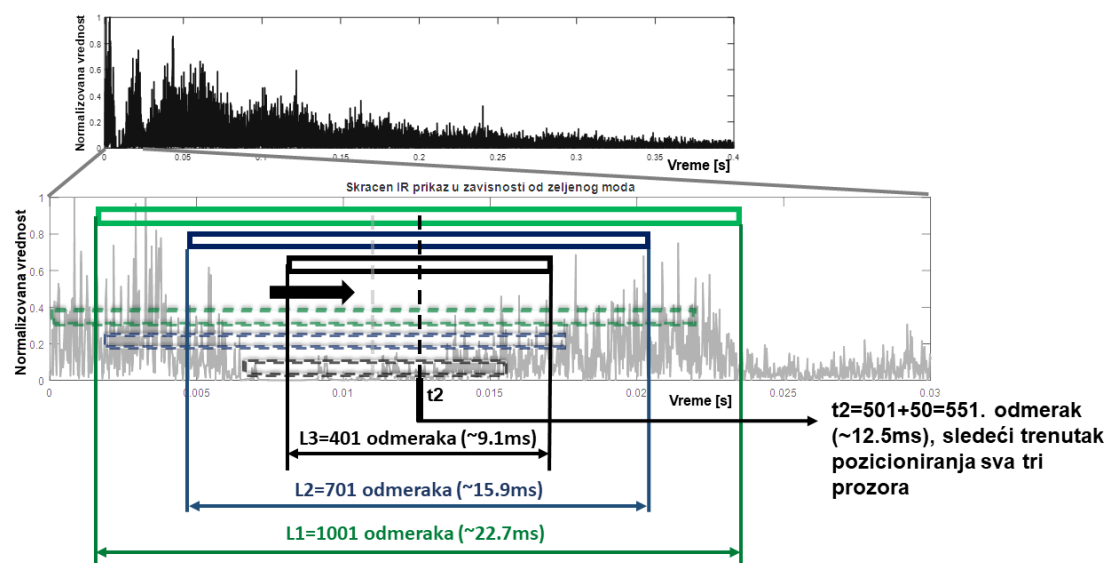


Slika 5.4. Ilustracija postupka izračunavanja globalnih parametara nad selektovanim „uzorkom“ signala; a) selekcija uzorka na osnovu pozicije prozora; b) Formiranje multifraktalnog spektra nad svakim uzorkom; c) Izračunavanje šest globalnih parametara iz svakog multifraktalnog spektra



Slika 5.5. Ilustracija vremenskog pozicioniranja izračunatih globalnih parametara multifraktalnog spektra

Prozori se potom iterativno pomeraju od početnog dela impulsnog odziva prostorijska ka njenom završetku, sa preklapanjem 1ms (što bi odgovaralo dužini od 50 odmeraka pri frekvenciji odabiranja 44100Hz), slika 5.6.

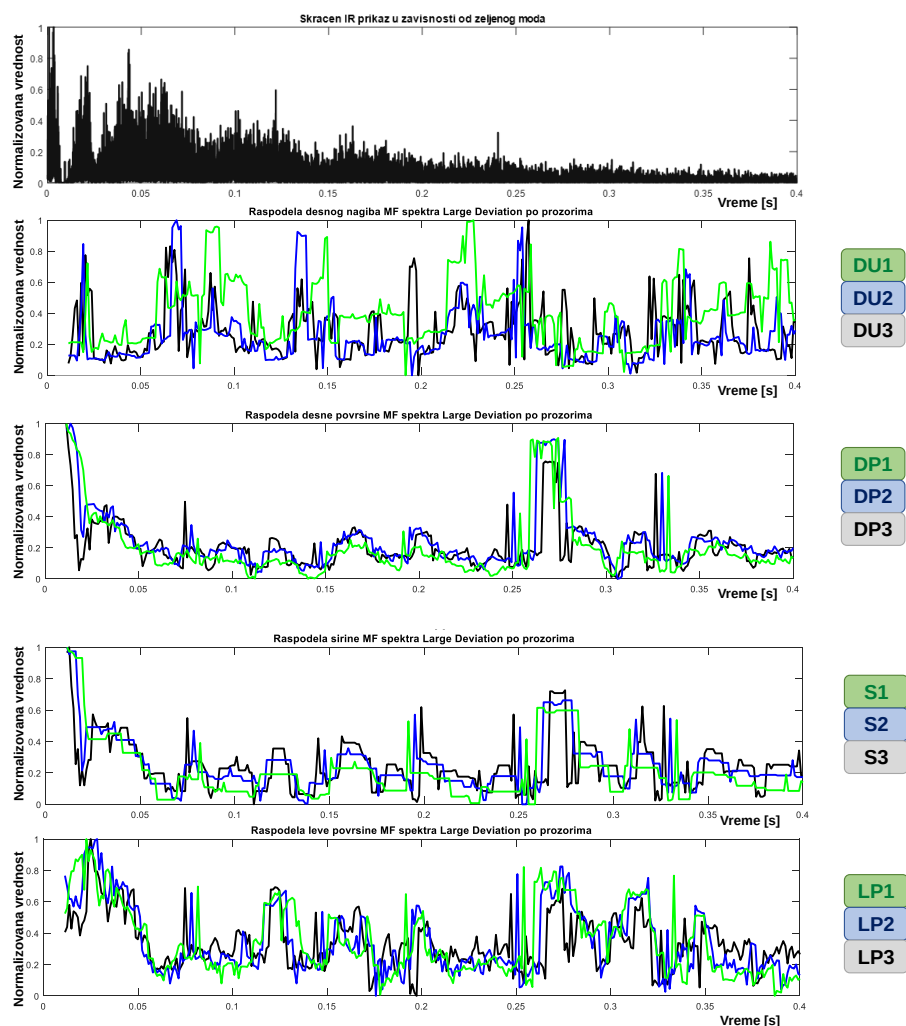


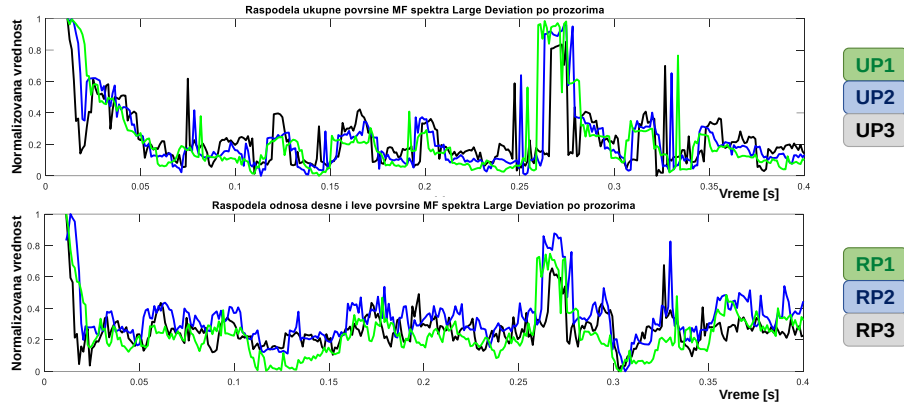
Slika 5.6. Ilustracija pomeranja prozora u signalu impulsnog odziva u postupku selektovanja „uzorka“ signala za multifraktalnu analizu

Za svaki pomeraj prozora, uzima se novi uzorak signala impulsnog odziva prostorijska za koji se potom ponovo izračunava multifraktalni spektar i beleže vrednosti šest gore navedenih globalnih parametara na novoj vremenskoj poziciji. Po završetku pomeranja prozora po signalu impulsnog odziva IR, dobija se vremenska raspodela vrednosti 6 globalnih parametara multifraktalnog spektra,

prethodno izračunatih za sve iterativno izdvojene delove signala impulsnog odziva prostorija.

Za svaki globalni parametar, DU, DP, S, LP, UP i RP paralelno su analizirane vremenske raspodele njihovih vrednosti, utvrđenih primenom sva tri prozora navedenih dužina: $L1$, $L2$ i $L3$. Prikaz vremenskih raspodela globalnih parametara u zavisnosti od selektovanih „uzoraka“ impulsnog odziva uz pomoć tri prozora dužina $L1$, $L2$ i $L3$ je dat na slici 5.7. U vremenskim raspodelama vrednosti svakog globalnog parametra uočavane su lokalne promene i pronalazena je korelacija tih promena sa vremenskim događajima u signalu impulsnog odziva. Konkretnije, tražen je događaj u raspodeli globalnih parametara DU, DP, S, LP, UP i RP koji bi ukazivao na granicu između oblasti ranih refleksija i oblasti reverberacije u impulsnom odzivu prostorija.





Slika 5.7. Prikaz vremenske raspodele izračunatih globalnih parametara nad krivom multifraktalnog spektra: desni nagib (DU), desna površina (DP), širina (S), leva površina (LP), ukupna površina (UP) i odnos desne i leve površine (RP). Zelena kriva ukazuje na korišćenje prozora dužine $L1=1001$ odmeraka, plava kriva ukazuje na korišćenje prozora dužine $L2=701$ odmeraka i crna kriva ukazuje na korišćenje prozora dužine $L3=401$ odmeraka

5.1.2. Dodatna obrada globalnih parametara multifraktalnog spektra

Sledeći korak u realizaciji algoritma u prvoj fazi istraživanja (Blok1) jeste dodatna obrada raspodele globalnih parametara kako bi automatska detekcija granice oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu bila što preciznija. S tim u vezi, za svaki pojedinačni globalni parametar množene su sve tri njegove raspodele (zelena, plava i crna kriva sa slike 5.7) dobijene multifraktalnom analizom nad uzorcima signala odziva, iterativno uzetih korišćenjem tri različita prozora dužina $L1$, $L2$ i $L3$ (zeleni, plavi i crni prozor sa slika 5.3 – 5.6). Postupak dobijanja rezultujuće krive raspodele globalnog parametra DU je prikazan na slici 5.8.

Neka je $DU1(t)$ kriva vremenske raspodele globalnog parametra multifraktalnog spektra DU, koja je dobijena korišćenjem prozora dužine $L1$ u iterativnom odabiru “uzoraka” signala odziva za multifraktalnu analizu. Kriva $DU1(t)$ se može predstaviti izrazom:

$$DU1(t) = \sum_k DU1_k \delta(t - t_k) \quad (5.1)$$

gde $\delta(t - t_k)$ predstavlja idealizovan Dirakov impuls u trenutku t_k , dok je $DU1_k$ intenzitet raspodele $DU1(t)$ u trenutku t_k . Na identičan način se mogu prikazati i vremenske raspodele $DU2(t)$ globalnog parametra DU dobijene

multifraktalnom analizom sa iterativnim korišćenim prozorom dužine L2, i $DU3(t)$ globalnog parametra DU dobijena multifraktalnom analizom sa prozorom dužine L3:

$$DU2(t) = \sum_k DU2_k \delta(t - t_k) \quad (5.2)$$

$$DU3(t) = \sum_k DU3_k \delta(t - t_k) \quad (5.3)$$

$DU(t)$ predstavlja vremensku raspodelu koja je dobijena množenjem intenziteta raspodela $DU1(t)$, $DU2(t)$ i $DU3(t)$ i predstavljena je izrazom:

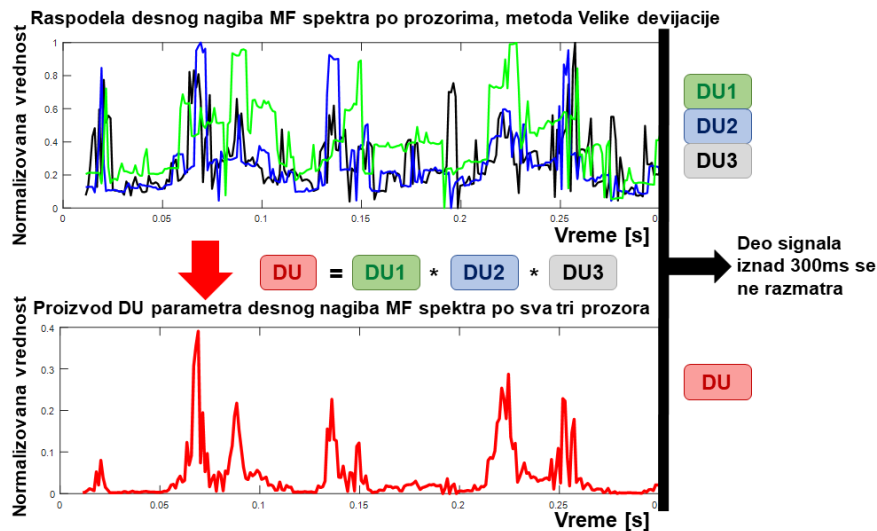
$$DU(t) = \sum_k (DU1_k \cdot DU2_k \cdot DU3_k) \delta(t - t_k) \quad (5.4)$$

Signal $DU(t)$ u vremenskom intervalu iznad 300ms se dalje ne analizira, zbog činjenice da taj vremenski interval nije od interesa za ovo istraživanje jer se u toj oblasti ne nalazi granica oblasti ranih refleksija u impulsnom odzvu (ilustrovano na slici 5.10). Na isti način dobijene su rezultujuće vremenske raspodele ostalih globalnih parametara $DP(t)$, $S(t)$, $LP(t)$, $UP(t)$ i $RP(t)$.

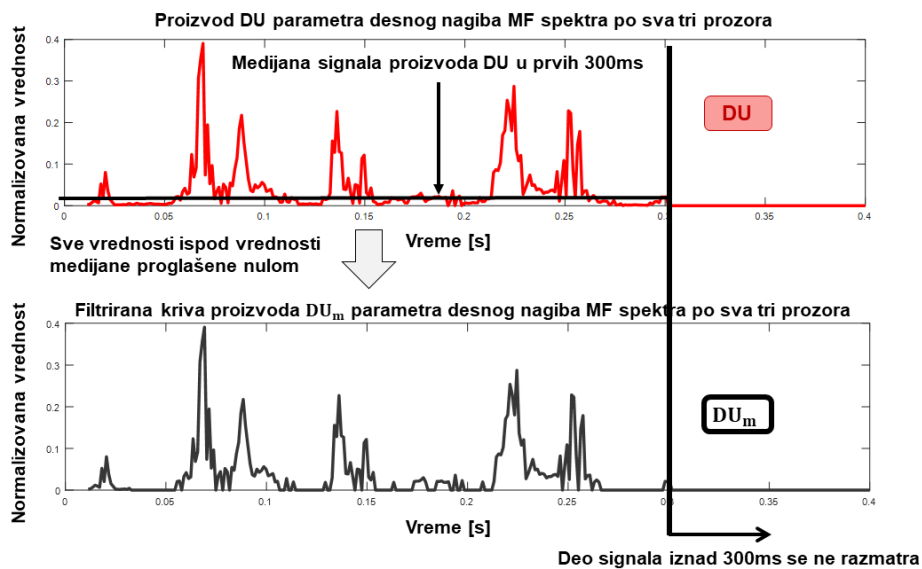
U nastavku opisa metodologije je prikazan primer samo globalnog multifraktalnog parametra desnog nagiba krive multifraktalnog spectra DU.

Dodatna obrada vremenske raspodele $DU(t)$ uključuje i izračunavanje medijane m za signal vremenske raspodele $DU(t)$. Ovim statističkim parametrom se utvrđuje vrednost ispod koje se nalazi 50% uzorka, a u ovom istraživanju to je 50% vrednosti vremenske raspodele $DU(t)$. Izračunata medijana predstavlja prag ispod kojeg se vrednosti raspodele $DU(t)$ izjednačavaju sa nulom, slika 5.9. Rezultat ovog filtriranja jeste modifikovana vremenska raspodela $DU_m(t)$.

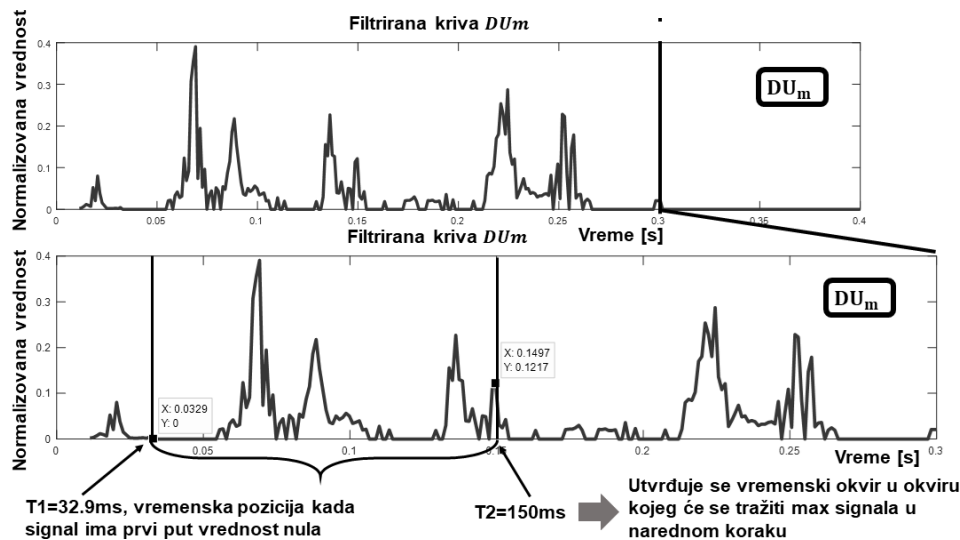
Poslednji korak u metodologiji koji je obuhvaćen Blokom 1 i prvom fazom istraživanja jeste određivanje lokalnog maksimuma u zadatom vremenskom okviru unutar modifikovane vremenske raspodele $DU_m(t)$, slika 5.10. Za početak vremenskog okvira je uzeta prva nulta vrednost raspodele $DU_m(t)$, odmah nakon prvog lokalnog maksimuma. Prvi lokalni maksimum je izostavljen jer se odnosi na direktni zvuk u impulsnom odzivu. Sa druge strane, za kraj vremenskog okvira je uzet vremenski trenutak od 150ms u ovom primeru, odnosno vremenski trenutak kada u prijemnu tačku pristigne 90% ukupne zvučne energije impulsnog odziva prostorije, slika 5.11.



Slika 5.8. Ilustracija dobijanja rezultujuće raspodele DU kao umnožak raspodela $DU1$, $DU2$ i $DU3$

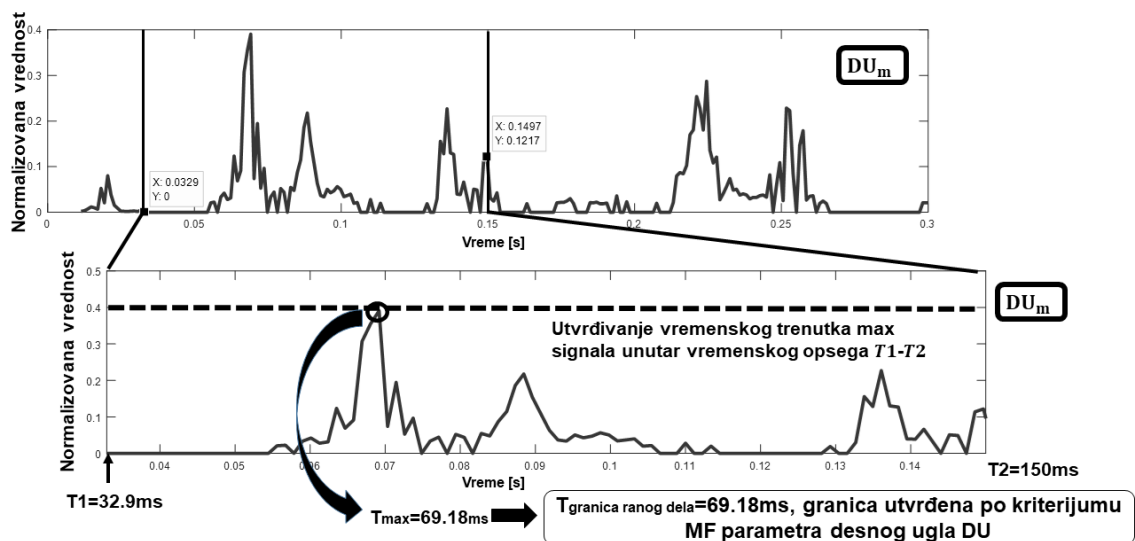


Slika 5.9. Ilustracija filtriranja vremenske raspodele DU uz pomoć medijane



Slika 5.10. Postupak zadavanja vremenskog okvira u modifikovanoj raspodeli

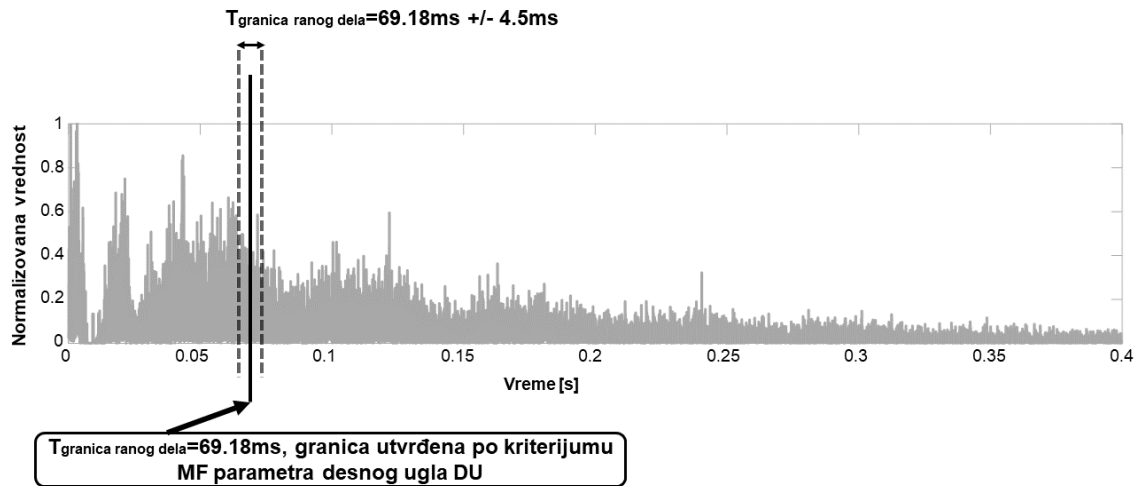
$$DU_m(t)$$



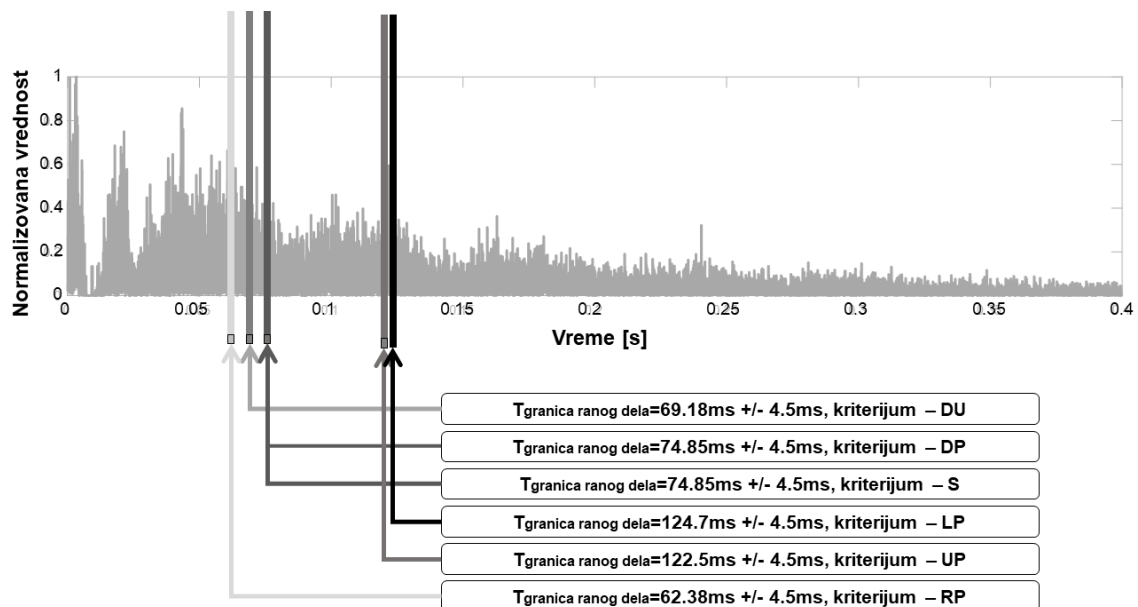
Slika 5.11. Postupak izdvajanja lokalnog maksimuma iz vremenskog okvira u modifikovanoj raspodeli $DU_m(t)$

Vremenski okvir unutar koga se određuje maksimum se određuje na ovakav način kako bi se skratilo neophodno vreme za obradu signala. Dodatni razlog je činjenica da se analiziraju impulsni odzivi različitih dužina jer su snimljeni u različitim realnim prostorijama, različitim dimenzijama, ali i u različitim fizičkim i softverskim modelima. Zbog toga bi korišćenje konstantnog vremenskog okvira bilo neadekvatno. Pretpostavka je da je tražena granica uvek unutar izabranog vremenskog okvira.

Detektovani lokalni maksimum u zadatom vremenskom okviru se proglašava za granicu oblasti ranih refleksija u analiziranom impulsnom odzivu sa marginom od $\pm L1/2$, slika 5.12. Na slici 5.13. su prikazane granice oblasti ranih refleksija, utvrđene na osnovu primene gore navedenog postupka, analizom vremenskih modifikovanih raspodela svih šest globalnih multifraktalnih parametara: $DU_m(t)$, $DP_m(t)$, $S_m(t)$, $LP_m(t)$, $UP_m(t)$, $RP_m(t)$.



Slika 5.12. Prikaz detektovane granice oblasti ranih refleksija na osnovu analize modifikovane raspodele $DU_m(t)$. Uračunata margina dužine $\pm L1/2 \sim 4.5ms$



Slika 5.13. Uporedni prikaz Izračunatih granica oblasti ranih refleksija na osnovu analiza modifikovanih raspodela $DU_m(t)$, $DP_m(t)$, $S_m(t)$, $LP_m(t)$, $UP_m(t)$, $RP_m(t)$.

5.2. Detekcija ranih refleksija 1D multifraktalnom analizom

Sledeću fazu u istraživanju predstavlja realizacija postupka detekcije ranih refleksija, prikazana blokovima 2 i 3 u opštoj blok šemi metodologije na slici 5.1. Ulazni signal u blokove 2 i 3 predstavlja deo vremenskog signala impulsnog odziva prostorija koji odgovara oblasti ranih refleksija u odzivu. U ovom delu istraživanja se analizira samo početni deo impulsnog odziva zbog činjenice da je samo u tom delu dominantan uticaj ranih refleksija. Oblast ranih refleksija je utvrđena prethodnim određivanjem granice ranog i reverberacionog dela odziva, postupak objašnjen u Poglavlju 5.1. Signal koji obuhvata oblast ranih refleksija impulsnog odziva predstavlja ulazni signal za dalje istraživanje (opisano blokovima 2 i 3, slika 5.1) koje nudi mehanizme za automatsku detekciju ranih refleksija od značaja, tj, onih koje mogu u određenoj meri uticati na subjektivni doživljaj zvuka. Blok 2 sa slike 5.1 obuhvata blok šemu postupka detekcije ranih refleksija u impulsnom odzivu pomoću multifraktalne analize nad 1D vremenskim signalom i prikazana je na slici 5.14.

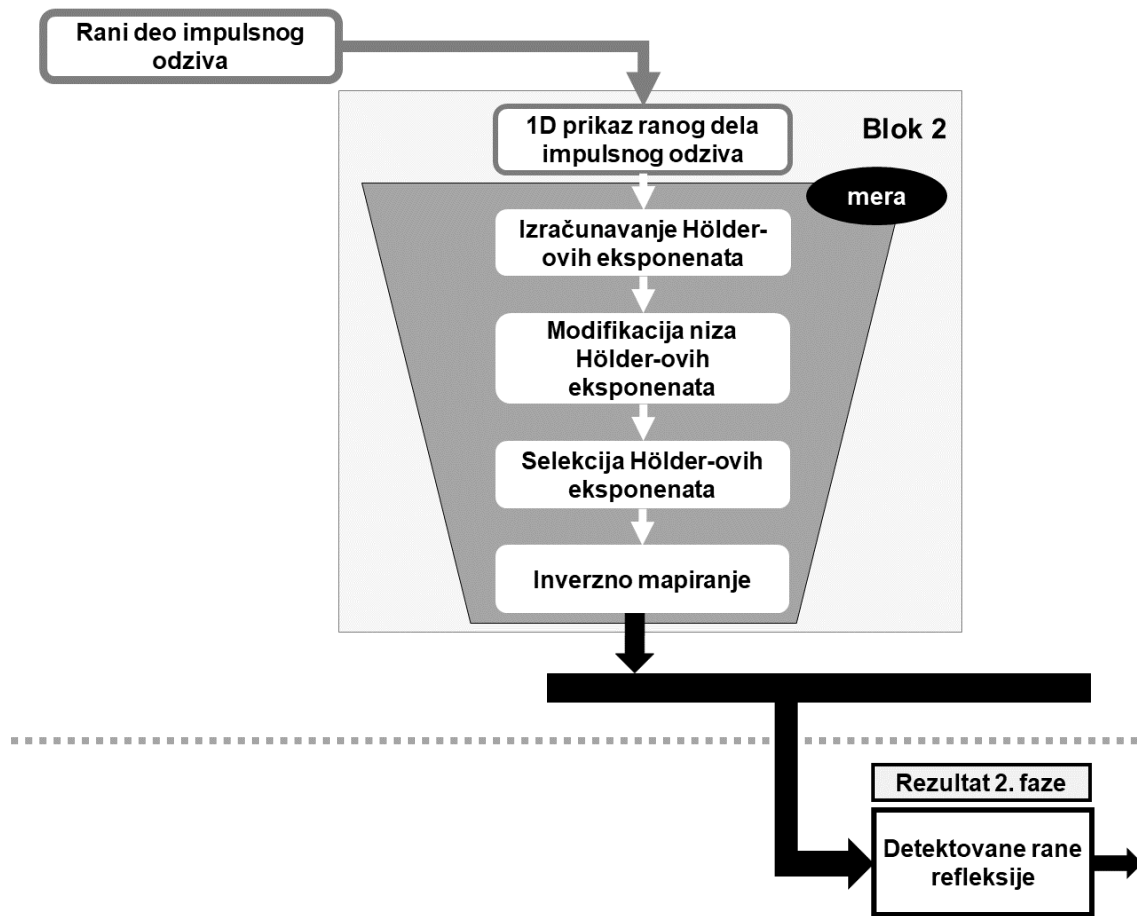
Signal ranog dela impulsnog odziva koji se analizira je normalizovan u opsegu od 0 do 1. Vremenska koordinata se može iskazati kao:

$$t_n = n \cdot \Delta t, \Delta t = 1/f_s, n = 1 \dots N - 1 \quad (5.5)$$

dok je intenzitet n -tog odmerka u signalu impulsnog odziva:

$$y(t_n) = y(n) = k, k \in [0 \ 1] \quad (5.6)$$

U analizi se koristi bipolaran i unipolaran signal impulsnog odziva.



Slika 5.14. Blok šema metodologije koja opisuje 1D detekciju ranih refleksija

5.2.1. Multifraktalna analiza – izračunavanje Hölderovih eksponenata

Nad prethodno normalizovanim signalom primenjuje se multifraktalna analiza, tj. za svaki vremenski odmerak u impulsnom odzivu izračunava se Hölderov eksponent “box-counting” metodom, opisanom u Poglavlju 3.2, iskazano izrazom (3.6). Boksevi koji se koriste za odabir uzorka S_ε iz vremenskog niza impulsnog odziva prostorija u procesu izračunavanja Hölderovih eksponenata su dimenzija $\varepsilon = 1, \varepsilon = 3$ i $\varepsilon = 5$. Mere za opisivanje lokalne neregularnosti signala unutar bokseva koje su korišćene u ovoj metodologiji su: 1) maksimum – *max*; 2) minimum – *min*; 3) suma – *sum*; 4) maksimum apsolutne devijacije u odnosu na centralnu poziciju u boksu – *diff central*; 5) maksimum kvadrirane apsolutne devijacije u odnosu na centralnu poziciju u boksu – *diff² central*. Navedene mere su definisane sledećim izrazima:

$$\max: \mu_\varepsilon(n) = \max_{j \in S_\varepsilon} y(j) \quad (5.7)$$

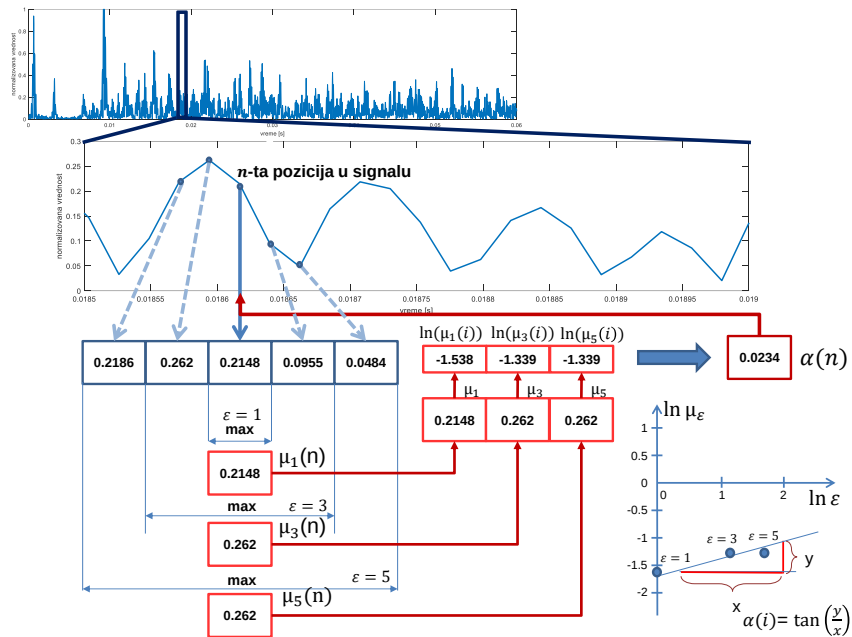
$$\min: \mu_\varepsilon(n) = \min_{j \in S_\varepsilon^*} y(j) \quad (5.8)$$

$$\text{sum: } \mu_\varepsilon(n) = \sum_{j \in S_\varepsilon} y(j) \quad (5.9)$$

$$\text{diff central: } \mu_\varepsilon(n) = \max_{j \in S_\varepsilon} |y(n) - y(j)| \quad (5.10)$$

$$\text{diff}^2 \text{ central: } \mu_\varepsilon(n) = \max_{j \in S_\varepsilon} |y(n) - y(j)|^2 \quad (5.11)$$

pri čemu je n n -ta pozicija u signalu impulsnog odziva $y(n)$ za koju se lokalno izračunava mera $\mu_\varepsilon(n)$ nad obuhvaćenim uzorkom signala S_ε , boksom dimenzije ε . U izrazu (5.8) S_ε^* predstavlja skup nenultnih vrednosti uzorka S_ε . Sve navedene mere su pojedinačno korišćene u izračunavanju Hölderovih eksponenata sa ciljem da se utvrdi mera sa kojom je postupak detekcije ranih refleksija najefikasniji. Na slici 5.15 je ilustrovan postupak izračunavanja Hölderovih eksponenata, korišćen u ovoj metodologiji, pri čemu je kao mera za opisivanje lokalne regularnosti/neregularnosti signala uzet maksimum.



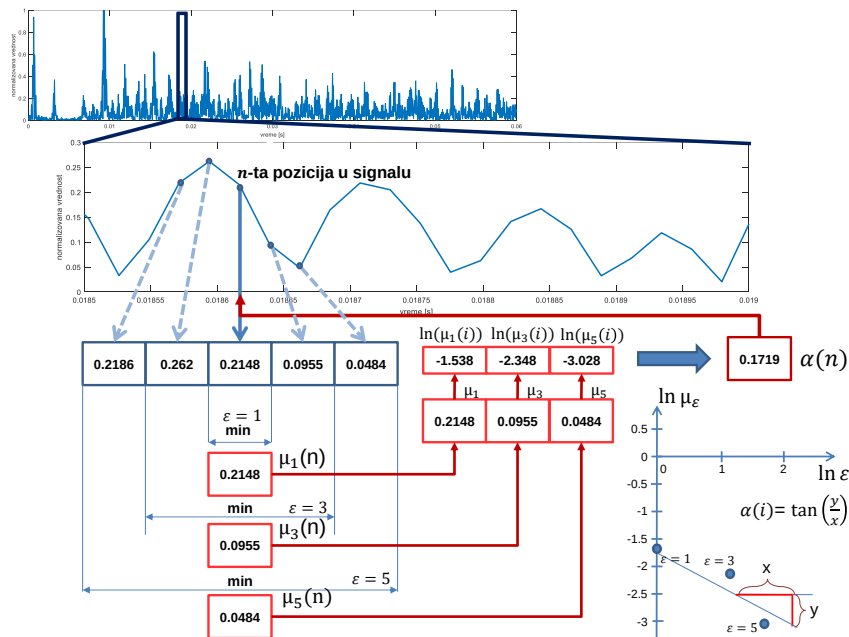
Slika 5.15. Ilustracija postupka izračunavanja Hölderovih eksponenata za meru maksimum, ulazni signal je unipolarni impulsni odziv prostorije

Na slikama 5.16, 5.17, 5.18 i 5.19 su ilustrovani postupci izračunavanja Hölderovih eksponenata za preostale navedene mere: minimum, suma, maksimalna devijacija u odnosu na centralnu poziciju uzorka i maksimalna kvadratna devijacija u odnosu na centralnu poziciju uzorka, respektivno.

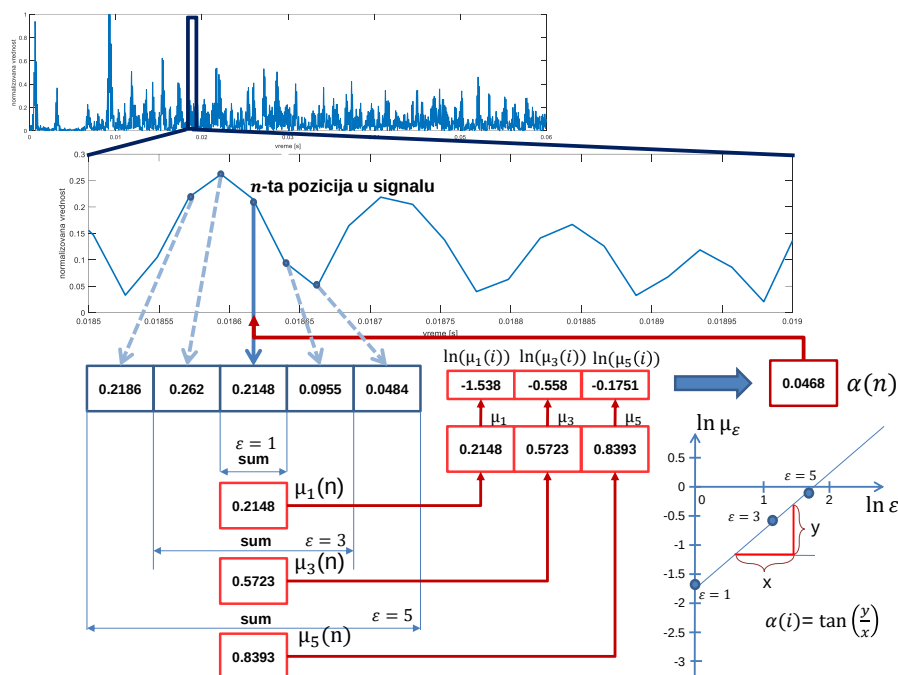
Na slici 5.20 su uporedno prikazane vrednosti izračunatog Hölderovog eksponenta za različite mere, a na istoj poziciji u signalu impulsnog odziva. Na istoj slici su prikazane i vrednosti Hölderovih eksponentata za različite mere na narednoj poziciji u signalu. Po završetku izračunavanja Hölderovog eksponenta za sve pozicije u signalu impulsnog odziva, formira se niz Hölderovih eksponentata za sve mere.

Na slici 5.21 je prikazan formiran niz izračunatih Hölderovih eksponentata nad signalom ranog dela impulsnog odziva prostorije pri korišćenju maksimuma apsolutnih devijacija u odnosu na centralnu poziciju u uzorku, kao mere za lokalno opisivanje signala.

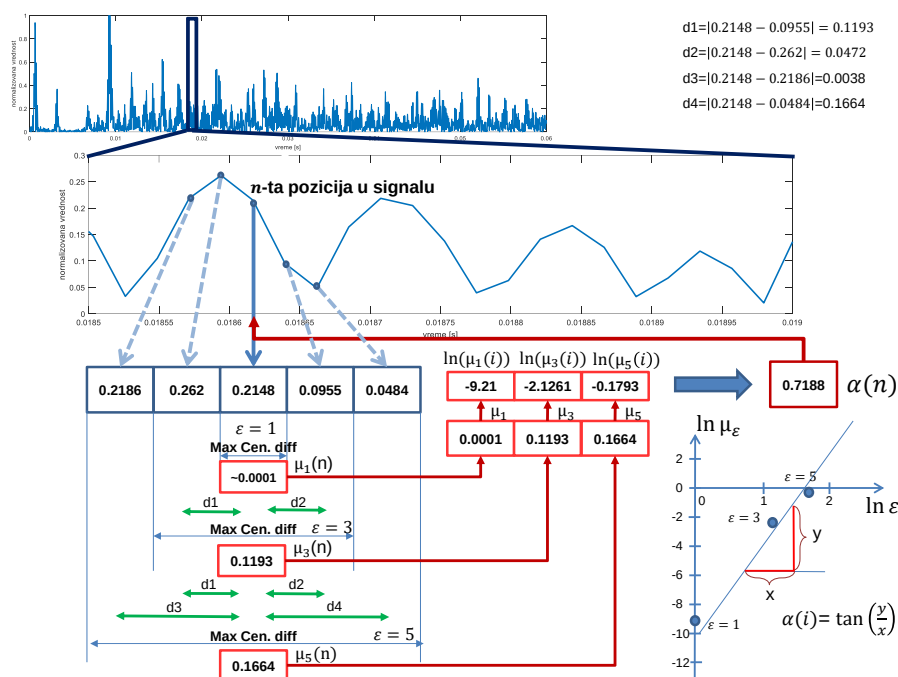
Vrednosti Hölderovih eksponentata opisuju lokalne varijacije intenziteta refleksija i regularnost strukture u impulsnom odzivu prostorija.



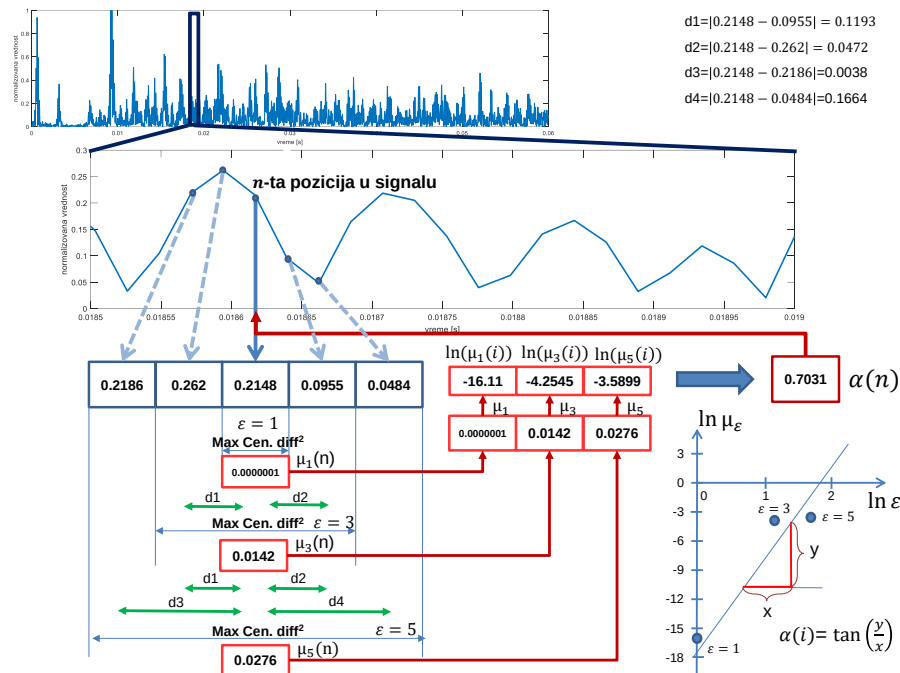
Slika 5.16. Ilustracija postupka izračunavanja Hölderovih eksponentata za meru minimum, ulazni signal je unipolarni impulsni odziv prostorije



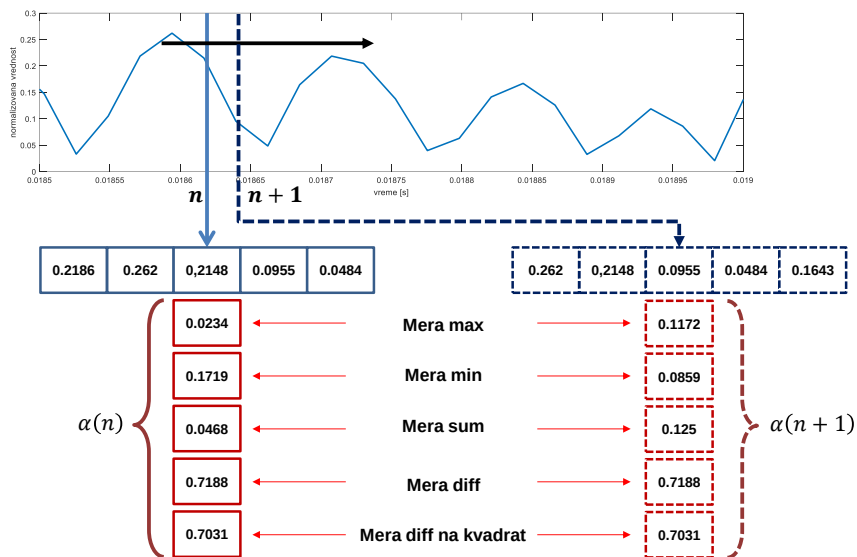
Slika 5.17. Ilustracija postupka izračunavanja Hölderovih eksponenata za meru suma, ulazni signal je unipolarni impulsni odziv prostorije



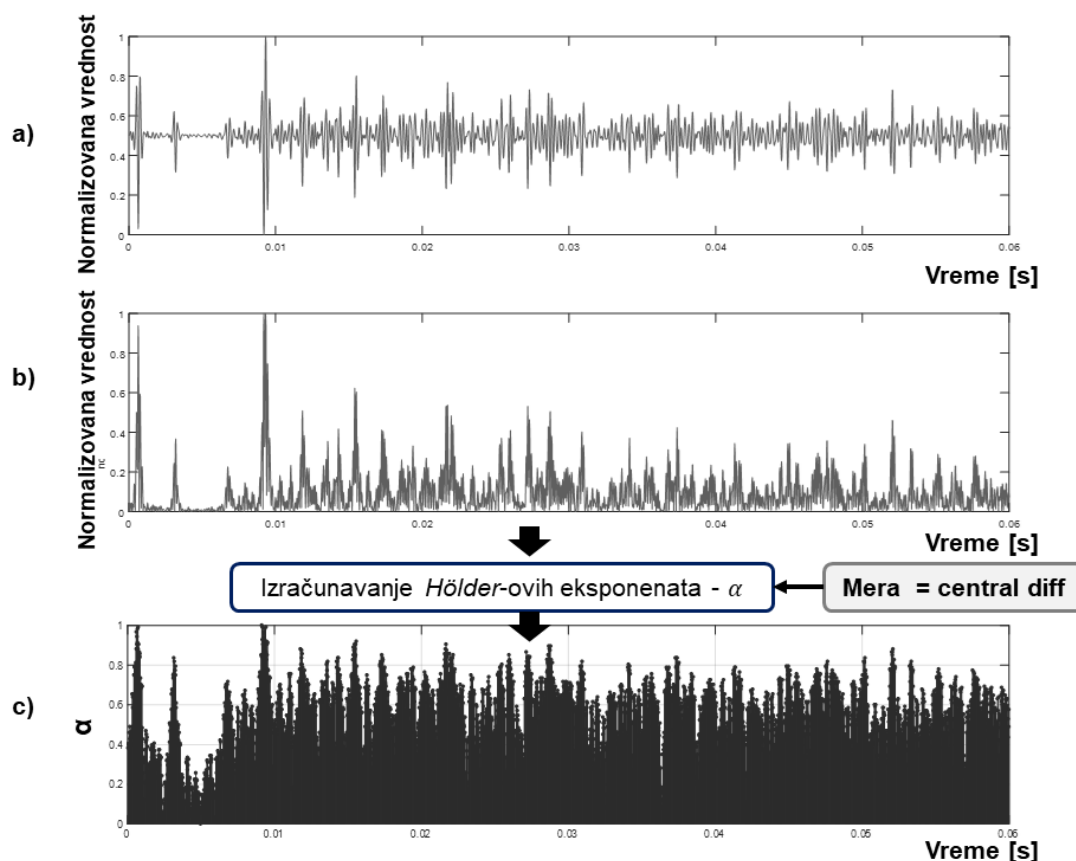
Slika 5.18. Ilustracija postupka izračunavanja Hölderovih eksponenata za meru maksimum devijacije od centralne pozicije uzorka, ulazni signal je unipolarni impulsni odziv prostorije



Slika 5.19. Ilustracija postupka izračunavanja Hölderovih eksponenata za meru maksimum kvadratnih devijacija od centralne pozicije uzorka, ulazni signal je unipolarni impulsni odziv prostorije

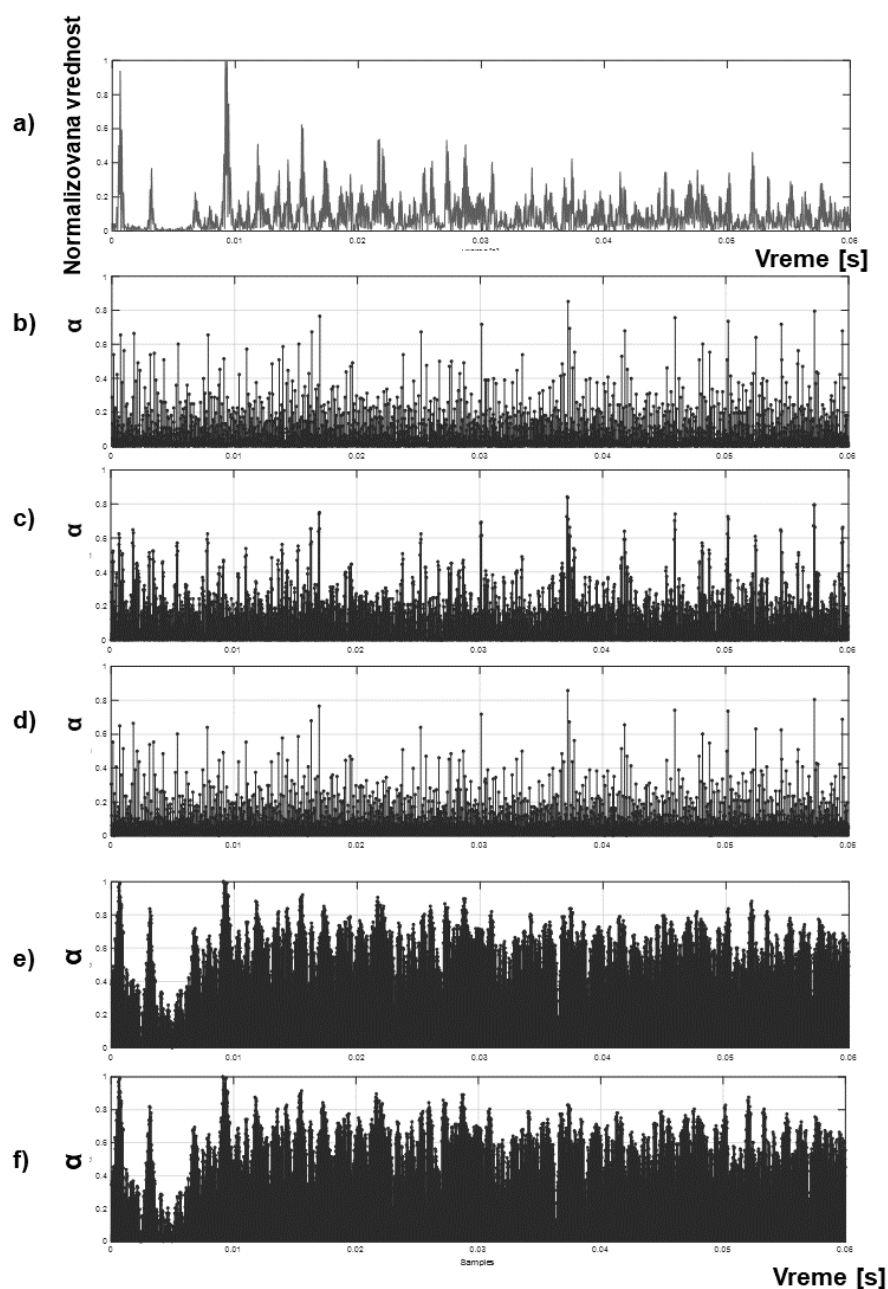


Slika 5.20. Ilustracija prikaza izračunatih vrijednosti Hölderovih eksponenata za različite mere na pozicijama n i $n+1$ u signalu



Slika 5.21. a) Originalni bipolarni signal impulsnog odziva b) Unipolarni prikaz istog signala koji ulazi u proces izračunavanja Hölderovih eksponenata; c) Niz izračunatih Hölderovih eksponenata nad signalom impulsnog odziva za meru "central diff".

Na slici 5.22. su uporedno prikazani nizovi izračunatih Hölderovih eksponenata nad istim signalom ranog dela impulsnog odziva prostorijske pri korišćenju različitih mera za lokalno opisivanje signala, definisanih izrazima pod 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 i 5.11. Treba napomenuti da je u ovom primeru signal ranog dela impulsnog odziva analiziran kao unipolarni signal.



Slika 5.22. Prikaz nizova izračunatih vrednosti Hölderovih eksponenata za različite mere, a za isti unipolarni signal impulsnog odziva. Korišćene mere: b) max; c) min; d) sum; e) central diff; f) central diff na kvadrat

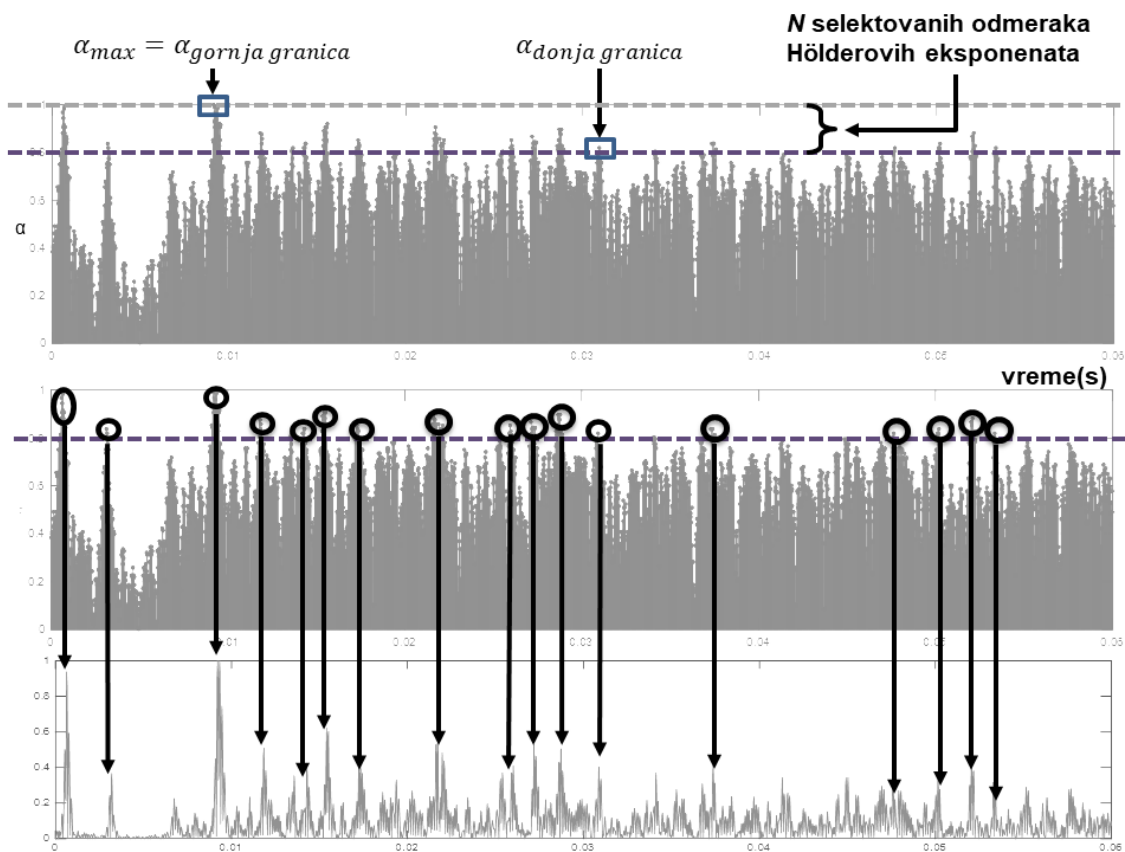
5.2.2. Selekcija Hölderovih eksponenata i inverzno mapiranje

Kako bi signal impulsnog odziva prostorije mogao biti analiziran pomoću multifraktala, neophodno je izvesti neku vrstu jedno-dimenzionalne multifraktalne transformacije, koja bi omogućila bidirekciono mapiranje vrednosti ulaznog signala u odgovarajuće vrednosti Holderovog eksponenta α i multifraktalnog

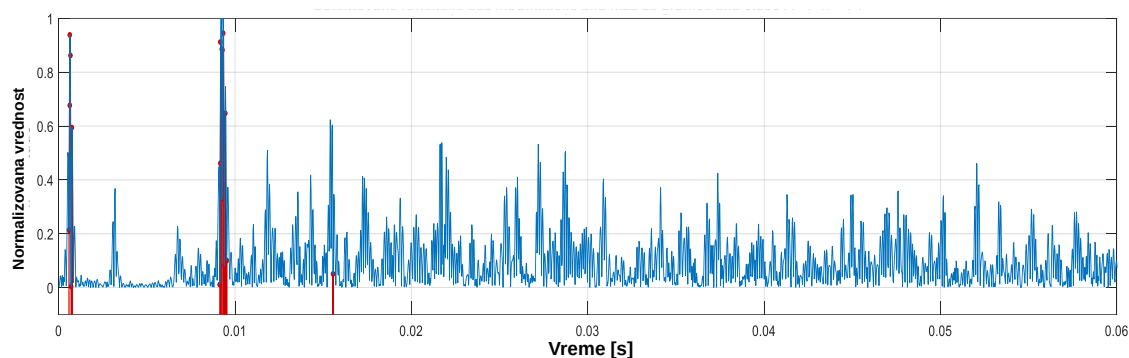
spektra $f(\alpha)$. Algoritam koji se koristi u postupku detekcije ranih refleksija, omogućava izdvajanje delova signala koji pripadaju tačno određenim delovima multifraktalnog spektra, odnosno, moguće je za zadati određeni opseg u raspodeli vrednosti Hölder-ovog eksponenta $\alpha \in [\alpha_{donja\ granica} - \alpha_{gornja\ granica}]$ ustanoviti koji delovi ulaznog signala su odgovorni za formiranje tog opsega vrednosti parametra α .

Određivanje opsega Hölder-ovog eksponenta radi izdvajanja refleksija iz impulsnog odziva je vršeno u skladu sa pretpostavkom da prve refleksije predstavljaju tačke u impulsnom odzivu gde postoje „defekti“ u strukturi signala i gde se osim nagle promene intenziteta signala menja i njegova regularnost. Takođe, uzevši u obzir činjenicu da visoke vrednosti eksponenta α označavaju mesta u kojima se signal lokalno dosta menja, moguće je pretpostaviti da visoke vrednosti Hölder-ovog eksponenta α ukazuju na prisustvo ranih refleksija u signalu impulsnog odziva prostorija. Postupak detekcije ranih refleksije se onda može posmatrati kao proces izdvajanja maksimuma vrednosti eksponenta $(\alpha_{donja\ granica} - \alpha_{max})$ iz dobijene raspodele Holderovih eksponenata α . Vremenske pozicije selektovanih vrednosti Hölderovih eksponenata zapravo ukazuju na vremenske pozicije detektovanih refleksija u signalu impulsnog odziva. Postupak utvrđivanja granice i selekcije određenog broja Hölderovih eksponenata je ilustrovan na slici 5.23.

U ovom istraživanju je u postupku inverznog mapiranja i detekcije ranih refleksije, vršena selekcija od 20 najvećih vrednosti Hölderovih eksponenata. Rezultat detekcije refleksija za zadati opseg od 20 najvećih vrednosti Hölderovih eksponenata izračunatih multifraktalnom analizom nad signalom jednog impulsnog odziva prostorije je prikazan na slici 5.24. U ovom primeru je izračunavanje Hölderovih eksponenata izvršeno primenom mere maksimum apsolutne devijacije u odnosu na centralnu poziciju u strukturi – *central diff.* Crveni odmerci na slici 5.24 prikazuju vremenske pozicije detektovanih refleksija u analiziranom impulsnom odzivu.



Slika 5.23. Ilustracija selektovanja opsega Hölderovih eksponenata u postupku detekcije refleksija u unipolarnom impulsnom odzivu



Slika 5.24. Detektovane refleksije u unipolarnom impulsnom odzivu, nakon selekcije 20 najvećih vrednosti Hölderovih eksponenata u inverznoj multifraktalnoj analizi, korišćena mera *central diff.*

Očigledno je da broj refleksije koje se detektuju na ovaj način direktno zavisi od izbora opsega eksponenta α . Donja granica vrednosti Hölderovih eksponenata se bira u zavisnosti od broja refleksija koje se želi detektovati. Donji prag izdvajanja eksponenta α je isti za celu dužinu analiziranog signala impulsnog

odziva prostorije. Predloženi metod osim intenziteta posmatra i oblik samih refleksija kroz analizu promene signala.

5.2.3. Modifikacija niza Hölderovih eksponenata

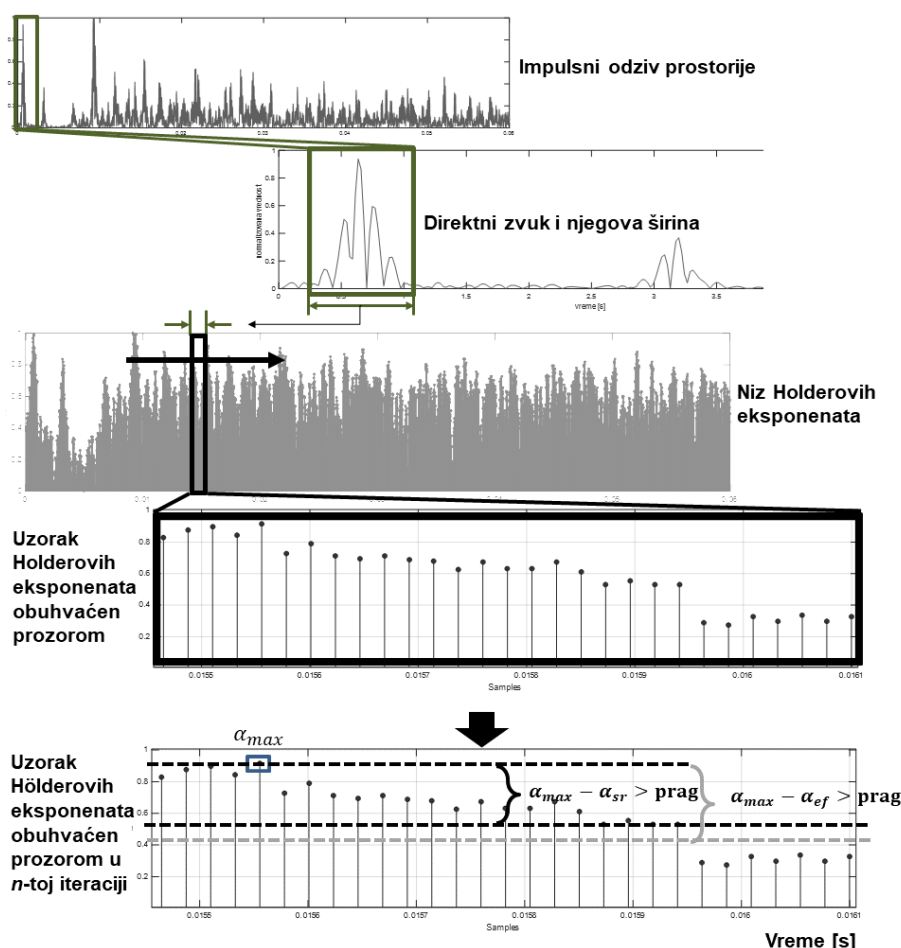
Prilikom slušanja nastaju složeni zvučni efekti, kao što su maskiranje zvuka, uticaj lokalnih bliskih refleksija, kao i korelisanost refleksija sa direktnim zvukom. Refleksije se često izdvajaju samo po intenzitetu i zbog toga dolazi često do pogrešnih detekcija refleksija.

Kako bi rezultat detekcije refleksija bio bolji i precizniji, uvode se dodatni alati u obradi niza vrednosti Hölderovih eksponenata. Niz vrednosti Hölderovih eksponenata se na neki način modifikuje, a cilj je izdvojiti one vrednosti Hölderovih eksponenata u raspodeli koje ukazuju na vremenske pozicije ranih refleksija u odzivu koje utiču na formiranje zvučne slike i subjektivni doživljaj zvuka, o čemu je bilo reči u poglavlju 3. Sa druge strane, potrebno je potisnuti sve ostale vrednosti eksponenta α koje ukazuju na pogrešnu detekciju.

Postupak modifikacije u procesu izdvajanja željenih vrednosti Hölderovog eksponenta je realizovan korišćenjem različitih lokalnih pragova za izdvajanje određenih vrednosti eksponenta α . Definisan prag sada nije isti za celu dužinu niza Hölderovih eksponenata, kao što je prvobitno bio slučaj, već je različit. Pomoću prozora određene dužine, izdvajaju se uzorci vrednosti α iz niza raspodele Hölderovih eksponenata. Postupak je iterativan, jer se prozor pomera bez preklapanja po celoj vremenskoj dužini niza vrednosti Hölderovih eksponenata. Za svaki pojedinačni izdvojen uzorak vrednosti α , utvrđuje se lokalni prag. Drugim rečima, u svakoj iteraciji se u selektovanom uzorku vrednosti eksponenta α unutar prozora određuje maksimalna vrednost eksponenta, a potom utvrđuje da li je ta selektovana vrednost značajno veća od ostalih vrednosti eksponenata α unutar selektovanog uzorka po nekom zadatom kriterijumu. Ukoliko to jeste slučaj, selektovana vrednost Hölderovog eksponenta se izdvaja. Na ovaj način se uzima u obzir lokalni uticaj refleksija. U ovom istraživanju, u postupku definisanja lokalnih pragova, korišćeni prozor je dužine u rasponu od dužine direktnog zvuka pa sve do 10ms kako bi se razmatrao i uticaj maskiranja koji pojedinačna refleksija ima u svojoj okolini.

Rezultat ovakvog postupka je modificovan niz raspodele vrednosti Hölderovih eksponenata, nad kojom se potom primenjuje već opisani postupak izdvajanja opsega najvećih α vrednosti, Potpoglavlje 5.2.2. Na osnovu izdvojenih vrednosti α se inverznim mapiranjem vrši detekcija refleksija u impulsnom odzivu.

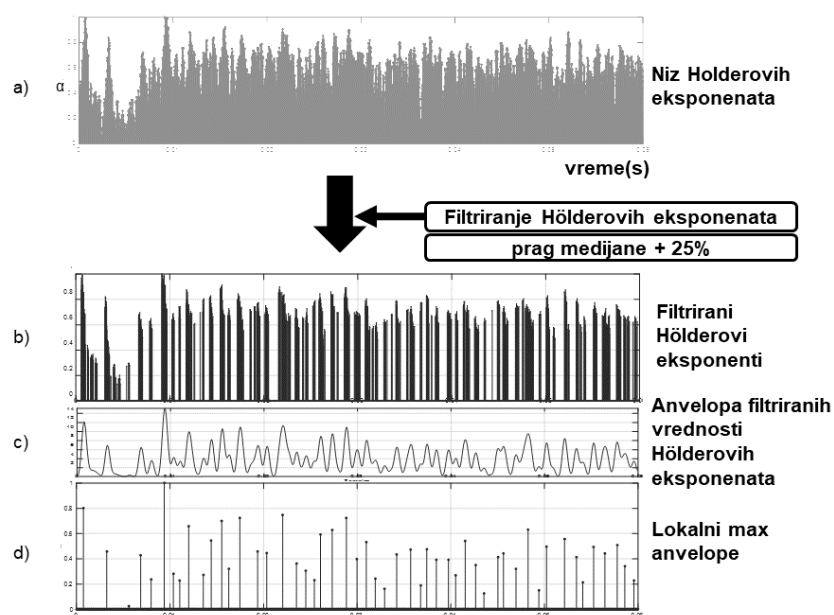
Kao kriterijum za definisanje praga radi izdvajanja pojedinačnih vrednosti iz raspodele Hölderovih eksponenata unutar prozora koristi se: razlika u odnosu na srednju vrednost (modifikacija 1) ili efektivnu vrednost (modifikacija 2) eksponenata izračunatu unutar prozora. Na slici 5.25 je ilustrovan postupak selekcije vrednosti Hölderovih eksponenata korišćenjem lokalnih pragova u postupku modifikacije 1, odnosno modifikacije 2.



Slika 5.25. Ilustracija postupka selekcije Hölderovih eksponenata iz raspodele korišćenjem lokalnih pragova nad uzorcima obuhvaćenih prozorom.

Takođe, lokalni prag koji se koristi u postupku modifikacije niza izračunatih vrednosti Hölderovih eksponenata jeste i vrednost medijane plus 25% uzorka, tj.

lokalni prag se definiše tako da u odnosu na njega 75% selektovanog uzorka eksponenta α ima manju vrednost (modifikacija 3). U postupku modifikacije 3, zadržavaju se samo one vrednosti Hölderovih eksponenata iz uzoraka koje su veće od definisanog lokalnog praga. Kako bi krajnji rezultat bio bolji, selektovane vrednosti α lokalnim pragovima se potom “pokrivaju” anvelopom i zadržavaju samo lokalni maksimumi dobijene anvelope (ovim se želelo grupisati više vremenski bliskih vrednosti α u nizu Hölderovih eksponenata, a zatim svaka lokalna grupa predstaviti jednom vrednošću, tj lokalnim max anvelope). Na slici 5.26 ilustrovan je postupak modifikacije 3.

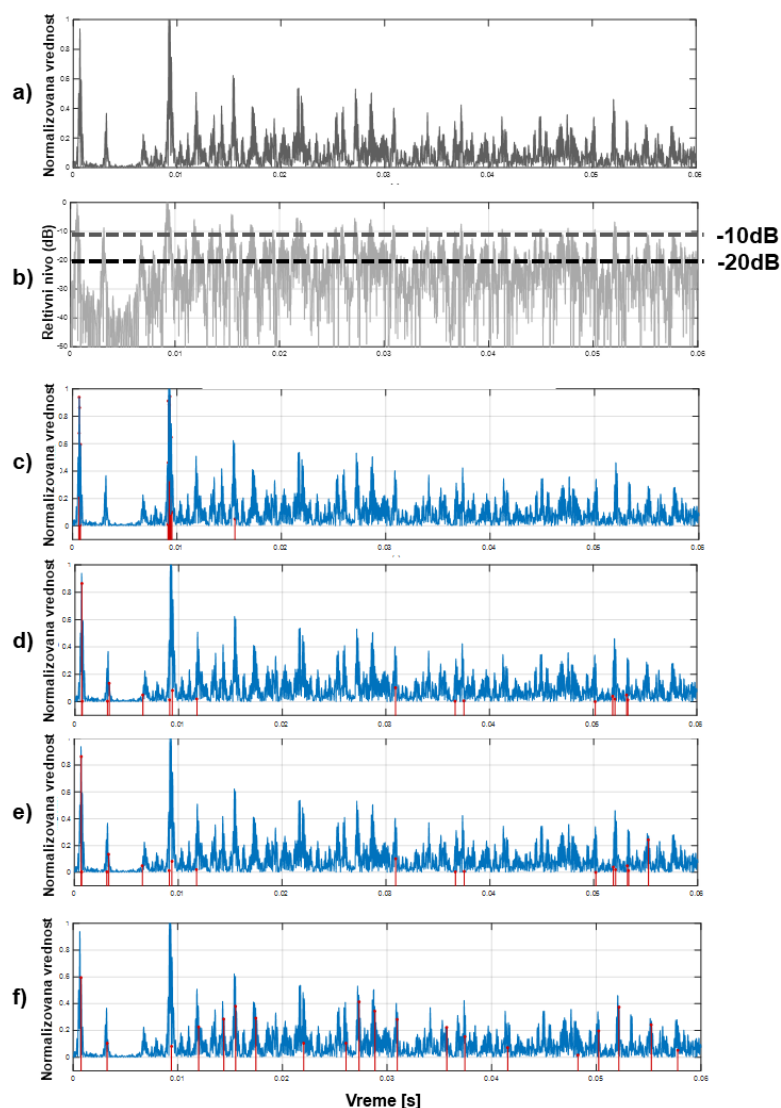


Slika 5.26. Postupak selekcije Hölderovih eksponenata. a) Originalni niz vrednosti α pre modifikacije; b) Selektovane vrednosti α modifikacijom 3; c) Anvelopa selektovanih vrednosti α pod b); d) Vremenske pozicije lokalnih maksimuma anvelope pod c)

Na kraju sledi inverzno mapiranje odmeraka signala impulsnog odziva i selektovanih vrednosti α . S tim u vezi, nad lokalnim maksimumima anvelope u modifikaciji 3 primenjuje se konacna selekcija njihovih vrednosti, opisano u Poglavlju 5.2.2. Vremenske pozicije selektovanih vrednosti α odgovaraju vremenskim pozicijama detektovanih refleksija u oblasti ranih refleksija impulsnog odziva prostorijske.

Detektovane refleksije uz pomoć 1D multifraktalne analize i dodatne obrade izračunatih vrednosti Hölderovih eksponenata različitim postupcima modifikacije,

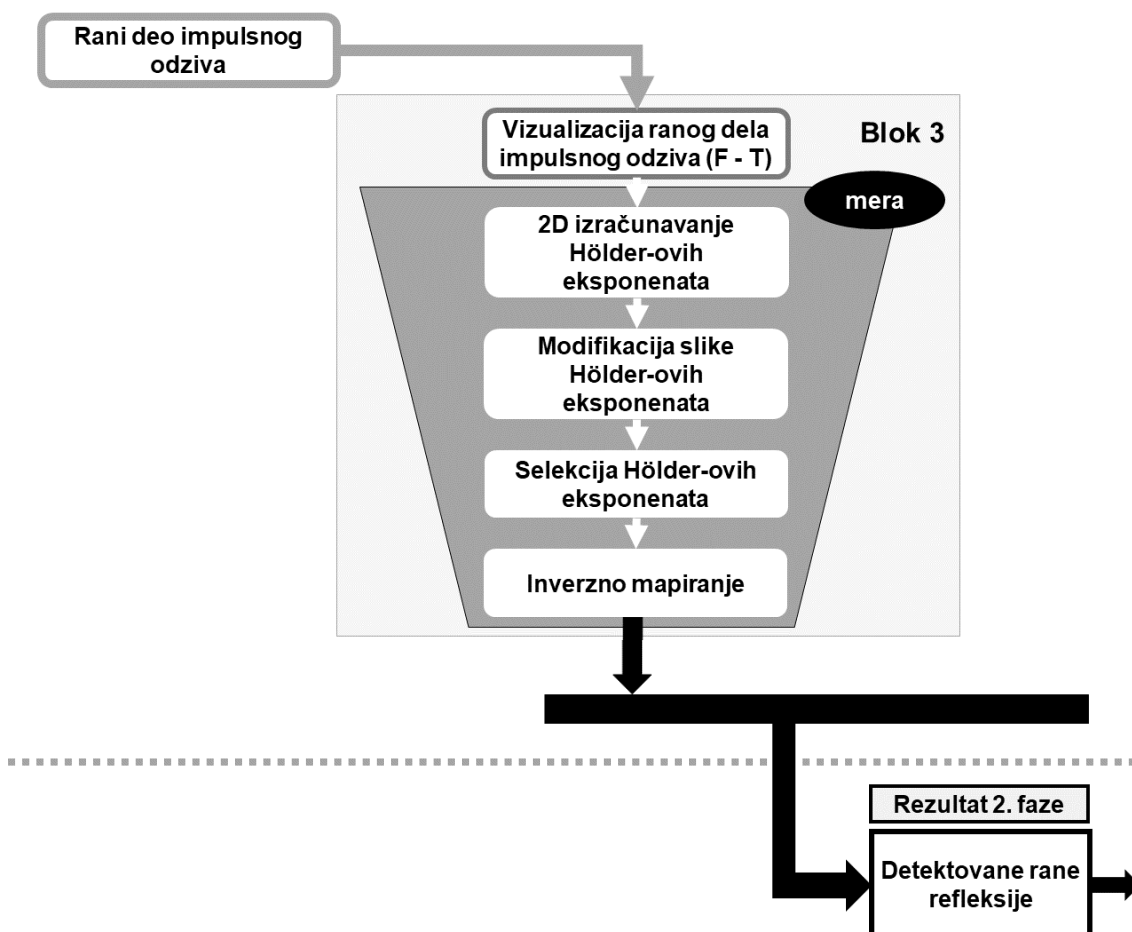
predstavljaju izlaz iz bloka 2 u prikazu metodologije, slika 5.1 i slika 5.14. Na slici 5.27 su uporedo prikazane detektovane refleksije u oblasti ranog dela impulsnog odziva prostorije (crveni signal na slici), za slučaj kada nije vršena modifikacija niza vrednosti Hölderovih eksponenata, kao i za slučajeve kada je nad nizom vrednosti Hölderovih eksponenata primenjena jedno od opisanih modifikacija 1, 2 i 3.



Slika 5.27. Detektovane refleksije u impulsnom odzivu sa i bez upotrebe postupka modifikacije vrednosti α ; a) Unipolarni normalizovan impulsni odziv; b) Prikaz relativnog nivoa signala odziva; c) Detektovane refleksije bez modifikacije; d) Detektovane refleksije primenom modifikacije 1; e) Detektovane refleksije primenom modifikacije 2; f) Detektovane refleksije primenom modifikacije 3

5.3. Detekcija ranih refleksija 2D multifraktalnom analizom

U ovoj fazi istraživanja uvedena je pretpostavka da se multifraktalna teorija može primeniti za obradu spektrograma IR. Polazi se od pretpostavke da sagledavanje informacija u dvodimenzionalnoj predstavi IR može da obezbedi precizniju detekciju refleksija u IR, nego što je to postignuto u 1D pristupu. Spektrogram impulsnog odziva je odabran kao osnov za analizu da bi se u detekciji ranih refleksija mogle iskoristiti i vremenske i frekvencijske karakteristike refleksija. Cilj toga je da se izdvoje relevantne informacije o lokalnim singularitetima u impulsnom odzivu koje imaju jasnu vremensku i frekvencijsku raspodelu. Blok šema predloženog algoritma za obradu signala impulsnog odziva prikazana je na slici 5.28.



Slika 5.28. Blok šema metodologije za 2D detekciju ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorijski.

Za potrebe analize detekcije ranih refleksija koristi se samo oblast ranog dela impulsnog odziva prostorija, čija je granica određena na način opisan u potpoglavlju 5.1. Svi impulсни odzivi iz raspoložive baze snimljenih odziva prostorija, su korišćeni i kao unipolarni, i kao bipolarni signali.

5.3.1. Vizualizacija impulsnog odziva prostorija

Spektrogram impulsnog odziva se realizuje primenom kratkovremene furijeove transformacije (STFT) uz primenu *Blackman*-ovog prozora. Prozor je dužine k koja je jednaka dužini direktnog zvuka u impulsnom odzivu. Pri klizanju prozora u vremenu primenjuje se preklapanje veličine $k-1$.

Izabranom dužinom prozora postiže se dobra rezolucija u vremenu što je neophodno za precizniju detekciju singulariteta signala u vremenu, tj. naglih lokalnih relativnih promena signala koje odgovaraju ranim refleksijama. X osa slike spektrograma je vremenska osa gde maksimalna vrednost odgovara izabranoj vremenskoj dužini signala impulsnog odziva koji se analizira. Y osa je frekvencijska osa i maksimalna vrednost odgovara polovini učestanosti odabiranja signala. Zbog načina primene multifraktalne analize u predloženom algoritmu, spektrogram impulsnog odziva je neophodno transformisati u sivu sliku.

Dobijena slika spektrograma je predstavljena kao dvodimenzionalna matrica sa realnim i pozitivnim vrednostima. Dimenzija spektrograma je $M \times N$, pri čemu je:

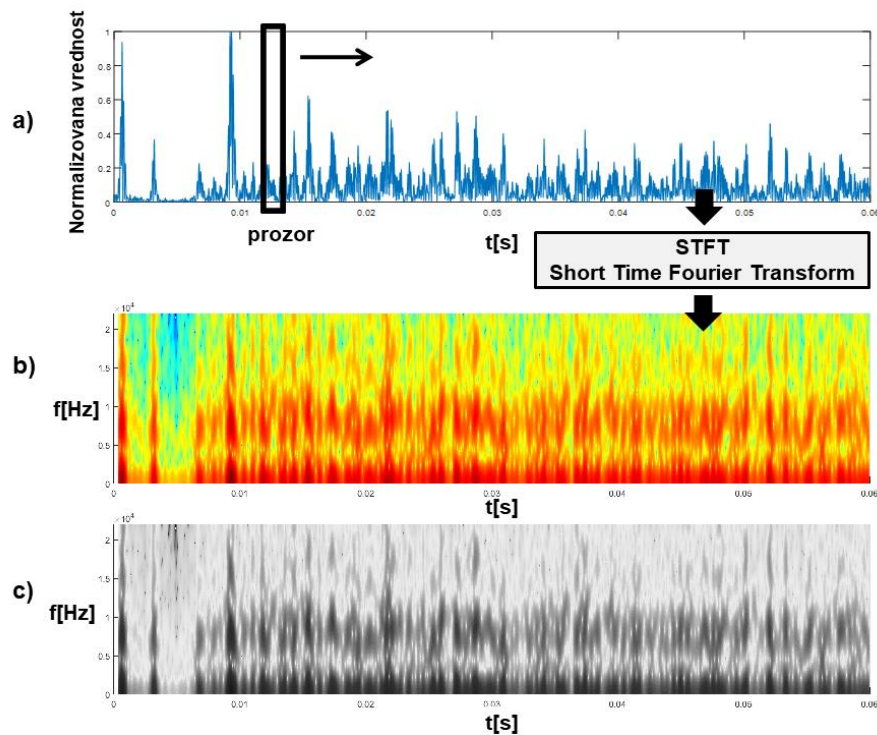
$$M = (L - k + 2)/2 \quad (5.12)$$

$$N = F/2 + 1 \quad (5.13)$$

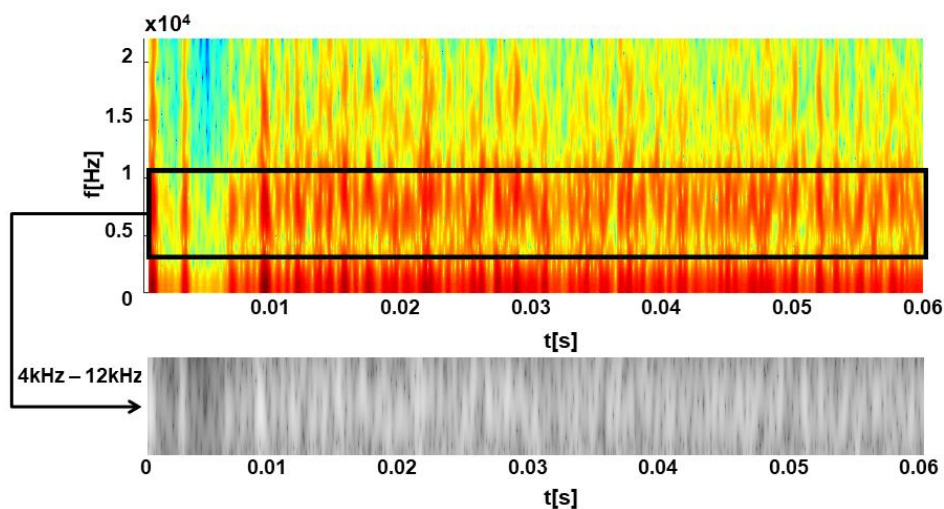
gde L predstavlja analiziranu dužinu impulsnog odziva, k je dužina prozora koji se koristi u izračunavanju spektrograma, a F je dužina FFT spektra IR. Svaki piksel u takvoj slici predstavlja nivo spektralne gustine snage, normalizovan na opseg $[0,1]$. Na slici 5.29 je ilustrovan postupak dobijanja spektrograma nad izabranim signalom impulsnog odziva prostorije.

Predloženi algoritam omogućava i izdvajanje pojedinih frekvencijskih opsega slike spektrograma, kako bi se ubrzalo vreme procesiranja slike sa jedne

strane, ali i dobile dodatne informacije o lokalnom ponašanju singulariteta u slici u zavisnosti od korišćenog frekvencijskog opsega, sa druge strane. Na slici 5.30 je ilustrovano izdvajanje frekvencijskog opsega od 4kHz do 10.2kHz sa slike spektrograma.



Slika 5.29. Ilustracija formiranja spektrograma nad 1D signalom. a) bipolarni impulsni odziv prostorije; b) dobijen spektrogram primenom STFT; c) siva slika spektrograma.



Slika 5.30. Izdvojeni frekvencijski opseg spektrograma nad kojim je vršena 2D multifraktalna analiza.

5.3.2. Multifraktalna analiza izračunavanje Hölder-ovih eksponenata u 2D domenu

Slika ili deo slike spektrograma impulsnog odziva predstavlja ulazni podatak za 2D MF analizu nad kojom se vrši dalja obrada. Multifraktalna svojstva slike su kvantitativno opisana metodom histograma. Za svaki piksel izračunava se vrednost Hölder-ovog eksponenta koja kvantifikuje lokalnu regularnost signala u okolini posmatrane pozicije na slici. Izračunavanje vrednosti Hölder-ovog eksponenta je vršeno metodom “*box-countig*” na sličan način kako je to rađeno u prethodnoj fazi istraživanja koje je opisano u Poglavlju 5.2.1. Mere koje su korišćene za opisivanje lokalne regularnosti su suma, maksimum, minimum, maksimum horizontalne devijacije i maksimum kvadratne horizontalne devijacije u odnosu na centralnu poziciju unutar pozicioniranog boksa na slici. Navedene mere su definisane izrazima:

$$\text{max: } \mu_{\varepsilon}(n, m) = \max_{j, r \in S_{\varepsilon}} y(j, r) \quad (5.14)$$

$$\text{min: } \mu_{\varepsilon}(n, m) = \min_{j, r \in S_{\varepsilon}^*} y(j, r) \quad (5.15)$$

$$\text{sum: } \mu_{\varepsilon}(n, m) = \sum_{j, r \in S_{\varepsilon}} y(j, r) \quad (5.16)$$

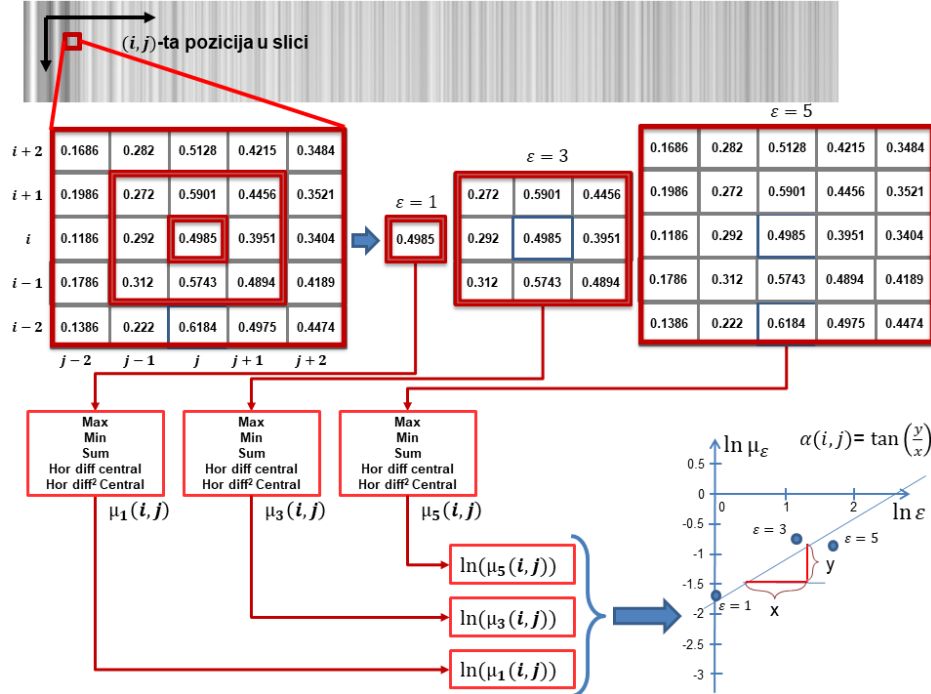
$$\text{hor diff central: } \mu_{\varepsilon}(n, m) = \max_{j, r \in S_{\varepsilon}} |y(j, m) - y(j, r)| \quad (5.17)$$

$$\text{hor diff}^2 \text{ central: } \mu_{\varepsilon}(n) = \max_{j, r \in S_{\varepsilon}} |y(j, m) - y(j, r)|^2 \quad (5.18)$$

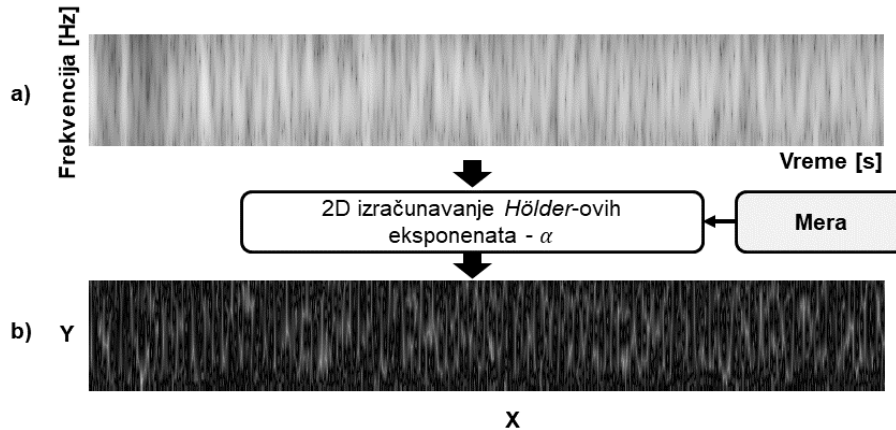
pri čemu je (n, m) (n, m) -ta pozicija na slici spektrograma za koju se lokalno izračunava mera $\mu_{\varepsilon}(n, m)$ nad obuhvaćenim uzorkom slike S_{ε} , boksom dimenzije ε . U izrazu (5.15) S_{ε}^* predstavlja skup nenulnih vrednosti uzorka S_{ε} . Na slici 5.31 je ilustrovan postupak izračunavanja vrednosti eksponenata α za svaku poziciju piksela na slici spektrograma.

Visoke vrednosti Hölder-ovih eksponenata ukazuju na nagle relativne promene u okolini posmatranog piksela. Izračunate vrednosti Hölder-ovih eksponenata za sve piksele upisane su u matricu A koja je istih dimenzija kao i slika spektrograma. Promene vrednosti matrice A po kolonama ukazuju na promene vrednosti Hölder-ovih eksponenata u vremenu, dok promene vrednosti

matrice A po vrstama ukazuju na promene vrednosti Hölder-ovih eksponenta po frekvencijama. Na slici 5.32 je prikazana formirana slika izračunatih eksponentata α pri čemu je za meru uzeta *Hor diff² central*, izraz (5.18).



Slika 5.31. Ilustracija 2D izračunavanja Hölderovih eksponentata za različite mere



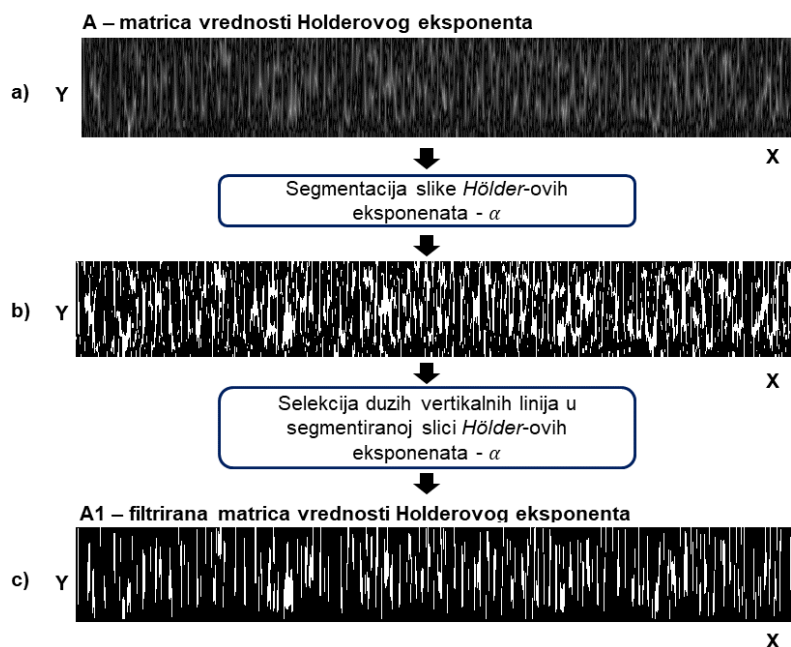
Slika 5.32. Ilustracija formiranja slike Hölderovih eksponentata. Korišćena mera: *Hor diff² central*; a) slika spektrograma kao ulazna slika u 2D multifraktalnu analizu; b) slika eksponentata α – A matrica.

5.3.3. Modifikacija slike Hölderovih eksponentata

Nakon 2D multifraktalne analize i formiranja slike vrednosti α , neophodno je izvršiti dodatnu obradu izračunatih vrednosti Hölderovih eksponentata kako bi

detekcija refleksija na kraju bila preciznija. Cilj ove dodatne obrade je da se izdvoje vrednosti Hölder-ovih eksponenata koje ukazuju na relativno velike promene energije, odnosno spektralne gustine snage spektrograma u vremenu. Zbog toga je neophodno zadržati samo visoke vrednosti Hölder-ovih eksponenata na slici. Filtriranje slike izračunatih eksponenata α je realizovano primenom praga vrednosti medijane, s tim što vrednošću medijane nije pokriveno 50%, već 75% uzorka.

Dodatna pretpostavka je da vremenske pozicije naglih promena energije spektrograma u vremenu, gledano u širem frekvencijskom opsegu, ukazuju na vremenske pozicije ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorijski. To je bio razlog da se u filtriranoj slici eksponenata α iz prethodnog koraka, zadrže samo one vrednosti α koje dovoljno dugo bez prekida "opstaju" duž frekvencijske ose na slici. Drugim rečima, zadržane su dovoljno duge neprekidane vertikalne linije u filtriranoj slici A. Krajnji rezultat ovog postupka je filtrirana slika eksponenata α - A1 matrica. Na slici 5.33. je prikazan postupak filtriranja originalne slike Hölder-ovih eksponenata.

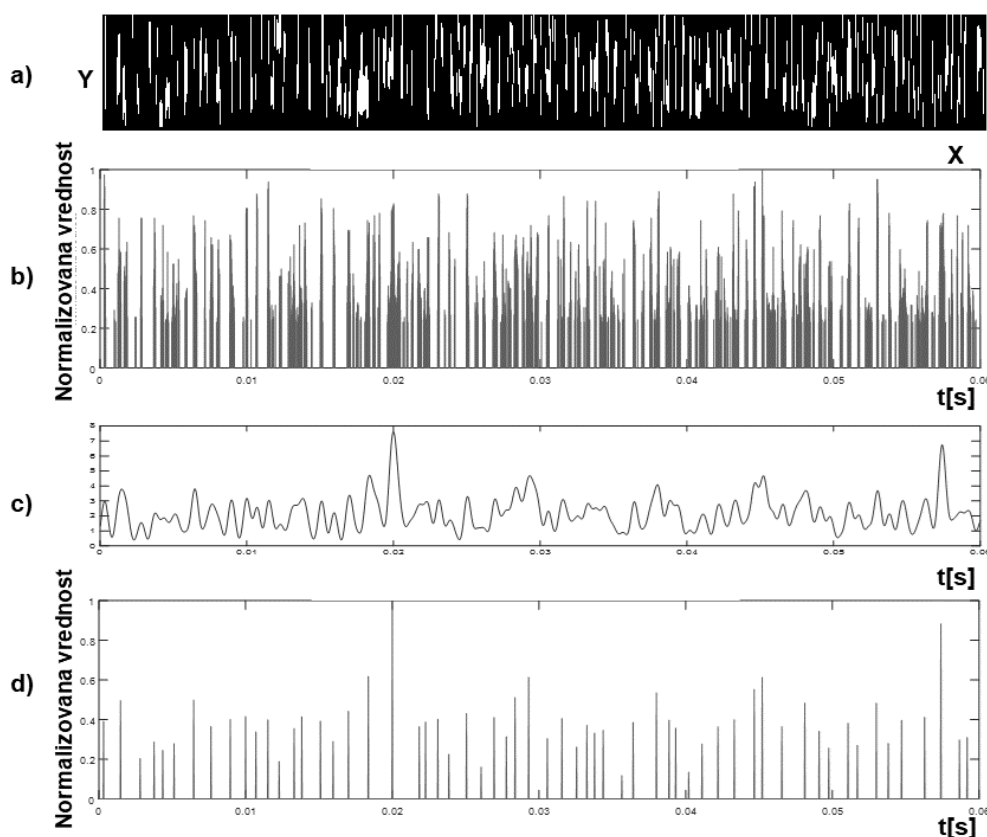


Slika 5.33. Ilustracija filtriranja slike Hölderovih eksponenata. a) matrica A - originalna slika eksponenata α ; b) filtriranje matrice A pragom medijane; c) matrica A1 - zadržane bez prekida visoke promene eksponenata α u širem frekvencijskom opsegu

5.3.4. Selekcija Holderovih eksponenata i inverzno mapiranje

Selekcija vrednosti Hölder-ovih eksponenata iz originalne slike A i filtrirane slike $A1$, čije će vremenske pozicije ukazivati na vremenske pozicije detektovanih ranih refleksija je realizovana kroz četiri postupka modifikacije Hölder-ovih eksponenata.

I) Postupak modifikacije 1 je opisan u tri koraka i ilustrovan na slici 5.34.



Slika 5.34. Ilustracija postupka modifikacije 1 u selekciji Holderovih eksponenata. a) Filtrirana slika $A1$; b) Niz N modifikovanih vrednosti Hölder-ovih eksponenata nakon sumiranja kolona u $A1$; c) Anvelopa za niz N ; d) Lokalni maksimumi anvelope pod c.

Prvi korak predstavlja formiranje niza N modifikovanih vrednosti Hölder-ovih eksponenata iz filtrirane slike eksponenata α (filtrirana $A1$ matrica iz 5.3.3), tako što se sumiraju vrednosti α po kolonama slike $A1$ i suma eksponenata α svake kolone predstavlja po jednu modifikovanu vrednost Hölder-ovog eksponenta u formiranom nizu N .

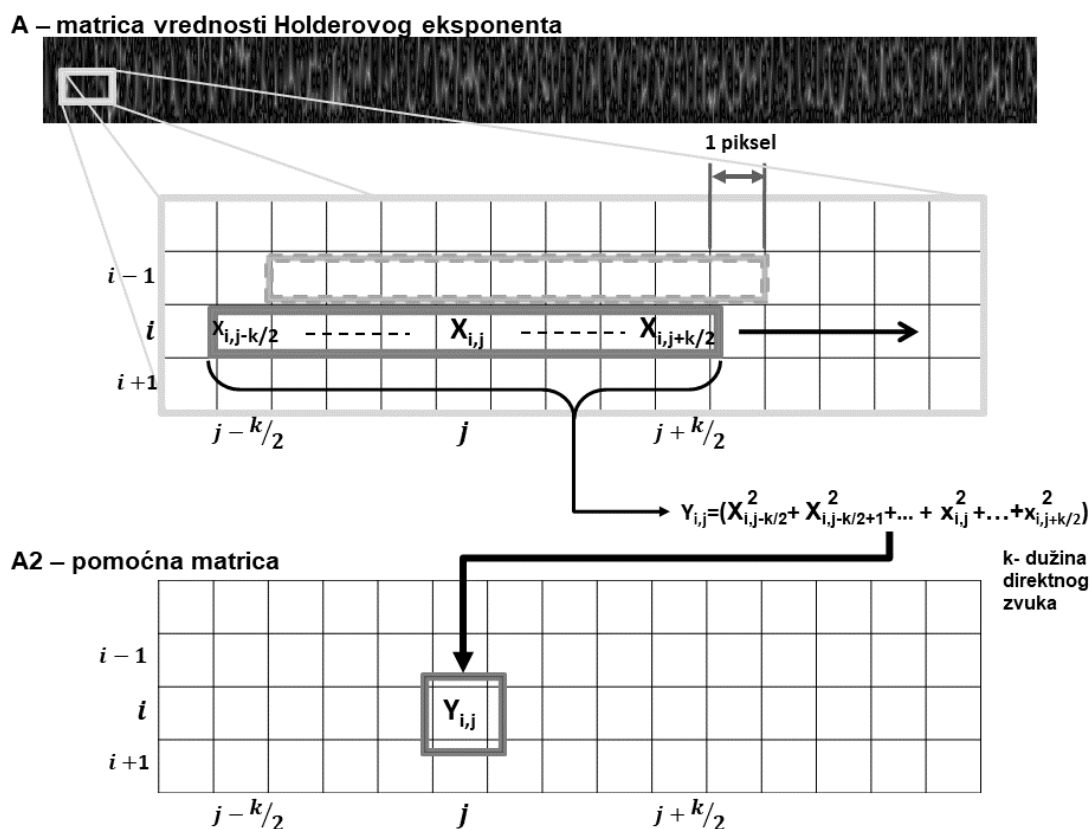
Drugi korak obuhvata računanje anvelope nad modifikovanim vrednostima eksponenata α u nizu N , kako bi se u N više blisko pozicioniranih vrednosti α

predstavilo jednom vrednošću čija pozicija odgovara poziciji jednog od lokalnih maksimuma anvelope.

Treći korak podrazumeva utvrđivanje lokalnih maksimuma anvelope, a potom filtriranje niza N pozicijama lokalnih maksimuma prethodno formirane anvelope nad modifikovanim Hölder-ovim eksponentima u nizu.

II) Postupak modifikacije 2 utvrđuje lokalnu energetska zastupljenost viših vrednosti Hölderovih eksponenata duž redova (vremenske ose) u originalnoj slici Hölderovih eksponenata, tj. matrici A. U tu svrhu se koristi jednodimenzionalni prozor dužine k jednak dužini direktnog zvuka u impulsnom odzivu.

U prvom koraku realizacije modifikacije 2, prozor klizi po matrici A sa preklapanjem $k - 1$ i u svakoj iteraciji se sabiraju kvadrati vrednosti Hölder-ovih eksponenata obuhvaćeni prozorom. Svaki takav rezultat sabiranja upisuje se u pomoćnu matricu A2 na poziciji centralnog polja posmatranog prozora. Matrica A2 je istih dimenzija kao i matrica A. Postupak formiranja matrice A2 je ilustrovan na slici 5.35.



Slika 5.35. Prikaz formiranja pomoćne matrice A2

U drugom koraku vrednosti iz matrice A2 se sumiraju po kolonama i rezultati upisuju u poseban niz N1. Ovim postupkom se pronalaze lokalne energetske vrednosti α u matrici A2 koje u zbiru po kolonama imaju visoke vrednosti amplitude i utvrđuju pozicije na kojima Hölder-ovi eksponenti imaju visoke vrednosti u širem frekvencijskom opsegu. Formiran niz N1 sadrži modifikovane vrednosti Hölder-ovih eksponenata.

Treći korak je modifikacija vrednosti Hölder-ovih eksponenata u samom nizu N1, formiranog u prethodnom koraku. Vrednosti eksponenata α u N1 se lokalno filtriraju, tako što se vrednosti α u nizu N1 umanjuju za vrednost lokalnog praga koji se izračunava kao vrednost medijane za 75% uzorka svih odmeraka obuhvaćenih prozorom u nizu N1. U ovom postupku, prozor je dužine k i iterativno se pomera bez preklapanja. U svakoj iteraciji, nakon izračunatog lokalnog praga, vrednosti modifikovanih Holderovih eksponenata obuhvaćenih prozorom se filtriraju i zadržavaju samo one vrednosti koje premašuju izračunati prag unutar zadatog prozora.

Četvrti korak uključuje formiranje anvelope nad filtriranim modifikovanim vrednostima α u N1.

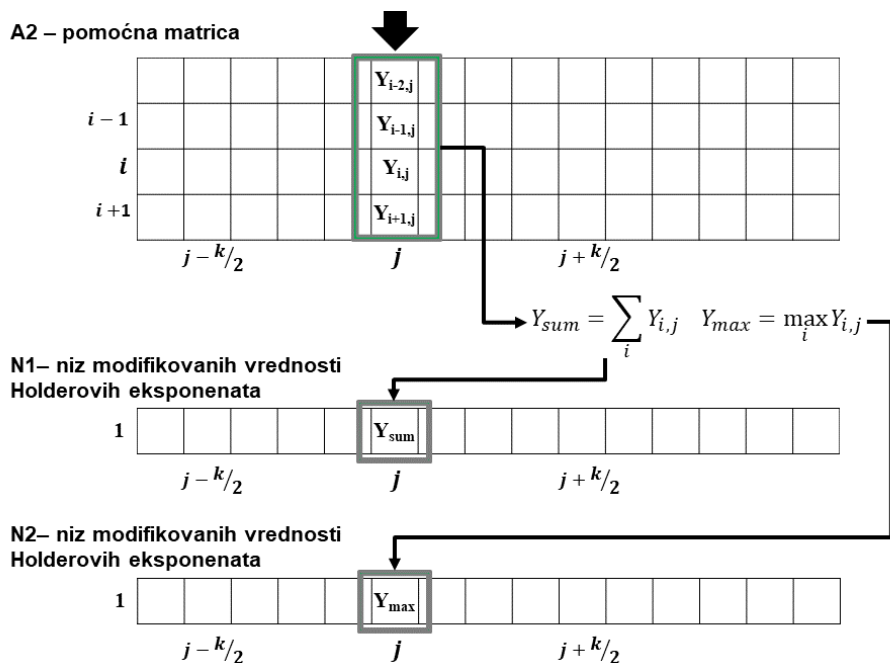
Poslednji, peti korak modifikacije 2 predstavlja utvrđivanje vremenskih pozicija lokalnih maksimuma iz formirane anvelope u prethodnom koraku.

III) Postupak modifikacije 3 je sličan modifikaciji 2, razlika je jedino u drugom koraku, gde umesto sabiranja svih izračunatih energetske vrednosti α po kolonama matrice A2, ovog puta se utvrđuje maksimalna vrednost svih izračunatih energetske vrednosti α za svaku kolonu matrice A2 i ta vrednost upisuje u niz N2. Na slici 5.36 je prikazan postupak formiranja nizova N1 i N2 iz opisanih postupaka modifikacije 2, i 3, respektivno.

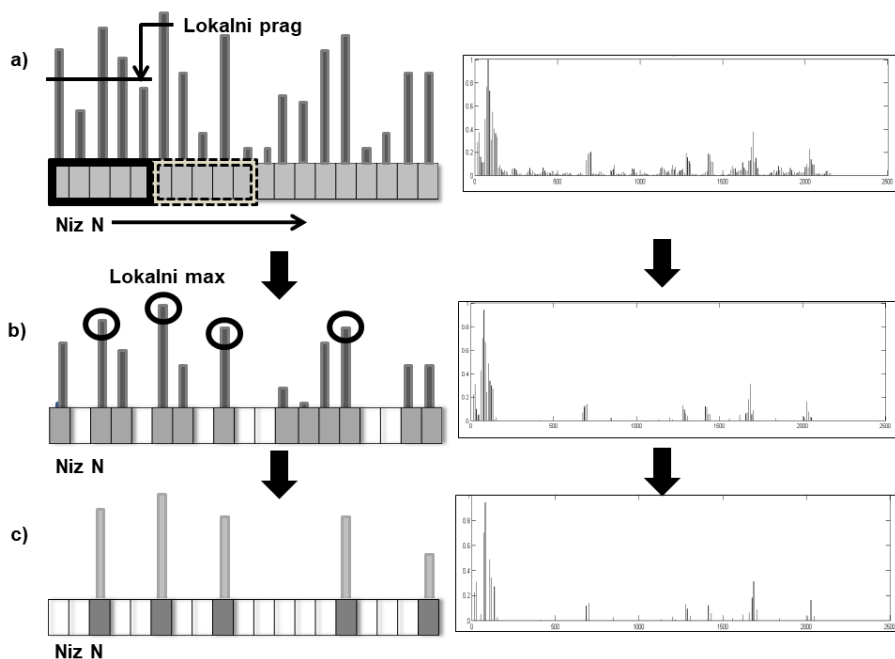
IV) Postupak modifikacije 4 je sličan modifikacijama 2 i 3, razlika je u prvom koraku gde se u ovom postupku direktno koristi originalna slika Hölderovih eksponenata, matrica A.

Drugi korak uključuje formiranje niza N3 sumiranjem vrednosti α po kolonama matrice A. gde umesto sabiranja svih izračunatih energetske vrednosti α po kolonama matrice A2, ovog puta se utvrđuje maksimalna vrednost svih izračunatih energetske vrednosti α za svaku kolonu matrice A2 i ta vrednost

upisuje u niz N2. Na slici 5.36. je prikazan postupak formiranja nizova N1 i N2 iz opisanih postupaka modifikacije 2, i 3, respektivno. Na slici 5.37 je prikazan postupak filtriranja nizova N1, N2 ili N3 upotrebom lokalnog praga medijane.

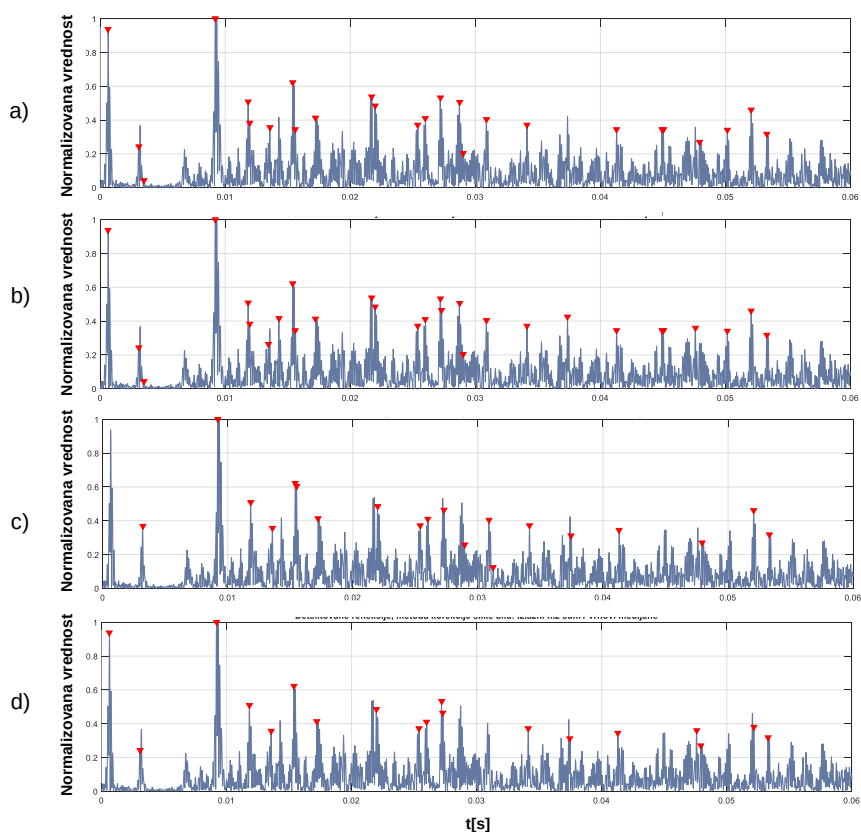


Slika 5.36. Postupak formiranja niza N1 sumiranjem vrednosti svake kolone pomoćne matrice A2, odnosno niza N2 određivanjem maksimuma vrednosti u svakoj koloni matrice A2



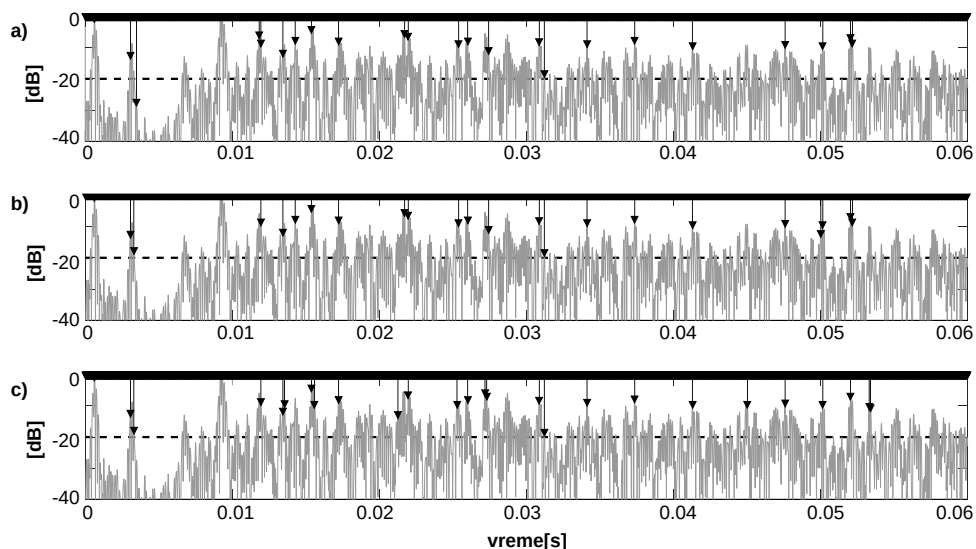
Slika 5.37. Ilustracija postupka filtriranja niza N lokalnim pragom medijane unutar uzorka obuhvaćenog prozorom

Finalne vrednosti izdvojenih Hölderovih eksponenata iz filtriranih nizova N, N1, N2 i N3, korišćenjem jednog od opisanih modifikacija 1, 2, 3 ili 4 respektivno, koriste se dalje u postupku inverznog mapiranja, čime se na osnovu vremenskih pozicija finalnih modifikovanih vrednosti α u nizu, detektuju vremenske pozicije ranih refleksija u analiziranom impulsnom odzivu prostorije. Pretpostavka je da se vremenske pozicije izdvojenih modifikovanih vrednosti Hölderovih eksponenata poklapaju sa vremenskim pozicijama ranih refleksija u impulsnom odzivu. Na slici 5.38. su prikazane detektovane refleksije u impulsnom odzivu kao rezultat 2D multifraktalne analize, kao rezultat primene sva četiri opisana postupka modifikacije prethodno izračunatih vrednosti Hölderovih eksponenata. Detektovane refleksije primenom 2D multifraktalne analize u ovoj fazi istraživanja predstavljaju ujedno i izlaz iz bloka 3 blok šeme predložene metodologije u disertaciji, slika 5.1. i slika 5.28.

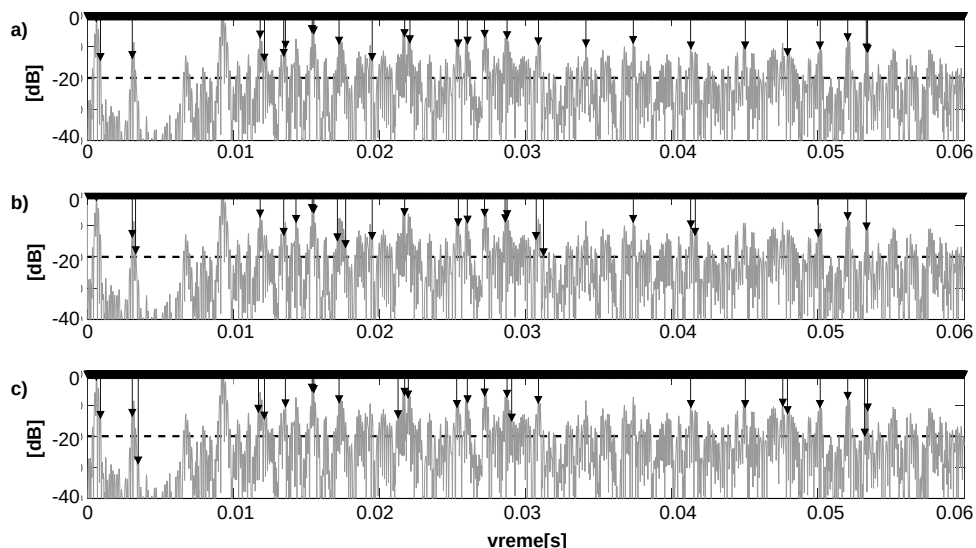


Slika 5.38. Detektovane refleksije u impulsnom odzivu prostorije primenom 2D MF analize, korišćenjem mere: $hor\ diff^2\ central$. Hölderovi eksponenti modifikovani: a) modifikacijom 1; b) modifikacijom 2; c) modifikacijom 3; d) modifikacijom 4

Na slikama 5.39 i 5.40 prikazane su detektovane refleksije u impulsnom odzivu primenom 2D multiraktalne anelize, pri čemu su analizirani samo frekvencijski delovi slike spektrograma koji odgovaraju centralnim učestanostima oktava: 250Hz, 500Hz i 1000Hz (slika 5.40), 2000Hz, 4000Hz i 8000Hz (slika 5.40).



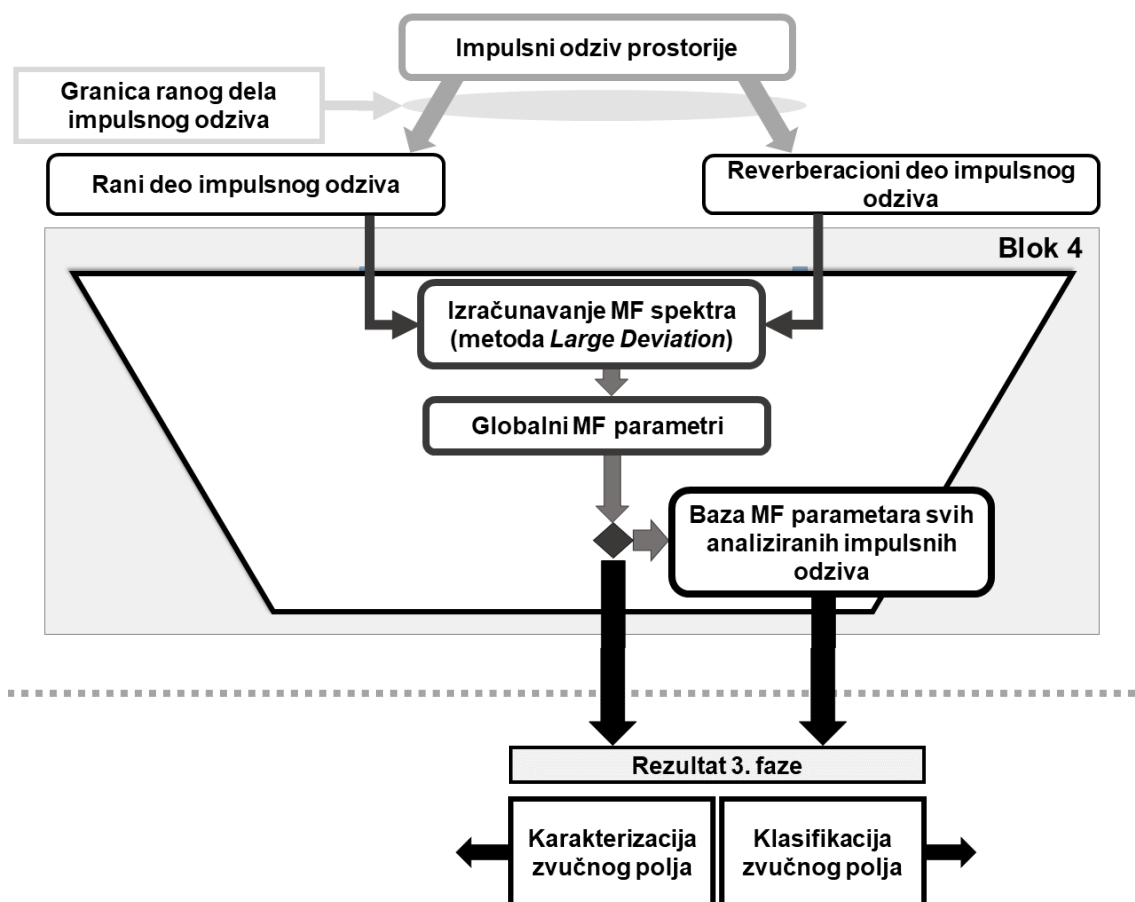
Slika 5.39. Detektovane refleksije u impulsnom odzivu prostorije primenom 2D multifraktalne analize nad delom slike spektrograma, korišćena mera: $hor\ diff^2\ central$, Modifikacija Hölderovih eksponenata: modifikacija 4, Centralna učestanost korišćenih opsega spektrograma: a) 250Hz; b) 500Hz; c) 1000Hz.



Slika 5.40. Detektovane refleksije u impulsnom odzivu prostorije primenom 2D multifraktalne analize nad delom slike spektrograma, korišćena mera: $hor\ diff^2\ central$, Modifikacija Hölderovih eksponenata: modifikacija 4, Centralna učestanost korišćenih opsega spektrograma: a) 2000Hz; b) 4000Hz; c) 8000Hz.

5.4. Karakterizacija i klasifikacija impulsnih odziva pomoću globalnih multifraktalnih parametara

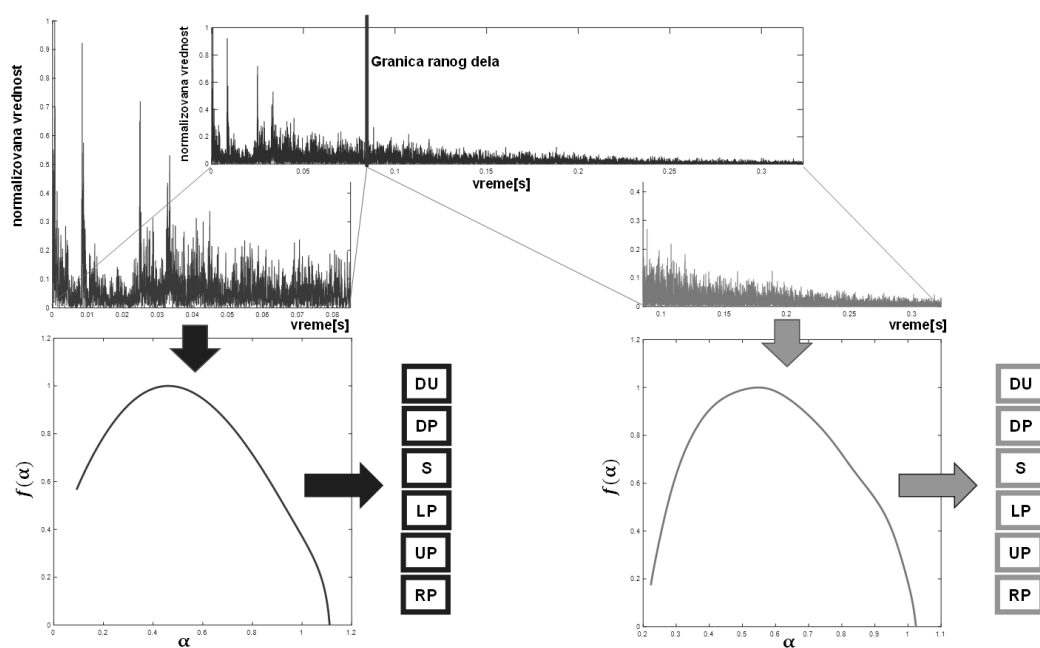
Poslednji deo istraživanja koji je predstavljen u ovoj disertaciji jeste karakterizacija i klasifikacija impulsnih odziva na osnovu izračunatih globalnih multifraktalnih parametara. Blok šema koja ilustruje ovaj deo istraživanja je predstavljena na slici 5.41 i predstavlja detaljniji uvid u blok 4 (ilustrovan u okviru glavne blok šeme metodologije na slici 5.1).



Slika 5.41. Ilustracija postupka karakterizacije i klasifikacije impulsnih odziva prostorija

Nakon utvrđenih granica oblasti ranih refleksija i reverberacionih delova u impulsnim odzivima prostorija pomoću metode objašnjene u potpoglavlju 5.1, u nastavku istraživanja u cilju karakterizacije i klasifikacije zvučnog polja, analiziraju se pojedinačno oblasti ranih refleksija posmatranih impulsnih odziva i njihovi reverberacioni delovi. Za svaku izdvojenju oblast impulsnog odziva prostorije (rani ili reverberacioni deo) izračunava se multifraktalni spektar

metodom velikih devijacija (*Large Deviation*) na osnovu koga se zatim određuju globalni multifraktalni parametri spektra: Desni nagib krive multifraktalnog spektra (DU), Širina krive multifraktalnog spektra (S), Desna površina (DP), Leva površina (DP), Ukupna površina (UP) i odnos desne i leve površine (RP) krive multifraktalnog spektra. Iz sličnih razloga kao u potpoglavlju 5.1. za formiranje multifraktalnog spektra izabrana je metoda Velikih devijacija, jer se tom metodom može dobiti mnogo više detalja i informacija o raspodeli singulariteta u izdvojenom delu impulsnog odziva. Takođe kao i u metodi opisanoj u 5.1, izračunavanje multifraktalnog spektra je izvršeno uz pomoć softverskog paketa *FracLab* [Vehel and Legrand, 2004]. Ilustracija izračunavanja multifraktalnog spektra, a potom i globalnih multifraktalnih parametara nad izabranim delovima signala impulsnog odziva je prikazana na slici 5.42.



Slika 5.42. Ilustracija postupka izračunavanja multifraktalnog spektra i globalnih multifraktalnih parametara za rani deo (levi deo slike), odnosno reverberacioni deo (desni deo slike) impulsnog odziva prostorije

Navedeni globalni parametri su izračunati za sve impulsne odzive koji su korišćeni u istraživanju, a njihove vrednosti potom uporedo analizirane u postupku karakterizacije i klasifikacije impulsnih odziva.

6. Analiza predloženih metoda u fizičkom modelu promenljive difuznosti

6.1. Fizički model prostorije promenljive difuznosti

Fizički modeli se koriste sa ciljem simulacije ponašanja i prostiranja zvuka u realnim prostorijama. Dimenzije fizičkih modela najčešće se skaliraju u razmeri 1:10 ili 1:50 u odnosu na originalne dimenzije realnih prostorija. Glavna karakteristika fizičkih modela je njihova dinamička sličnost sa originalnim prostorijama, jer bez obzira na različite dimenzije realne prostorije i njenog fizičkog modela, identičan je proces ponašanja zvučnog polja u njima, tj. dinamički procesi se obavljaju na isti način, po istim osnovnim fizičkim zakonitostima, u oba sistema. Prilikom konstrukcije fizičkog modela sa stepenom skaliranja $1/n$, moraju biti zadovoljeni sledeći kriterijumi:

- Sve dimenzije fizičkog modela su smanjene $1/n$ u odnosu na originalne dimenzije prostorije koja se modelira;
- Pošto je medijum prenosa zvuka u modelu vazduh (isto kao i u originalnoj prostoriji), brzina zvuka ostaje nepromenjena u modelu i originalnoj prostoriji, a vreme između refleksija se smanjuje u odnosu $1/n$;
- Talasna dužina zvuka u modelu mora biti smanjena $1/n$ puta u odnosu na talasnu dužinu zvuka u originalnoj prostoriji. Veličine svih dimenzija (d) i talasnih dužina (μ) u modelu i u originalnoj prostoriji zadovoljavaju kriterijum:

$$\frac{d_{op}}{d_{fm}} = \frac{\mu_{op}}{\mu_{fm}} = n \quad (6.1)$$

gde indeks *op* predstavlja parametre u originalnoj prostoriji, dok indeks *fm* ukazuje na parametre u fizičkom modelu.

- Zbog smanjenja talasne dužine u modelu n puta, frekvencije u modelu moraju biti povećane za odnos n ;

- Apsorpcija vazduha u modelu treba da ima vrednost n puta veću u odnosu na vrednost apsorpcije koja se primenjuje na originalnim frekvencijama;
- Ako je akustička impedansa površina modela prostorije (u kome su dimenzije smanjene n puta, tj. frekvencijski opseg zvuka u modelu povećan n puta), jednaka impedansi odgovarajućih površina prostorije originalnih dimenzija (sa originalnim zvučnim frekvencijskim opsegom), onda sledi da će vreme reverberacije u modelu biti smanjeno n puta u odnosu na vreme reverberacije u originalnoj prostoriji [Harwood and Burd 1970].

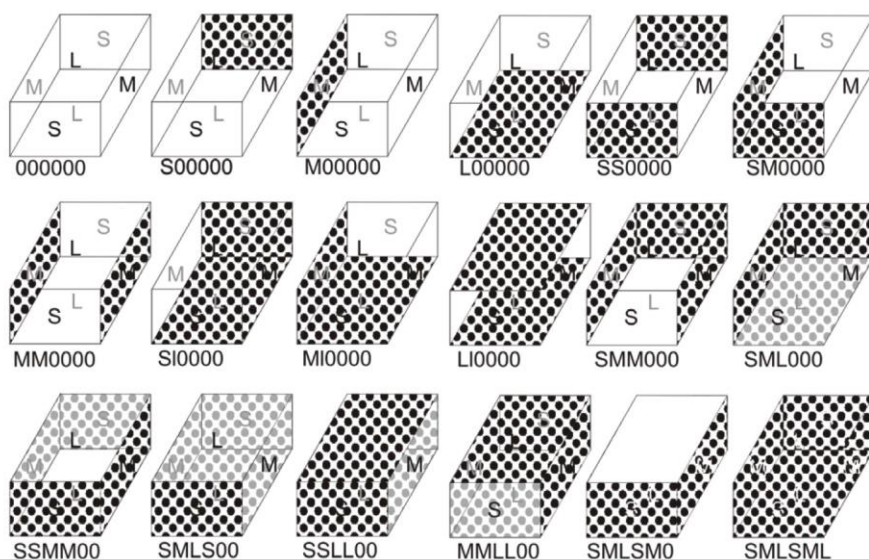
Rad sa modelima podrazumeva rad sa transponovanim frekvencijskim opsegom i sa nestandardnom mernom opremom koja omogućava rad na frekvencijama n puta većim od audio opsega. Impulsni odziv snimljen u modelu je zato neophodno vratiti u izvorni opseg frekvencija pre nego što se on upotrebi u analizi realne prostorije. Pojam, principi modelovanja i načini snimanja u fizičkim modelima objašnjeni su u [Mijić and Šumarac-Pavlović, 2007] i [Šumarac-Pavlović and Mijić, 2008].

Fizički model prostorije sa promenljivom difuznošću koji je korišćen u ovom istraživanju, detaljno je opisan u [Šumarac-Pavlović and Petrović 2010]. Ovaj model prostorije je paralelopipednog oblika, dimenzija 80x60x47cm, skaliran u razmeri 1:10, konstruisan za potrebe ispitivanja akustičkih odziva prostorija u zavisnosti od njihove difuznosti. Model sadrži pokretne strane sa različitim difuznim površinama, sačinjene od specijalnog reljefa. Same strane modela napravljene su od drvenih ploča debljine 2cm lakiranih sa tri sloja laka kako bi se izbegla poroznost drvenih površina. Reljef na stranama je formiran od posebno pripremljenih drvenih polu-hemisfera prečnika 2cm za koje su u [Vorlander and Mommertz 2000] izračunati koeficijenti sketeringa. U [Vorlander and Mommertz 2000] je pokazano da se koeficijent sketeringa reljefne površine određuje gustinom rasporeda polu-hemisfera po posmatranoj površini. Strane su pokretne u smislu da se ravne strane bez reljefa mogu po potrebi skidati sa paralelopipeda i umesto njih dodavati strane sa reljefnom, tj. difuznom površinom. Na slici 6.1. je prikazan izgled korišćenog fizičkog modela.



Slika 6.1. Prikaz fizičkog modela različite difuznosti: a) sa ravnim stranama; b) sa difuznim stranama

Kombinovanjem strana odgovarajućih reljefnih površina i odgovarajućih difuznih karakteristika, menjaju se akustičke karakteristike prostorije, a time i struktura njenog impulsnog odziva. U eksperimentu je korišćeno 18 različitih kombinacija reljefnih i ravnih površina stranica za konstrukciju fizičkog modela prostorije promenljive difuznosti, što je ilustrovano na slici 6.2.



6.2. Prikaz 18 različitih kombinacija reljefnih i ravnih površina u konstrukciji fizičkog modela difuzne prostorije

U oznaci „xxxxxx“, „0“ ukazuje na postojanje jedne ravne strane (strane glatke površine), dok „S“, „M“ i „L“ ukazuju na postojanje jedne strane paralelopipeda sa reljefnom površinom. „S“, „M“ i „L“ označavaju stranice dimenzije 47x60, 80x47 i 60x80 cm, respektivno. Za svaku kombinaciju reljefnih

i ravnih površina u konstrukciji fizičkog modela snimljen je impulsni odziv. Na ovaj način dobijeno je 18 različitih impulsnih odziva koji oslikavaju 18 različitih karakteristika prostorija, sa rasponom indeksa difuznosti (SDI) od 0 do 1. Vrednost SDI=0 odgovara modelu sa svim ravnim zidovima, dok vrednost SDI=1 odgovara modelu sa svim difuznim površinama. U tabeli 6.1. date su oznake svih 18 kombinacija fizičkog modela prostorije promenljive difuznosti koji su korišćeni tokom ovog istraživanja, kao i vrednosti SDI izračunate za svaki pojedinačni slučaj. Razlike između ovih impulsnih odziva ogledaju se u drugačijoj strukturi, rasporedu i obliku prvih refleksija. Budući da su ovi impulsni odzivi snimljeni u laboratorijskim uslovima sa kontrolisanom promenom difuznosti, oni su odgovarajući za proveru adekvatnosti predloženih metoda za karakterizaciju zvučnog polja u ovoj disertaciji.

Tabela 6.1. Pregled indeksa difuznosti površina prostorije (SDI) i oznaka impulsnih odziva, snimljenih u fizičkom modelu promenljive difuznosti

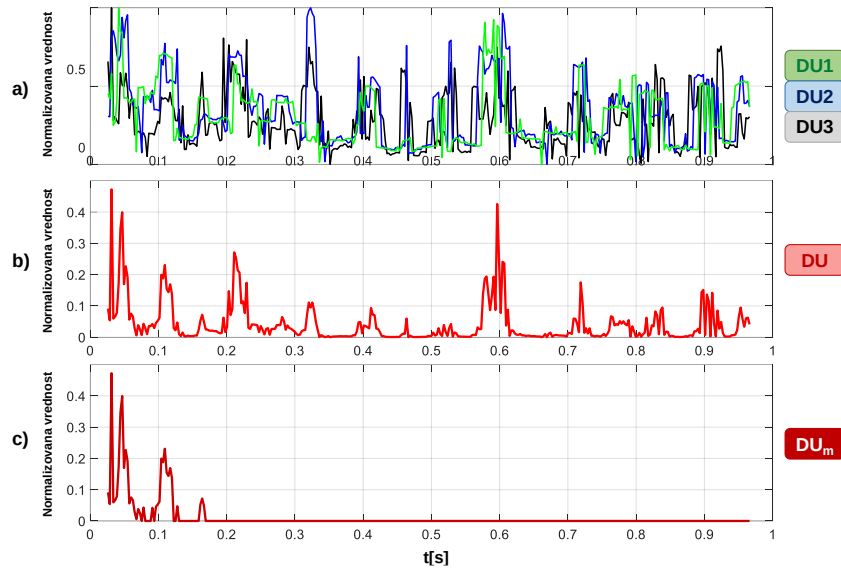
Oznaka kombinacije reljefnih i ravnih površina	000000	S00000	M00000	L00000	SS0000	SM0000	MM0000	SL0000	ML0000
SDI	0	0.1239	0.1652	0.2109	0.2478	0.2891	0.3304	0.3348	0.3761
Oznaka IR	IR ₀₀₀₀₀₀	IR _{S00000}	IR _{M00000}	IR _{L00000}	IR _{SS0000}	IR _{SM0000}	IR _{MM0000}	IR _{SL0000}	IR _{ML0000}
Oznaka kombinacije reljefnih i ravnih površina	LL0000	SMM000	SML000	SSMM00	SMLS00	SSLL00	MMLL00	SMLSM0	SMLSML
SDI	0.4218	0.4543	0.5	0.5782	0.6239	0.6696	0.7522	0.7891	1
Oznaka IR	IR _{LL0000}	IR _{SMM000}	IR _{SML000}	IR _{SSMM00}	IR _{SMLS00}	IR _{SSLL00}	IR _{MMLL00}	IR _{SMLSM0}	IR _{SMLSML}

6.2. Utvrđene granice oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu

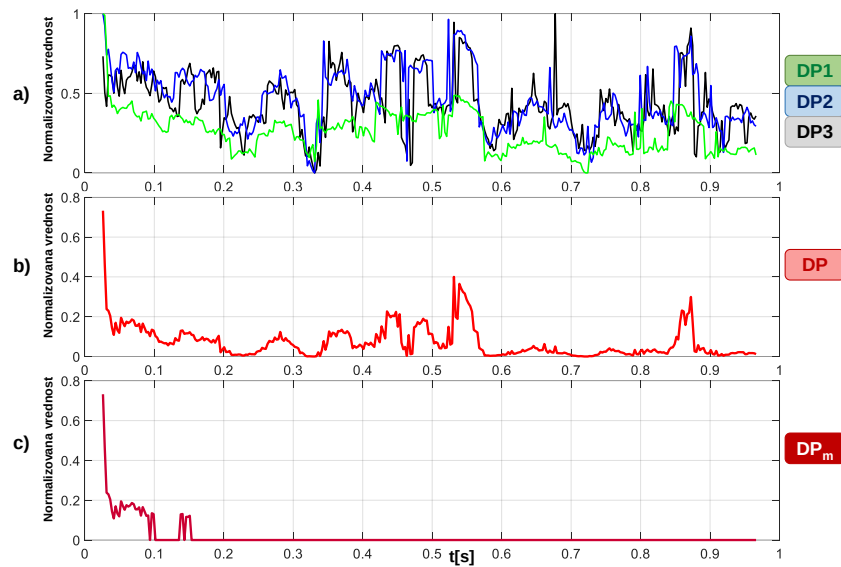
Granice oblasti ranih refleksija izračunate su korišćenjem globalnih parametara multifraktalnog spektra dobijenih multifraktalnom analizom. Korišćena je metoda, opisana blokom 1 u blok šemi metodologije za karakterizaciju zvučnog polja navedene u poglavlju 5.1. Predloženi postupak utvrđivanja granice oblasti ranih refleksija je prvo analiziran nad impulsnim odzivima snimljenim u fizičkom modelu prostorije promenljive difuznosti. Impulsni

odzivi su analizirani kao bipolarni, unipolarni i kvadrirani unipolarni signali, normalizovani u opsegu između 0 i 1.

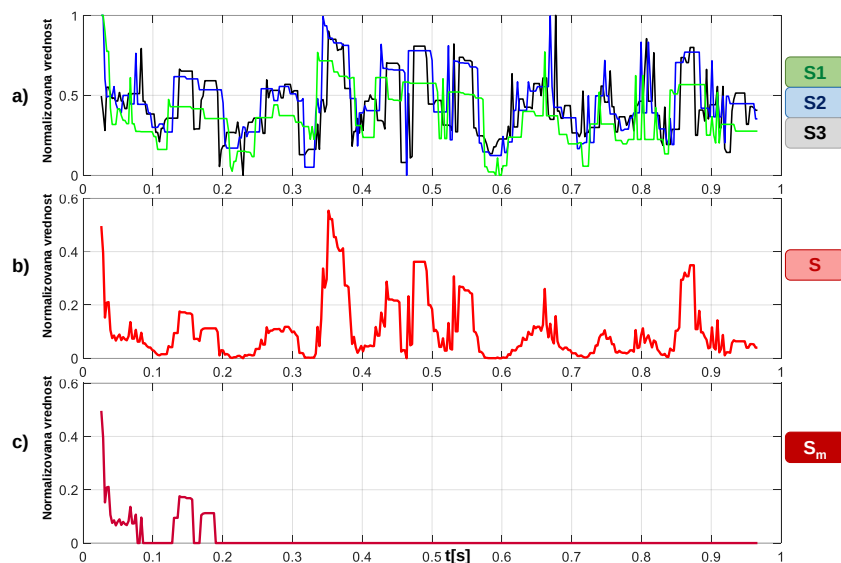
Na slikama 6.3a, 6.4a, 6.5a, 6.6a, 6.7a i 6.8a prikazane su vremenske raspodele izračunatih globalnih multifraktalnih parametara: Desni nagib MF spektra – DU; Desna površina MF spektra; Širina MF spektra – S; Leva površina MF spektra – LP; Ukupna površina MF spektra – UP; Odnos desne i leve površine MF spektra – RP, nad bipolarnim impulsnim odzivom IR_{000000} . Prozori koji su iterativno korišćeni u postupku selekcije dela impulsnog odziva za multifraktalnu analizu su dužina $L_1=52,08\text{ms}$, $L_2=20,8\text{ms}$ i $L_3=36,45\text{ms}$, i njihov korak pomeranja je bio $2,6\text{ms}$. Navedene vremenske dužine prozora su izračunate na osnovu njihovih dužina izraženih u broju odmeraka: $L_1=1001$ odmeraka, $L_2=701$ odmeraka, $L_3=401$ odmeraka, korak pomeranja od 50 odmeraka, i učestanosti odmeravanja korišćenih impulsnih odziva, $F_s=19200\text{Hz}$. Kao rezultat korišćenja tri prozora različite dužine, formirane su tri vremenske raspodele svakog nevedenog globalnog MF parametra, prikazane u tri različite boje (zelena za L_1 , plava za L_2 i crna za L_3 dužinu korišćenog prozora). Na slikama 6.3b, 6.4b, 6.5b, 6.6b, 6.7b i 6.8b prikazane su dobijene vremenske raspodele svakog analiziranog globalnog MF parametra kao rezultat množenja dobijenih vremenskih raspodela istih parametara za sva tri pojedinačna prozora dužine L_1 , L_2 i L_3 , dok je rezultat njihove dodatne modifikacije (opisana u predloženoj metodi u poglavlju 5.1) prikazan na slikama 6.3c, 6.4c, 6.5c, 6.6c, 6.7c i 6.8c.



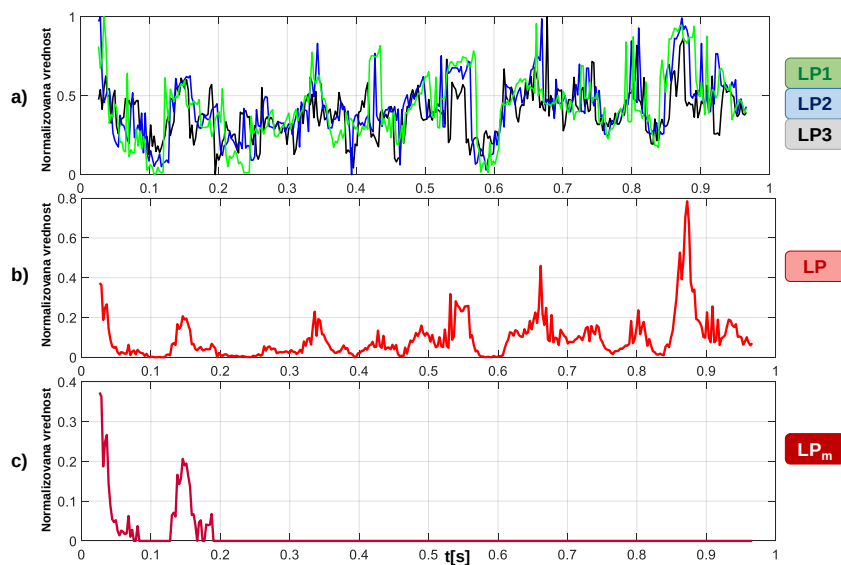
Slika 6.3. a) Prikaz raspodele globalnog MF parametra DU za bipolarni impulsni odziv IR_{000000} , korišćeni prozori dužina: $L1=52.08\text{ms}$ - zelena, $L2=36.45\text{ms}$ – plava i $L3=20.8\text{ms}$ - crna kriva; b) Raspodela DU kao umnožak raspodele DU1, DU2 i DU3; c) Kriva DU_m modifikovane raspodele DU



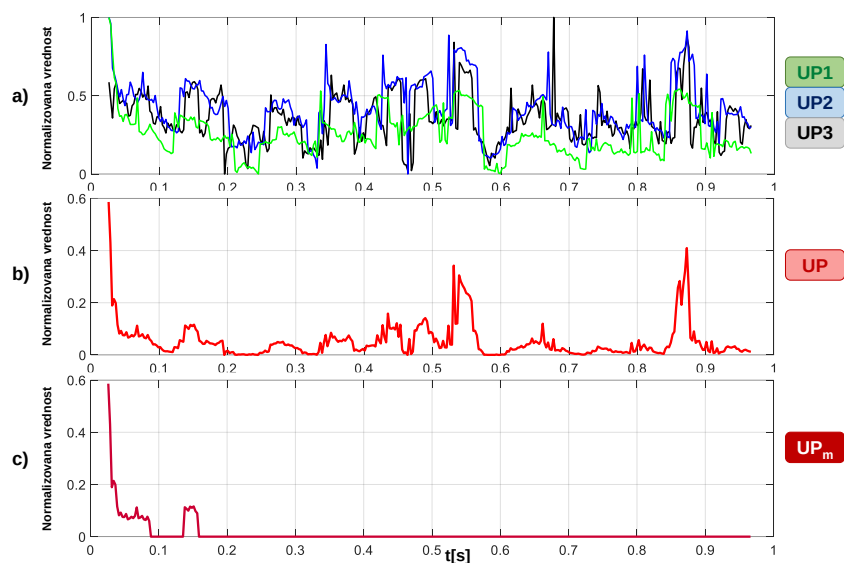
Slika 6.4. a) Prikaz raspodele globalnog MF parametra DP za bipolarni impulsni odziv IR_{000000} , korišćeni prozori dužina: $L1=52.08\text{ms}$ - zelena, $L2=36.45\text{ms}$ – plava i $L3=20.8\text{ms}$ - crna kriva; b) Raspodela DP kao umnožak raspodele DP1, DP2 i DP3; c) Kriva DP_m modifikovane raspodele DP



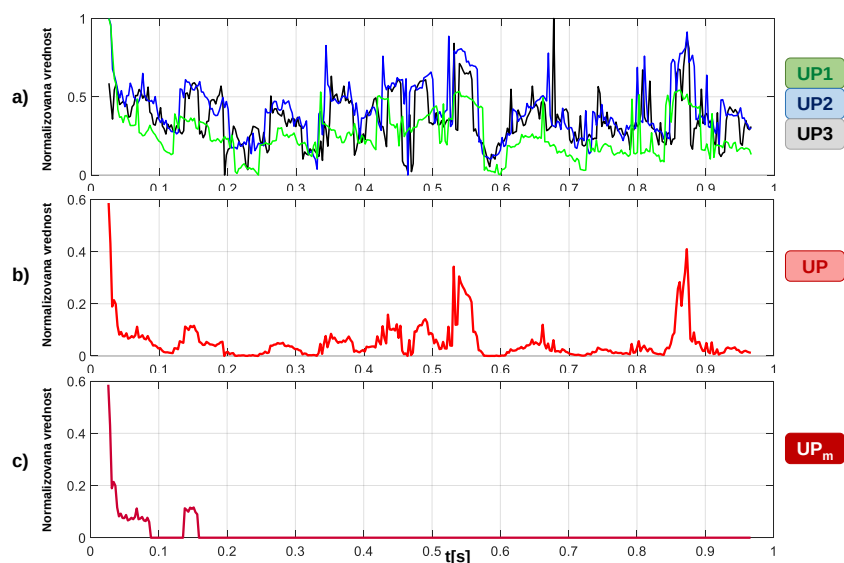
Slika 6.5. a) Prikaz raspodele globalnog MF parametra S za bipolarni impulsni odziv IR_{000000} , korišćeni prozori dužina: $L1=52.08\text{ms}$ - zelena, $L2=36.45\text{ms}$ – plava i $L3=20.8\text{ms}$ - crna kriva; b) Raspodela S kao umnožak raspodela S1, S2 i S3; c) Kriva S_m modifikovane raspodele S



Slika 6.6. a) Prikaz raspodele globalnog MF parametra LP za bipolarni impulsni odziv IR_{000000} , korišćeni prozori dužina: $L1=52.08\text{ms}$ - zelena, $L2=36.45\text{ms}$ – plava i $L3=20.8\text{ms}$ - crna kriva; b) Raspodela LP kao umnožak raspodela LP1, LP2 i LP3; c) Kriva LP_m modifikovane raspodele LP



Slika 6.7. a) Prikaz raspodele globalnog MF parametra UP za bipolarni impulsni odziv IR_{000000} , korišćeni prozori dužina: $L1=52.08\text{ms}$ - zelena, $L2=36.45\text{ms}$ - plava i $L3=20.8\text{ms}$ - crna kriva; b) Raspodela LP kao umnožak raspodele UP1, UP2 i UP3; c) Kriva UP_m modifikovane raspodele UP



Slika 6.8. a) Prikaz raspodele globalnog MF parametra RP za bipolarni impulsni odziv IR_{000000} , korišćeni prozori dužina: $L1=52.08\text{ms}$ - zelena, $L2=36.45\text{ms}$ - plava i $L3=20.8\text{ms}$ - crna kriva; b) Raspodela RP kao umnožak raspodele RP1, RP2 i RP3; c) Kriva RP_m modifikovane raspodele RP

U tabeli 6.2. zabeležene su vrednosti za granicu između oblasti ranih refleksija i reverberacionog dela dobijene primenom metode opisane u poglavlju 5.1. na bipolarne impulsne odzive snimljene u fizičkom modelu promenljive

difuznosti. Prozori koji su iterativno korišćeni u postupku selekcije dela impulsnog odziva za multifraktalnu analizu su takođe vremenskih dužina $L_1=52,08\text{ms}$, $L_2=36.45\text{ms}$ i $L_3=20.8\text{ms}$, i njihov korak pomeranja je bio 2.6ms . Granice su utvrđene analizom vremenskih raspodela svakog od šest definisanih globalnih parametara u multifraktalnom spektru: DU, DP, S, LP, UP i RP.

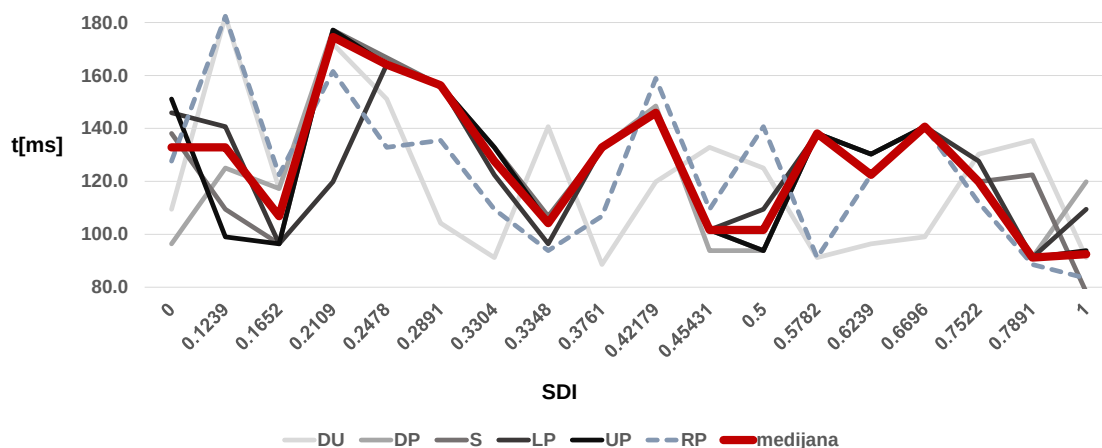
Tabela 6.2. Pregled utvrđenih vremenskih granica oblasti ranih refleksija u bipolarnim impulsnim odzivima iz fizičkog modela promenljive difuznosti.

Redni broj IR	Grupa impulsnih odziva IR	Naziv IR	BIPOLARNI IR						Medijana svih_granica
			GRANICA DU (ms)	GRANICA DP (ms)	GRANICA S (ms)	GRANICA LP (ms)	GRANICA UP (ms)	GRANICA RP (ms)	
1	Fizički model promenljive difuznosti	IR ₀₀₀₀₀₀	109.4	96.4	138.1	145.9	151.1	127.7	132.9
2		IR _{S00000}	182.3	125.1	109.4	140.7	99.0	182.3	132.9
3		IR _{M00000}	117.2	117.2	96.4	96.4	96.4	122.4	106.8
4		IR _{L00000}	171.9	177.1	177.1	119.8	177.1	161.5	174.5
5		IR _{SS0000}	151.1	164.1	166.7	164.1	164.1	132.9	164.1
6		IR _{SM0000}	104.2	156.3	156.3	156.3	156.3	135.5	156.3
7		IR _{MM0000}	91.2	132.9	132.9	122.4	132.9	109.4	127.7
8		IR _{SL0000}	140.7	104.2	106.8	96.4	104.2	93.8	104.2
9		IR _{ML0000}	88.6	132.9	132.9	132.9	132.9	106.8	132.9
10		IR _{LL0000}	119.8	148.5	145.9	145.9	145.9	158.9	145.9
11		IR _{SMM000}	132.9	93.8	101.6	101.6	101.6	109.4	101.6
12		IR _{SML000}	125.1	93.8	93.8	109.4	93.8	140.7	101.6
13		IR _{SSMM00}	91.2	138.1	138.1	138.1	138.1	91.2	138.1
14		IR _{SMLS00}	96.4	122.4	122.4	130.3	130.3	122.4	122.4
15		IR _{SSLL00}	99.0	140.7	140.7	140.7	140.7	140.7	140.7
16		IR _{MMLL00}	130.3	119.8	119.8	127.7	119.8	112.0	119.8
17		IR _{SMLSM0}	135.5	91.2	122.4	91.2	91.2	88.6	91.2
18		IR _{SMLSML}	91.2	119.8	78.2	109.4	93.8	83.4	92.5

Predloženom metodom za utvrđivanje granice oblasti ranog dela u impulsnom odzivu, dobijene su različite vrednosti vremenskih granica na osnovu pojedinačne analize vremenske raspodele svakog od 6 navedenih globalnih multifraktalnih parametara. Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 6.2. uočava se da se vrednosti granica dobijenih na osnovu parametara DU i RP, najviše razlikuju i procentualno imaju u najmanjem broju slučajeva iste vrednosti kao granice utvrđene po parametrima DP, S, LP i UP. Rezultati dobijenih vrednosti granica pokazuju da se, u određenoj meri za različite globalne kriterijume, dobijaju iste ili vrlo slične vrednosti granica. Za svaki pojedinačni analizirani impulsni odziv u tabeli 6.2 posebno su označena (obojena drugom bojom) polja sa istim vrednostima granica po različitim kriterijumima. Takođe, prilikom analize dobijenih vrednosti granica treba uzeti u obzir i marginu greške na dobijene

vrednosti granica u opsegu $\pm 26\text{ms}$, što odgovara polovini najdužeg prozora korišćenog u algoritmu. U cilju smanjenja greške i za potrebe određivanja koju vrednost među izračunatim granicama proglasiti za pravu vremensku granicu, korišćena je medijana 6 različitih vrednosti dobijenih granica. Vrednosti medijana granica izračunatih korišćenjem 6 različitih kriterijumima upisane su u poslednjoj koloni u tabeli 6.2.

Potom je analizirana zavisnost između utvrđenih vrednosti granica oblasti ranih refleksija i vrednosti SDI za impulsne odzive snimljene u fizičkom modelu prostorije promenljive difuznosti. Na slici 6.9 su prikazane raspodele utvrđenih vrednosti granica rane oblasti u bipolarnim impulsnim odzivima snimljeni u fizičkom modelu prostorije različite difuznosti, raspona indeksa difuznosti od $\text{SDI}=0$ do $\text{SDI}=1$, po svim globalnim multifraktalnim parametrima: DU, DP, S, LP, UP i RP, kao i medijana njihovih vrednosti. Kriva utvrđenih vrednosti granice oblasti ranih refleksija dobijena izračunavanjem medijane je na slici 6.9 prikazana zadebljanom crvenom linijom.



Slika 6.9. Prikaz utvrđenih vrednosti granice kod bipolarnog IR, po različitim globalnim multifraktalnim parametrima, u zavisnosti od SDI indeksa difuznosti.

Na osnovu raspodela dobijenih vrednosti granica sa slike 6.9, može se zaključiti da raspodele granica u analizi bipolarnog impulsnog odziva imaju sličan trend opadanja vrednosti, u odnosu na porast indeksa difuznosti SDI u fizičkom modelu prostorije. Opadanje vrednosti granice oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu sa povećanjem difuznosti u prostorijama je očekivano, budući

da kod impulsnih odziva koji su snimljeni u difuznijim sredinama, pojedinačne refleksije brže prestaju da budu uočljive.

Granice su na isti način utvrđene, a zatim njihove raspodele analizirane u zavisnosti od SDI, i za ostale prikaze signala impulsnog odziva, unipolarne i kvadrirane unipolarne. Cilj ove analize je da se utvrdi da li, i u kojoj meri, prikaz signala koji se analizira (bipolarni, unipolarni ili kvadrirani unipolarni) utiče na promene dobijenih vrednosti granica po svim pojedinačnim globalnim MF parametrima koji su korišćeni u ovom istraživanju. S tim u vezi, u tabelama 6.3 i 6.4 zabeležene su izračunate vremenske pozicije granice oblasti ranih refleksija za unipolarne, odnosno kvadrirane unipolarne impulsne odzive, respektivno.

U oba slučaja korišćena je metoda za utvrđivanje granice oblasti ranih refleksija predložena u poglavlju 5.1. Za odabir uzorka impulsnog odziva u MF analizi su ponovo, kao i u slučaju analize bipolarnog signala, upotrebljeni prozori vremenskih dužina $L_1=52,08\text{ms}$, $L_2=20,8\text{ms}$ i $L_3=36,45\text{ms}$, i korak pomeranja prozora $2,6\text{ms}$. Takođe, granice su izračunate na osnovu posmatranja raspodela svakog od 6 globalnih parametara multifraktalnog spektra, definisanih u poglavlju 5.1. U poslednjoj koloni u tabelama 6.3, odnosno 6.4 upisane su vrednosti granica dobijene izračunavanjem medijane od pojedinačnih vrednosti granica, utvrđenih korišćenjem svih 6 globalnih multifraktalnih parametara. Takođe, u tabelama 6.3 i 6.4 za svaki pojedinačni analizirani impulsni odziv, posebno su označena (obojena drugom bojom) polja sa istim vrednostima granica dobijenim po različitim kriterijumima.

Na osnovu rezultata datih u tabelama 6.3 i 6.4, predstavljene su raspodele utvrđenih granica rane oblasti u unipolarnim i kvadriranim unipolarnim impulsnim odzivima snimljenim u fizičkom modelu prostorije promenljive difuznosti. Granice su utvrđene po svim korišćenim globalnim multifraktalnim parametrima, kao i medijana njihovih vrednosti.

Tabela 6.3. Pregled utvrđenih vremenskih granica oblasti ranih refleksija u unipolarnim impulsnim odzivima iz fizičkog modela promenljive difuznosti.

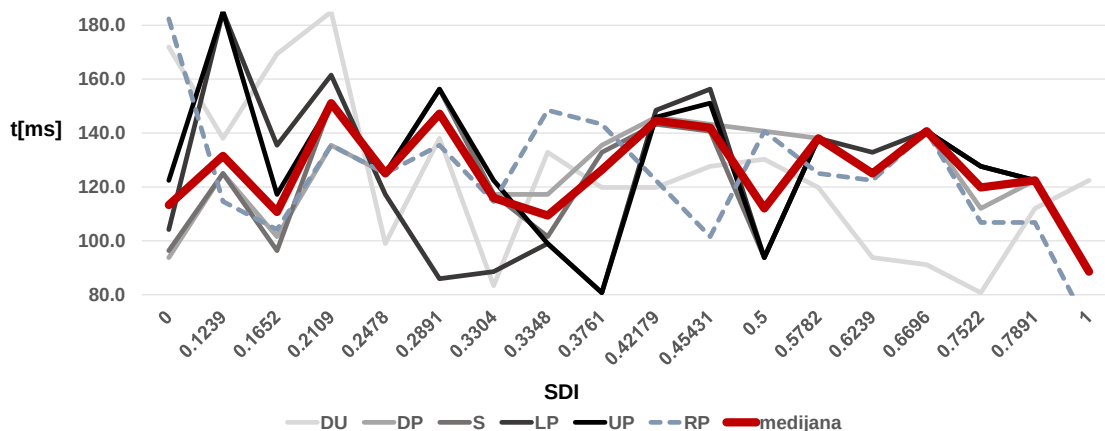
Redni broj IR	Grupa impulsnih odziva IR	Naziv IR	UNIPOLARNI IR						Medijana svih_granica
			GRANICA DU (ms)	GRANICA DP (ms)	GRANICA S (ms)	GRANICA LP (ms)	GRANICA UP (ms)	GRANICA RP (ms)	
1	Fizički model promenljive difuznosti	IR ₀₀₀₀₀₀	171.9	93.8	96.4	104.2	122.4	182.3	113.3
2		IR _{S00000}	138.1	125.1	125.1	184.9	184.9	114.6	131.6
3		IR _{M00000}	169.3	101.6	96.4	135.5	117.2	104.2	110.7
4		IR _{L00000}	184.9	135.5	151.1	161.5	151.1	135.5	151.1
5		IR _{SS0000}	99.0	125.1	125.1	117.2	125.1	125.1	125.1
6		IR _{SM0000}	138.1	156.3	156.3	86.0	156.3	135.5	147.2
7		IR _{MM0000}	83.4	117.2	117.2	88.6	122.4	114.6	115.9
8		IR _{SL0000}	132.9	117.2	101.6	99.0	99.0	148.5	109.4
9		IR _{ML0000}	119.8	135.5	132.9	80.8	80.8	143.3	126.4
10		IR _{LL0000}	119.8	145.9	143.3	148.5	145.9	122.4	144.6
11		IR _{SMM000}	127.7	143.3	140.7	156.3	151.1	101.6	142.0
12		IR _{SML000}	130.3	140.7	93.8	93.8	93.8	140.7	112.0
13		IR _{SSMM00}	119.8	138.1	138.1	138.1	138.1	125.1	138.1
14		IR _{SMLS00}	93.8	125.1	125.1	132.9	125.1	122.4	125.1
15		IR _{SSLL00}	91.2	140.7	140.7	140.7	140.7	140.7	140.7
16		IR _{MMLL00}	80.8	112.0	127.7	127.7	127.7	106.8	119.8
17		IR _{SMLSM0}	112.0	122.4	122.4	122.4	122.4	106.8	122.4
18		IR _{SMLSML}	122.4	88.6	88.6	88.6	88.6	67.8	88.6

Tabela 6.4. Pregled utvrđenih vremenskih granica oblasti ranih refleksija u kvadriranim unipolarnim impulsnim odzivima iz fizičkog modela promenljive difuznosti.

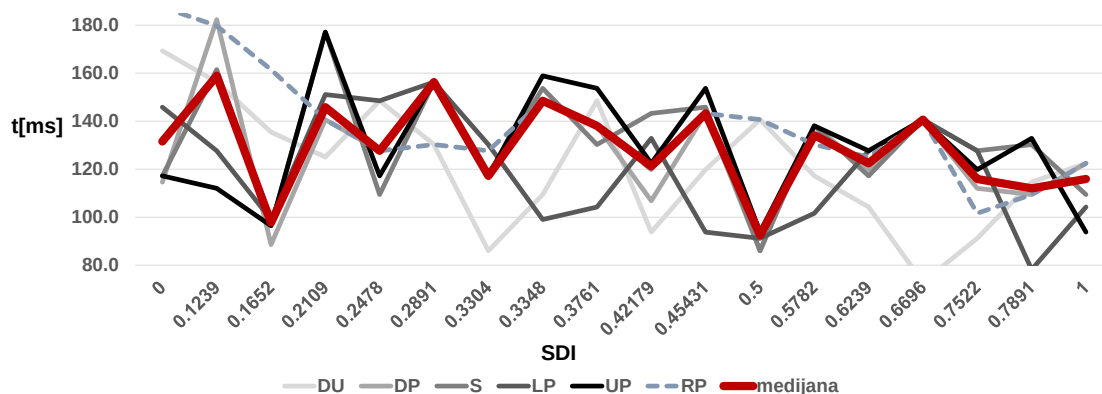
Redni broj IR	Grupa impulsnih odziva IR	Naziv IR	KVADRIRANI UNIPOLARNI IR						Medijana svih_granica
			GRANICA DU (ms)	GRANICA DP (ms)	GRANICA S (ms)	GRANICA LP (ms)	GRANICA UP (ms)	GRANICA RP (ms)	
1	Fizički model promenljive difuznosti	IR ₀₀₀₀₀₀	169.3	114.6	117.2	145.9	117.2	187.6	131.6
2		IR _{S00000}	156.3	182.3	161.5	127.7	112.0	179.7	158.9
3		IR _{M00000}	135.5	88.6	96.4	99.0	96.4	161.5	97.7
4		IR _{L00000}	125.1	140.7	177.1	151.1	177.1	140.7	145.9
5		IR _{SS0000}	148.5	127.7	109.4	148.5	117.2	127.7	127.7
6		IR _{SM0000}	130.3	156.3	156.3	156.3	156.3	130.3	156.3
7		IR _{MM0000}	86.0	117.2	117.2	130.3	117.2	127.7	117.2
8		IR _{SL0000}	109.4	148.5	153.7	99.0	158.9	148.5	148.5
9		IR _{ML0000}	148.5	138.1	130.3	104.2	153.7	138.1	138.1
10		IR _{LL0000}	93.8	106.8	143.3	132.9	122.4	119.8	121.1
11		IR _{SMM000}	119.8	143.3	145.9	93.8	153.7	143.3	143.3
12		IR _{SML000}	140.7	86.0	86.0	91.2	93.8	140.7	92.5
13		IR _{SSMM00}	117.2	138.1	138.1	101.6	138.1	130.3	134.2
14		IR _{SMLS00}	104.2	119.8	117.2	127.7	127.7	125.1	122.4
15		IR _{SSLL00}	73.0	140.7	140.7	140.7	140.7	140.7	140.7
16		IR _{MMLL00}	91.2	112.0	127.7	127.7	119.8	101.6	115.9
17		IR _{SMLSM0}	114.6	109.4	130.3	78.2	132.9	109.4	112.0
18		IR _{SMLSML}	122.4	122.4	109.4	104.2	93.8	122.4	115.9

Krive raspodela su takođe prikazane u zavisnosti od vrednosti indeksa difuznosti SDI, slika 6.10 (unipolarni signal) i slika 6.11 (kvadrirani unipolarni signal). Krive granica, dobijene izračunavanjem medijane za granice po svih 6

globalnih MF parametra unipolarnog, odnosno kvadriranog unipolarnog signala, prikazane su zadebljanom crvenom linijom.



Slika 6.10. Prikaz utvrđenih granica kod unipolarnog IR, po različitim globalnim multifraktalnim parametrima, u zavisnosti od SDI indeksa difuznosti.

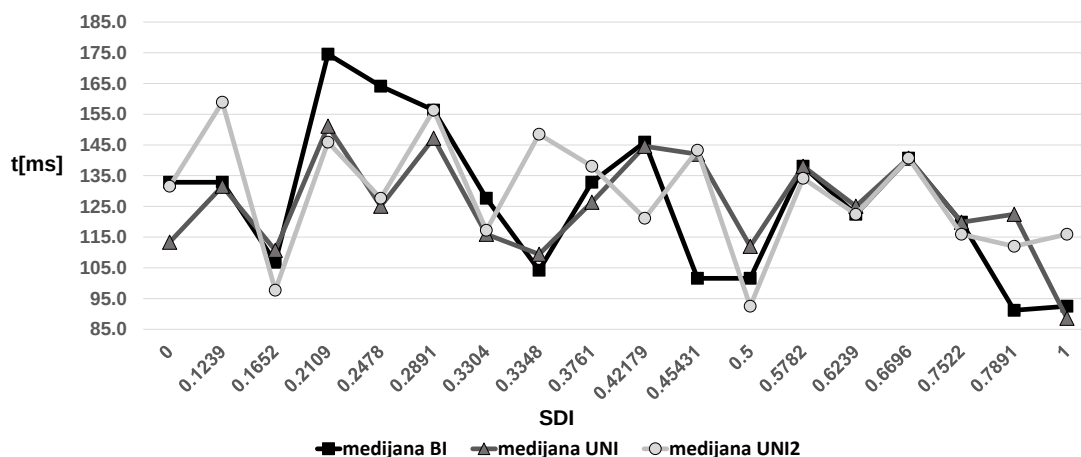


Slika 6.11. Prikaz utvrđenih granica kod kvadriranog unipolarnog IR, po različitim globalnim multifraktalnim parametrima, u zavisnosti od SDI indeksa difuznosti.

Rezultati na slikama 6.10 i 6.11 pokazuju trend opadanja vrednosti utvrđenih granica u impulsnim odzivima sa porastom vrednosti indeksa difuznosti prostorijske. Najveća odstupanja od trenda pokazuje raspodela granica dobijena upotrebom globalnog MF parametra desnog nagiba krive MF spektra – DU. Zaključak je i da se u uslovima većeg indeksa difuznosti SDI manje razlikuju vrednosti granica dobijene upotrebom različitih globalnih MF parametra.

Na slici 6.12. je prikazan grafik sa uporednim pregledom raspodela utvrđenih vremenskih granica oblasti ranih refleksija kada su impulsni odzivi (snimljeni u fizičkom modelu prostorijske promenljive difuznosti) analizirani kao

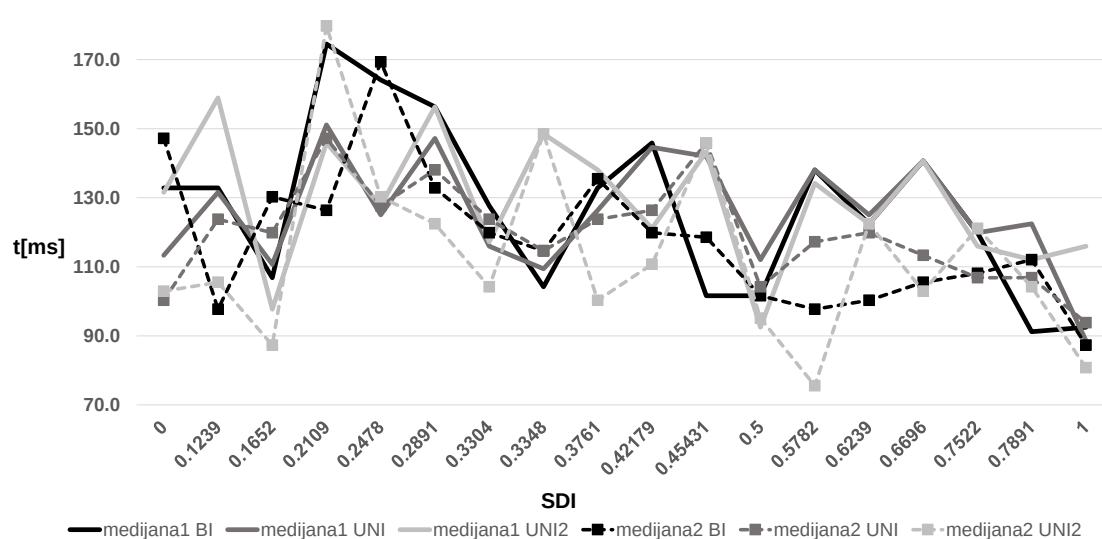
bipolarni (BI), unipolarni (UNI) i kvadrirani unipolarni (UNI2) signali u odnosu na opseg vrednosti SDI [0 1]. Vremenske granice prikazane na slici 6.11. predstavljaju vrednosti medijana izračunatih granica dobijenih korišćenjem metode predložene u poglavlju 5.1 i raspodele svih 6 globalnih multifraktalnih parametara. U svim slučajevima korišćeni su prozori dužina $L_1=52,08\text{ms}$, $L_2=20,8\text{ms}$ i $L_3=36,45\text{ms}$ sa korakom pomeranja prozora $2,6\text{ms}$. Iz grafika sa slike 6.12 se može zaključiti da dobijene vrednosti granica postaju manje zavisne od prikaza impulsnih odziva koji se analiziraju (BI, UNI ili UNI2) u slučaju kada su impulsní odzivi snimljeni u prostorijama sa većim vrednostima SDI [0.5 0.75]. U tim uslovima vrednosti granica dobijene kao medijane vrednosti granica po svih 6 globalnih MF parametara imaju identične vrednosti, nezavisno od prikaza analiziranih signala.



Slika 6.12. Paralelni prikaz zavisnosti utvrđenih granica oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu i SDI indeksa difuznosti u fizičkom modelu promenljive difuznosti

Postupak utvrđivanja vrednosti granice čiji su rezultati predstavljeni u tabelama 6.2, 6.3 i 6.4 je ponovljen korišćenjem prozora manjih dužina u multifraktalnoj analizi, tačnije: $L_1=10,4\text{ms}$, $L_2=13\text{ms}$ i $L_3=15,6\text{ms}$, i koraka pomeranja prozora $2,6\text{ms}$. Ovog puta je uzeta u obzir margina na dobijene vrednosti granica od $\pm 7,8\text{ms}$ što bi odgovaralo polovini korišćenog najdužeg prozora u algoritmu. Na slici 6.13 je grafik sa uporednim prikazom raspodele utvrđenih vremenskih granica oblasti ranih refleksija za prozore vremenskih dužina $L_1=52,08\text{ms}$, $L_2=20,8\text{ms}$ i $L_3=36,45\text{ms}$ i novih raspodela medijana za utvrđene granice oblasti ranih refleksija kada su korišćeni prozori dužina

$L_1=10,4\text{ms}$, $L_2=13\text{ms}$ i $L_3=15.6\text{ms}$. Krive vrednosti medijana za granice dobijene upotrebom dužih prozora u MF analizi prikazane su na slici 6.13. punim linijama i imaju oznaku u svojim nazivima „medijana1“. Sa druge strane, krive vrednosti medijana za granice dobijenih upotrebom kraćih prozora u MF analizi prikazane su na slici 6.13. isprekidanim linijama i imaju oznaku u svojim nazivima „medijana2“. Odzivi su analizirani u formi bipolarnih (BI), unipolarnih (UNI) i kvadriranih unipolarnih (UNI2) signala.



Slika 6.13. Paralelni prikaz zavisnosti vrednosti granica oblasti ranih refleksija od vrednosti SDI, upotrebom različitih prozora u MF analizi i pri analizi različitih formi signala impulsnih odziva

Na osnovu raspodela utvrđenih granica sa slike 6.13, može se zaključiti da raspodele granica u analizama sva tri oblika signala impulsnih odziva (bipolarni, unipolarni i kvadrirani unipolarni signal) imaju sličan trend opadanja vrednosti, u odnosu na porast indeksa difuznosti SDI. Ipak veća odstupanja su u slučaju MF analize nad kraćim uzorcima impulsnog odziva (korišćenje kraćih prozora).

U nastavku istraživanja je analizirano u kojoj meri promena dužine prozora u MF analizi i njihov korak pomeranja utiče na promenu kriva raspodela globalnih MF parametara koji se koriste u ovom istraživanju, a samim tim i na promenu vrednosti utvrđenih granica oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu. S tim u vezi, povećane su dužine prozora i korak pomeranja, a zatim su na osnovu različitih vremenskih dužina prozora i koraka njihovog pomeranja praćene promene u vremenskoj raspodeli izračunatih globalnih multifraktalnih

parametara: DU, DP, S, LP, UP i RP. Cilj je da se utvrdi da li i u kojoj meri na rezultat utiče promena vremenskih dužina prozora i koraka njihovog pomeranja koji se koriste u realizaciji metodologije, opisane u 5.1.

Posebna pažnja je posvećena: a) MF analizi u slučajevima kada je korak pomeranja 50% vremenske dužine prozora, na primer: 40 ms/20 ms, 60ms/30ms, 80ms/40ms i 100ms/50ms); b) MF analizi u slučajevima kada se vremenska dužina prozora povećava, dok korak pomeranja prozora ostaje nepromenjen: 40/20, 60/20, 80/20, 100/20, 120/20, 140/20 i 20/2, 40/2, 60/2, 80/2, 100/2, 120/2 i 140/2 (navedeni odnosi predstavljaju dužinu prozora u ms / dužina koraka pomeranja prozora u ms). Takođe, analizirani su i proizvodi raspodele globalnog multifraktalnog parametra za tri pojedinačna prozora sa istim korakom pomeranja. Radi bolje preglednosti, u tabeli 6.5 su navedene korišćene vremenske dužine sva tri prozora i koraci njihovog pomeranja.

Tabela 6.5. Pregled vremenskih dužina prozora i njihov korak pomeranja, korišćenih u postupku utvrđivanja granice oblasti ranog dela u impulsnim odzivima.

Prozor 1 (ms)	Prozor 2 (ms)	Prozor 3 (ms)	Korak pomeranja (ms)
40	60	80	20
60	80	100	20
80	100	120	20
100	120	140	20
40	60	80	20
60	80	100	30
80	100	120	40
100	120	140	50
20	40	60	2
40	60	80	2
60	80	100	2
80	100	120	2
100	120	140	2

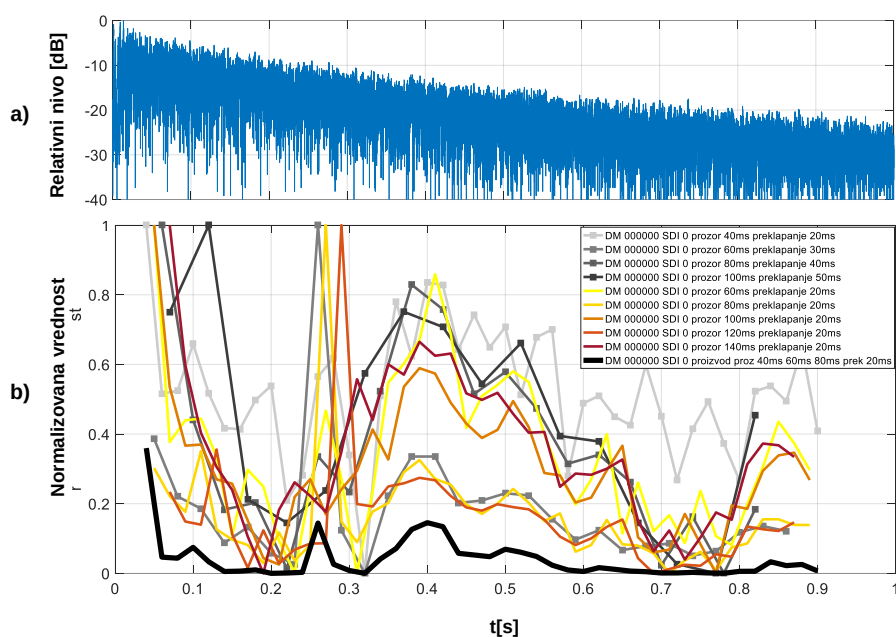
Na slici 6.14 prikazane su vremenske raspodele globalnog parametra desne površine krive multifraktalnog spektra – DP, za različite vremenske dužine prozora i njihove korake pomeranja, u analizi unipolarnog impulsnog odziva IR₀₀₀₀₀₀. Na grafiku su prikazani slučajevi vremenske raspodele globalnog parametra DP kada je korak pomeranja 50% dužine prozora (krive nijanse sive) i kada se za fiksni korak pomeranja od 20ms povećava dužina prozora (krive nijanse žute). Zadebljana kriva crne boje na grafiku predstavlja vremensku

raspodelu globalnog parametra desne površine – DP, dobijene kao proizvod raspodele globalnog multifraktalnog parametra DP za tri pojedinačna prozora dužina 40ms, 60ms i 80ms, sa istim korakom pomeranja od 20ms.

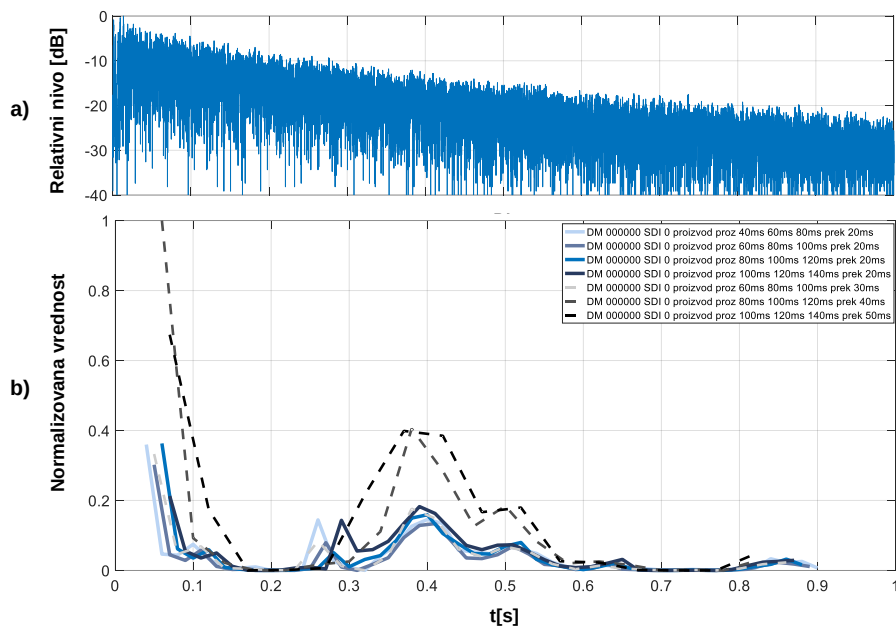
Na slici 6.15 su prikazane vremenske raspodele globalnog parametra desne površine krive multifraktalnog spektra – DP, dobijene kao proizvod raspodela ovog parametra izračunatog za tri pojedinačna prozora različitih dužina, ali sa istim korakom pomeranja od 20ms.

Na slici 6.16 su dodatno prikazane vremenske raspodele globalnog parametra DP sa korakom pomeranja od 2ms. U ovom slučaju je analiziran kvadrirani unipolarni impulsni odziv IR_{000000} .

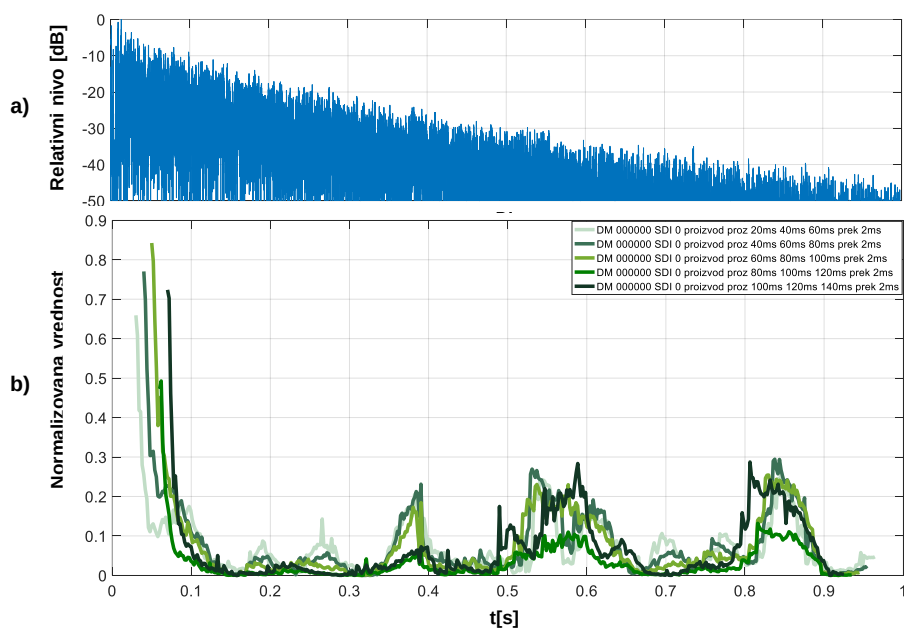
Analiza je izvršena i za ostale impulsne odzive snimljene u fizičkom modelu promenljive difuznosti i za sva tri prikaza signala, bipolarni, unipolarni i kvadrirani unipolarni.



Slika 6.14. a) Analizirani unipolarni impulsni odziv IR_{000000} ; b) Paralelni prikaz vremenskih raspodela izračunatog globalnog MF parametra DP za različite vremenske dužine prozora i koraka pomeranja prozora.



Slika 6.15. a) Analizirani unipolarni impulsni odziv IR_{000000} ; b) Paralelni prikaz raspodela izračunatog globalnog MF parametra DP kao proizvoda raspodela DP za tri prozora različitih vremenskih dužina i istog koraka pomeranja od 20ms.

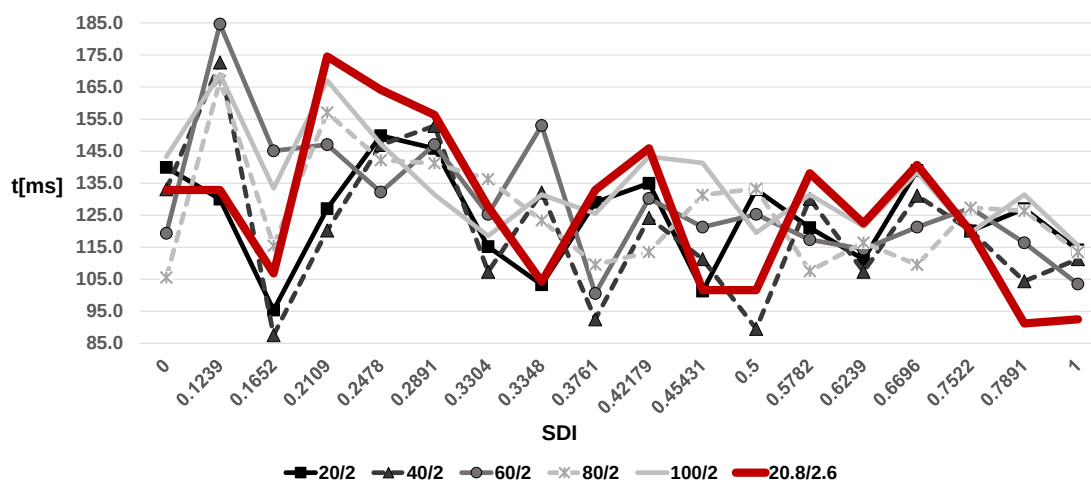


Slika 6.16. a) Analizirani unipolarni impulsni odziv IR_{000000} ; b) Paralelni prikaz raspodela izračunatog globalnog MF parametra DP kao proizvoda raspodela DP za tri prozora različitih vremenskih dužina i istog koraka pomeranja od 2ms.

Za sve korišćene vremenske dužine prozora i njihove korake pomeranja tokom MF analize impulsnih odziva, utvrđene su granice oblasti ranih refleksija primenom metode predložene u poglavlju 5.1.

Na slikama 6.17, 6.18 i 6.19 uporedo su prikazane raspodele utvrđenih vrednosti granica u odnosu na indeks difuznosti SDI u fizičkom modelu prostorije, za 6 globalnih multifraktalnih parametara za nekoliko različitih vremenskih dužina prozora, sa istim korakom pomeranja prozora od 2ms. Dobijene granice predstavljaju medijanu vrednosti granica dobijenih po svih 6 korišćenih parametara multifraktalnog spektra. Krive na slikama 6.17, 6.18 i 6.19 označene su u formi X/Y, gde X predstavlja dužinu korišćenog prozora u ms, dok je Y vrednost dužine koraka pomeranja prozora u ms.

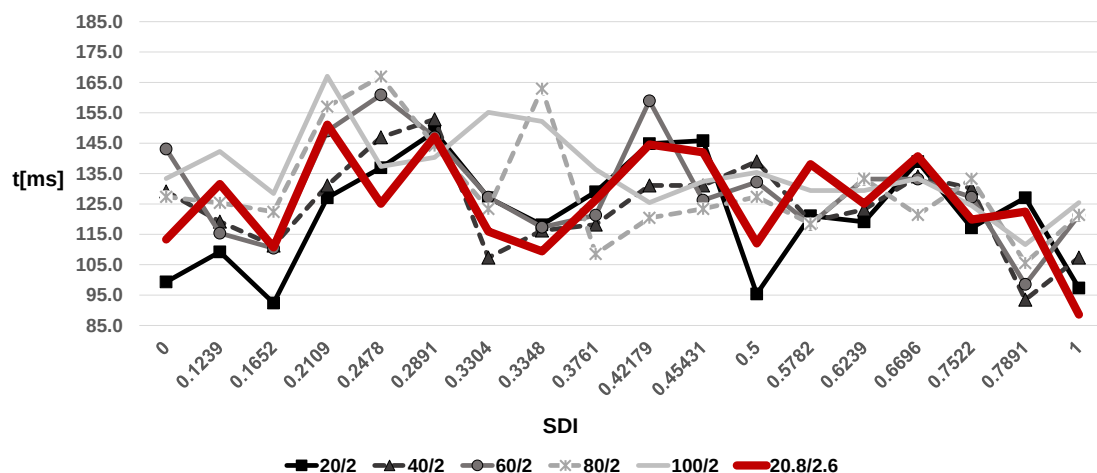
Na slici 6.17 su rezultati analize bipolarnog signala impulsnog odziva, dok su na slikama 6.18 i 6.19 rezultati analize za unipolarni i kvadrirani unipolarni signala impulsnog odziva.



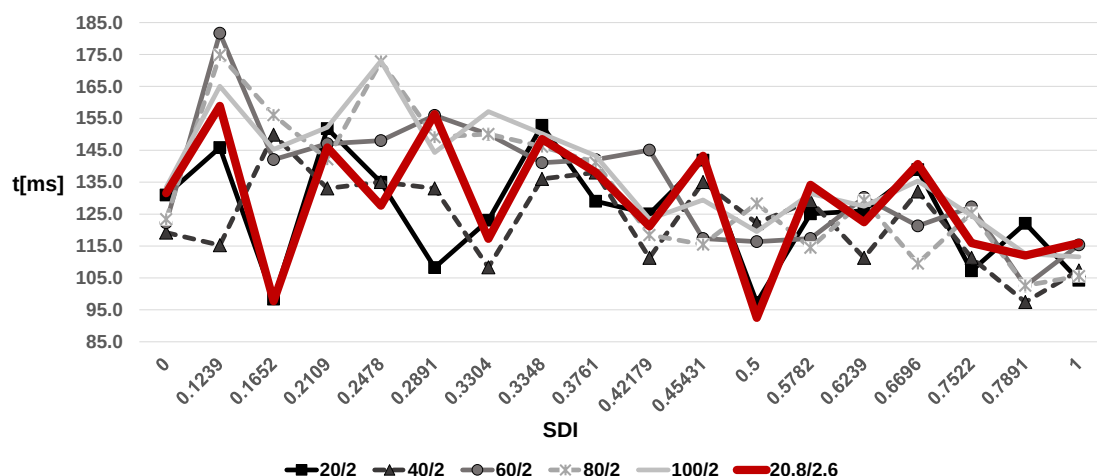
Slika 6.17. Paralelni prikaz raspodele granica ranih delova bipolarnih impulsnih odziva snimljenih u fizičkom modelu prostorije promenljive difuznosti, u odnosu na vrednosti SDI, za prozore različitih dužina i koraka njihovog pomeranja

Na osnovu prikazanih raspodela dobijenih vrednosti granica (slike 6.17, 6.18 i 6.19) u slučajevima primene različitih vremenskih dužina prozora i njihovih koraka pomeranja u postupku multifraktalne analize i realizacije predložene metode iz poglavlja 5.1, zaključuje se da u analizi bipolarnih i kvadriranih unipolarnih impulsnih odziva postoji trend opadanja vrednosti utvrđenih granica u odnosu na povećanje vrednosti indeksa difuznosti SDI. Ovaj trend je nezavisan od dužine prozora korišćenog u multifraktalnoj analizi signala i njegovog koraka pomeranja. Vrednosti granica dobijene korišćenjem različitih dužina prozora

postaju identične kod impulsnih odziva snimljenih u fizičkom modelu prostorije u uslovima viših indeksa difuznosti, $SDI > 0.5$.



Slika 6.18. Paralelni prikaz raspodele granica ranih delova unipolarnih impulsnih odziva snimljenih u fizičkom modelu prostorije promenljive difuznosti, u odnosu na vrednosti SDI, za prozore različitih dužina i koraka njihovog pomeranja



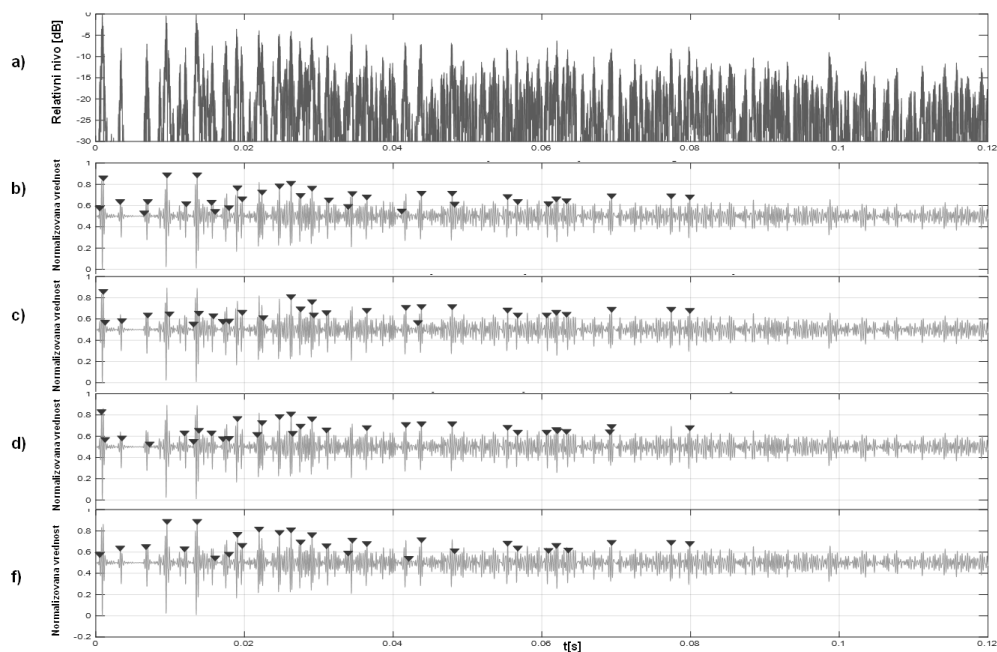
Slika 6.19. Paralelni prikaz raspodele granica ranih delova kvadriranih unipolarnih impulsnih odziva snimljenih u fizičkom modelu prostorije promenljive difuznosti, u odnosu na vrednosti SDI, za prozore različitih dužina i koraka njihovog pomeranja

6.3. Detektovane rane refleksije u impulsnom odzivu

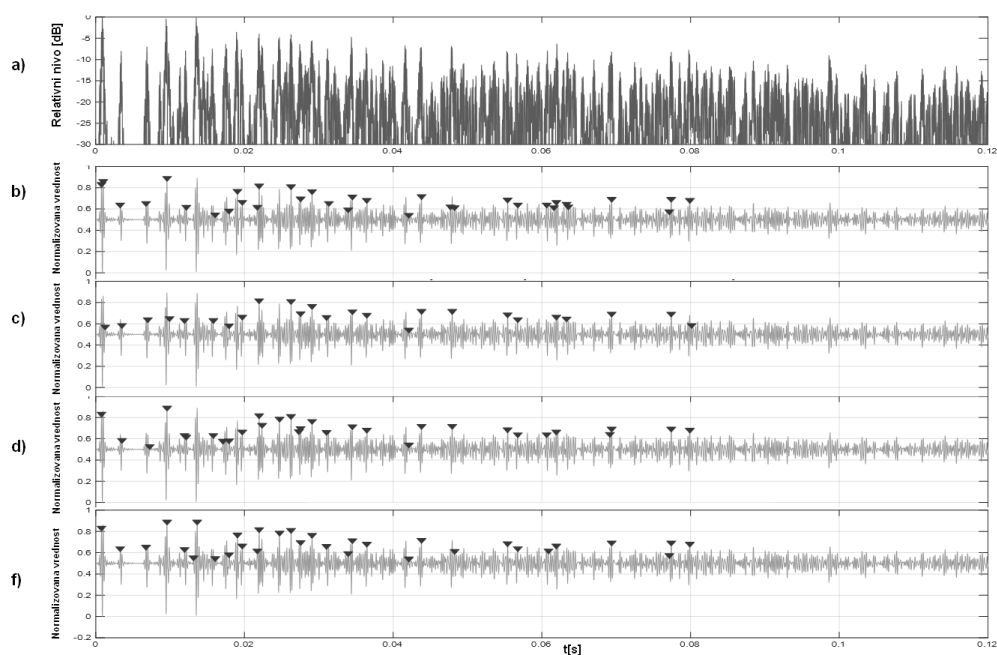
Baza impulsnih odziva snimljenih u fizičkom modelu promenljive difuznosti korišćena je i za detekciju ranih refleksija primenom metoda predloženih u poglavlju 5.2 i 5.3.

U ovom poglavlju prikazani su rezultati detekcije refleksija na primeru impulsnog odziva IR_{000000} , snimljenog u fizičkom modelu difuzne prostorije sa indeksom difuznosti $SDI=0$. Navedeni impulsni odziv je uzet za primer zbog toga što fizički model difuzne prostorije sa ovom vrednošću SDI odgovara ekstremnom slučaju, prostoriji u kojoj nema reljefnih površina (sve strane u fizičkom modelu su ravne), tako da snimljeni impulsni odziv sadrži veliki broj izraženih jakih refleksija u ranom delu impulsnog odziva koje bi trebalo detektovati predloženim metodama za detekciju refleksija. Rezultati detekcije refleksija u ovom primeru iskorišćeni su za procenu verodostojnosti predloženih postupaka za detekciju, kao i procenu njihove efektivnosti, tj. da li je i u kojoj meri moguće detektovati sve značajne refleksije u impulsnom odzivu prostorije, uz minimalnu detekciju drugih refleksija. Refleksije su detektovane primenom pet mera za izračunavanje Holderovih eksponenata i primenom predloženih modifikacija metode za detekciju, detaljno opisanih u poglavlju 5.3.

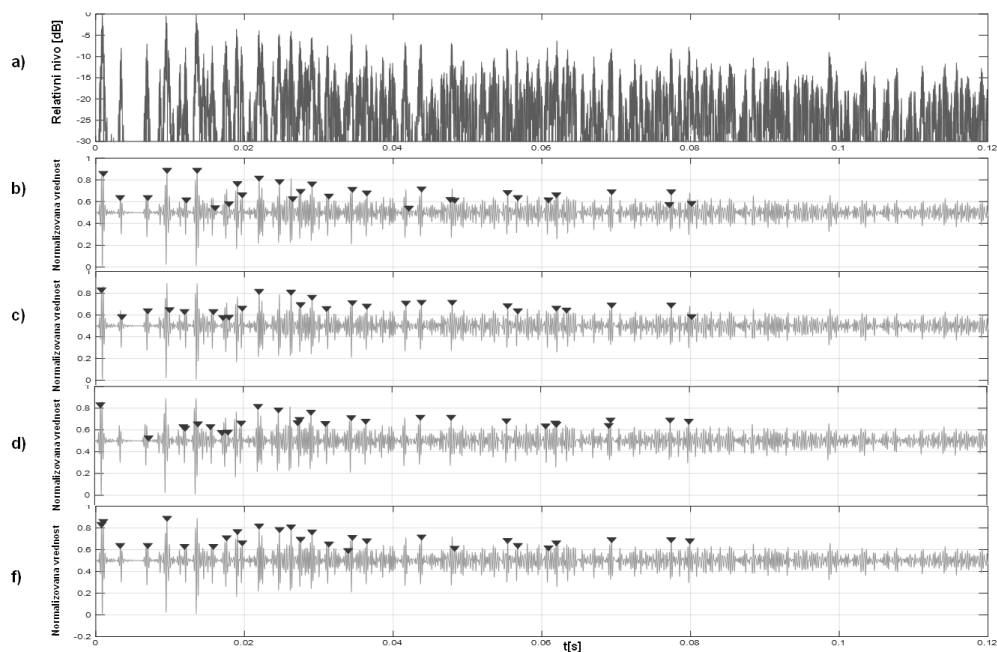
Na slikama 6.20, 6.21, 6.22, 6.23 i 6.24 prikazani su rezultati detekcije refleksija primenom 2D multifraktalne analize korišćenjem sledećih mera za izračunavanje eksponenata α : suma (*sum*), maksimum (*max*), minimum (*min*), horizontalna devijacija (*hor central diff*) i kvadratna horizontalna devijacija (*hor central diff²*) u odnosu na centralnu poziciju piksela unutar korišćenih bokseva dimenzija ϵ , respektivno. Cilj ovog dela istraživanja je odrediti za koju primenjenu meru i modifikaciju u 2D multifraktalnoj analizi impulsnih odziva prostorija predložena metoda za detekcija ranih refleksija daje najbolje rezultate. Provera je vršena tako što je ispitivano da li su detektovane sve refleksije koje su vizualno lako uočljive. Za kriterijum detekcije je korišćen apsolutni prag od -10dB i tražene su refleksije koje nisu oslabljene za više od 10dB. Razlog za definisanje ovakvog kriterijuma je bio taj što su refleksije iznad zadatog praga dovoljno jake da mogu uticati na formiranje subjektivnog doživljaja zvuka i maskiranja sukcesivnih refleksija u vremenskom okviru od 10ms [Everest and Pohlmann 2009]. Smatra se da sve refleksije koje su istaknute za barem 6dB u odnosu na svoje susedne refleksije, gledano u vremenskom okviru dužine 2ms ispred posmatrane refleksije, mogu uticati na formiranje subjektivnog doživljaja zvuka [Everest and Pohlmann 2009]. Primer detekcije „značajnih“ refleksija ilustrovan je na slici 6.25.



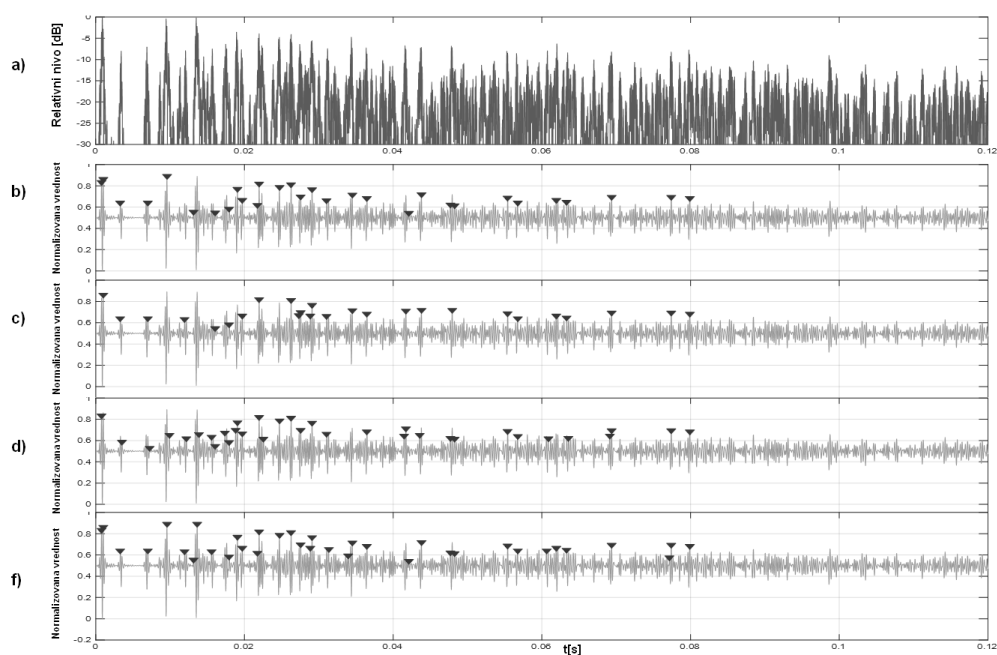
Slika 6.20. Detektovane refleksije u impulsnom odzivu IR_{000000} . Mera u 2D MF analizi: *sum*. a) Relativni nivo impulsnog odziva u dB; Slika Holderovih eksponenata je modifikovana: b) modifikacijom 1; c) modifikacijom 2; d) modifikacijom 3; e) modifikacijom 4.



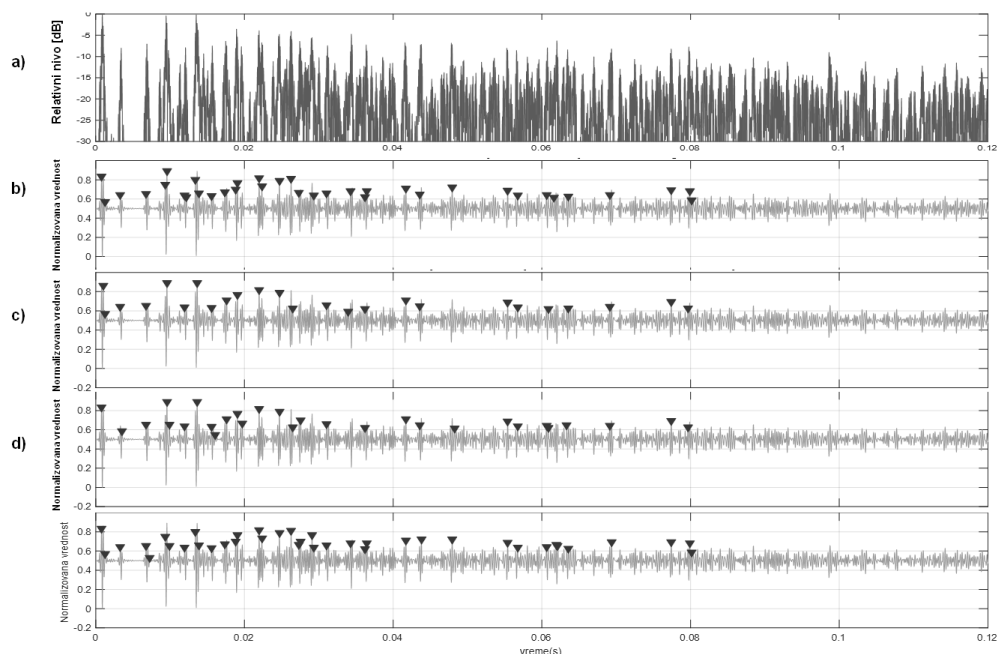
Slika 6.21. Detektovane refleksije u impulsnom odzivu IR_{000000} . Mera u 2D MF analizi: *max*. a) Relativni nivo impulsnog odziva u dB; Slika Holderovih eksponenata je modifikovana: b) modifikacijom 1; c) modifikacijom 2; d) modifikacijom 3; e) modifikacijom 4.



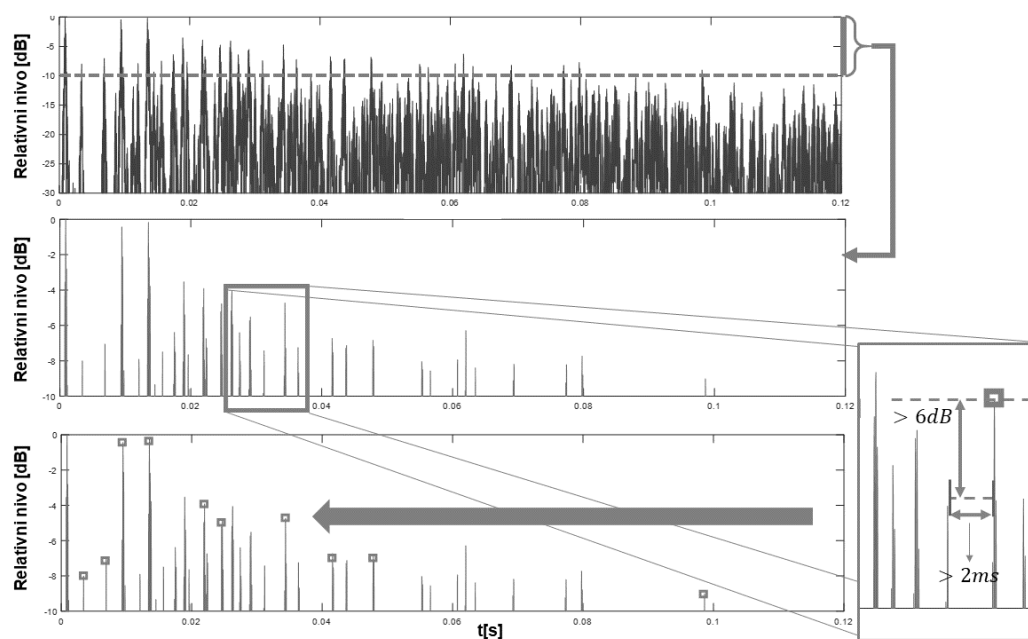
Slika 6.22. Detektovane refleksije u impulsnom odzivu IR_{000000} . Mera u 2D MF analizi: *min*. a) Relativni nivo impulsnog odziva u dB; Slika Holderovih eksponenata je modifikovana: b) modifikacijom 1; c) modifikacijom 2; d) modifikacijom 3; e) modifikacijom 4.



Slika 6.23. Detektovane refleksije u impulsnom odzivu IR_{000000} . Mera u 2D MF analizi: *hor central diff*. a) Relativni nivo impulsnog odziva u dB; Slika Holderovih eksponenata je modifikovana: b) modifikacijom 1; c) modifikacijom 2; d) modifikacijom 3; e) modifikacijom 4.



Slika 6.24. Detektovane refleksije u impulsnom odzivu IR_{000000} . Mera u 2D MF analizi: *hor central diff*². a) Relativni nivo impulsnog odziva u dB; Slika Holderovih eksponenata je modifikovana: b) modifikacijom 1; c) modifikacijom 2; d) modifikacijom 3; e) modifikacijom 4.



Slika 6.25. Ilustracija utvrđivanja refleksija u impulsnom odzivu koje su istaknute lokalno za 6dB u odnosu na susedne refleksije unutar vremenskog prozora od 2ms

U tabeli 6.6. je prikazana uspešnost detekcije refleksija od interesa (na osnovu gore navedenih kriterijuma), za svaku korišćenu meru i za svaku modifikaciju u 2D multifraktalnoj analizi. Praktična upotrebljivost algoritma je testirana nad impulsnim odzivom snimljenom u fizičkom modelu difuzne

prostori je sa indeksom difuznosti površine $SDI=0$. Prvo je zabeležen broj značajnih refleksija koje se lako mogu uočiti vizuelnim putem. Kriterijum je bio apsolutni prag od -10dB , tj. potrebno je detektovati sve refleksije koje nisu relativno oslabljene za više od 10dB u odnosu na direktni zvuk. Potom je za svaku meru i modifikaciju utvrđen broj refleksija koje su detektovane i ovi rezultati upisani su u tabelu 6.6. Takođe, u analiziranom impulsnom odzivu utvrđen je i broj postojećih refleksija koje su lokalno istaknute za 6dB u odnosu na refleksije obuhvaćene vremenskim okvirom u trajanju od 2ms pre posmatrane refleksije, a potom i utvrđen broj takvih refleksija detektovanih u nekom od predloženih postupaka. Rezultati su zabeleženi u tabeli 6.6.

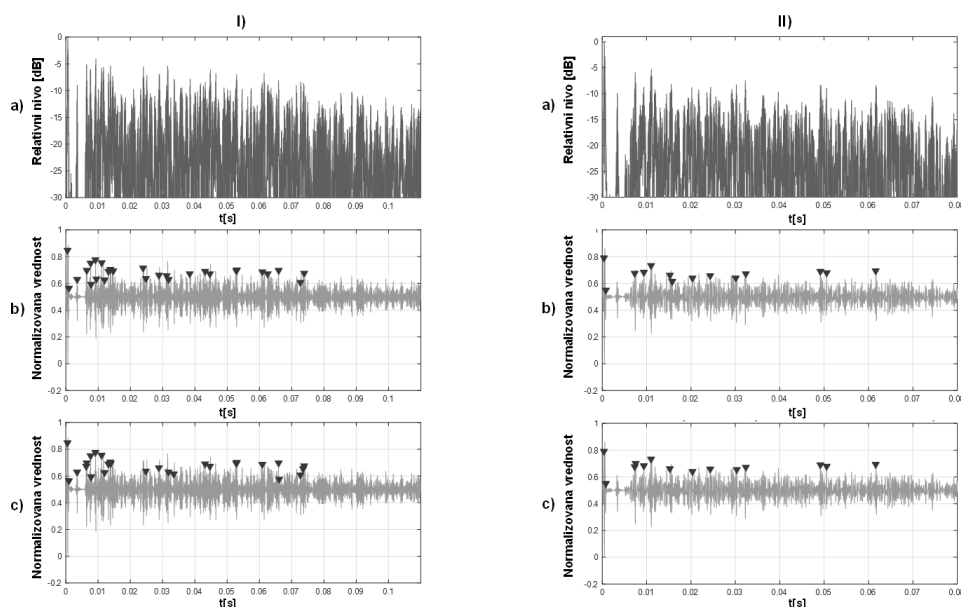
Tabela 6.6. Pregled uspešnosti detektovanja refleksija za svaku meru i svaku modifikaciju primenjenu u 2D MF analizi. Analiziran je impulsni odziv IR_{000000} .

Naziv odziva	Refleksije relativno oslabljene za manje od 10dB – R _{10dB} (ukupan broj)	Detektovane R _{10dB} (broj)	Detektovane R _{10dB} (%)	Lokalno istaknute refleksije 6dB unutar prozora 2ms – R _{6dB-2ms} (ukupan broj)	Detektovane R _{6dB-2ms} (broj)	Detektovane R _{6dB-2ms} (%)
2_000000_1b_sc2, (SDI=0)						
Mera: sum						
Modifikacija 1	28	26	92.85	10	8	80
Modifikacija 2	28	24	85.81	10	7	70
Modifikacija 3	28	24	85.81	10	7	70
Modifikacija 4	28	26	92.85	10	8	80
Sr. vrednost (%):			89.33	Sr. vrednost (%):		75
Mera: max						
Modifikacija 1	28	24	85.81	10	6	60
Modifikacija 2	28	22	78.57	10	6	60
Modifikacija 3	28	23	82.14	10	7	70
Modifikacija 4	28	25	89.28	10	8	80
Sr. vrednost (%):			83.95	Sr. vrednost (%):		67.5
Mera: min						
Modifikacija 1	28	25	89.28	10	8	80
Modifikacija 2	28	24	85.81	10	7	70
Modifikacija 3	28	21	75	10	5	50
Modifikacija 4	28	23	82.14	10	6	60
Sr. vrednost (%):			83.06	Sr. vrednost (%):		65
Mera: hor central diff						
Modifikacija 1	28	23	82.14	10	7	70
Modifikacija 2	28	23	82.14	10	6	60
Modifikacija 3	28	25	89.28	10	8	80
Modifikacija 4	28	26	92.85	10	8	80
Sr. vrednost (%):			86.6	Sr. vrednost (%):		72.5
Mera: hor central diff²						
Modifikacija 1	28	27	96.42	10	9	90
Modifikacija 2	28	23	82.14	10	8	80
Modifikacija 3	28	23	82.14	10	7	70
Modifikacija 4	28	27	96.42	10 82.85	9	90
Sr. vrednost (%):			89.28	Sr. vrednost (%):		82.85

Na osnovu rezultata u tabeli 6.6. i prikazane efikasnosti (izražene u procentima) predloženih metoda detekcija ranih refleksija za posmatrani impulsni

odziv prostorije, zaključuje se da je najuspešniji postupak detekcije refleksija kada se primenjuje mera *hor central diff*², sa modifikacijama 1 i 4. U tom slučaju, uspešnost detektovanih refleksija oslabljenih za ne više od 10dB u odnosu na direktni zvuk iznosi 96.4%, dok je uspešnost detekcije lokalno istaknutih refleksija 90%.

Na slici 6.26. ilustrovani su rezultati detekcije refleksija u impulsnim odzivima IR_{L00000} i IR_{SMLSM0} , snimljenih u fizičkom modelu prostorije promenljive difuznosti sa indeksima difuznosti površina: I) $SDI=0.2109$; II) $SDI=0.789$, respektivno. Time je izvršeno poređenje rezultata u slučajevima impulsnih odziva snimljenih u prostorijama male, odnosno velike difuznosti. Algoritam je pokazao zadovoljavajuću preciznost detekcije refleksija u oba slučaja.



Slika 6.26. Prikaz detektovanih refleksija u impulsnim odzivima I) IR_{L00000} ; II) IR_{SMLSM0} , primenom 2D multifraktalne analize i mere *hor central diff*². a) Relativni nivo analiziranih impulsnih odziva u dB. Rezultat detekcije nakon dodatne obrade Hölderovih eksponenata i primene modifikacije: b) modifikacija 1; c) modifikacija 4

6.4. Efikasnost predloženog algoritma za detekciju refleksija u impulsnom odzivu

Procena uspešnosti predloženog algoritama za detekciju refleksija primenom multifraktalne analize u 2D domenu 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 refleksija je da se ispita, da li je moguće i pod kojim uslovima detektovati kontrolnu refleksiju (CR), koja je umetnuta na određenim mestima u signalu impulsnog odziva (IR).

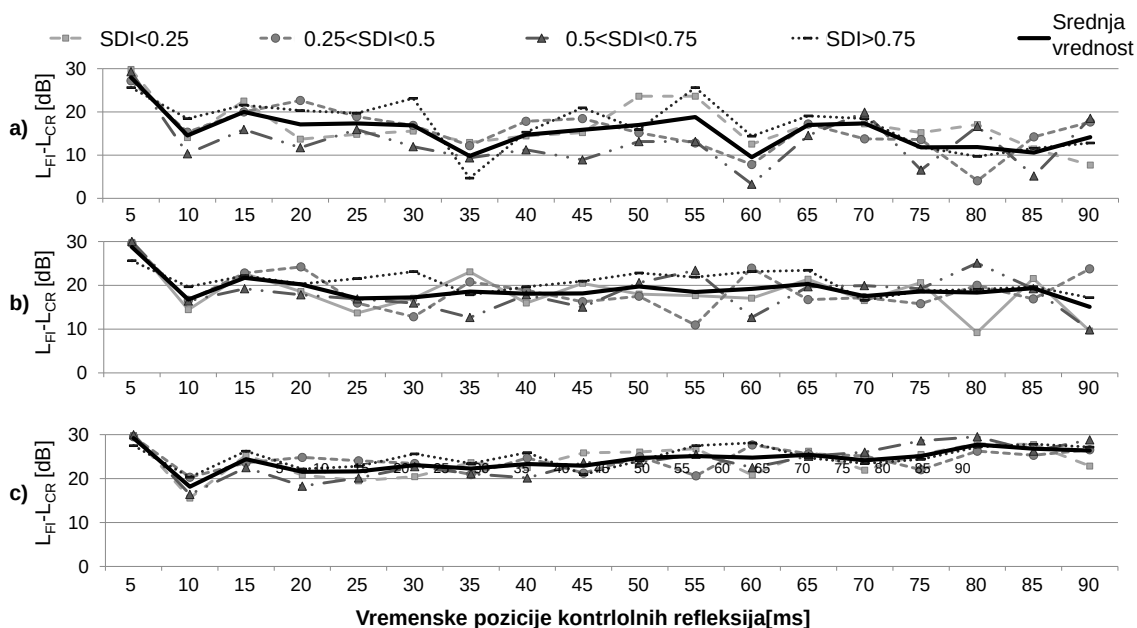
Efikasnost predloženog algoritma testirana je na identičan način kao u [Ristić et al. 2013], proverom mogućnosti detekcije kontrolnih refleksija u impulsnom odzivu pomoću multifraktalne analize u 2D domenu. Kao kontrolna refleksija (CR) koristi se kopija direktnog zvuka (FI) koja se iterativno slabi tokom testiranja algoritma. Umetanje CR u impulsnom odzivu je vršeno na vremenskim pozicijama od 5ms do 90ms, sa korakom umetanja 5ms. Beležena je maksimalna razlika nivoa direktnog zvuka (L_{FI}) i nivoa oslabljene kontrolne refleksije (L_{CR}) u trenutku prestanka detektovanja CR, $L_{FI}-L_{CR}$. Efikasnost algoritma je prvo proverena nad impulsnim odzivima snimljenim u fizičkom modelu prostorije promenljive difuznosti. Prilikom testiranja algoritma, radi lakše obrade rezultata, impulсни odzivi su grupisani u četiri grupe na osnovu vrednosti indeksa difuznosti SDI. Prvu grupu čine impulсни odzivi snimljeni u konfiguraciji modela sa najmanjim vrednostima indeksa difuznosti ($SDI < 0.25$), zatim slede grupe impulsnih odziva sa stepenom difuznosti ($0.25 < SDI < 0.5$) i ($0.5 < SDI < 0.75$). Poslednja grupa obuhvata impulсне odzive snimljene u konfiguracijama modela sa najvećim vrednostima indeksa difuznosti površina ($0.75 < SDI$). Razlike između korišćenih signala se ogledaju u drugačijoj strukturi, rasporedu i obliku prvih refleksija.

Tokom eksperimenta, vizualizacija impulsnih odziva vršena je nad prvih 200ms signala, dok je za početak impulsnog odziva uzet trenutak nailaska direktnog zvuka na prijemu. Svi impulсни odzivi su razmatrani bipolarno, normalizovani u opsegu -1 do 1, za koje je izračunavan spektrogram.

Radi bržeg i efikasnijeg rada predloženog algoritma, slika spektrograma je filtrirana u frekvencijskom opsegu. Drugim rečima, MF analiza je primenjena nad delovima slike spektrograma unutar frekvencijskih opsega 187,5Hz-375Hz, 375Hz-750Hz, 750Hz-1500Hz, 1500Hz-3000Hz i 3000Hz-6000Hz, koji

predstavljaju oktavne frekvencijske opsege sa centralnim učestanostima 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz i 4kHz, respektivno. Takođe, posmatrana je i zavisnost efikasnosti algoritma od korišćenog frekvencijskog opsega slike spektrograma za 2D MF analizu.

Dijagrami na slici 6.27. predstavljaju raspodelu maksimalnih vrednosti razlike ($L_{FI}-L_{CR}$) nivoa FI i nivoa CR u trenutku kada prestaje njena detekcija u odnosu na vremensku poziciju gde je CR umetnuta u impulsnom odzivu. Dijagrami odgovaraju srednjim vrednostima graničnih vrednosti $L_{FI}-L_{CR}$ za svaku grupu impulsnih odziva iz modela, formiranim na osnovu vrednosti SDI u modelu. Na slici 6.27. je prikazano i poređenje rezultata u zavisnosti od frekvencijskog opsega iz spektrograma koji je korišćen za 2D MF analizu: opseg 187.5Hz-375Hz (slika 6.27a); opseg 750Hz-1500Hz (slika 6.27b); opseg 3000Hz-6000Hz (slika 6.27c).

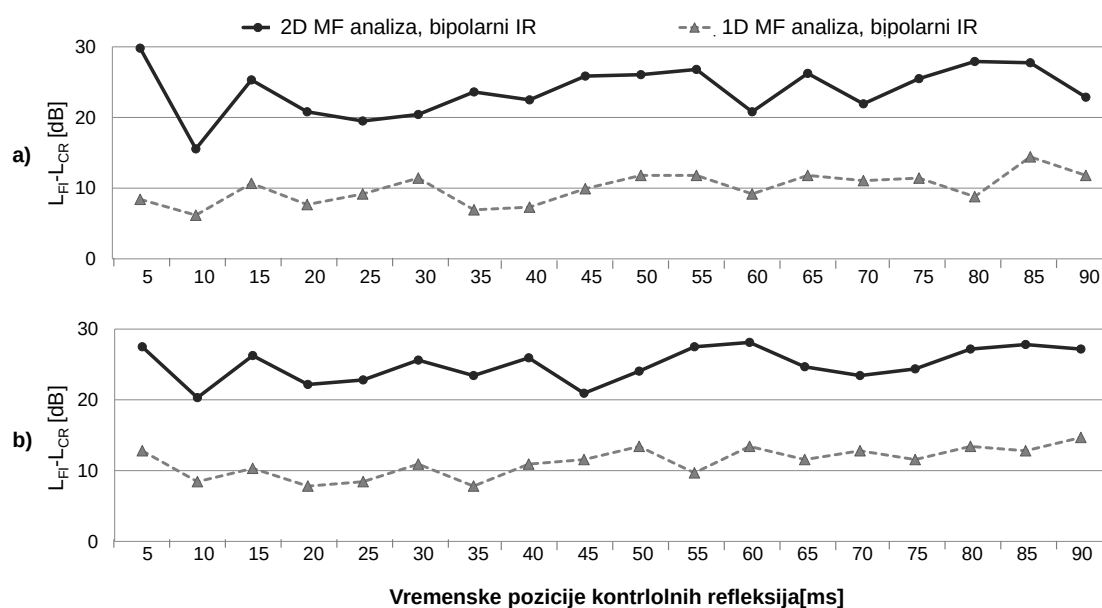


Slika 6.27. Maksimum nivoa razlike $L_{FI}-L_{CR}$ za impulsne odzive (IR) snimljene u fizičkom modelu promenljive difuznosti, 2D MF analiza slika spektrograma za frekvencijske opsege: a) 187.5Hz-375Hz; b) 750Hz-1500Hz; c) 3000Hz-6000Hz

Podebljana crna linija predstavlja srednju vrednost raspodela graničnih vrednosti $L_{FI}-L_{CR}$ za sve 4 grupe snimljenih impulsnih odziva u fizičkom modelu promenljive difuznosti.

Rezultati pokazuju da predložen algoritam omogućava detekciju oslabljene CR za više od -10dB u početnom delu IR (Slika 6.27a), pa do -20dB (Slika 6.27c.) Na osnovu dobijenih rezultata može se uočiti zavisnost maksimalne granične vrednosti L_{FI-LCR} od korišćenog frekvencijskog opsega slike spektrograma u 2D MF analizi. Najbolji rezultati detekcije CR su ostvareni u slučaju korišćenja frekvencijskog opsega slike spektrograma 3000Hz-6000Hz (Slika 6.27c), kada je srednja vrednost L_{FI-LCR} u opsegu između -20dB i -25dB. Na slici 6.27c je pokazana najmanja zavisnost dobijenih rezultata od vrednosti SDI. Ovakvi rezultati mogu se objasniti činjenicom da je deo spektrograma u frekvencijskom opsegu 3000Hz-6000Hz koji predstavlja ulaznu sliku u 2D MF analizi, najveća ulazna slika u ovom eksperimentu, tj. MF analiza se izvršava nad najvećom količinom podataka pa je preciznost izračunavanja *Hölder*-ovog eksponenta najveća.

Slika 6.28. ilustruje poboljšanja predloženog 2D MF algoritma, ostvarena u odnosu na ranije publikovan 1D MF pristup [Ristić et al. 2013].



Slika 6.28. Maksimum nivoa razlike $L_{FI-L_{CR}}$ za impulsne odzive (IR) snimljene u fizičkom modelu promenljive difuznosti, poređenje rezultata detekcije ranih refleksija primenom 1D i 2D MF analize, u slučajevima: a) $SDI < 0.25$; b) $SDI > 0.75$

U ovom primeru 2D MF algoritam koristi deo slike spektrograma u frekvencijskom opsegu 3000Hz-6000Hz. Maksimalna granična vrednost $L_{FI-L_{CR}}$

je u proseku veća za 10dB sa predloženim 2D MF algoritmom kada se impulsni odziv analizira kao slika spektrograma, u odnosu na primenu 1D MF algoritma i analizu impulsnog odziva kao 1D signala. Ostvarena poboljšanja su nezavisna od vrednosti SDI: mala difuznost (slika 6.28a); velika difuznost (slika 6.28b). Rezultati su identični i za druge frekvencijske opsege spektrograma. Prikazani rezultati pokazuju napredak u efikasnosti detektovanja ranih refleksija primenom multifraktala nad vizualizovanim impulsnim odzivom i potvrđuju uspešnost primene MF u analizi impulsnih odziva. Ova poboljšanja u odnosu na rezultate dobijene primenom prethodnog 1D MF algoritma, usledila su ne samo zbog izvršenih promena samog algoritma, već i zbog uzimanja u obzir i vremenskih i frekvencijskih karakteristika impulsnih odziva. Bolje detektovanje ranih refleksija se ogleda u većoj osetljivosti algoritma, većoj preciznosti i selektivnosti algoritma, kao i u pomeranju granice detekcije ranih refleksija. 2D MF analiza, kao dobro sredstvo za opisivanje lokalne regularnosti slike, može da omogući automatizaciju procesa otkrivanja značajnih ranih refleksija u impulsnom odzivu.

6.5. Klasterizacija impulsnih odziva

U postupku karakterizacije i klasterizacije impulsnih odziva na osnovu izračunatih globalnih MF parametara DU, DP, S, LP, UP i RP nad posmatranim signalima, prvo je korišćena baza impulsnih odziva snimljenih u fizičkom modelu prostorije sa promenljivom difuznošću, pa samim tim i različitim vrednostima indeksa difuznosti (SDI). Karakterizacija i klasterizacija impulsnih odziva je izvršena primenom metode opisane u poglavlju 5.4. Između pojedinačnih raspodela globalnih MF parametara, izračunatih MF analizom nad celim ili delom impulsnih odziva i stepena difuznosti u fizičkom modelu utvrđena je korelacija. Globalni MF parametri izračunati su pojedinačno za tri oblasti impulsnih odziva (oblast ranih refleksija, oblast reverberacionog dela i celi impulsni odziv snimljen u fizičkom modelu), kao i za tri različita vremenska prikaza signala (bipolarni, unipolarni i kvadrirani unipolarni signal), pri čemu su signali u svim navedenim slučajevima normalizovani u opsegu od 0 do 1. Vrednosti granica na osnovu kojih su impulsni odzivi podeljeni na oblast ranih refleksija i reverberacionog dela, korišćeni su iz tabela 6.2, 6.3 i 6.4. U tabeli 6.7. su prikazane izračunate vrednosti

globalnih MF parametara DU, DP, S, LP, UP i RP, u slučaju kada su analizirani celi signali impulsnih odziva vremenskih dužina 1s, za tri različita vremenska prikaza signala (bipolarni, unipolarni i kvadrirani unipolarni signal). U tabeli 6.8. prikazane su izračunate vrednosti globalnih MF parametara DU, DP, S, LP, UP i RP u slučaju kada je analizirana samo oblast ranih refleksija impulsnih odziva, ponovo za tri različita vremenska prikaza signala (bipolarni, unipolarni i kvadrirani unipolarni signal). U tabeli 6.9. prikazane su izračunate vrednosti globalnih MF parametara DU, DP, S, LP, UP i RP u slučaju kada su analizirane samo reverberacione oblasti impulsnih odziva, u formi bipolarnog, unipolarnog i kvadriranog unipolarnog signala.

Vrednosti zabeležene u tabelama 6.7, 6.8 i 6.9 su iskorišćene za izračunavanje vrednosti korelacije između dobijenih vrednosti globalnih MF parametara DU, DP, S, LP, UP i RP nad analiziranim impulsnim odzivima iz fizičkog modela promenljive difuznosti sa jedne strane, i SDI vrednosti fizičkog modela u kojima su posmatrani impulsnih odzivi snimljeni, sa druge strane.

Tabela 6.7. Pregled izračunatih vrednosti globalnih MF parametara primenom MF analize nad celim impulsnim odzivima iz fizičkog modela promenljive difuznosti. Odzivi su analizirani kao bipolarni (BI), unipolarni (UNI) i kvadrirani unipolarni (UNI2) signali.

		ozn	000000	S00000	M00000	L00000	SS0000	SM0000	MM0000	SL0000	ML0000	LL0000	SMM000	SML000	SSMM00	SMLS00	SSLL00	MMLL00	SMLS00	SMLS00
celi IR		SDI	0	0.1239	0.1652	0.2109	0.2478	0.2891	0.3304	0.3348	0.3761	0.42179	0.45431	0.5	0.5782	0.6239	0.6696	0.7522	0.7891	1
BI	DU	10.669	11.725	14.466	13.882	8.656	10.882	15.452	12.096	4.805	3.243	5.874	3.115	3.367	3.907	3.930	3.963	2.854	3.451	
	DP	0.241	0.231	0.233	0.251	0.248	0.220	0.239	0.222	0.234	0.243	0.214	0.211	0.209	0.210	0.207	0.210	0.202	0.202	
	S	1.110	1.108	1.116	1.108	1.104	1.116	1.110	1.108	1.115	1.109	1.112	1.107	1.121	1.113	1.105	1.108	1.110	1.105	
	LP	0.401	0.425	0.430	0.409	0.425	0.459	0.431	0.445	0.456	0.433	0.482	0.480	0.495	0.481	0.485	0.472	0.504	0.488	
	UP	0.643	0.657	0.663	0.659	0.673	0.678	0.670	0.667	0.691	0.676	0.696	0.690	0.704	0.691	0.692	0.683	0.706	0.690	
	RP	0.601	0.544	0.542	0.613	0.584	0.479	0.556	0.499	0.514	0.561	0.443	0.439	0.421	0.437	0.426	0.446	0.402	0.414	
UNI	DU	17.045	15.039	6.329	19.696	3.773	3.481	4.567	19.024	6.416	2.731	3.104	2.749	2.799	4.538	2.926	2.799	2.593	2.658	
	DP	0.238	0.226	0.230	0.244	0.242	0.228	0.241	0.227	0.232	0.238	0.217	0.206	0.201	0.204	0.207	0.203	0.183	0.189	
	S	1.037	1.044	1.049	1.002	1.040	1.044	1.042	1.008	1.022	1.052	1.053	1.045	1.043	1.011	1.049	1.038	1.049	1.021	
	LP	0.366	0.387	0.399	0.373	0.396	0.425	0.387	0.399	0.414	0.399	0.446	0.447	0.468	0.447	0.450	0.446	0.488	0.466	
	UP	0.604	0.613	0.629	0.617	0.638	0.653	0.627	0.626	0.646	0.636	0.663	0.653	0.669	0.651	0.657	0.649	0.670	0.656	
	RP	0.651	0.585	0.577	0.653	0.612	0.536	0.623	0.570	0.559	0.596	0.488	0.461	0.430	0.458	0.461	0.457	0.375	0.406	
UNI2	DU	10.294	8.505	10.368	5.727	3.481	7.536	8.507	11.059	9.799	3.308	7.107	1.286	3.618	2.426	3.676	2.096	1.411	1.498	
	DP	0.374	0.367	0.361	0.435	0.377	0.335	0.401	0.347	0.361	0.353	0.393	0.395	0.324	0.369	0.366	0.367	0.344	0.353	
	S	1.854	1.885	1.885	2.090	1.884	1.897	1.967	1.844	1.944	1.865	2.108	2.108	1.988	2.092	2.108	2.106	2.108	2.100	
	LP	0.715	0.760	0.791	0.766	0.784	0.849	0.774	0.792	0.842	0.788	0.884	0.896	0.911	0.906	0.908	0.877	0.965	0.915	
	UP	1.089	1.127	1.152	1.201	1.161	1.184	1.176	1.139	1.203	1.141	1.276	1.291	1.235	1.275	1.274	1.244	1.309	1.268	
	RP	0.523	0.484	0.456	0.568	0.481	0.395	0.518	0.438	0.429	0.448	0.444	0.441	0.356	0.407	0.403	0.419	0.356	0.386	

Tabela 6.8. Pregled izračunatih vrednosti globalnih MF parametara primenom MF analize nad oblastima ranih refleksija u impulsnim odzivima iz fizičkog modela promenljive difuznosti. Odzivi su analizirani kao bipolarni (BI), unipolarni (UNI) i kvadrirani unipolarni (UNI2) signali.

Rani deo IR	ozn	000000	S00000	M00000	L00000	SS0000	SM0000	MM0000	SL0000	ML0000	LL0000	SMM000	SML000	SSMM00	SMLS00	SSLL00	MMLL00	SMLS00	SMLSML
	SDI	0	0.1239	0.1652	0.2109	0.2478	0.2891	0.3304	0.3348	0.3761	0.42179	0.45431	0.5	0.5782	0.6239	0.6696	0.7522	0.7891	1
BI	DU	10.279	11.033	6.875	14.237	10.412	9.432	6.704	9.078	15.888	9.083	12.363	8.690	8.966	5.262	11.765	10.563	12.110	15.565
	DP	0.322	0.289	0.286	0.253	0.260	0.249	0.290	0.295	0.261	0.244	0.288	0.289	0.279	0.330	0.239	0.237	0.294	0.225
	S	0.975	0.940	0.969	0.840	0.851	0.879	0.959	0.903	0.852	0.799	0.901	0.910	0.917	1.074	0.787	0.792	0.901	0.762
	LP	0.157	0.147	0.183	0.153	0.157	0.167	0.179	0.158	0.153	0.149	0.150	0.158	0.172	0.223	0.155	0.154	0.134	0.158
	UP	0.479	0.435	0.469	0.406	0.416	0.416	0.469	0.453	0.414	0.392	0.438	0.448	0.452	0.553	0.394	0.391	0.428	0.382
	RP	2.045	1.969	1.561	1.651	1.654	1.489	1.623	1.868	1.704	1.640	1.914	1.827	1.621	1.477	1.537	1.545	2.192	1.427
UNI	DU	17.963	17.302	11.437	16.347	8.798	7.194	12.269	8.769	8.579	11.165	6.271	9.594	12.077	7.228	6.434	6.228	8.249	12.005
	DP	0.311	0.276	0.263	0.251	0.269	0.278	0.267	0.280	0.285	0.250	0.285	0.286	0.266	0.296	0.264	0.255	0.288	0.212
	S	0.912	0.894	0.879	0.743	0.927	0.932	0.884	0.856	0.881	0.853	0.962	0.919	0.878	0.942	0.958	0.912	0.961	0.740
	LP	0.170	0.159	0.180	0.150	0.173	0.204	0.174	0.162	0.182	0.166	0.218	0.156	0.171	0.188	0.216	0.193	0.171	0.163
	UP	0.481	0.435	0.443	0.401	0.442	0.482	0.441	0.442	0.466	0.416	0.503	0.442	0.438	0.483	0.479	0.448	0.459	0.375
	RP	1.824	1.738	1.461	1.672	1.558	1.362	1.539	1.724	1.569	1.513	1.303	1.836	1.554	1.574	1.224	1.318	1.679	1.302
UNI2	DU	4.218	2.782	2.785	4.365	3.193	6.029	3.605	3.554	3.336	4.798	6.480	1.992	4.301	2.755	1.954	5.246	5.626	5.887
	DP	1.041	0.956	0.951	0.871	1.045	0.837	0.890	1.041	0.934	0.905	0.787	0.920	0.944	1.074	0.689	0.744	0.959	0.778
	S	3.244	3.456	3.206	2.997	3.410	2.924	3.211	3.311	3.079	2.902	2.742	2.890	3.093	3.663	2.363	2.518	3.110	2.630
	LP	0.638	0.690	0.736	0.637	0.621	0.671	0.651	0.657	0.590	0.561	0.625	0.544	0.674	0.694	0.640	0.582	0.570	0.611
	UP	1.679	1.646	1.687	1.508	1.665	1.508	1.540	1.698	1.523	1.466	1.413	1.464	1.618	1.768	1.329	1.326	1.529	1.389
	RP	1.631	1.385	1.291	1.367	1.683	1.248	1.368	1.584	1.584	1.615	1.259	1.692	1.402	1.547	1.075	1.279	1.682	1.273

Tabela 6.9. Pregled izračunatih vrednosti globalnih MF parametara primenom MF analize nad reverberacionim delovima u impulsnim odzivima iz fizičkog modela promenljive difuznosti. Odzivi analizirani kao bipolarni (BI), unipolarni (UNI) i kvadrirani unipolarni (UNI2) signali.

Reverb. deo IR	ozn	000000	S00000	M00000	L00000	SS0000	SM0000	MM0000	SL0000	ML0000	LL0000	SMM000	SML000	SSMM00	SMLS00	SSLL00	MMLL00	SMLS00	SMLSML
	SDI	0	0.1239	0.1652	0.2109	0.2478	0.2891	0.3304	0.3348	0.3761	0.42179	0.45431	0.5	0.5782	0.6239	0.6696	0.7522	0.7891	1
BI	DU	10.521	11.793	15.037	14.058	19.432	18.301	15.990	12.223	20.799	21.840	22.449	24.784	3.742	21.513	13.317	22.088	16.703	12.821
	DP	0.241	0.238	0.235	0.254	0.250	0.223	0.241	0.226	0.232	0.238	0.211	0.205	0.212	0.204	0.207	0.205	0.199	0.198
	S	0.989	0.974	0.971	0.949	0.951	0.961	0.971	1.015	0.967	0.945	0.964	0.958	0.991	0.959	0.950	0.980	0.963	0.986
	LP	0.332	0.345	0.360	0.314	0.336	0.365	0.352	0.384	0.373	0.346	0.413	0.408	0.410	0.401	0.393	0.403	0.431	0.421
	UP	0.574	0.584	0.595	0.568	0.586	0.588	0.593	0.610	0.606	0.585	0.624	0.613	0.622	0.604	0.600	0.608	0.630	0.619
	RP	0.727	0.689	0.652	0.808	0.742	0.611	0.686	0.588	0.622	0.689	0.512	0.503	0.517	0.509	0.526	0.508	0.460	0.469
UNI	DU	17.764	15.684	21.230	20.297	24.168	11.343	21.184	19.019	26.285	7.125	31.769	8.918	2.995	30.476	3.411	3.833	3.201	2.818
	DP	0.240	0.228	0.229	0.244	0.240	0.227	0.238	0.232	0.231	0.237	0.213	0.203	0.205	0.205	0.212	0.204	0.186	0.188
	S	0.916	0.904	0.902	0.884	0.892	0.894	0.906	0.940	0.897	0.887	0.869	0.876	0.915	0.868	0.882	0.907	0.871	0.922
	LP	0.303	0.315	0.329	0.298	0.318	0.334	0.318	0.341	0.340	0.312	0.354	0.366	0.385	0.358	0.354	0.373	0.397	0.408
	UP	0.543	0.542	0.558	0.542	0.558	0.561	0.555	0.573	0.571	0.549	0.567	0.569	0.590	0.563	0.566	0.578	0.582	0.596
	RP	0.794	0.724	0.698	0.819	0.756	0.680	0.749	0.679	0.678	0.761	0.602	0.553	0.533	0.573	0.598	0.547	0.468	0.460
UNI2	DU	10.936	9.008	11.102	5.718	15.371	6.928	8.999	11.347	10.245	6.385	7.359	13.488	3.753	10.900	10.759	10.627	2.373	13.845
	DP	0.378	0.369	0.363	0.436	0.372	0.343	0.398	0.349	0.366	0.349	0.397	0.387	0.334	0.362	0.371	0.362	0.345	0.343
	S	1.595	1.547	1.621	1.831	1.565	1.589	1.683	1.636	1.686	1.620	1.771	1.776	1.732	1.786	1.775	1.829	1.785	1.774
	LP	0.569	0.581	0.652	0.610	0.622	0.648	0.627	0.638	0.683	0.653	0.696	0.742	0.741	0.720	0.737	0.802	0.747	
	UP	0.948	0.949	1.015	1.045	0.994	0.991	1.025	0.987	1.048	1.003	1.093	1.129	1.075	1.103	1.091	1.099	1.148	1.090
	RP	0.665	0.635	0.557	0.715	0.599	0.530	0.635	0.546	0.536	0.535	0.571	0.522	0.450	0.488	0.514	0.491	0.431	0.460

Dobijene vrednosti korelacije između vrednosti globalnih MF parametara i vrednosti SDI su zabeležene u tabeli 6.10. U tabeli 6.10 su prikazane izračunate vrednosti korelacije globalnih MF parametara i SDI vrednosti u slučajevima multifraktalne analize nad celim signalom, ranim delom i reverberacionim delom impulsnih odziva, snimljenih u fizičkom modelu promenljive difuznosti. Takođe, rezultati korelacije izračunati su pri MF analizi različitih prikaza signala impulsnih odziva, tj. impulsnih odziva u formi bipolarnog (BI), unipolarnog (UNI) i kvadriranog unipolarnog (UNI2) signala.

Rezultati navedeni u tabeli 6.10. pokazuju da je najveći stepen pozitivne korelisanosti (vrednosti 0.8 i više) ostvaren u slučaju raspodele multifraktalnog parametara LP u odnosu na vrednosti indeksa difuznosti SDI.

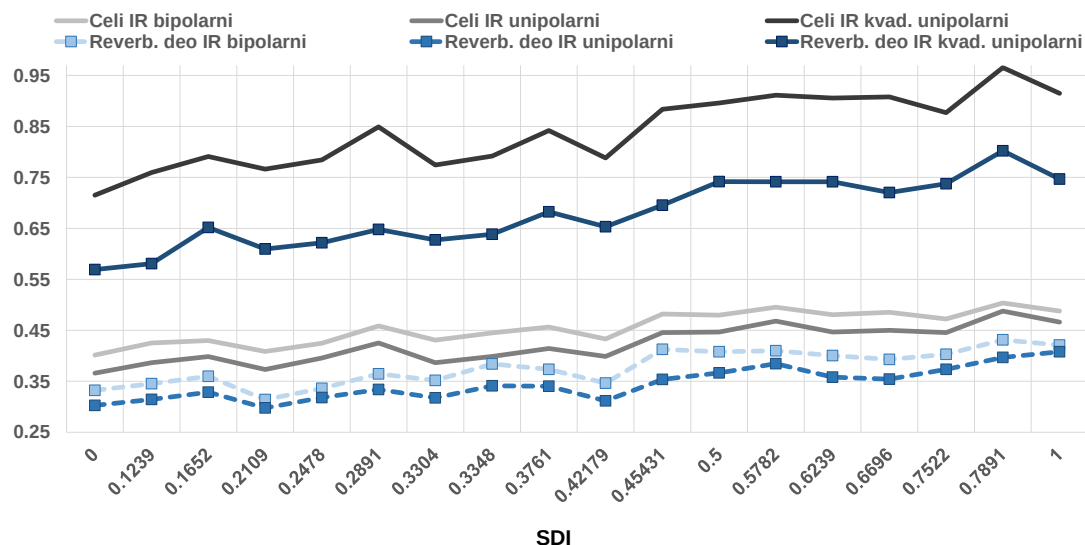
Tabela 6.10. Izračunata korelisanost između globalnih MF parametara, nakon MF analize različitih delova signala impulsnih odziva iz fizičkog modela promenljive difuznosti, i SDI vrednosti modela u kojem su impulsi odzivi snimljeni.

Grupa impulsnih odziva IR	Naziv IR	Corr (DU-SDI)	Corr (DP-SDI)	Corr (S-SDI)	Corr (LP-SDI)	Corr (UP-SDI)	Corr (RP-SDI)
Model difuzne prostorije	rani deo IR, BI	0.229921	-0.36999	-0.40751	-0.0159	-0.26943	-0.27758
	rani deo IR, UNI	-0.53609	-0.45355	-0.03041	0.195335	-0.18869	-0.48557
	rani deo IR, UNI2	0.288594	-0.47155	-0.51907	-0.40172	-0.54803	-0.197
	reverberacioni deo IR, BI	0.132401	-0.85423	0.009408	0.835152	0.741516	-0.83379
	reverberacioni deo IR, UNI	-0.5316	-0.87406	-0.14345	0.897112	0.825526	-0.88571
	reverberacioni deo IR, UNI2	-0.04381	-0.40127	0.699446	0.899207	0.814659	-0.81464
	celi IR, BI	-0.75587	-0.80699	-0.14423	0.85724	0.798636	-0.83962
	celi IR, UNI	-0.62224	-0.86401	-0.01804	0.877991	0.783236	-0.88428
	celi, UNI2	-0.75752	-0.30022	0.726102	0.873742	0.817543	-0.73281

Visoka pozitivna korelisanost [+0.8,+1]
 Pozitivna korelisanost [+0.6,+0.8]
 Nekorelisanost [-0.1,+0.1]

Visoka negativna korelisanost [-0.8,-1]
 Negativna korelisanost [-0.6,-0.8]

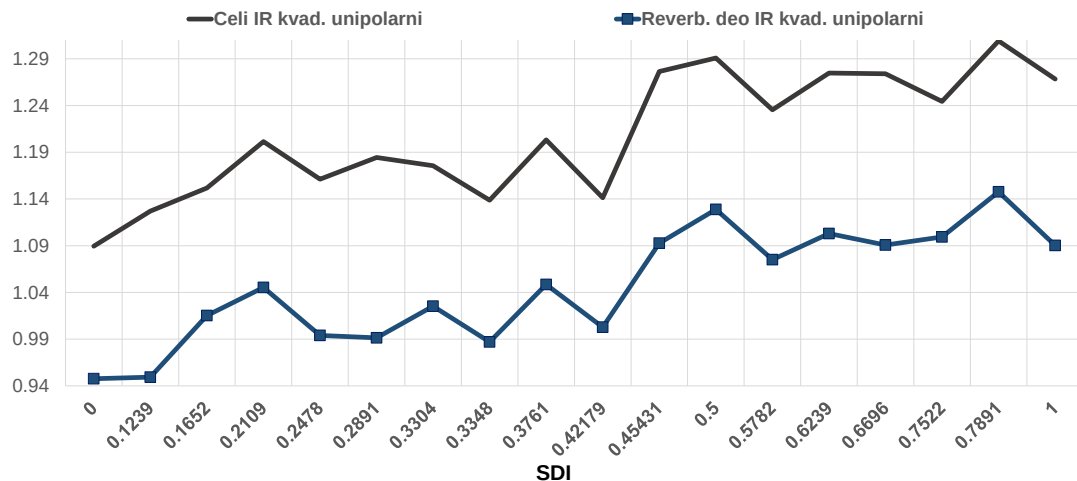
Drugim rečima, vrednosti globalnog MF parametra Leva površina (LP) iz multifraktalnog spektra, dobijenog MF analizom metode velikih devijacija, imaju trend povećanja sa rastom vrednosti SDI u fizičkom modelu promenljive difuznosti, u kome su analizirani impulsi odzivi snimljeni, što se može zaključiti sa slike 6.29. Visoke vrednosti korelisanosti za raspodelu vrednosti LP u odnosu na vrednosti SDI su ostvarene kada je multifraktalna analiza vršena nad reverberacionim delom i celim signalima impulsnih odziva, prikazanih kao: bipolarni, unipolarni i kvadrirani unipolarni signali.



Slika 6.29. Prikaz raspodele parametara LP u zavisnosti od vrednosti SDI, analizirani celi signali i reverberacioni delovi signala impulsnih odziva iz fizičkog modela, oba puta za bipolarni (BI), unipolarni (UNI) i kvadrirani unipolarni (UNI2) prikaz signala.

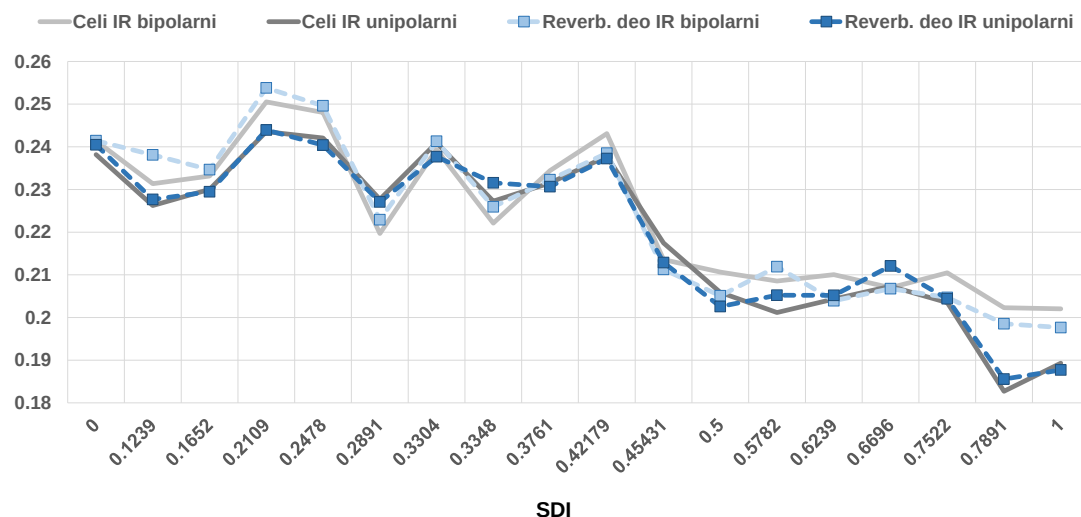
Relativno visoke stepene pozitivne korelisanosti ostvarene su i u slučaju raspodele globalnog MF parametara UP u odnosu na vrednosti indeksa difuznosti SDI. Na slici 6.30 prikazane su raspodele multifraktalnog parametara UP u odnosu na vrednosti SDI u slučaju kada je multifraktalna analiza vršena nad reverberacionim delom i celim signalom impulsnog odziva, analiziranjem impulsnog odziva kao kvadriranog unipolarnog signala.

U tabeli 6.10 najveći stepen negativne korelisanosti (vrednosti manje od - 0.8) je ostvaren u slučaju raspodele multifraktalnog parametara DP u odnosu na vrednosti difuznosti SDI. Drugim rečima, vrednosti desne površine (DP) multifraktalnog spektra dobijene MF analizom metodom velikih devijacija nad izabranim impulsnim odzivima se smanjuju sa povećanjem vrednosti indeksa difuznosti SDI, što se može zaključiti sa slike 6.31. Najveće negativne vrednosti korelisanosti između raspodele vrednosti DP i vrednosti SDI su postignute u slučaju kada je multifraktalna analiza primenjena nad celim signalom i reverberacionim delom bipolarnog i unipolarnog signala.

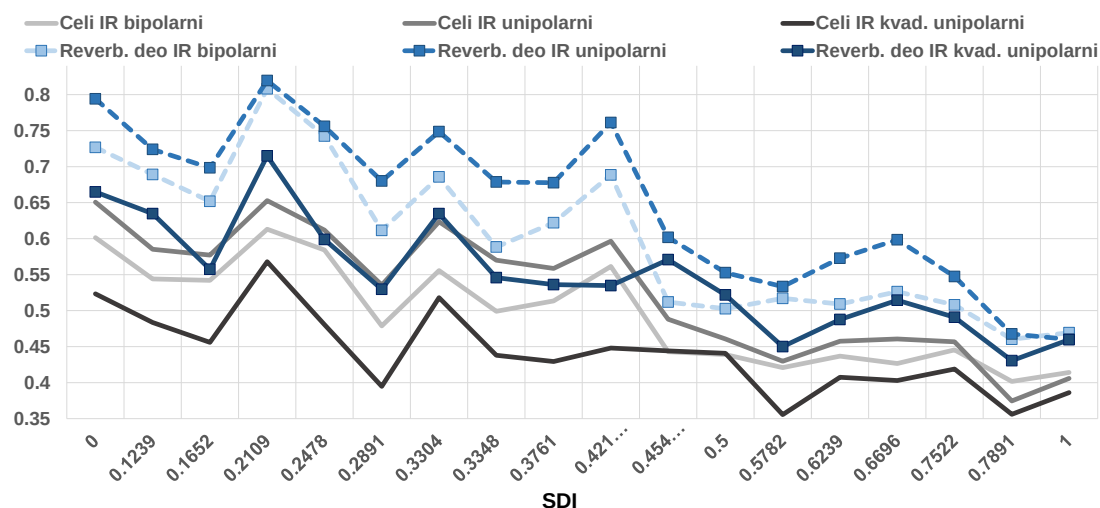


Slika 6.30. Prikaz raspodele parametara UP u zavisnosti od vrednosti SDI, analizirani celi signali i reverberacioni delovi signala impulsnih odziva iz fizičkog modela, oba puta za kvadrirani unipolarni (UNI2) prikaz signala.

Takođe, visoki stepen negativne korelisanosti zabeležen je i između globalnog multifraktalnog parametara RP u odnosu na vrednosti difuznosti SDI. Na slici 6.32 prikazane su raspodele multifraktalnog parametara RP u odnosu na vrednosti SDI u slučaju kada je multifraktalna analiza vršena nad reverberacionim delom i celim signalom impulsnog odziva, analiziranjem impulsnog odziva kao bipolarnog, unipolarnog i kvadriranog unipolarnog signala.

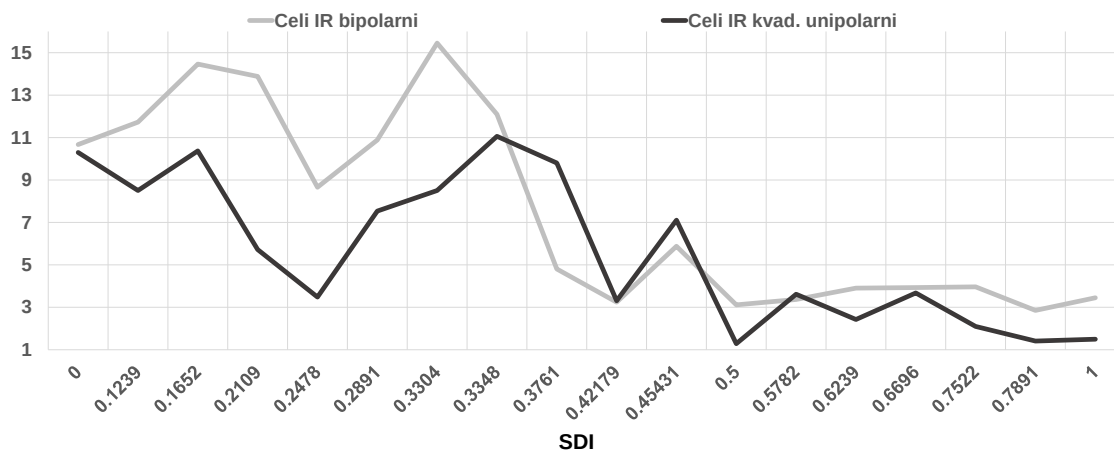


Slika 6.31. Prikaz raspodele parametara DP u zavisnosti od vrednosti SDI, analizirani celi signali i reverberacioni delovi signala impulsnih odziva iz fizičkog modela, oba puta za bipolarni (BI) i unipolarni (UNI) prikaz signala.



Slika 6.32. Prikaz raspodele parametara RP u zavisnosti od vrednosti SDI, analizirani celi signali i reverberacioni delovi signala impulsnih odziva iz fizičkog modela, oba puta za bipolarni (BI), unipolarni (UNI) i kvadrirani unipolarni (UNI2) prikaz signala.

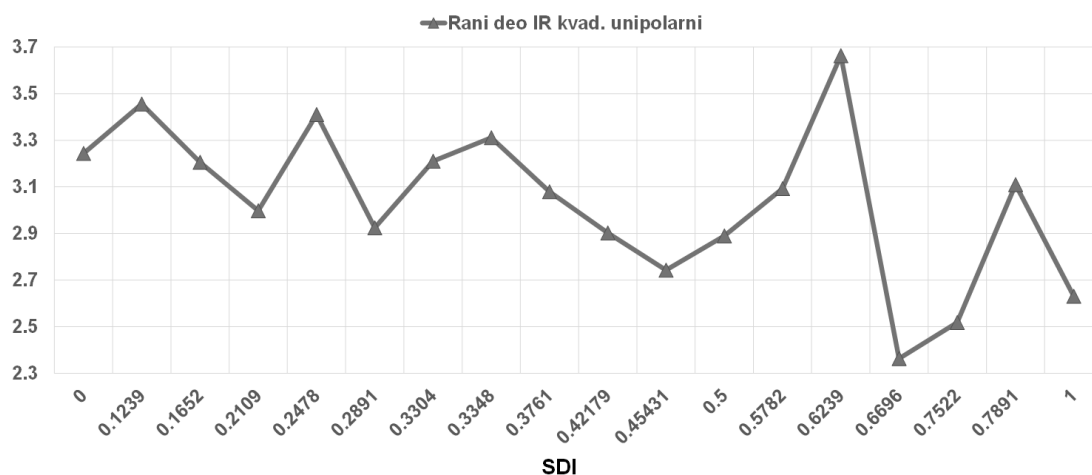
Relativno visoki stepen negativne korelisanosti zabeležen je i između globalnog multifraktalnog parametra DU u odnosu na vrednosti difuznosti SDI, u slučajevima kada su impulsnih odzivi analizirani kao celi bipolarni i kvadrirano unipolarni signali, što je prikazano na slici 6.33.



Slika 6.33. Prikaz raspodele parametara DU u zavisnosti od vrednosti SDI, analizirani celi signali impulsnih odziva iz fizičkog modela, za bipolarni (BI) i kvadrirani unipolarni (UNI2) prikaz signala.

Kada se multifraktalna analiza primenjuje nad ranim delom impulsnog odziva, može se na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 6.10 zaključiti da ne postoji korelisanost između raspodela globalnih multifraktalnih parametara i vrednosti SDI, ili je korelisanost relativno niska (manja od 0.5). Jedna od najvećih

negativnih korelisanosti je dobijena između raspodele parametra S i vrednosti indeksa difuznosti SDI (~ -0.51), u slučaju kada je analiziran rani deo impulsnog odziva, prikazan kao kvadrirani unipolarni (UNI2) signal. Raspodela parametra S u odnosu na indeks difuznosti, za navedeni slučaj, je prikazana na slici 6.34.

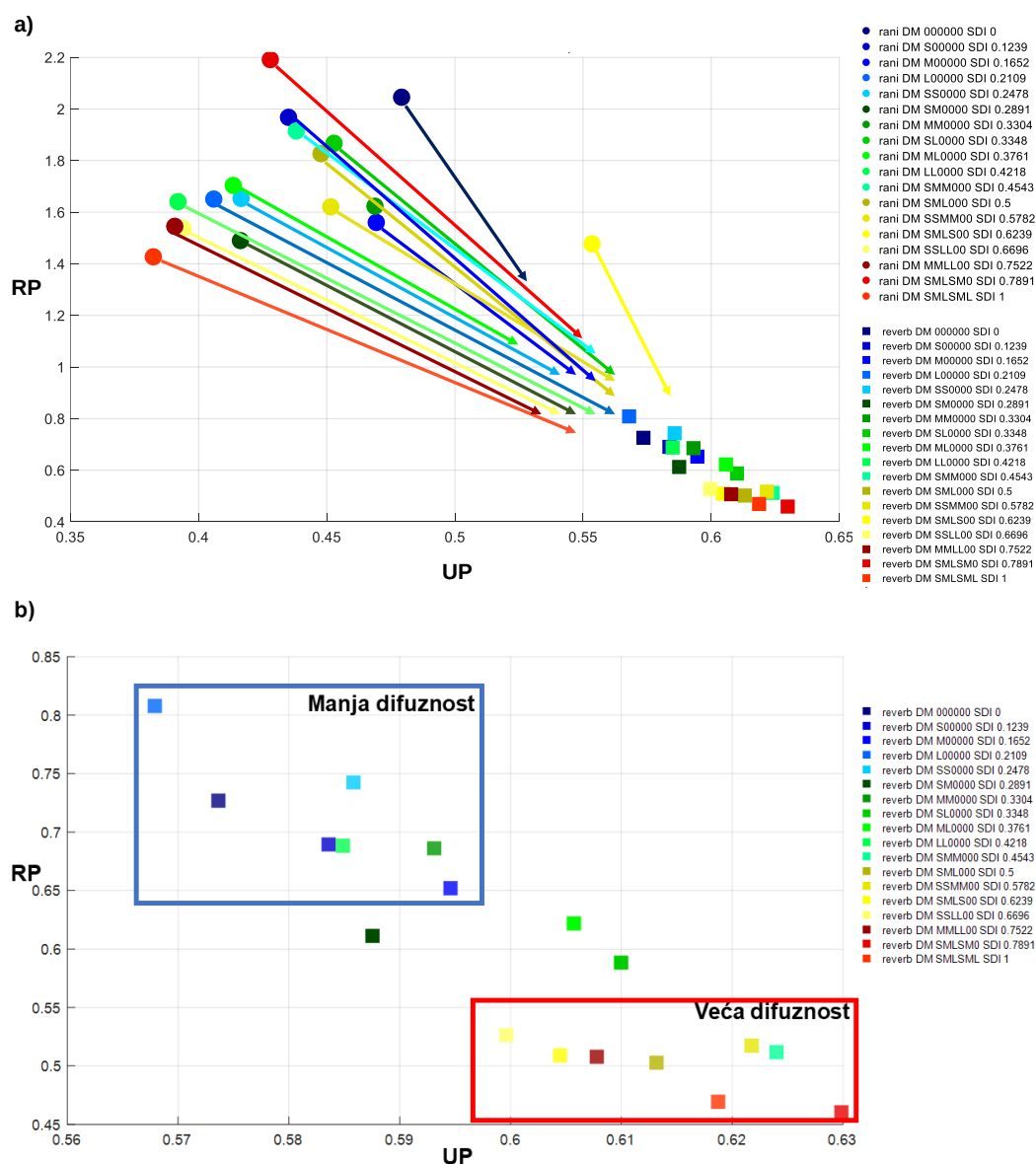


Slika 6.34. Prikaz raspodele parametara S u zavisnosti od vrednosti SDI, analizirani rani delovi signala impulsnih odziva iz fizičkog modela, za kvadrirani unipolarni (UNI2) prikaz signala.

Nakon izračunatih vrednosti globalnih multifraktalnih parametara za sve impulsne odzive iz baze korišćenih tokom istraživanja, izvršena je klasterizacija, tj. grupisanje impulsnih odziva posmatranjem dva ili tri od ukupno 6 opisanih globalnih parametara.

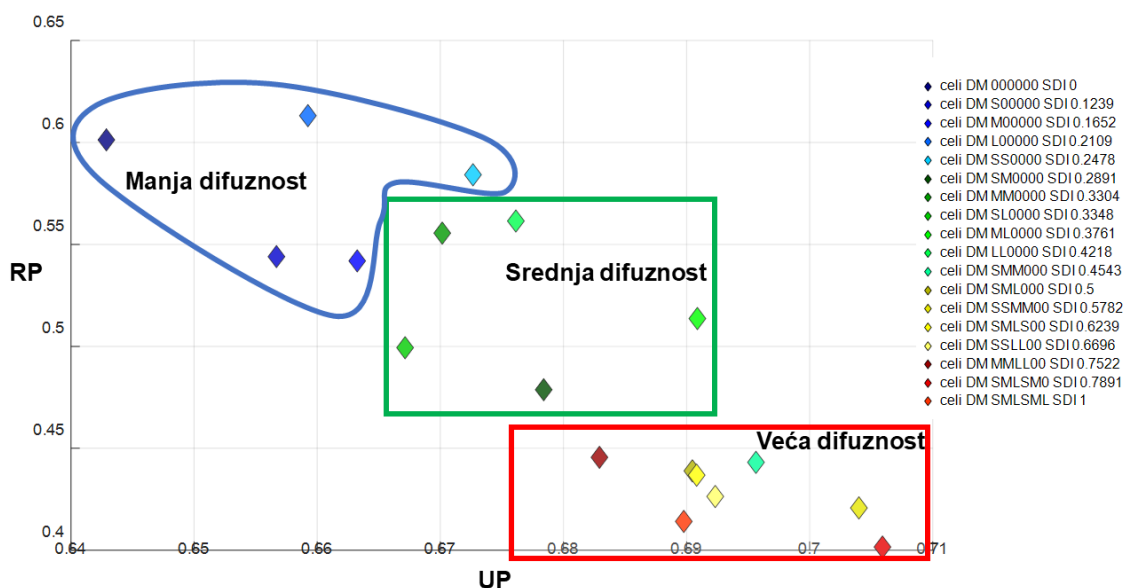
Kriterijum pri izboru dva, odnosno tri globalna multifraktalna parametara od analiziranih 6 (DU, DP, S, LP, UP i RP), je bio stepen korelisanosti izabranih parametara u odnosu na vrednosti indeksa difuznosti SDI. Na slici 6.35 ilustrovan je slučaj kada su izabrani parametri: ukupna površina (UP) i odnos desne i leve površine (RP), dva parametara sa malim stepen negativne korelisanosti sa SDI, u slučaju MF analize nad ranim delom bipolarnih impulsnih odziva. Za UP je vrednost korelisanosti -0.269 , dok je za RP vrednost korelisanosti -0.277 . Pokazano je da klasterizacija nije zadovoljavajuća, što je ilustrovano na slici 6.35a. Međutim, kada se ta dva parametara (UP i RP) izračunaju primenom MF analize nad reverberacionim delom impulsnih odziva, posmatrani parametri UP i RP pokazuju visok stepen korelisanosti (za UP: 0.74 , a za RP: -0.83) sa indeksima difuznosti SDI. Klasterizacija je u ovom slučaju bolja, jer su se izdvojili

impulsni odzivi snimljeni u fizičkom modelu prostorije sa većom difuznošću od ostalih impulsnih odziva iz modela. Klasteri izdvojenih impulsnih odziva dobijeni uparivanjem parametara UP i RP pod opisanim uslovima prikazani su na slici 6.35b. Na slici 6.35a je ilustrovana i migracija impulsnih odziva u 2D domenu uparivanjem parametara UP i RP, analiziranjem prvo ranog, a potom i reverberacionog dela impulsnih odziva u formi bipolarnog signala.



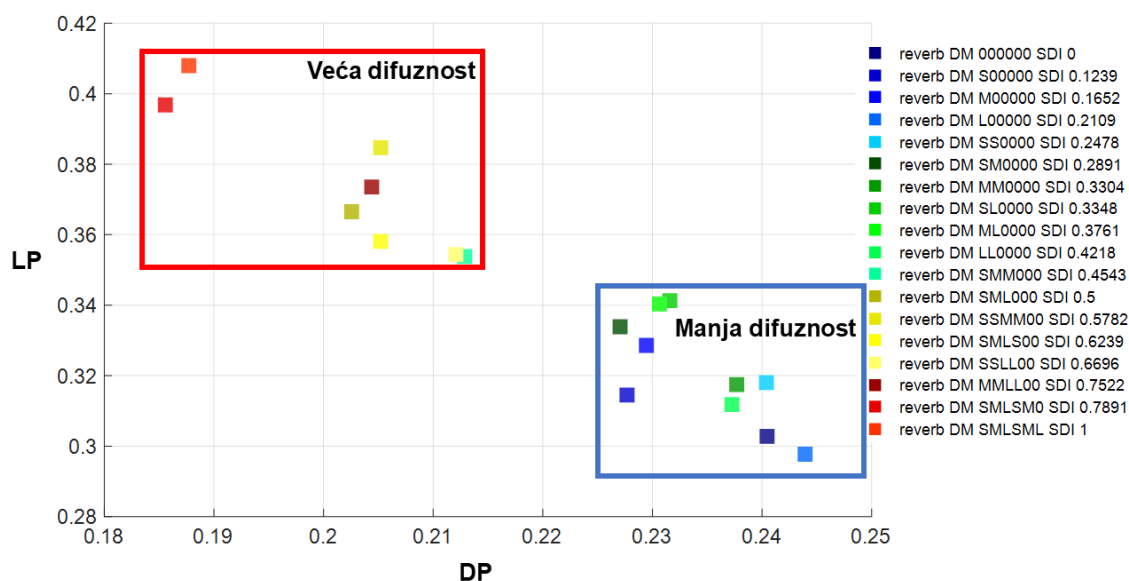
Slika 6.35. Klasterizacija bipolarnih impulsnih odziva iz fizičkog modela promenljive difuznosti, upoređivanjem globalnih MF parametara: UP i RP. Kriterijum za klasterizaciju impulsnih odziva je stepen difuznosti u fizičkom modelu. Analizirana je oblast a) ranih delova impulsnih odziva; b) reverberacioni deo impulsnih odziva.

Zaključuje se da uparivanje globalnih multifraktalnih parametara koji imaju visoke vrednosti korelisanosti (pozitivne i negativne) obezbeđuje bolju klasterizaciju impulsnih odziva. Na slici 6.36. je prikazana klasterizacija impulsnih odziva uparivanjem istih parametara UP i RP kao i u prethodnom slučaju, ali ovog puta primenom multifraktalne analize nad celim signalom impulsnih odziva u formi bipolarnih signala (stepen korelacije za UP je +0.798, dok je za RP -0.839).



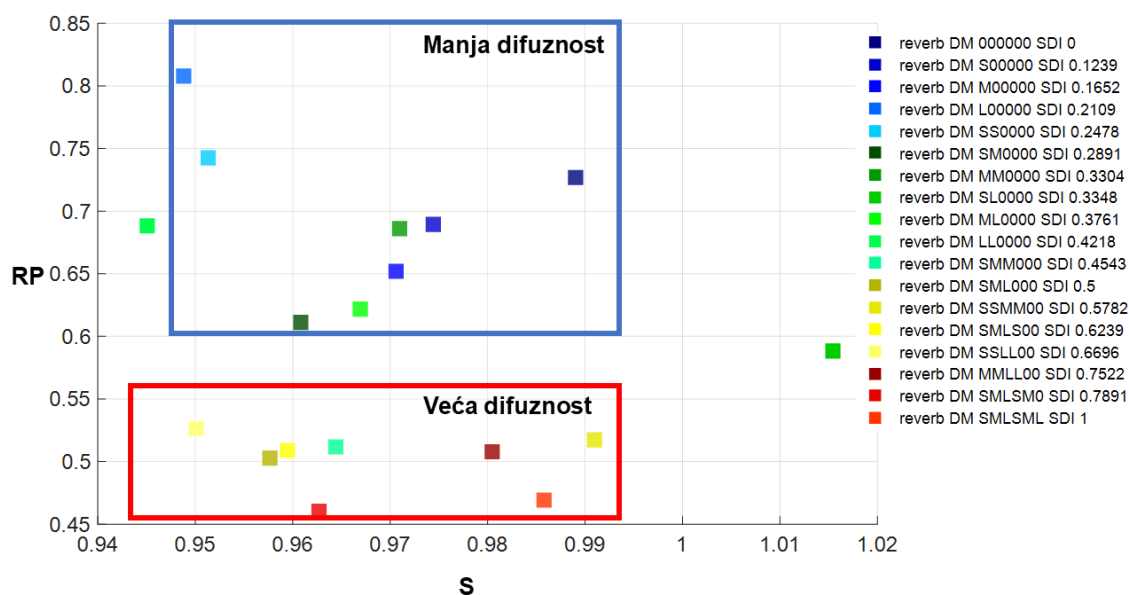
Slika 6.36. Klasterizacija bipolarnih celih impulsnih odziva iz fizičkog modela promenljive difuznosti, upoređivanjem globalnih MF parametara: UP i RP. Kriterijum za klasterizaciju odziva je stepen difuznosti u fizičkom modelu.

Na slici 6.37. je prikazana klasterizacija impulsnih odziva upoređivanjem parametara DP i LP, dobijenih primenom MF analize nad reverberacionim delom impulsnih odziva u formi unipolarnih (UNI) signala. Globalni MF parametri DP i LP su odabrani kao kriterijumi za klasterizaciju impulsnih odziva iz fizičkog modela zbog visoke stepena korelacije u odnosu na SDI, (za DP stepen korelacije je -0.874, a za LP je +0.899).



Slika 6.37. Klasterizacija reverberacionih delova unipolarnih impulsnih odziva iz fizičkog modela promenljive difuznosti, upoređivanjem globalnih MF parametara: DP i LP. Kriterijum za klasterizaciju odziva je stepen difuznosti u fizičkom modelu.

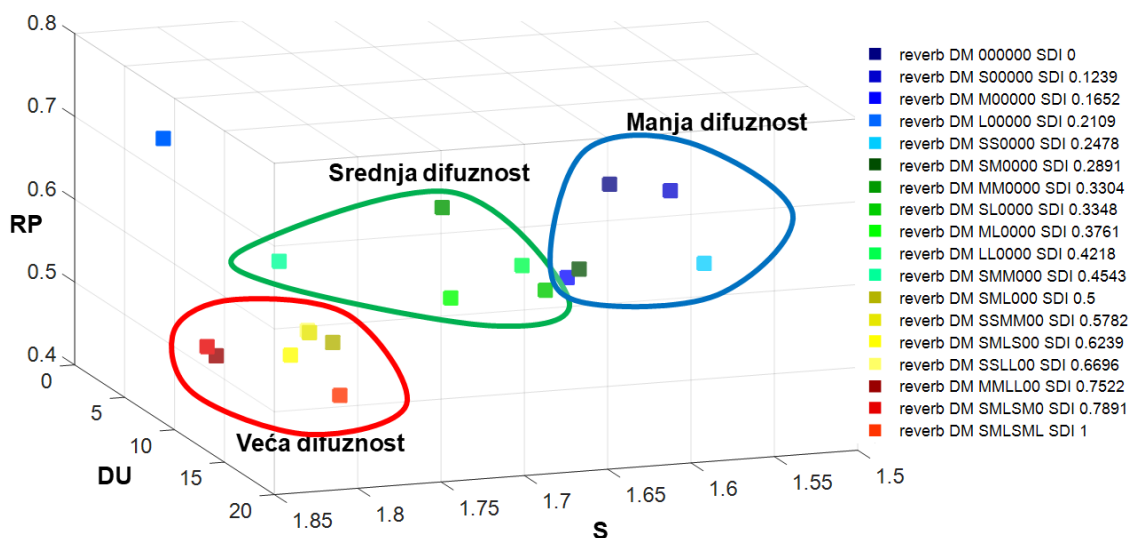
Na slici 6.38 prikazana je klasterizacija impulsnih odziva upoređivanjem vrednosti parametara S i RP, dobijenih primenom MF analize nad reverberacionim delom impulsnih odziva datih u formi bipolarnih (BI) signala.



Slika 6.38. Klasterizacija reverberacionih delova bipolarnih impulsnih odziva iz fizičkog modela promenljive difuznosti, upoređivanjem globalnih MF parametara: S i RP. Kriterijum za klasterizaciju odziva je stepen difuznosti u fizičkom modelu.

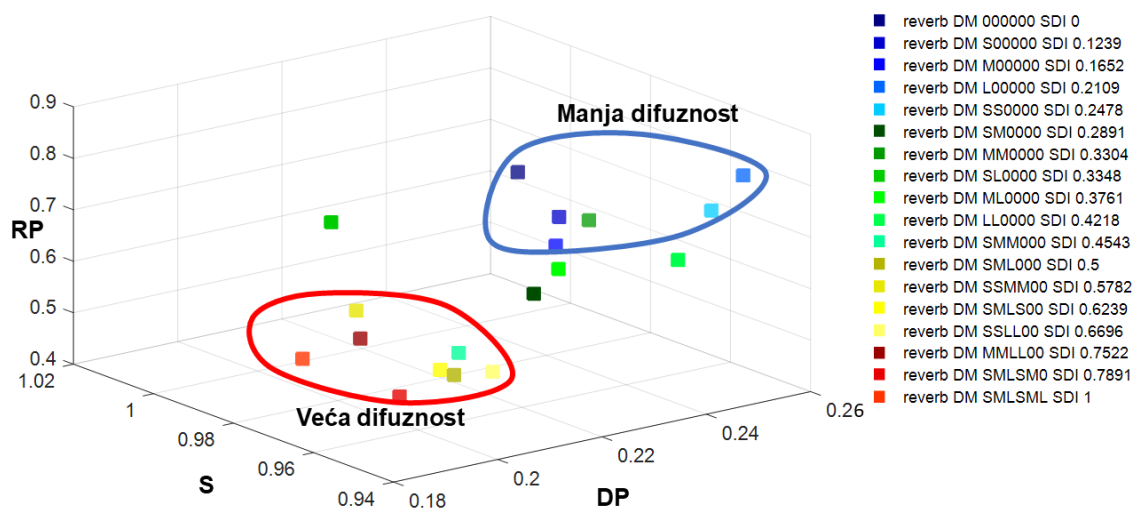
U ovom slučaju izabran je parametar S, zbog malog stepena korelacije ovog parametra i vrednosti SDI fizičkog modela u kome su posmatrani impulsni odzivi snimljeni (+0.0094, tabela 6.10). S druge strane, globalni MF parametar RP reverberacionih delova bipolarnih impulsnih odziva iz fizičkog modela je visoko negativno korelisan sa vrednostima SDI fizičkog modela (-0.83379, tabela 6.10). Rezultat ilustrovan na slici 6.38, takođe pokazuje dobru klasterizaciju jer su impulsni odzivi snimljeni u konfiguracijama fizičkog modela sa većim indeksom difuznosti $SDI > 0.5$ grupisali i razdvojili u odnosu na ostale impulsne odzive iz fizičkog modela.

U nastavku ovog dela istraživanja, pored klasterizacije impulsnih odziva iz fizičkog modela promenljive difuznosti na osnovu upoređivanja vrednosti 2 od 6 globalna MF parametra, vršena je klasterizacija impulsnih odziva korišćenjem vrednosti 3 od 6 globalna MF parametra. Testirano je više različitih kombinacija globalnih MF parametara u postupku klasterizacije. Takođe, klasterizacija je vršena nakon MF analize celih, ali i ranih i reverberacionih delova impulsnih odziva. Na slici 6.39. je izdvojen rezultat klasterizacije impulsnih odziva upoređivanjem vrednosti parametara DU, S i RP, dobijenih primenom MF analize nad reverberacionim delom impulsnih odziva u formi kvadriranih unipolarnih (UNI2) signala. Ova tri parametra su izabrana zato što je jedan među njima sa izrazito niskom korelisanošću u odnosu na vrednosti SDI (za vrednosti DU je vrednost korelisanošću sa vrednostima SDI: -0.043), drugi izabrani parametar ima visoku pozitivnu vrednost korelisanošću u odnosu na vrednosti SDI (za vrednosti S je vrednost korelisanošću sa vrednostima SDI: +0.699) i treći izabrani parametar je sa visokom negativnom vrednošću korelisanošću u odnosu na vrednosti SDI (za vrednosti RP je vrednost korelisanošću sa vrednostima SDI: -0.814). Zaključuje se da korišćenje ova tri parametra daje dobre rezultate u klasterizaciji impulsnih odziva kada se porede sa ostvarenim stepenom difuznosti zvučnog polja u prostoriji. Međutim, ako se navedeni parametri (DU, S i RP) koriste za klasterizaciju ranih delova ili celih kvadriranih unipolarnih impulsnih odziva, to nije slučaj i rezultat klasterizacije nije dobar.



Slika 6.39. Klasterizacija reverberacionih delova kvadriranih unipolarnih impulsnih odziva snimljenih u fizičkom modelu promenljive difuznosti, upoređivanjem MF parametara: DU, S i RP. Kriterijum za klasterizaciju impulsnih odziva je stepen difuznosti u fizičkom modelu.

Na slici 6.40. je izdvojen još jedan rezultat klasterizacije impulsnih odziva, ovog puta upoređivanjem vrednosti parametara DP, S i RP, dobijenih primenom MF analize nad reverberacionim delom impulsnih odziva u formi bipolarnih (BI) signala. Ova tri parametra su izabrana zato što je jedan među njima sa izrazito niskom korelisanošću u odnosu na vrednosti SDI (za vrednosti S vrednost korelisanosti sa vrednostima SDI je: +0.009408), preostala dva izabrana parametra pokazuju negativnu korelisanost u odnosu na vrednosti SDI (za vrednosti DP je vrednost korelisanosti sa vrednostima SDI: -0.85423, za vrednosti RP je vrednost korelisanosti sa vrednostima SDI: -0.83379). Upoređivanjem ova tri globalna MF parametra zaključuje se da se postiže dobra klasterizacija impulsnih odziva na osnovu kriterijuma difuznosti zvučnog polja u prostori u kojoj su posmatrani impulsnih odzivi snimljeni, u smislu da su izdvojeni impulsnih odzivi snimljeni u konfiguracijama fizičkog modela sa visokim vrednostima indeksa difuznosti površine ($SDI > 0.5$) od ostalih impulsnih odziva iz modela.



Slika 6.40. Klasterizacija reverberacionih delova bipolarnih impulsnih odziva snimljenih u fizičkom modelu promenljive difuznosti, upoređivanjem MF parametara: DP, S i RP.

Kriterijum za klasterizaciju impulsnih odziva je stepen difuznosti u fizičkom modelu.

7. Analiza predloženih metoda nad bazom impulsnih odziva korišćenih tokom istraživanja

7.1. Baza impulsnih odziva za testiranje predloženih metoda

Za potrebe istraživanja, korišćena je baza od ukupno 192 impulsna odziva prostorija različitih akustičkih karakteristika. Impulsni odzivi prostorija iz korišćene baze su generisani na različite načine i pod različitim uslovima i akustički opisuju prostorije koje se međusobno razlikuju po akustičkim svojstvima, geometriji i nameni. Analizom različitih impulsnih odziva se testira primenljivost predložene metodologije u različitim graničnim situacijama. Veliki broj impulsnih odziva je iz iste baze odziva korišćene i u [Ristić 2016]. Impulsni odzivi korišćeni u disertaciji mogu se podeliti u tri velike grupe odziva i prikazani su u tabeli 7.1:

- Impulsni odzivi snimljeni u fizičkom modelu prostorija;
- Impulsni odzivi generisani uz pomoć softvera;
- Impulsni odzivi snimljeni u realnim prostorijama.

Tabela 7.1. Pregled korišćenih impulsnih odziva za potrebe istraživanja

Grupe korišćenih impulsnih odziva u istraživanju	Tipovi impulsnih odziva po grupama	Broj odziva po grupi
Fizički modeli	Fizički model promenljive difuznosti	18
	Fizički model reverberacione komore	12
	Fizički model subotičkog pozorišta	10
Simulacioni modeli	Paralelopipedne forme sa različitim proporcijama stranica	41
	Paralelopipedne forme sa deformisanim stranicama	17
	Modeli realnih prostorija- crkve	13
Realne prostorije	Pozorište BDP	12
	Pozorište Boško Buha	11
	Koncertne i operske sale	4
	Crkve	54
Ukupno impulsni odziva:		192

7.1.1. Impulsni odzivi snimljeni u fizičkom modelu prostorija

Prvu grupu impulsnih odziva prostorija iz korišćene baze čine impulsni odzivi snimljeni u fizičkim modelima prostorija. Kao što je već rečeno u

prethodnom poglavlju 6.1, fizički modeli se koriste sa ciljem simulacije ponašanja i prostiranja zvuka u realnim prostorijama [Mijić and Šumarac-Pavlović, 2007] i [Šumarac-Pavlović and Mijić, 2008]. Impulsni odzivi iz ove grupe odziva se međusobno razlikuju u zavisnosti od korišćenih apsorpcionih i difuznih materijala u samom fizičkom modelu. U poglavlju 6.1 je detaljno opisan fizički model promenljive difuznosti u kome je za potrebe istraživanja snimljeno 18 impulsnih odziva, nad kojima su potom analizirane predložene metode za karakterizaciju zvučnog polja. U nastavku ovog poglavlja biće više reči o ostalim fizičkim modelima korišćenim u istraživanju. Pored fizičkog modela promenljive difuznosti, u istraživanju su korišćena još dva fizička modela:

1) Fizički model reverberacione komore, konstruisan kao kopija originalne reverberacione komore u razmeri 1:10, koja se nalazi na Institutu za ispitivanje materijala u Beogradu [Mijić and Perolo, 1992]. Ovaj model se koristi za merenje koeficijenta apsorpcije materijala. Za potrebe ovog istraživanja, impulsni odzivi su snimani u konfiguracijama modela sa različitim količinama umetnutih apsorpcionih materijala u modelu reverberacione komore, počev od situacije kada je reverberaciona komora prazna (tada je stepen apsorpcije najmanji), pa sa postepenim dodavanjem apsorpcionih materijala. Od apsorpcionih materijala korišćen je sunđer. Impulsni odzivi su snimljeni za šest različitih konfiguracija postavljenih apsorpcionih materijala. Takođe je menjan i relativni položaj mikrofona kojim su snimani impulsni odzivi u odnosu na pobudu. Korišćene su dve pozicije mikrofona, simbolički nazvane „blizu“, odnosno „daleko“. Na ovaj način dobijeni su impulsni odzivi čija struktura zavisi od količine apsorpcionog materijala postavljenog u modelu, ali i od pozicije mikrofona u odnosu na pobudu. Položaj pobude u modelu je uvek na istoj poziciji. U tabeli 7.2 je dat pregled impulsnih odziva, koji su snimljeni u fizičkom modelu reverberacione komore, u slučajevima različitog broja sunđera postavljenih u modelu i različitih pozicija mikrofona u odnosu na zvučnu pobudu. U oznaci impulsnog odziva „ IR_{RK_XY} “, oznaka RK navedena u indeksu ukazuje da je impulsni odziv snimljen u fizičkom modelu reverberacione komore, oznaka X u indeksu određuje relativno rastojanje i poziciju mikrofona u odnosu na zvučnu pobudu. S tim u vezi, ukoliko je $X=B$, mikrofona je postavljen ispred sunđera, odnosno bliže zvučnoj pobudi. Ukoliko je

$X=D$, mikrofoni su u tom slučaju postavljeni iza suda u modelu, tj. na većem rastojanju u odnosu na zvučnu pobudu. Konačno, simbol Y naveden u indeksu oznake predstavlja zapravo broj koji ukazuje na broj suda postavljenih u fizičkom modelu reverberacione komore.

Tabela 7.2. Impulsni odzivi iz fizičkog modela reverberacione komore, korišćeni tokom istraživanja

Broj suda u fizičkom modelu reverberacione komore	0	1	2	4	6	7
Pozicija mikrofona u odnosu na zvučnu pobudu	Bliže pobudi	Pre suda	Pre suda	Pre suda	Pre suda	Pre suda
Oznaka IR	IR _{RK_B0}	IR _{RK_B1}	IR _{RK_B2}	IR _{RK_B4}	IR _{RK_B6}	IR _{RK_B7}
Broj suda u fizičkom modelu reverberacione komore	0	1	2	4	6	7
Pozicija mikrofona u odnosu na zvučnu pobudu	Dalje od pobude	Iza suda	Iza suda	Iza suda	Iza suda	Iza suda
Oznaka IR	IR _{RK_D0}	IR _{RK_D1}	IR _{RK_D2}	IR _{RK_D4}	IR _{RK_D6}	IR _{RK_D7}

2) Fizički model subotičkog pozorišta predstavlja umanjenu kopiju sale Narodnog pozorišta u Subotici, napravljenu u razmeri 1:10. Osnovne karakteristike ovog modela su opisane u [Mijić et al. 2014]. Treba naglasiti da je u trenutku publikovanja rada, sala Narodnog pozorišta izgrađena samo od golog betona osnovne geometrijske forme, bez dodatnih intervencija na površinama, tako da je verifikacija akustičke sličnosti modela sa realnom salom pozorišta samo delimično moguća. Impulsni odzivi koji su korišćeni u ovom istraživanju su snimljeni u modelu subotičkog pozorišta na različitim pozicijama prijemnika i zvučne pobude. Tom prilikom, korišćene su različite kombinacije apsorpcionih i difuznih materijala u modelu. Impulsni odzivi su snimljeni za konfiguracije, dobijene nakon određenih intervencija u modelu, detaljnije objašnjeno u [Ristić 2016]. U tabeli 7.3 je dat pregled impulsnih odziva, snimljenih u modelu subotičkog pozorišta sa opisom konfiguracija modela u kojima su snimljeni navedeni impulsni odzivi.

Tabela 7.3. Impulsni odzivi iz fizičkog modela subotičkog pozorišta

Impulsni odzivi snimljeni u modelu subotičkog pozorišta	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Opis konstrukcije dodatih apsorbujućih i difuznih elemenata u modelu
	IR _{SM1}	Apsorberi dve galerije, reljef bez plafona
	IR _{SM2}	Bez_plafona
	IR _{SM3}	Dodate_prva_i_druga_galerija_uz_apsorbere
	IR _{SM4}	Dva_reda_sundjera'
	IR _{SM5}	Dva_reda_sundjera_i_zadnji_zid
	IR _{SM6}	Galerija_dodata
	IR _{SM7}	Gornji_red_sundjera
	IR _{SM8}	Reljef_zadnji_zid
	IR _{SM9}	Reljef_zadnji_zid_i_finiji_reljef
	IR _{SM10}	Sve_beton

7.1.2. Impulsni odzivi generisani u softverskim modelima prostorija

Druga velika grupa impulsnih odziva korišćenih u istraživanju je generisana softverskim alatom za digitalnu simulaciju propagacije zvuka u prostoriji. Softverski modeli se često koriste za ispitivanje različitih akustičkih karakteristika prostorije i utvrđivanje potencijalnih problema u akustici prostorija, jer omogućavaju relativno laku promenu akustičkih i geometrijskih parametara koji mogu biti od značaja za odziv. Principi softverskog modelovanja i simulacije zvučnog polja (rej-trejsing metoda i metoda likova), koji se zasnivaju na zakonima po kojima se spekularne i difuzne refleksije odbijaju od površina prostorije [Kuttruff 2009], objašnjeni su u [Šumarac-Pavlović 2007]. Za simulaciju i modelovanje zvučnog polja korišćen je softverski paket ODEON. Zvučni izvor je u svakoj prostoriji postavljen u centralnoj zoni unutrašnje zapremine, malo pomeren iz centra simetrije, koji potom emituje zvučne zrake uniformnom raspodelom u slučajnim pravcima. Za zadat vremenski interval, koji odgovara vremenu reverberacije, analizira se geometrijsko prostiranje emitovanih zvučnih zraka [Šumarac-Pavlović 2007] i time utvrđuje veza između geometrije prostorije i njenog formiranog impulsnog odziva. Za potrebe ovog istraživanja, generisani su impulsni odzivi u softverskim modelima različitih geometrijskih formi.

Prvu grupu čine softverski modeli jednostavnih geometrijskih formi paralelopipednog modela istih stranica čijom transformacijom proporcija dimenzija stranica su formirani izduženi modeli. Četiri stranice modela iz ove grupe su produžavane ili skraćivane u tri koraka. U svim slučajevima dimenzija modela postignut je koeficijent apsorpcije unutrašnjih zidova uniformne

raspodele, dok koeficijent difuznosti SDI varira uniformno sa vrednostima 0.2, 0.5 i 0.9. U tabeli 7.4 su navedeni svi impulsni odzivi koji su snimljeni u softverskom modelu paralelopipednih prostorija ravnomernih proporcija, za različite dimenzije i različite vrednosti indeksa difuznosti SDI.

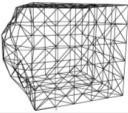
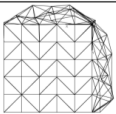
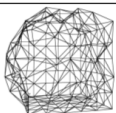
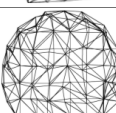
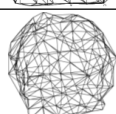
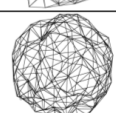
Tabela 7.4. Impulsni odzivi iz softverskog modela paralelopipednih prostorija različitih proporcija

Impulsni odzivi snimljeni u softverskom modelu paralelopipednih prostorija različitih proporcija	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Oznaka konstrukcije modela	Dimenzije modela	Indeks difuznosti SDI
	IR _{paralel} 12	paralel1	20x20x20m	0.2
	IR _{paralel} 15			0.5
	IR _{paralel} 19			0.9
	IR _{paralel} 22	paralel2	20x20x40m	0.2
	IR _{paralel} 25			0.5
	IR _{paralel} 29			0.9
	IR _{paralel} 32	paralel3	20x20x80m	0.2
	IR _{paralel} 35			0.5
	IR _{paralel} 39			0.9
	IR _{paralel} 42	paralel4	20x20x160m	0.2
	IR _{paralel} 45			0.5
	IR _{paralel} 49			0.9
	IR _{paralel} 52	paralel5	20x20x10m	0.2
	IR _{paralel} 55			0.5
	IR _{paralel} 59			0.9
	IR _{paralel} 62	paralel6	20x20x5m	0.2
	IR _{paralel} 65			0.5
	IR _{paralel} 69			0.9
	IR _{paralel} 72	paralel7	20x20x2.5m	0.2
	IR _{paralel} 75			0.5
	IR _{paralel} 79			0.9
	IR _{paralel_L} 12	paralel_L_1	20x20x20m	0.2
	IR _{paralel_L} 15			0.5
	IR _{paralel_L} 19			0.9
	IR _{paralel_L} 22	paralel_L_2	20x20x40m	0.2
	IR _{paralel_L} 25			0.5
	IR _{paralel_L} 29			0.9
	IR _{paralel_L} 32	paralel_L_3	20x20x80m	0.2
	IR _{paralel_L} 35			0.5
	IR _{paralel_L} 39			0.9
	IR _{paralel_L} 42	paralel_L_4	20x20x160m	0.2
	IR _{paralel_L} 45			0.5
	IR _{paralel_L} 49			0.9
	IR _{paralel_L} 52	paralel_L_5	20x20x10m	0.2
	IR _{paralel_L} 55			0.5
	IR _{paralel_L} 59			0.9
	IR _{paralel_L} 62	paralel_L_6	20x20x5m	0.2
	IR _{paralel_L} 65			0.5
	IR _{paralel_L} 69			0.9
	IR _{paralel_L} 72	paralel_L_7	20x20x2.5m	0.2
	IR _{paralel_L} 75			0.5
	IR _{paralel_L} 79			0.9

Drugu grupu softverskih modela čine modeli nepravilnih formi, takođe nastali transformacijom pravilnog paralelopipednog modela istih stranica. Transformacija je vršena tako što je stranica po stranica u modelu dobijala sitnoizlomljenu nepravilnu formu, čime se povećava difuznost površine svake

strane modela. U tabeli 7.5 su navedeni impulsni odzivi koji su generisani u softverskom modelu nepravilnih formi, za različite vrednosti indeksa difuznosti SDI.

Tabela 7.5. Impulsni odzivi iz softverskog modela nepravilnih formi izvedeni iz paralelopipednih formi

Impulsni odzivi snimljeni u softverskom modelu nepravilnih formi izvedeni iz paralelopipednih formi	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Oznaka konstrukcije modela	Konstrukcija modela	SDI
	IR _{kromp} 12	Akromp11		0.2
	IR _{kromp} 15			0.5
	IR _{kromp} 19			0.9
	IR _{kromp} 22	Akromp12		0.2
	IR _{kromp} 25			0.5
	IR _{kromp} 29			0.9
	IR _{kromp} 32	Akromp13		0.2
	IR _{kromp} 35			0.5
	IR _{kromp} 39			0.9
	IR _{kromp} 42	Akromp14		0.2
	IR _{kromp} 45			0.5
	IR _{kromp} 49			0.9
	IR _{kromp} 52	Akromp15		0.2
	IR _{kromp} 55			0.5
	IR _{kromp} 59			0.9
	IR _{kromp} 62	Akromp16		0.2
	IR _{kromp} 65			0.5
	IR _{kromp} 69			0.9

Treću grupu čine softverski modeli crkava koje pripadaju moravskom, vizantijskom i raškom stilu gradnje. Modeli iz ove grupe su preuzeti iz [Vasov 2012]. Impulsni odzivi koji su simulirani u modelima crkava su generisani za slučaj zvučne pobude ispred oltara, dok je pozicija prijemnika u centralnom delu prostora. U tabeli 7.6 su navedeni impulsni odzivi koji su generisani u softverskom modelu crkava i koji su korišćeni u ovom istraživanju.

Tabela 7.6. Impulsni odzivi iz softverskog modela crkava sva tri stila gradnje: moravski (M), vizantijski (V) i raški (R)

Impulsni odzivi snimljeni u modelu crkava	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Naziv crkve	Stil gradnje crkve	Oznaka za stil gradnje
	IR _{mod_CR} M1	Lazarica	Moravski	M
	IR _{mod_CR} V1	Ljuboten	vizantijski	V
	IR _{mod_CR} V2	Markov manastir	vizantijski	V
	IR _{mod_CR} V3	Matejce	vizantijski	V
	IR _{mod_CR} V4	Matka	vizantijski	V
	IR _{mod_CR} V5	Nagoricino	vizantijski	V
	IR _{mod_CR} M2	Nova Pavlica	moravski	M
	IR _{mod_CR} R1	Pridvorica	raški	R
	IR _{mod_CR} M3	Ravanica	moravski	M
	IR _{mod_CR} R2	Studenica	raški	R
	IR _{mod_CR} R3	Sv.Nikola (BALJEVAC)	raški	R
	IR _{mod_CR} V6	Sv.Nikola (KURSUMLIJA)	vizantijski	V
	IR _{mod_CR} R4	Ziča	raški	R

7.1.3. Realni impulsni odzivi

Korišćeno je više grupa impulsnih odziva snimljenih u različitim realnim prostorijama. U pitanju su impulsni odzivi snimljeni u pozorišnim salama, koncertnim i operskim salama i crkvama. Svaka od navedenih prostorija poseduje sebi svojstvene akustičke karakteristike i njihovi impulsni odzivi se međusobno razlikuju po obliku i strukturi. Impulsni odzivi su snimljeni u dva pozorišta u Beogradu: „Beogradsko dramsko pozorište“ i dečije pozorište „Boško Buha“. Prilikom snimanja ovih odziva, zvučna pobuda je na bini, dok je mesto prijema menjano na različitim pozicijama duž sredine gledališta i bočno. U tabelama 7.7 i 7.8 navedene su oznake impulsnih odziva snimljenih u pozorištima „Beogradsko dramsko pozorište“ i „Boško Buha“ koje su korišćene u ovom istraživanju, respektivno. Grupa koncertnih i operskih sala obuhvata Operu u Mariboru, pre i posle akustičke obrade, potom Operu u Ljubljani i na kraju čuvenu koncertnu dvoranu u Beču, *Musicverein*. Oznake ova četiri impulsa odziva su navedeni u tabeli 7.9. U prva dva slučaja (opera u Mariboru i opera u Ljubljani), impulsni odzivi su snimljeni od strane istraživača Laboratoriju za akustiku, dok je impulsni odziv sale *Musicverein* preuzet sa interneta za potrebe ovog istraživanja. Pored simuliranih impulsnih odziva u modelima crkava, impulsni odzivi su snimani i u pravim crkvama. Podaci su preuzeti iz arhiva laboratorije, a oznake impulsnih odziva realnih crkava su prikazani u tabeli 7.10.

Tabela 7.7. Realni impulsni odzivi snimljeni u pozorištu „Beogradsko dramsko pozorište“

Realni impulsni odzivi snimljeni u pozorištu „Beogradsko dramsko pozorište“	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Opis sala i pozicija mikrofona	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Opis sala i pozicija mikrofona
	IR _{BDP1}	BDP_mala_sala_drugi_red	IR _{BDP7}	BDP_velika_sala_9_red_sred_2
	IR _{BDP2}	BDP_mala_sala_poslednji_red	IR _{BDP8}	BDP_velika_sala_9_red_sred_3
	IR _{BDP3}	BDP_bina_velike_sale	IR _{BDP9}	BDP_velika_sala_9_red_sred_3a
	IR _{BDP4}	BDP_velika_sala_2_red_sred_1	IR _{BDP10}	BDP_velika_sala_15_red_sred_1
	IR _{BDP5}	BDP_velika_sala_2_red_sred_2	IR _{BDP11}	BDP_velika_sala_15_red_sred_2
	IR _{BDP6}	BDP_velika_sala_9_red_sred_1	IR _{BDP12}	BDP_velika_sala_15_red_sred_3

Tabela 7.8. Realni impulsni odzivi snimljeni u dečjem pozorištu „Boško Buha“

Realni impulsni odzivi snimljeni u pozorištu „Boško Buha“	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Pozicija mikrofona	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Pozicija mikrofona
	IR _{BB1}	red_1_sredina	IR _{BB7}	red_12_sredina
	IR _{BB2}	red_5_bocno	IR _{BB8}	red_14_bocno(drugi_segment)
	IR _{BB3}	red_5_sredina	IR _{BB9}	red_18_bocno(drugi_segment)
	IR _{BB4}	red_9_bocno	IR _{BB10}	red_18_sredina(drugi_segment)
	IR _{BB5}	red_9_sredina	IR _{BB11}	red_23_sredina(drugi_segment)
	IR _{BB6}	red_12_bocno	IR _{BB12}	red_12_sredina

Tabela 7.9. Realni impulsni odzivi snimljeni u koncertnim salama i operama

Realni impulsni odzivi snimljeni u koncertnim salama i operama	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Sala	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Sala
	IR _{SALA1}	Maribor_balet_pre akustičke obrade	IR _{SALA3}	Opera_Ljubljana_bocno_2_galerija
	IR _{SALA2}	Maribor_balet_nakon akustičke obrade	IR _{SALA4}	Bečka Musikvereinsaal-norm

Tabela 7.10. Realni impulsni odzivi snimljeni u crkvama

Realni impulsni odzivi snimljeni u crkvama	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Crkva	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Crkva	Oznaka impulsnog odziva (IR)	Crkva
	IR _{CR_CU1}	Čuprija1	IR _{CR_PE4}	Petrova Crkva3a	IR _{CR_SO7}	Sopocani10
	IR _{CR_CU2}	Čuprija2	IR _{CR_PE5}	Petrova Crkva3b	IR _{CR_ST1}	Studenica mala1
	IR _{CR_CU3}	Čuprija4	IR _{CR_PE6}	Petrova Crkva5	IR _{CR_ST2}	Studenica mala2
	IR _{CR_CU4}	Čuprija5	IR _{CR_PE7}	Petrova Crkva5a	IR _{CR_ST3}	Studenica srednja1
	IR _{CR_GR1}	Gradac1	IR _{CR_PE8}	Petrova Crkva6a	IR _{CR_ST4}	Studenica srednja2
	IR _{CR_GR2}	Gradac3	IR _{CR_PE9}	Petrova Crkva7a	IR _{CR_ST5}	Studenica srednja3
	IR _{CR_GR3}	Gradac6	IR _{CR_PE10}	Petrova Crkva8	IR _{CR_ST6}	Studenica velika1
	IR _{CR_GR4}	Gradac9	IR _{CR_PE11}	Petrova Crkva9	IR _{CR_ST7}	Studenica velika2
	IR _{CR_GR5}	Gradac10	IR _{CR_PE12}	Petrova Crkva9a	IR _{CR_ST8}	Studenica velika3
	IR _{CR_MA1}	Manasija1	IR _{CR_RA1}	Ravanica1	IR _{CR_ST9}	Studenica velika4
	IR _{CR_MA2}	Manasija2	IR _{CR_RA2}	Ravanica2	IR _{CR_ST10}	Studenica velika7
	IR _{CR_NP1}	Nova Pavlica1	IR _{CR_RA3}	Ravanica3	IR _{CR_ST11}	Studenica velika8
	IR _{CR_NP2}	Nova Pavlica4	IR _{CR_SO1}	Sopocani1	IR _{CR_ST12}	Studenica velika9
	IR _{CR_NP3}	Nova Pavlica5	IR _{CR_SO2}	Sopocani2	IR _{CR_ST13}	Studenica velika10
	IR _{CR_NP4}	Nova Pavlica6	IR _{CR_SO3}	Sopocani3	IR _{CR_ST14}	Studenica velika11
	IR _{CR_PE1}	Petrova Crkva1	IR _{CR_SO4}	Sopocani4	IR _{CR_SU1}	Supska3
	IR _{CR_PE2}	Petrova Crkva2	IR _{CR_SO5}	Sopocani7	IR _{CR_SU2}	Supska4
	IR _{CR_PE3}	Petrova Crkva3	IR _{CR_SO6}	Sopocani8	IR _{CR_SU3}	Supska5

7.2. Utvrđene granice oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu

Multifraktalnom analizom impulsnih odziva prostorija i izračunavanjem globalnih parametara u multifraktalnom spektru, određene su granice oblasti ranih refleksija. Ovaj postupak ponovljen je i kod ostalih impulsnih odziva iz baze odziva koji su korišćeni u ovom istraživanju, a koji su opisani i grupisani u prethodnom poglavlju 7.1. U postupku utvrđivanja granica, korišćena je metoda predložena u poglavlju 5.1, opisana blokom 1 u blok šemi metodologije za karakterizaciju zvučnog polja. Impulsni odzivi su analizirani kao bipolarni, unipolarni i kvadrirani unipolarni signali, normalizovani u opsegu između 0 i 1. Zbog velikog broja analiziranih impulsnih odziva, u tabelama 7.11, 7.12, 7.13 prikazani su samo odabrani rezultati. Sve tri tabele obuhvataju rezultate dobijene MF analizom impulsnih odziva iz svih pojedinačnih grupa impulsnih odziva iz korišćene baze opisane u prethodnom poglavlju 7.1. Navedene tabele 7.11, 7.12 i 7.13, se međusobno razlikuju po tome da li su analizirani bipolarni, unipolarni ili kvadrirani unipolarni signali impulsnih odziva, respektivno. Granice oblasti ranih refleksija su izračunate za svaki od 6 globalnih parametara multifraktalnog spektra, definisana u poglavlju 5.1: Desni nagib spektra – DU; Desna površina spektra – DP; Širina spektra – S; Leva površina spektra – LP; Ukupna površina – UP i Odnos desne i leve površine spektra – RP. U poslednjoj koloni sve tri tabele je izračunata medijana dobijenih granica na osnovu analiza svih 6 globalnih MF parametara. Slično kao u prikazanim rezultatima dobijenih granica oblasti ranih refleksija za impulsne odzive iz fizičkog modela promenljive difuznosti u poglavlju 6.2, analiziranjem rezultata iz tabela 7.11, 7.12 i 7.13 može se zaključiti da se za mnoge impulsne odzive prostorija, dobijaju identični rezultati vrednosti vremenskih granica, gledano po različitim kriterijumima, tj. globalnim parametrima (DU, DP, S, LP, UP i RP). Polja u tabelama sa istim vrednostima granica po različitim kriterijumima za pojedinačne impulsne odzive su posebno obojena nijansom sive.

Tabela 7.11. Pregled vrednosti granica oblasti ranih refleksija u impulsnim odzivima iz korišćene baze odziva, dobijene analizom globalnih multifraktalnih parametara. Reultati su prikazani za grupu bipolarnih impulsnih odziva

Redni broj IR	Grupa impulsnih odziva IR	Naziv IR	BIPOLARNI IR						Medijana svih_granica
			GRANICA DU (ms)	GRANICA DP (ms)	GRANICA S (ms)	GRANICA LP (ms)	GRANICA UP (ms)	GRANICA RP (ms)	
1	Model reverberacione komore	IR _{RK_B1}	20.6	10.2	7.6	7.6	7.6	10.7	8.9
2		IR _{RK_B2}	10.4	7.6	7.6	6.5	11.5	16.7	9.0
3		IR _{RK_B7}	7.0	3.9	6.0	6.0	6.5	6.5	6.3
4		IR _{RK_D1}	10.4	18.2	19.0	19.0	18.2	20.8	18.6
5		IR _{RK_D6}	8.6	9.1	10.4	9.4	9.1	8.3	9.1
6	Model subotičkog pozorišta	IR _{SM2}	73.7	31.8	53.3	73.7	74.9	31.8	63.5
7		IR _{SM3}	48.8	77.1	98.7	51.0	53.3	29.5	52.2
8		IR _{SM4}	89.6	73.7	98.7	27.2	73.7	28.4	73.7
9		IR _{SM5}	28.4	28.4	32.9	27.2	32.9	28.4	28.4
10		IR _{SM9}	42.0	26.1	57.8	60.1	60.1	27.2	49.9
11	Softverski model prostorije paralelopipednih prostorija	IR _{kromp12}	147.4	127.0	76.0	178.0	76.0	18.2	101.5
12		IR _{kromp15}	99.8	114.5	63.5	39.7	38.6	156.5	81.7
13		IR _{kromp19}	28.4	169.0	166.7	171.2	169.0	155.4	167.8
14		IR _{paralel19}	171.2	158.8	88.5	87.3	88.5	237.0	123.6
15		IR _{paralel42}	46.5	52.2	52.2	53.3	53.3	39.7	52.2
16		IR _{paralel152}	182.6	100.9	100.9	170.1	102.1	88.5	101.5
17	Softverski model crkava	IR _{mod_CRM1}	104.3	141.7	155.4	51.0	141.7	59.0	123.0
18		IR _{mod_CRV1}	74.9	146.3	35.2	35.2	146.3	146.3	110.6
19		IR _{mod_CRM2}	89.6	165.6	164.4	63.5	165.6	81.7	127.0
20		IR _{mod_CRM3}	70.3	179.2	117.9	17.0	179.2	195.0	148.5
21		IR _{mod_CRV6}	141.7	31.8	150.8	163.3	30.6	66.9	104.3
22	Pozorišna sala BDP	IR _{BDP1}	108.9	53.3	83.9	87.3	99.8	55.6	85.6
23		IR _{BDP2}	52.2	56.7	57.8	56.7	56.7	71.5	56.7
24		IR _{BDP4}	31.8	56.7	53.3	68.0	56.7	51.0	55.0
25		IR _{BDP5}	73.7	81.7	81.7	81.7	81.7	89.6	81.7
26		IR _{BDP6}	32.9	29.5	46.5	64.6	46.5	42.0	44.2
27	Pozorišna sala Boško Buha	IR _{BB1}	71.5	39.7	99.8	99.8	99.8	37.4	85.6
28		IR _{BB3}	90.7	77.1	76.0	36.3	77.1	48.8	76.6
29		IR _{BB4}	42.0	81.7	81.7	82.8	82.8	89.6	82.2
30		IR _{BB7}	116.8	86.2	54.4	55.6	54.4	36.3	55.0
31		IR _{BB11}	85.1	78.3	93.0	37.4	42.0	103.2	81.7
32	Koncertne i operne sale	IR _{SALA1}	96.4	82.8	82.8	81.7	81.7	83.9	82.8
33		IR _{SALA2}	74.9	169.0	169.0	48.8	169.0	276.7	169.0
34		IR _{SALA3}	173.5	62.4	115.7	133.8	132.7	188.2	133.2
35		IR _{SALA4}	131.5	40.8	40.8	163.3	40.8	166.7	86.2
36	Crkve realni IR	IR _{CR_CU1}	220.0	195.0	157.6	284.6	192.8	197.3	196.2
37		IR _{CR_CU2}	208.6	170.1	178.0	308.4	178.0	76.0	178.0
38		IR _{CR_CU3}	212.0	158.8	170.1	217.7	159.9	195.0	182.6
39		IR _{CR_PE6}	35.2	131.5	130.4	131.5	131.5	116.8	131.0
40		IR _{CR_PE7}	48.8	107.7	110.0	128.1	128.1	106.6	108.9
41		IR _{CR_RA2}	204.1	257.4	133.8	281.2	258.5	61.2	230.7
42		IR _{CR_RA3}	220.0	203.0	200.7	242.7	203.0	113.4	203.0
43		IR _{CR_SO1}	52.2	97.5	123.6	100.9	100.9	65.8	99.2
44		IR _{CR_SO2}	138.3	124.7	125.9	128.1	125.9	120.2	125.9
45		IR _{CR_SO3}	170.1	149.7	88.5	152.0	150.8	180.3	151.4
46		IR _{CR_ST3}	77.1	47.6	61.2	61.2	47.6	47.6	54.4
47		IR _{CR_ST4}	141.7	72.6	72.6	37.4	72.6	89.6	72.6
48		IR _{CR_ST5}	106.6	79.4	77.1	87.3	79.4	69.2	79.4
49		IR _{CR_ST13}	300.5	164.4	164.4	164.4	164.4	264.2	164.4
50		IR _{CR_ST14}	197.3	121.3	205.2	121.3	121.3	303.9	159.3

Tabela 7.12. Pregled vrednosti granica oblasti ranih refleksija u impulsnim odzivima iz korišćene baze odziva, dobijene analizom globalnih multifraktalnih parametara. Rezultati su prikazani za grupu unipolarnih impulsnih odziva

Redni broj IR	Grupa impulsnih odziva IR	Naziv IR	UNIPOLARNI IR						Medijana svih_granica
			GRANICA DU (ms)	GRANICA DP (ms)	GRANICA S (ms)	GRANICA LP (ms)	GRANICA UP (ms)	GRANICA RP (ms)	
1	Model reverberacione komore	IR _{RK_B1}	11.5	24.7	7.8	22.7	22.7	24.7	22.7
2		IR _{RK_B2}	12.0	8.1	7.6	10.4	7.6	16.7	9.3
3		IR _{RK_B7}	7.3	7.0	6.5	6.3	6.5	7.6	6.8
4		IR _{RK_D1}	19.5	18.8	18.8	19.0	19.0	20.8	19.0
5		IR _{RK_D6}	8.3	9.1	10.4	6.0	9.1	8.6	8.9
6	Model subotičkog pozorišta	IR _{SM2}	42.0	31.8	72.6	73.7	73.7	31.8	57.3
7		IR _{SM3}	56.7	78.3	95.3	51.0	53.3	29.5	55.0
8		IR _{SM4}	59.0	64.6	72.6	27.2	73.7	28.4	61.8
9		IR _{SM5}	28.4	28.4	32.9	27.2	32.9	28.4	28.4
10		IR _{SM9}	42.0	26.1	57.8	60.1	60.1	27.2	49.9
11	Softverski model prostorije paralelopipednih prostorija	IR _{kromp12}	203.0	18.2	172.4	172.4	171.2	18.2	171.8
12		IR _{kromp15}	32.9	94.1	94.1	95.3	94.1	145.1	94.1
13		IR _{kromp19}	54.4	166.7	167.8	37.4	170.1	116.8	141.7
14		IR _{paralel19}	69.2	180.3	180.3	88.5	180.3	52.2	134.4
15		IR _{paralel42}	94.1	52.2	52.2	53.3	53.3	153.1	53.3
16		IR _{paralel152}	136.1	142.9	142.9	142.9	142.9	136.1	142.9
17	Softverski model crkava	IR _{mod_CRM1}	89.6	117.9	48.8	51.0	46.5	189.4	70.3
18		IR _{mod_CRM1V1}	122.5	200.7	35.2	38.6	35.2	82.8	60.7
19		IR _{mod_CRM2}	178.0	80.5	83.9	63.5	82.8	116.8	83.4
20		IR _{mod_CRM3}	169.0	93.0	94.1	94.1	93.0	38.6	93.6
21		IR _{mod_CRMV6}	90.7	104.3	104.3	104.3	104.3	98.7	104.3
22		IR _{BDP1}	53.3	37.4	68.0	87.3	99.8	55.6	61.8
23	Pozorišna sala BDP	IR _{BDP2}	53.3	56.7	59.0	56.7	56.7	71.5	56.7
24		IR _{BDP4}	70.3	56.7	53.3	55.6	55.6	51.0	55.6
25		IR _{BDP5}	88.5	68.0	83.9	65.8	65.8	89.6	76.0
26		IR _{BDP6}	32.9	29.5	46.5	83.9	46.5	72.6	46.5
27		IR _{BB1}	89.6	99.8	99.8	82.8	99.8	43.1	94.7
28	Pozorišna sala Boško Buha	IR _{BB3}	94.1	77.1	76.0	36.3	76.0	78.3	76.6
29		IR _{BB4}	102.1	46.5	46.5	48.8	46.5	89.6	47.6
30		IR _{BB7}	71.5	54.4	54.4	66.9	54.4	111.1	60.7
31		IR _{BB11}	98.7	80.5	38.6	38.6	38.6	80.5	59.5
32	Koncertne i operne sale	IR _{SALA1}	48.8	82.8	80.5	80.5	80.5	94.1	80.5
33		IR _{SALA2}	198.4	167.8	38.6	38.6	38.6	81.7	60.1
34		IR _{SALA3}	36.3	115.7	115.7	116.8	116.8	105.5	115.7
35		IR _{SALA4}	139.5	39.7	40.8	123.6	39.7	62.4	51.6
36	Crkve realni IR	IR _{CR_CU1}	300.5	179.2	157.6	162.2	195.0	48.8	170.7
37		IR _{CR_CU2}	37.4	170.1	178.0	258.5	291.4	61.2	174.1
38		IR _{CR_CU3}	212.0	158.8	170.1	217.7	156.5	48.8	164.4
39		IR _{CR_PE6}	145.1	131.5	139.5	127.0	131.5	129.3	131.5
40		IR _{CR_PE7}	122.5	128.1	110.0	132.7	128.1	78.3	125.3
41		IR _{CR_RA2}	113.4	257.4	133.8	29.5	258.5	61.2	123.6
42		IR _{CR_RA3}	47.6	208.6	200.7	247.2	207.5	115.7	204.1
43		IR _{CR_SO1}	52.2	127.0	98.7	97.5	127.0	111.1	104.9
44		IR _{CR_SO2}	225.6	124.7	127.0	182.6	124.7	120.2	125.9
45		IR _{CR_SO3}	171.2	233.6	88.5	150.8	150.8	233.6	161.0
46		IR _{CR_ST3}	77.1	47.6	61.2	116.8	47.6	47.6	54.4
47		IR _{CR_ST4}	146.3	71.5	71.5	72.6	72.6	89.6	72.6
48		IR _{CR_ST5}	39.7	141.7	138.3	88.5	140.6	82.8	113.4
49		IR _{CR_ST13}	300.5	161.0	164.4	164.4	164.4	158.8	164.4
50		IR _{CR_ST14}	197.3	204.1	203.0	292.5	205.2	302.7	204.7

Tabela 7.13. Pregled vrednosti granica oblasti ranih refleksija u impulsnim odzivima iz korišćene baze odziva, dobijene analizom globalnih multifraktalnih parametara. Reultati su prikazani za grupu unipolarnih impulsnih odziva

Redni broj IR	Grupa impulsnih odziva IR	Naziv IR	KVADRIRANI UNIPOLARNI IR						Medijana svih_granica
			GRANICA DU (ms)	GRANICA DP (ms)	GRANICA S (ms)	GRANICA LP (ms)	GRANICA UP (ms)	GRANICA RP (ms)	
1	Model reverberacione komore	IR _{RK_B1}	14.3	24.2	24.0	12.5	19.8	16.2	18.0
2		IR _{RK_B2}	10.4	18.0	18.0	6.8	17.5	14.3	15.9
3		IR _{RK_B7}	7.3	7.0	6.5	6.0	6.5	7.3	6.8
4		IR _{RK_D1}	19.8	17.5	17.5	25.5	17.5	15.1	17.5
5		IR _{RK_D6}	7.8	6.8	9.1	7.6	6.0	6.5	7.2
6	Model subotičkog pozorišta	IR _{SM2}	86.2	27.2	72.6	74.9	73.7	31.8	73.2
7		IR _{SM3}	37.4	53.3	54.4	49.9	54.4	28.4	51.6
8		IR _{SM4}	87.3	85.1	73.7	72.6	73.7	85.1	79.4
9		IR _{SM5}	29.5	28.4	32.9	27.2	32.9	20.4	28.9
10		IR _{SM9}	70.3	26.1	57.8	25.0	60.1	27.2	42.5
11	Softverski model prostorije paralelopipednih prostorija	IR _{kromp12}	55.6	170.1	171.2	172.4	172.4	18.2	170.7
12		IR _{kromp15}	22.7	38.6	37.4	43.1	38.6	145.1	38.6
13		IR _{kromp19}	149.7	46.5	72.6	36.3	69.2	149.7	70.9
14		IR _{paralel19}	246.1	368.5	367.4	87.3	368.5	272.1	319.8
15		IR _{paralel42}	94.1	52.2	52.2	53.3	53.3	40.8	52.7
16	Softverski model crkava	IR _{paralel152}	230.2	217.7	217.7	44.2	217.7	132.7	217.7
17		IR _{mod_CRM1}	157.6	190.5	95.3	51.0	93.0	189.4	126.4
18		IR _{mod_CRV1}	74.9	125.9	125.9	37.4	125.9	132.7	125.9
19		IR _{mod_CRM2}	200.7	52.2	66.9	65.8	53.3	155.4	66.3
20		IR _{mod_CRM3}	90.7	36.3	186.0	208.6	36.3	36.3	63.5
21	Pozorišna sala BDP	IR _{mod_CRV6}	214.3	107.7	107.7	107.7	107.7	98.7	107.7
22		IR _{BDP1}	49.9	37.4	38.6	90.7	37.4	72.6	44.2
23		IR _{BDP2}	77.1	35.2	36.3	49.9	36.3	69.2	43.1
24		IR _{BDP4}	39.7	37.4	37.4	77.1	77.1	38.6	39.1
25		IR _{BDP5}	77.1	65.8	69.2	57.8	69.2	44.2	67.5
26	Pozorišna sala Boško Buha	IR _{BDP6}	80.5	29.5	43.1	42.0	42.0	77.1	42.5
27		IR _{BB1}	53.3	44.2	44.2	69.2	85.1	64.6	59.0
28		IR _{BB3}	52.2	99.8	82.8	36.3	82.8	51.0	67.5
29		IR _{BB4}	37.4	80.5	82.8	82.8	82.8	98.7	82.8
30		IR _{BB7}	112.3	129.3	55.6	65.8	130.4	112.3	112.3
31	Koncertne i operске sale	IR _{BB11}	74.9	38.6	38.6	38.6	38.6	114.5	38.6
32		IR _{SALA1}	78.3	108.9	108.9	108.9	108.9	94.1	108.9
33		IR _{SALA2}	191.6	38.6	38.6	39.7	38.6	301.6	39.1
34		IR _{SALA3}	178.0	107.7	115.7	115.7	108.9	183.7	115.7
35		IR _{SALA4}	116.8	39.7	161.0	40.8	40.8	39.7	40.8
36	Crkve realni IR	IR _{CR_CU1}	240.4	264.2	265.3	69.2	264.2	218.8	252.3
37		IR _{CR_CU2}	82.8	269.9	156.5	157.6	156.5	90.7	156.5
38		IR _{CR_CU3}	32.9	254.0	254.0	233.6	254.0	95.3	243.8
39		IR _{CR_PE6}	91.9	105.5	105.5	125.9	105.5	129.3	105.5
40		IR _{CR_PE7}	60.1	132.7	110.0	132.7	132.7	43.1	121.3
41		IR _{CR_RA2}	139.5	249.5	249.5	198.4	250.6	61.2	223.9
42		IR _{CR_RA3}	197.3	158.8	157.6	157.6	157.6	165.6	158.2
43		IR _{CR_SO1}	86.2	127.0	127.0	95.3	127.0	145.1	127.0
44		IR _{CR_SO2}	90.7	183.7	161.0	233.6	97.5	216.6	172.4
45		IR _{CR_SO3}	220.0	91.9	88.5	89.6	89.6	138.3	90.7
46		IR _{CR_ST3}	78.3	97.5	94.1	94.1	57.8	36.3	86.2
47		IR _{CR_ST4}	94.1	86.2	85.1	25.0	85.1	87.3	85.6
48		IR _{CR_ST5}	102.1	141.7	141.7	141.7	141.7	47.6	141.7
49		IR _{CR_ST13}	176.9	51.0	239.3	167.8	51.0	274.4	172.4
50		IR _{CR_ST14}	193.9	40.8	120.2	234.7	40.8	138.3	129.3

7.3. Detektovane rane refleksije u impulsnom odzivu

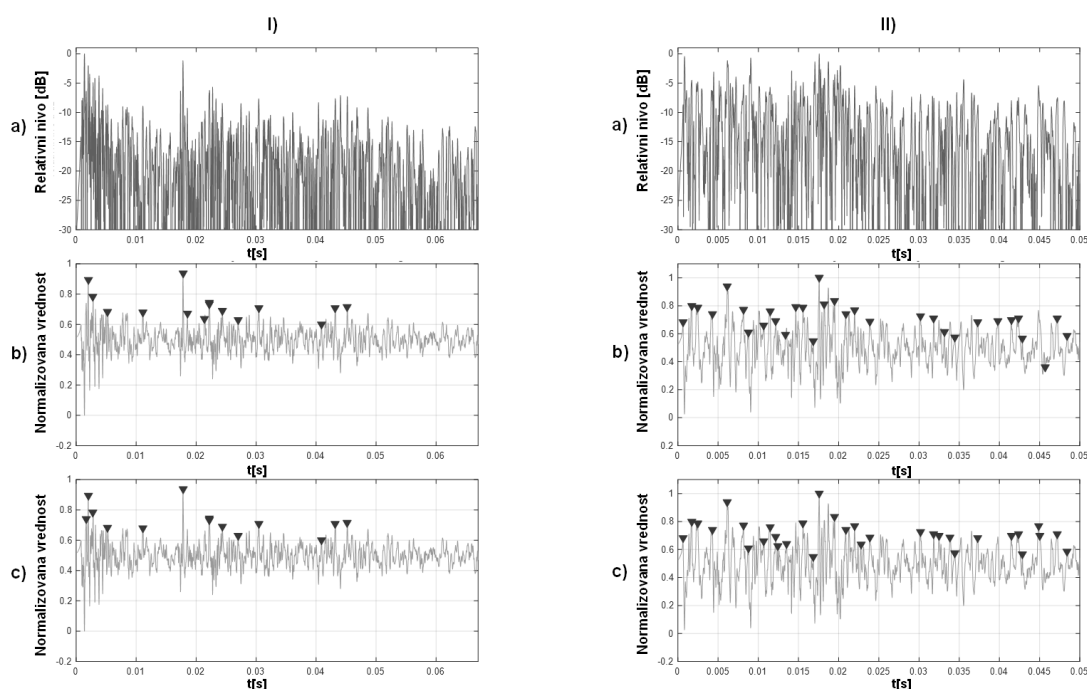
Baza impulsnih odziva opisana u 7.1 je korišćena i za detekciju ranih refleksija primenom metoda predloženih u poglavlju 5.2 i 5.3.

U nastavku su prikazani neki od rezultata detekcije refleksija u različitim impulsnim odzivima primenom 2D multifraktalne analize, u slučaju korišćenja mere hor central diff2, sa modifikacijama 1 i 4. Razlog za prikaz ovih metoda, je taj što su prilikom analize impulsnih odziva iz fizičkog modela promenljive difuznosti, upravo one dale najbolje rezultate detekcije u odnosu na ostale korišćene mere i modifikacije, opisane u 5.2 i 5.3. Rezultati detekcije koji su prikazani obuhvataju impulsne odzive različitih akustičkih karakteristika kao predstavnike različitih grupa impulsnih odziva iz baze impulsnih odziva formirane za potrebe ovog istraživanja.

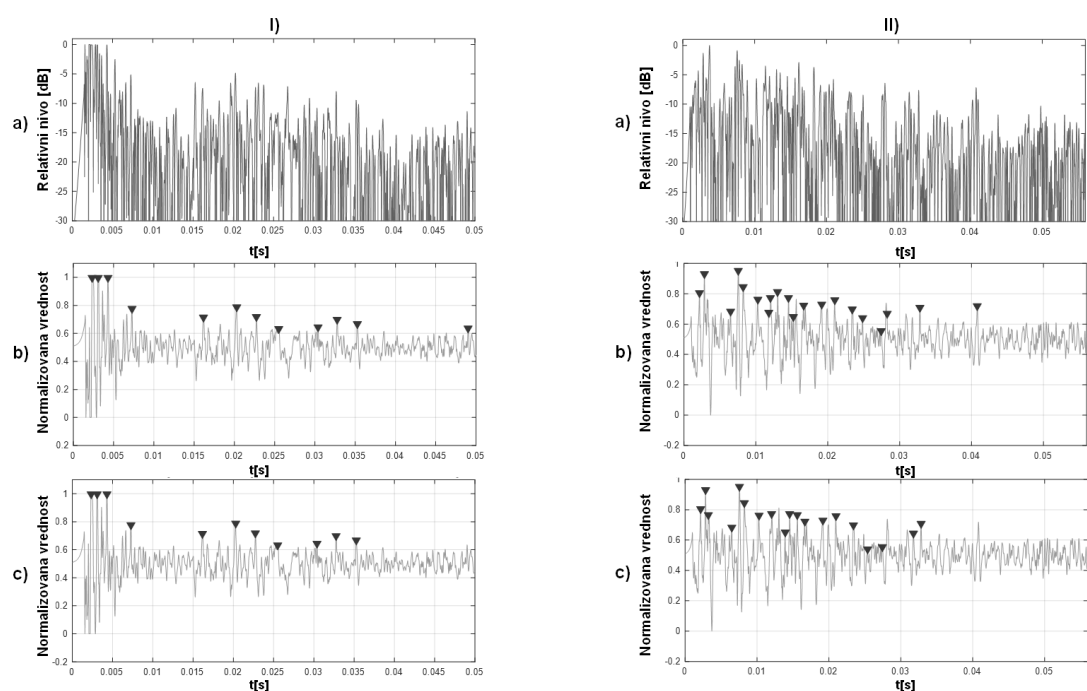
Na slikama 7.1 i 7.2 ilustrovani su rezultati detekcije refleksija u realnim impulsnim odzivima, snimljeni u maloj, odnosno velikoj pozorišnoj sali BDP, respektivno. U navedenim salama impulsi odzivi su snimljeni na različitim pozicijama (različiti redovi po sredini auditorijuma u sali). Na slici 7.1 ilustrovana je detekcija za pozicije mikrofona u drugom i poslednjem redu auditorijuma u maloj pozorišnoj sali BDP, tj. detekcija refleksija u impulsnim odzivima: IR_{BDP1} – drugi red, IR_{BDP2} , poslednji red. U slučaju velike pozorišne sale BDP, slika 7.2, ilustrovana je detekcija refleksija u impulsnim odzivima, snimljenim za pozicije mikrofona u 2. i 15. redu auditorijuma, tj. detekcija refleksija u impulsnim odzivima: IR_{BDP4} – 2. red, IR_{BDP10} , 15. red.

Budući da je uobičajena pozicija zvučne pobude na bini sale, posledica različitih pozicija snimanja se ogleda u različitoj teksturi snimljenih impulsnih odziva i raspodeli refleksija u njima. U slučaju impulsnog odziva snimljenog u drugom redu sedišta (bliže zvučnoj pobudi), ilustrovano na slikama 7.1 I) i 7.2 I), rane refleksije su izraženije, usamljene, lako uočljive, sa manjim ili većim kašnjenjem u odnosu na direktni zvuk. U slučaju daljih pozicija snimanja impulsnog odziva (poslednji redovi gledališta u sali), ilustrovano na slikama 7.1 II) i 7.2 II), broj prisutnih refleksija je veći, a njihov individualni efekat manji.

Predložena metoda za detekciju refleksija je pokazala zadovoljavajuću preciznost detekcije u oba slučaja.

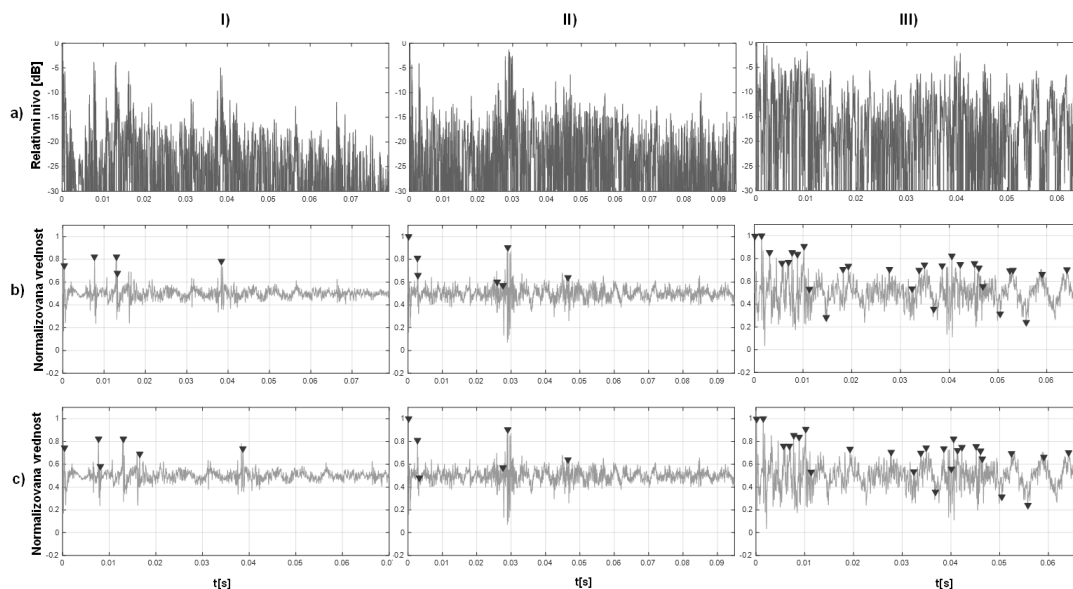


Slika 7.1. Detektovane refleksije u impulsnim odzivima I) IR_{BDP1} ; II) IR_{BDP2} , primenom 2D MF analize i mere *hor central* diff2. a) Relativni nivo analiziranih impulsnih odziva. U dodatnoj obradi Hölderovih eksponenata primena: b) modifikacije 1; c) modifikacije 4



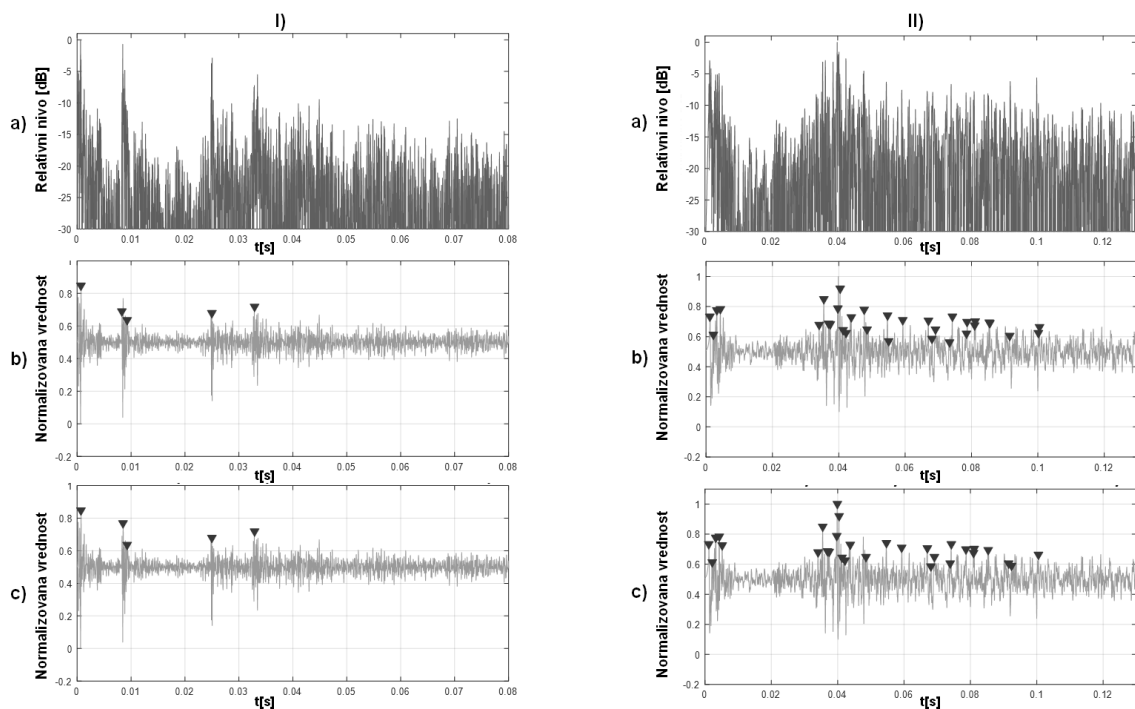
Slika 7.2. Detektovane refleksije u impulsnim odzivima I) IR_{BDP4} ; II) IR_{BDP10} , primenom 2D MF analize i mere *hor central* diff2. a) Relativni nivo analiziranih impulsnih odziva. U dodatnoj obradi Hölderovih eksponenata primena: b) modifikacije 1; c) modifikacije 4

Sličan rezultat je postignut i u detekciji refleksija u impulsnim odzivima snimljenim u pozorišnoj sali Boško Buha na različitim pozicijama gledališta u sali, što je ilustrovano na slici 7.3. Ilustrovana je detekcija refleksija u impulsnim odzivima: IR_{BB3} – 5. red sredina; IR_{BB8} – 14. red bočno i IR_{BB11} – 23. red sredina.

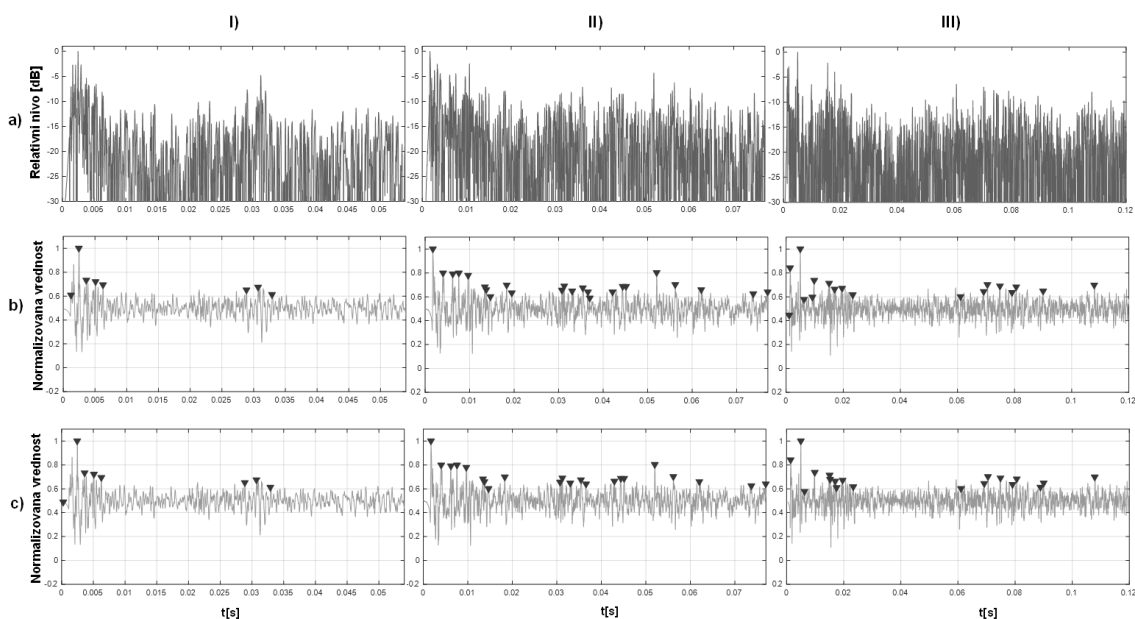


Slika 7.3. Detektovane refleksije u impulsnim odzivima: I) IR_{BDP3}; II) IR_{BDP8}; III) IR_{BDP11}, primenom 2D MF analize i mere *hor central diff2*. a) Relativni nivo analiziranih impulsnih odziva. Dodatna obrada Hölderovih eksponenata primenom: b) modifikacije 1; c) modifikacije 4

Na slici 7.4 je dat uporedni prikaz rezultata detekcije refleksije u realnim impulsnim odzivima, snimljenim u sali Mariborske opere pre (IR_{SALA1}) i posle njene akustičke obrade (IR_{SALA2}). Tekstura impulsnog odziva snimljenog nakon akustičke obrade sale je znatno promenjena u pozitivnom smislu, refleksije nisu pojedinačno dominantne i lako uočljive. U prvom slučaju (impulsni odziv sale pre akustičke obrade) algoritam je detektovao sve jake refleksije, dok je u drugom slučaju (impulsni odziv sale posle akustičke obrade), pored prve dominantne grupe refleksija detektovao još desetak refleksija koje slede i koje nisu vizualno lako uočljive. Na slici 7.5. je dat uporedni prikaz rezultata detekcije realnih impulsnih odziva snimljenih u nekoliko crkava: IR_{CR_NP1} – Nova Pavlica, IR_{CR_MA1} – Manasija i IR_{CR_ST6} – Studenica. Može se konstatovati da su sve refleksije koje su istaknutije i detektovane predloženim algoritmom.



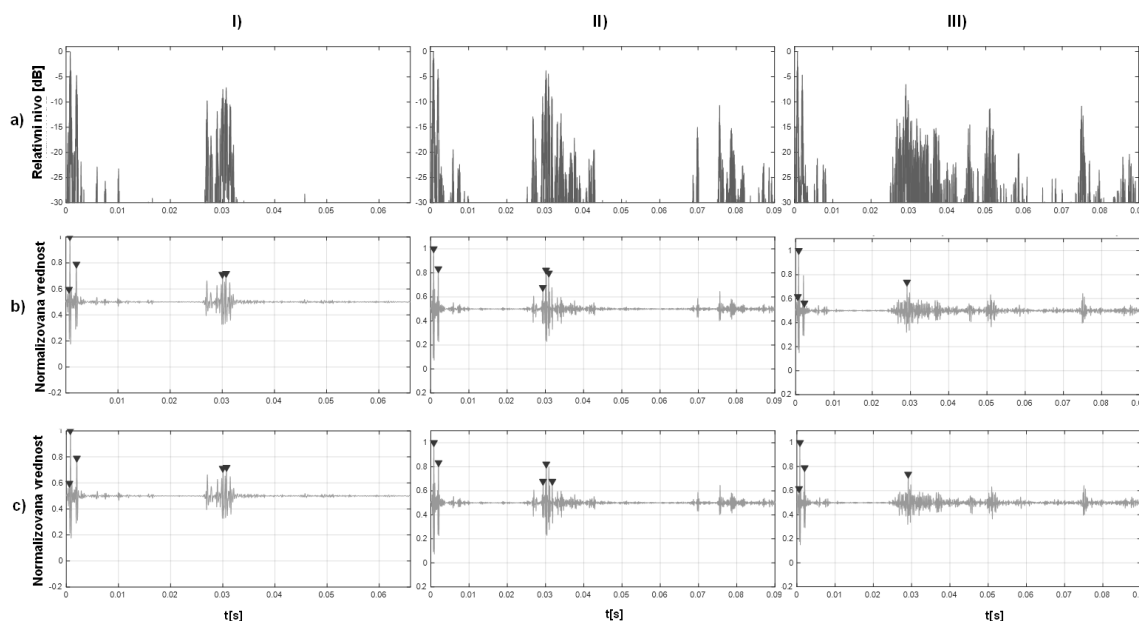
Slika 7.4. Detektovane refleksije u impulsnim odzivima: I) IR_{SALA1} ; II) IR_{SALA2} , primenom 2D MF analize i mere *hor central diff2*. a) Relativni nivo analiziranih impulsnih odziva. Dodatna obrada Hölderovih eksponenata primenom: b) modifikacije 1; c) modifikacije 4



Slika 7.5. Detektovane refleksije u impulsnim odzivima: I) IR_{CR_NP1} ; II) IR_{CR_MA1} ; III) IR_{CR_ST6} , primenom 2D MF analize i mere *hor central diff2*. a) Relativni nivo analiziranih impulsnih odziva. Dodatna obrada Hölderovih eksponenata primenom: b) modifikacije 1; c) modifikacije 4

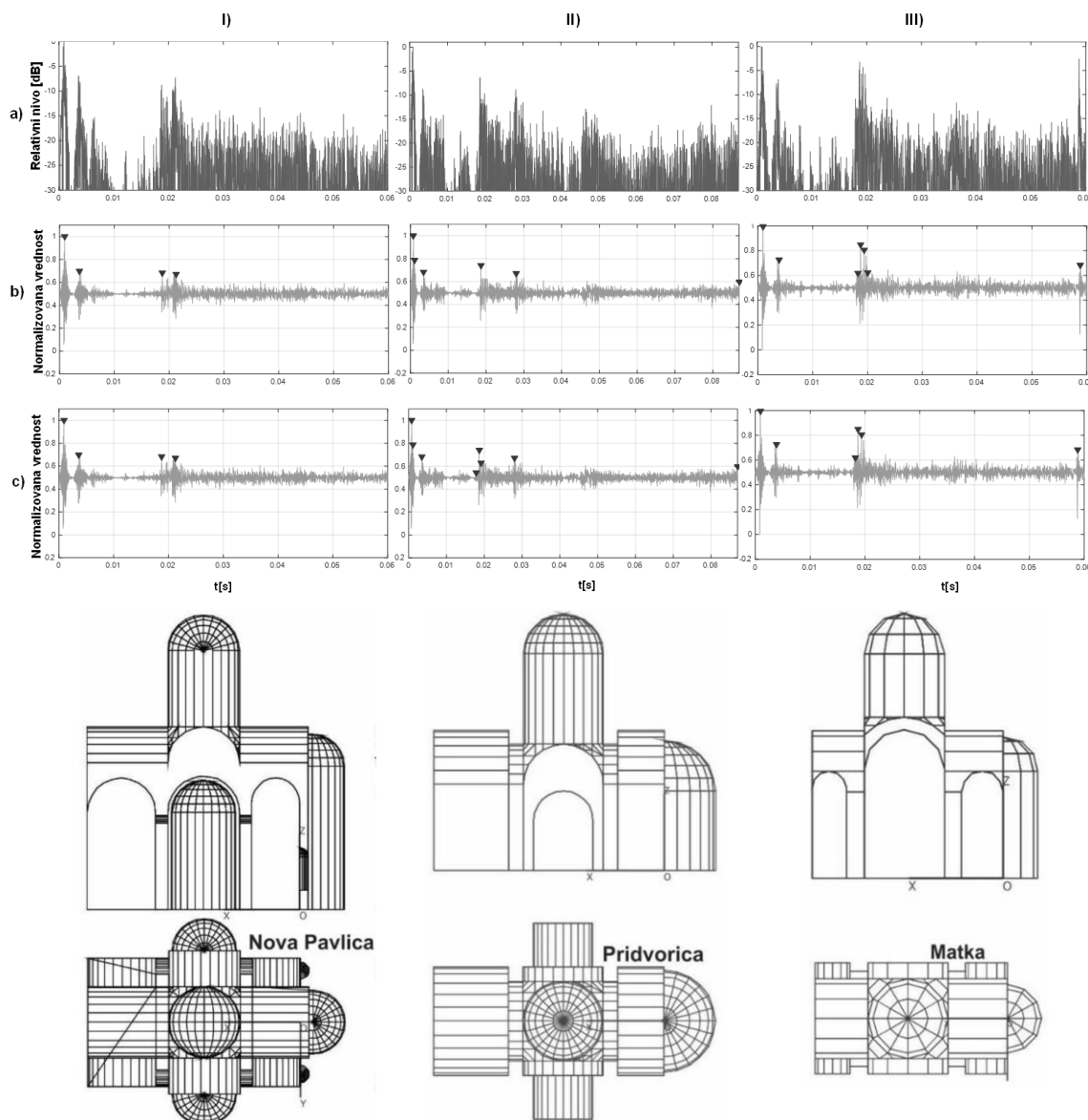
U nastavku slede rezultati detekcije refleksija u impulsnim odzivima generisanih u fizičkim i softverskim modelima. Na slici 7.6. ilustrovani su rezultati

detekcije refleksija u fizičkom modelu Subotičkog pozorišta za različite konfiguracije modela po pitanju difuznosti i apsorpcije: IR_{SM10} - model sve beton, IR_{SM6} - model dodata galerija i IR_{SM1} - model prisutni apsorberi, dve galerije, reljef bez plafona. U sva tri prikazana slučaja, detektovane su refleksije relativno oslabljene ne više od 10dB u odnosu na direktni zvuk.



Slika 7.6. Detektovane refleksije u impulsnim odzivima: I) IR_{SM10} ; II) IR_{SM6} ; III) IR_{SM1} , primenom 2D MF analize i mere *hor central* diff2. a) Relativni nivo analiziranih impulsnih odziva. Dodatna obrada Hölderovih eksponenata i primenom: b) modifikacije 1; c) modifikacije 4

Na slici 7.7. ilustrovani su rezultati detekcije refleksija u impulsnim odzivima koji su generisani u softverskim modelima crkava za tri različite stilske grupe gradnje: IR_{mod_CRM2} – impulsni odziv generisan u softverskom modelu crkve Nova Pavlica, moravski stil gradnje; IR_{mod_CR1} – impulsni odziv generisan u softverskom modelu crkve Pridvorica, raški stil gradnje; IR_{mod_CRV4} – impulsni odziv generisan u softverskom modelu crkve Matka, vizantijski stil gradnje. U sva tri prikazana slučaja, detektovane su dominantne refleksije relativno oslabljene ne više od 10dB u odnosu na direktni zvuk.

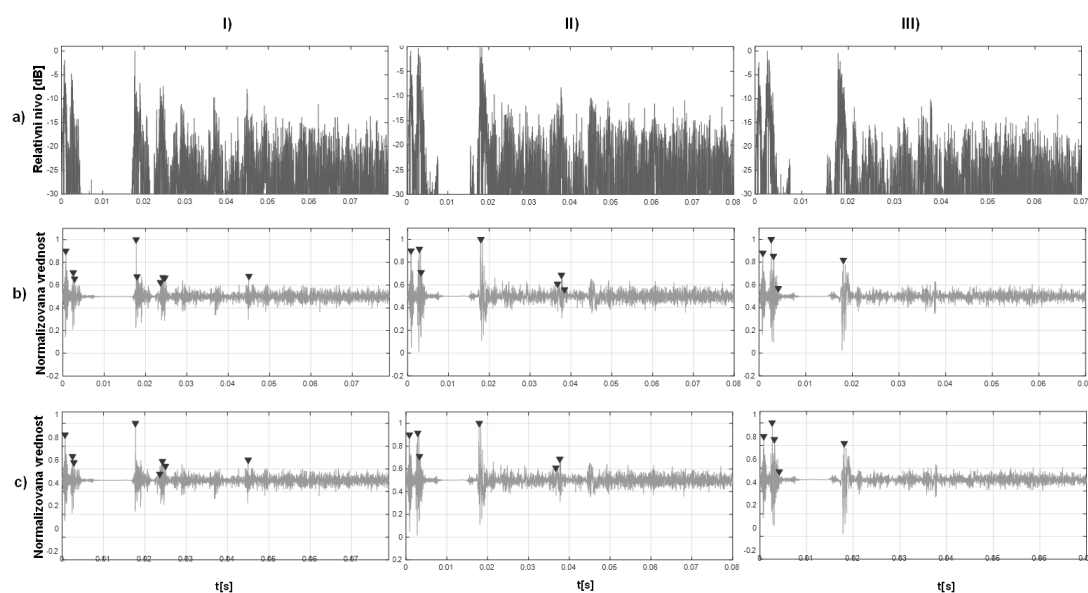


Slika 7.7. Detektovane refleksije u impulsnim odzivima: I) IR_{mod_CRM2} ; II) IR_{mod_CRM1} ; III) IR_{mod_CRM4} , primenom 2D MF analize i mere *hor central diff2*. a) Relativni nivo analiziranih impulsnih odziva. Dodatna obrada Hölderovih eksponenata i primenom: b) modifikacije 1; c) modifikacije 4

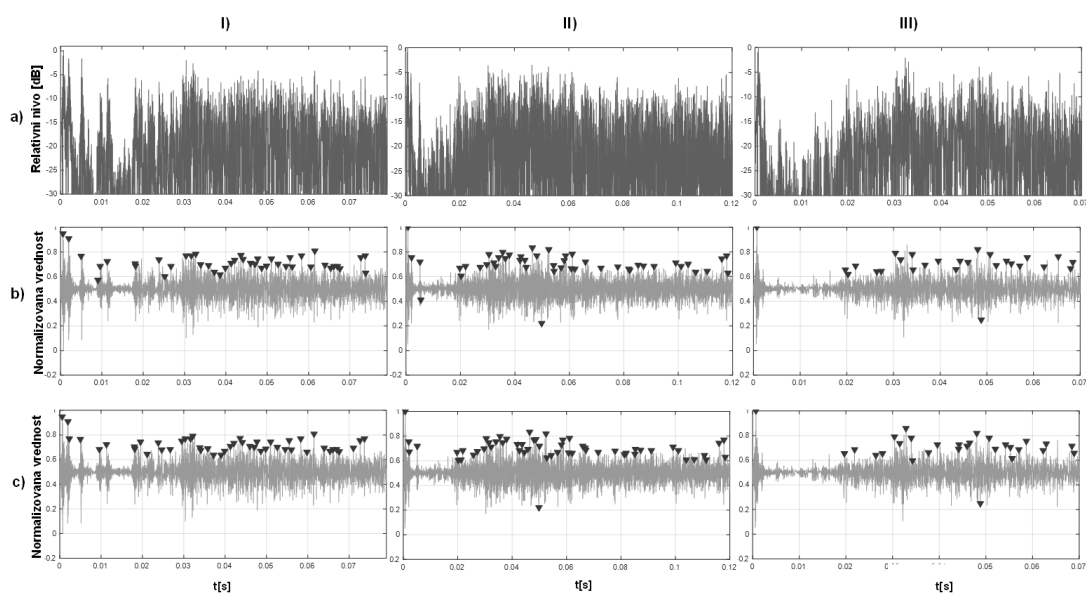
Na slici 7.8 ilustrovani su rezultati detekcije refleksija u impulsnim odzivima, generisani u softverskom modelu prostorije iz grupe paralelopipednih prostorija sa izlomljenim stranicama, naziv konstrukcije: AKROMP11. Prikazani su rezultati u slučajevima primene različitih vrednosti indeksa difuznosti SDI u modelu: $IR_{kromp12}$ (SDI=0.2), $IR_{kromp15}$ (SDI=0.5), $IR_{kromp19}$ (SDI=0.9). Na slici 7.9 ilustrovani su rezultati detekcije refleksija u impulsnim odzivima, generisani u softverskom modelu prostorije iz grupe paralelopipednih prostorija sa stranama

različitim proporcija, (dimenzija 20x20x5m, oznaka konstrukcije: Paralel6). Takođe, prikazani su rezultati u slučajevima primene različitih vrednosti indeksa difuznosti SDI u modelu: $IR_{\text{paralel62}}$ (SDI=0.2), $IR_{\text{paralel65}}$ (SDI=0.5), $IR_{\text{paralel69}}$ (SDI=0.9).

U svim slučajevima, rezultati su pokazali da je bolja detekcija u softverskim modelima paralelopipednih prostorija sa izlomljenim stranicama gde su detektovane sve vizualno istaknute refleksije relativno oslabljene ne više od 10dB u odnosu na direktni zvuk. Kod softverskog modela paralelopipednih prostorija sa stranicama različitih proporcija, konkretno u ovom primeru dimenzija 20x20x5m, detektovan je i veliki broj pogrešnih refleksija.



Slika 7.8. Detektovane refleksije u impulsnim odzivima: I) IR_{kromp12} ; II) IR_{kromp15} ; III) IR_{kromp19} , primenom 2D MF analize i mere *hor central diff2*. a) Relativni nivo analiziranih impulsnih odziva. Dodatna obrada Hölderovih eksponenata i primenom: b) modifikacije 1; c) modifikacije 4



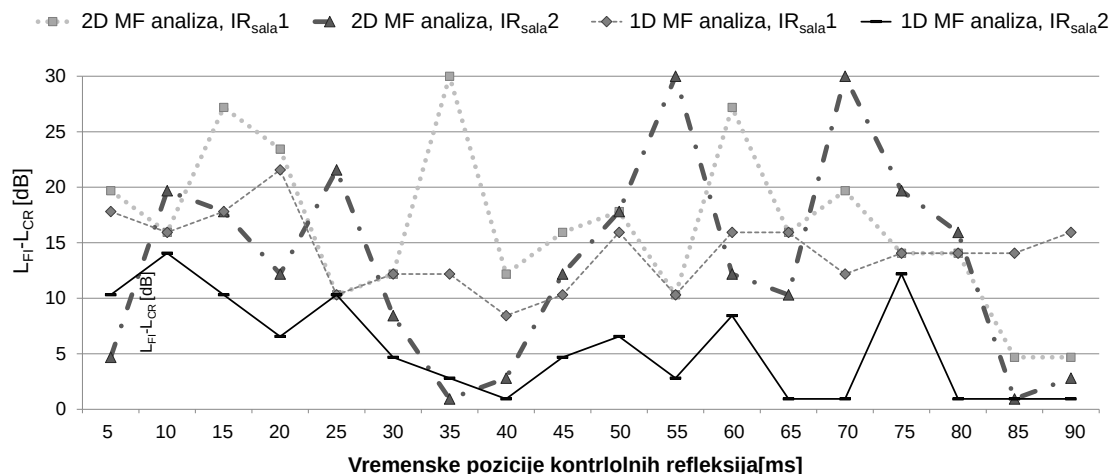
Slika 7.9. Detektovane refleksije u impulsnim odzivima: I) $IR_{\text{paralel62}}$; II) $IR_{\text{paralel65}}$; III) $IR_{\text{paralel69}}$, primenom 2D MF analize i mere *hor central* diff2. a) Relativni nivo analiziranih impulsnih odziva. Dodatna obrada Hölderovih eksponenata i primenom: b) modifikacije 1; c) modifikacije 4

7.4. Efikasnost predložene metode za detekciju refleksija

Efikasnost predložene metode za detekciju refleksija je testirana i nad realnim impulsnim odzivima proverom mogućnosti detekcije umetnutih kontrolnih refleksija u impulsnom odzivu pomoću multitifraktalne analize u 1D i 2D domenu. Umetanje kontrolne refleksije (CR) koja iterativno slabi tokom testiranja algoritma je vršeno na vremenskim pozicijama u impulsnom odzivu od 5ms do 90ms, sa korakom umetanja 5ms. Beležena je maksimalna razlika nivoa direktnog zvuka (L_{FI}) i nivoa oslabljene kontrolne refleksije (L_{CR}) u trenutku prestanka detekcije CR, $L_{FI}-L_{CR}$.

Na slici 7.9. prikazani su rezultati maksimalne dobijene granične vrednosti $L_{FI}-L_{CR}$ kada je analiziran realan IR snimljen u Slovenačkom nacionalnom pozorištu u Mariboru pre (IR_{SALA1}) i posle akustičke adaptacije (IR_{SALA2}). U ovom primeru 2D MF algoritam takođe koristi deo slike spektrograma u frekvencijskom opsegu 3000Hz-6000Hz. 2D MF algoritam je i ovog puta pokazao bolje rezultate u detekciji CR u odnosu na prethodnu 1D MF metodu. Međutim, u analizi realnih

impulsnih odziva, postoje skokovite promene vrednosti $L_{FI-L_{CR}}$ za vremenske trenutke umetanja CR, u odnosu na rezultate provere efikasnosti detekcije umetanjem kontrolnih refleksija kod impulsnih odziva snimljenih u fizičkom modelu promenljive difuznosti, slika 6.28.



Slika 7.10. Maksimum nivoa razlike $L_{FI-L_{CR}}$, analizirani impulsnih odzivi IR_{SALA1} i IR_{SALA2}, poređenje rezultata primenom 2D MF i 1D MF metode za detekciju refleksija

Prikazani rezultati pokazuju poboljšanu efikasnost detekcije ranih refleksija primenom multifraktala nad vizualizovanim impulsnim odzivom i potvrđuju uspešnost primene 2D MF u analizi impulsnih odziva, što je takođe potvrđeno i u poglavlju 6.4.

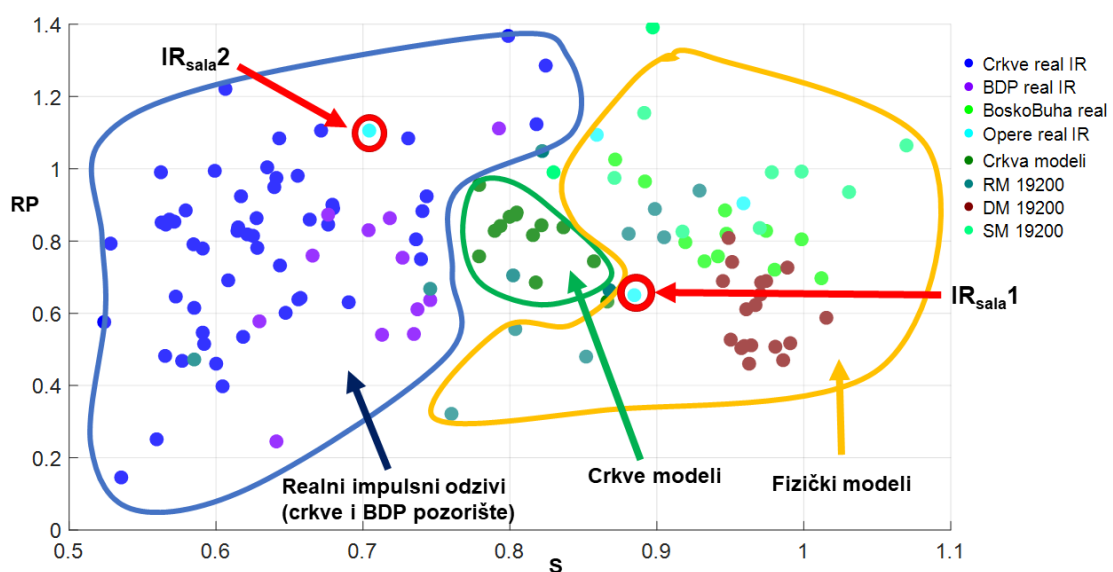
7.5. Klasterizacija impulsnih odziva

Klasterizacija impulsnih odziva na osnovu izračunatih globalnih MF parametara DU, DP, S, LP, UP i RP urađena je za korišćenjem impulsnih odziva iz baze, opisane u poglavlju 7.1. Na sličan način, kao i u poglavlju 6.5, karakterizacija i klasterizacija impulsnih odziva izvršena je primenom metode opisane u poglavlju 5.4. Globalni MF parametri su pojedinačno izračunati za tri oblasti impulsnih odziva (oblast ranih refleksija, oblast reberberacionog dela i ceo impulsnih odziv snimljen u fizičkom modelu), kao i za tri različita vremenska prikaza signala (bipolarni, unipolarni i kvadrirani unipolarni signal), pri čemu su signali u svim navedenim slučajevima normalizovani u opsegu od 0 do 1. Vrednosti granica na osnovu kojih su impulsnih odzivi podeljeni na oblasti ranog i

reverberacionog dela, dobijene su iz tabela 7.11, 7.12 i 7.13. Treba imati u vidu da su u navedenim tabelama, zbog velikog broja impulsnih odziva u bazi, prikazani rezultati granica samo jednog broja impulsnih odziva.

Na slici 7.11 ilustrovan je rezultat klasterizacije impulsnih odziva upoređivanjem globalnih multifraktalnih parametara S i RP, primenom MF analize nad reverberacionim delom impulsnog odziva datog u formi bipolarnog (BI) signala. Klasterizacija je izvršena nad impulsnim odzivima iz sledećih grupa:

- realni impulсни odzivi snimljeni u koncertnim salama i operama, pozorišnim salama („Beogradsko dramsko pozorište“ (BDP) i „Boško Buha“) i crkvama,
- impulсни odzivi snimljeni u fizičkom modelu promenljive difuznosti, reverberacione komore i subotičkog pozorišta i
- impulсни odzivi generisani u softverskim modelima crkava.



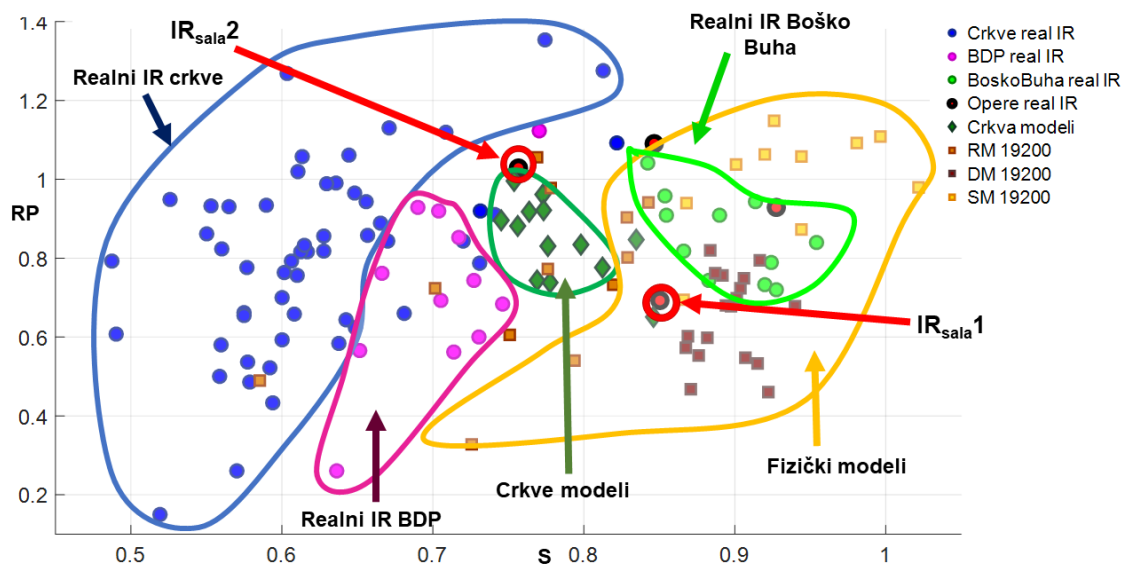
Slika 7.11. Klasterizacija reverberacionih delova bipolarnih impulsnih odziva iz korišćene baze, upoređivanjem globalnih MF parametara: S i RP

Rezultat pokazuje da su se u grupe izdvojili realni impulсни odzivi snimljeni u crkvama i u pozorišnoj sali BDP sa jedne strane, i impulсни odzivi snimljeni u fizičkim modelima sa druge strane. Posebno su se grupisali impulсни odzivi generisani u softverskim modelima crkava. Impulсни odziv koji je snimljen u mariborskoj pozorišnoj sali nakon akustičke obrade (IR_{sala2}) je pripao klasteru sa

realnim odzivima crkava koje odlikuje velika difuznost, što je i očekivano jer kao što je ranije napomenuto, tekstura impulsnog odziva snimljenog nakon akustičke obrade sale je znatno promjenjena u smislu difuznosti, refleksije nisu pojedinačno dominantne i lako uočljive. Sa druge strane, impulsni odziv snimljen u mariborskoj sali pre akustičke obrade (IR_{sala1}) je izdvojen od grupe realnih odziva i pripao je klasteru sa impulsnim odzivima iz fizičkih modela.

Treba napomenuti da se impulsni odzivi snimljeni u pozorišnoj sali „Boško Buha“ nisu klasterizovali na očekivani način, nisu pripali grupi realnih odziva (crkve i BDP), već su ostali u grupi impulsnih odziva snimljenih u fizičkim modelima. Rezultat klasterizacije nije tako jasan kao što je bio slučaj u klasterizaciji impulsnih odziva iz fizičkog modela promenljive difuznosti, za iste kriterijume, slika 6.38.

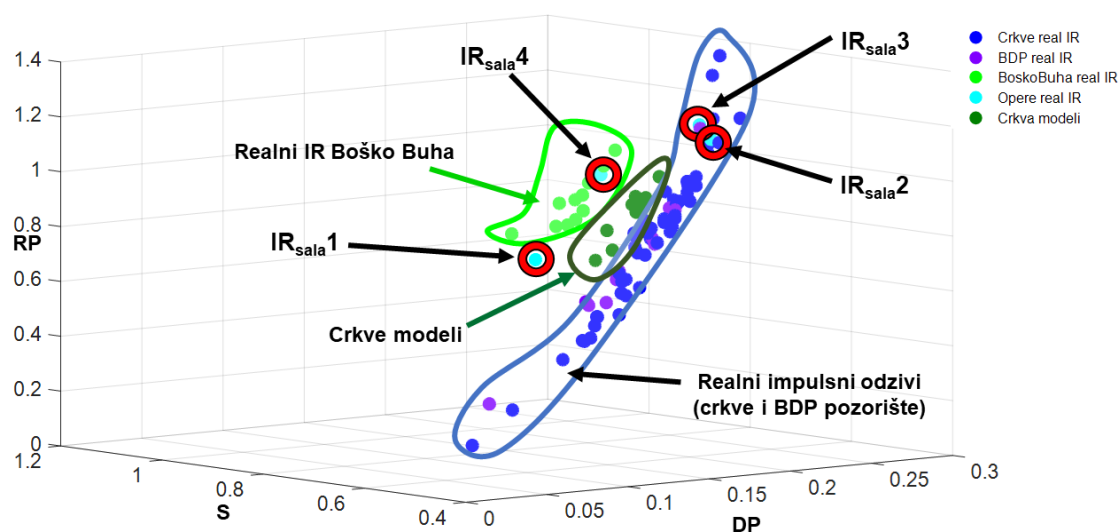
Na slici 7.12 ilustrovan je rezultat klasterizacije istih grupa impulsnih odziva kao u prethodnom slučaju, upoređivanjem istih globalnih multifraktalnih parametara S i RP , primenom multifraktalne analize nad reverberacionim delom impulsnih odziva, ali ovog puta u formi unipolarnih (UNI) signala.



Slika 7.12. Klasterizacija reverberacionih delova unipolarnih impulsnih odziva iz korišćene baze, upoređivanjem globalnih MF parametara: S i RP

Rezultat je sličan kao u prethodnom primeru, s tim što su se sada dodatno izdvojili realni impulsni odzivi snimljeni u crkvama od realnih impulsnih odziva snimljeni u pozorišnoj sali BDP.

Na slici 7.13 je ilustrovan rezultat klasterizacije impulsnih odziva upoređivanjem 3 globalna multifraktalna parametra DP, S i RP, primenom MF analize nad reverberacionim delom impulsnih odziva predstavljenih u formi bipolarnih (BI) signala. Klasterizacija je izvršena nad impulsnim odzivima iz sledećih grupa korišćenih odziva: realni impulsnih odzivi snimljeni u 1) koncertnim salama i operama; 2) snimljeni u pozorišnoj sali „Beogradsko dramsko pozorište“ (BDP); 3) snimljeni u pozorišnoj sali „Boško Buha“; 4) snimljeni u crkvama; 5) impulsnih odzivi generisani u softverskim modelima crkava.

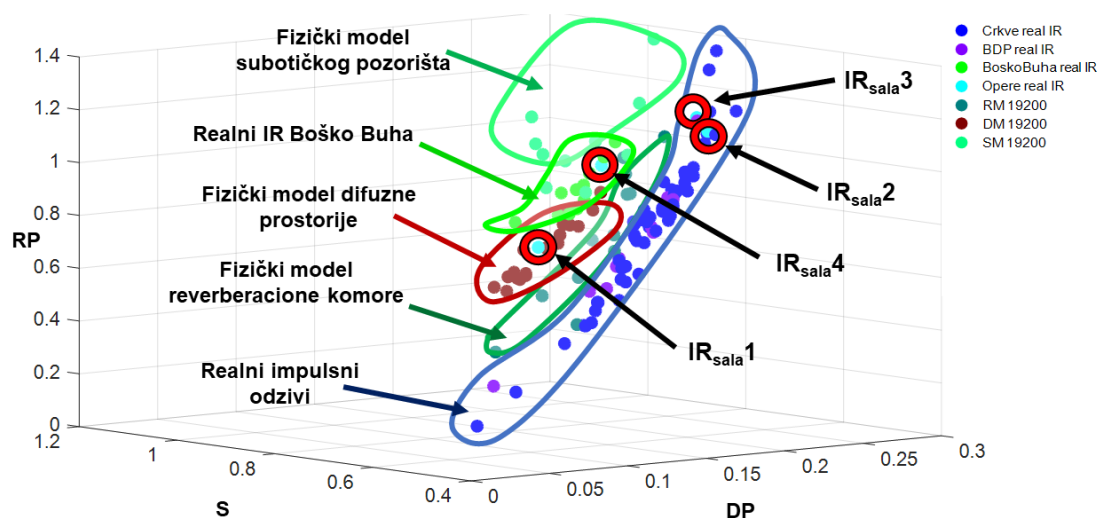


Slika 7.13. Klasterizacija reverberacionih delova bipolarnih impulsnih odziva iz korišćene baze, upoređivanjem globalnih MF parametara: DP, S i RP

Rezultat je pokazao dobru klasterizaciju, u smislu da su se impulsnih odzivi generisani u softverskim modelima crkava posebno grupisali i razdvojili od ostalih grupa realnih impulsnih odziva. Takođe, posebno su se izdvojili impulsnih odzivi snimljeni u pozorišnoj sali „Boško Buha“, u odnosu na ostale realne odzive snimljene u crkvama i pozorišnoj sali BDP. Na sličan način kao što je pokazano u rezultatu klasterizacije po dva kriterijuma, ilustrovanom na slici 7.11, i ovde su se jasno izdvojili impulsnih odzivi snimljeni u mariborskoj pozorišnoj sali pre (IR_{sala1}) i posle (IR_{sala2}) njene akustičke obrade. Impulsnih odziv IR_{sala1} je pripao grupi realnih impulsnih odziva snimljenih u crkvama i pozorišnoj sali BDP, što je i bilo očekivano. Impulsnih odziv snimljen u sali ljubljanske opere (IR_{sala3}) je takođe pripao grupi realnih odziva snimljenih u crkvama i pozorišnoj sali BDP, dok je

impulsni odziv snimljen u koncertnoj sali *Musicverein* (IR_{sala4}) pripao grupi realnih impulsnih odziva koji su snimljeni u pozorišnoj sali „Boško Buha“.

Na slici 7.14 ilustriran je rezultat klasterizacije impulsnih odziva po istim kriterijumima kao u prethodnom primeru, s tim što je ovog puta pored postojećih grupa impulsnih odziva, postupak klasterizacije izvršen i nad impulsnim odzivima snimljenim u fizičkim modelima promenljive difuznosti, reverberacione komore i subotičkog pozorišta.



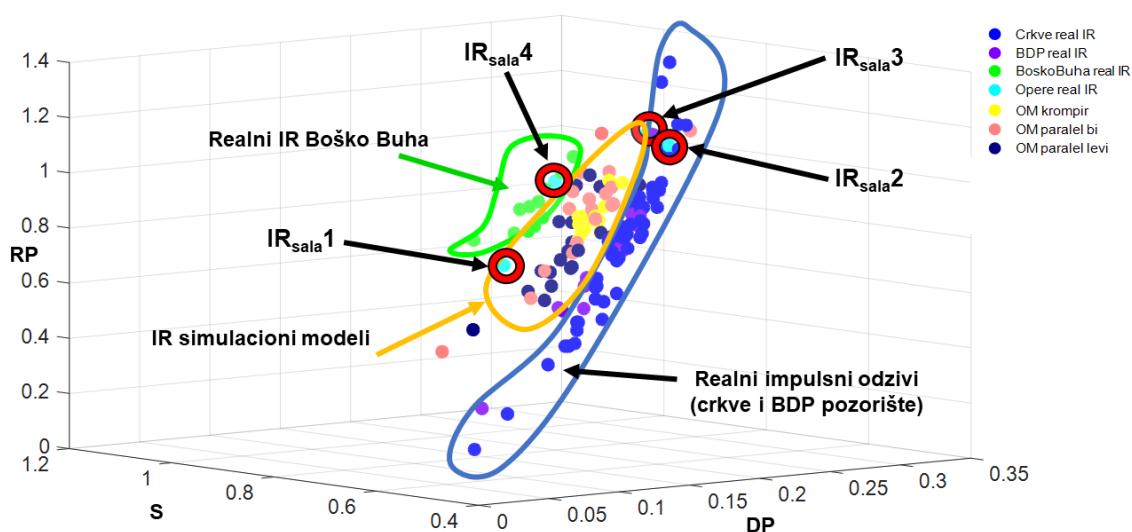
Slika 7.14. Klasterizacija reverberacionih delova bipolarnih impulsnih odziva iz korišćene baze, upoređivanjem globalnih MF parametara: DP, S i RP

Rezultat je pokazao da su se u postupku klasterizacije izdvojile grupe impulsnih odziva snimljeni u fizičkim modelima u odnosu na realne impulsne odzive.

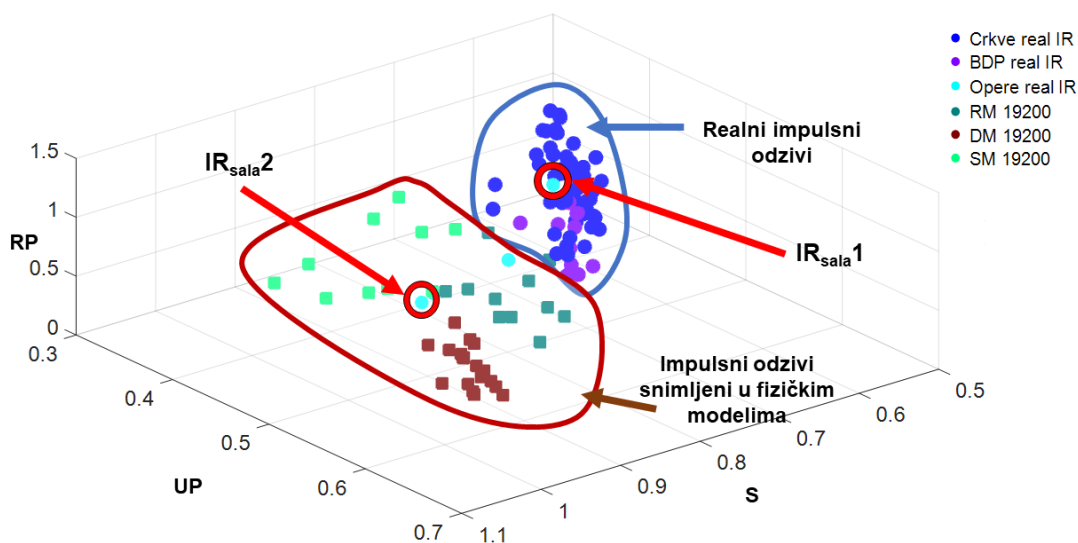
Sličan rezultat je postignut i kada su se po istim kriterijumima kao u prethodna dva navedena primera klasterizovali realni bipolarni impulsni odzivi sa jedne strane, i odzivi generisani u softverskim modelima paralelopipednih prostorija izlomljenih stranica, stranica različitih proporcija i softverskog modela crkava sa druge strane. Realni impulsni odzivi su se jasno izdvojili od impulsnih odziva generisanih u softverskim modelima. Ilustracija ovog primera je prikazana na slici 7.15.

Na slici 7.16 je ilustriran rezultat klasterizacije istih grupa impulsnih odziva kao u prethodnom slučaju ilustrovanom na slici 7.14, ali ovog puta upoređivanjem

globalnih multifraktalnih parametara S, UP i RP, primenom multifraktalne analize nad reverberacionim delom impulsnih odziva u formi bipolarnih (BI) signala.



Slika 7.15. Klasterizacija reverberacionih delova bipolarnih impulsnih odziva iz korišćene baze, upoređivanjem globalnih MF parametara: DP, S i RP



Slika 7.16. Klasterizacija reverberacionih delova bipolarnih impulsnih odziva iz korišćene baze, upoređivanjem globalnih MF parametara: S, UP i RP

Realni impulsnii odzivi snimljeni u crkvama i pozorišnoj Sali BDP su se izdvojili i zajedno grupisali u odnosu na impulsne odzive snimljene u fizičkim modelima. Realni impulsnii odzivi snimljeni u pozorišnoj sali „Boško Buha“ čine poseban klaster. I ovog puta su se jasno razdvojili impulsnii odzivi snimljeni u mariborskoj pozorišnoj sali pre (IR_{sala1}) i posle (IR_{sala2}) njene akustičke obrade.

Impulsni odziv IR_{sala1} je pripao grupi realnih impulsnih odziva snimljenih u crkvama i pozorišnoj sali BDP, što je i bilo očekivano.

8. Zaključak

Metodologija predstavljena u ovoj disertaciji obuhvata prikaz više različitih metoda za unapređenje analize impulsnog odziva. Ove metode imaju za cilj utvrđivanje granice između oblasti ranih refleksija i reverberacije, detekciju ranih refleksija u impulsnom odzivu, kvantifikovanje svojstava impulsnog odziva prostorije, kao i proveru mogućnosti akustičke klasterizacije impulsnih odziva, a sve to na osnovu opisa lokalnih i globalnih karakteristika signala primenom multifraktalne analize. Predložena metodologija je detaljno opisana u poglavlju 5. U poglavljima 6 i 7 prikazan je skraćeni pregled izmerenih performansi algoritma nakon intenzivnog testiranja, kao i analiza dobijenih rezultata na osnovu kojih su potom izvedeni zaključci. U nastavku teksta prezentovani su osnovni doprinosi ove disertacije sa kratkim analizama i smernice za dalji razvoj i unapređenje performansi algoritma.

Analiza ranih refleksija u karakterizaciji zvučnog polja u prostorijama predstavlja značajnu temu u akustičkom dizajnu prostorija, jer one sa svojim pojedinačnim ili zbirnim efektom na specifičan način utiču na doživljaj zvuka kod slušaoca. Metode za detekciju ranih refleksija publikovane do sada u literaturi ne obezbeđuju dovoljno precizno određivanje vremenske pozicije ranih refleksija u impulsnom odzivu. Postoji više razloga zašto je ova oblast nepotpuna i nedovoljno istražena. Jedan od njih jeste činjenica da postoji veliki broj komponenti u zvučnom polju koji čine kompleksnu teksturu impulsnog odziva i koje učestvuju u kreiranju subjektivnog doživljaja zvuka u prostoriji.

Značaj ovog istraživanja ogleda se u razvoju grupe alata za nelinearnu obradu signala impulsnog odziva prostorija. Ovi alati omogućavaju automatizovanu analizu strukture impulsnog odziva prostorije u domenu singulariteta dobijenih putem multifraktalne analize. U postupku utvrđivanja granice oblasti ranih refleksija analizirani su globalni parametri multifraktalnog spektra. Izvršena je provera korelisanosti između različitih globalnih parametara multifraktalnog spektra i akustičkih karakteristika prostorije. Nagle promene u raspodelama globalnih multifraktalnih parametara su dovedene u vezu sa

globalnim promenama u strukturi impulsnih odziva. Globalni multifraktalni parametri su iskorišćeni i u postupku karakterizacije zvučnog polja i klasterizacije različitih tipova impulsnih odziva. Multifraktalna analiza i izračunavanje Hölderovih eksponenata u 1D i 2D domenu iskorišćeni su za lokalno opisivanje neregularnosti signala i detekciju naglih promena u impulsnom odzivu prostorija. Analiza detektovanja refleksija je omogućila uvid u lokalne karakteristike impulsnog odziva i njihovu korelisanost sa akustičkim osobinama same prostorije. U postupku detekcije značajnih ranih refleksija korišćenjem multifraktalne teorije na 2D prikazu impulsnog odziva prostorije akcenat je stavljen na vizualizaciju impulsnog odziva prostorije u vremensko-frekvencijskom domenu. U tom delu istraživanja primenjena je multifraktalna analiza na lokalne relativne promene spektralne gustine snage spektrograma. Ovakva analiza je omogućila prikaz raspodele detektovanih refleksija u više domena. Izračunavanje Hölderovih eksponenata je vršeno „*box-counting*“ metodom, korišćenjem različitih mera za procenu vrednosti Hölderovih eksponenata: sume, maksimuma, minimuma, maksimuma apsolutne devijacije i maksimuma kvadratne apsolutne devijacije u odnosu na centralnu poziciju u boksu. Sve navedene mere pojedinačno su korišćene u izračunavanju Hölderovih eksponenata sa ciljem da se utvrdi mera s kojom je postupak detekcije ranih refleksija najefikasniji.

Zbog nepouzdanosti prepoznavanja tačnog položaja svih traženih refleksija u impulsnom odzivu, procena uspešnosti predloženog algoritma je vršena veštačkim umetanjem kontrolnih test refleksija. Testirana je sposobnost algoritma da detektuje kontrolnu refleksiju u impulsnom odzivu prostorije pod određenim uslovima: kada je kopija direktnog zvuka kao kontrolna refleksija umetnuta na određenim mestima i kada je relativno oslabljena u odnosu na originalni direktni zvuk. S tim u vezi predloženi su odgovarajući parametri za ocenu uspešnosti algoritma: 1) razlika nivoa direktnog zvuka i nivoa kontrolne refleksije u trenutku prestanka njenog detektovanja; 2) razlika nivoa kontrolne refleksije u trenutku prestanka njenog detektovanja i lokalnog maksimuma susednih refleksija u okolini umetnute kontrolne refleksije. Efikasnost algoritma detekcije ranih

refleksija je proverena i u postupku za 1D, i u postupku za 2D multifraktalnu analizu impulsnog odziva.

Primenljivost predložene metodologije testirana je analizom različitih impulsnih odziva, u različitim graničnim situacijama. Za potrebe istraživanja, korišćena je baza od 192 impulsa odziva snimljena u prostorijama različitih akustičkih karakteristika. Analizirani su impulsi odzivi snimljeni u realnim prostorijama (crkvama, pozorišnim salama i koncertnim dvoranama), u fizičkim modelima promenljive difuznosti, reverberacione komore i subotičkog pozorišta, kao i u softverskim modelima različitih geometrijskih formi. Impulsi odziv je jedinstven za svaku prostoriju i zavisi između ostalog od veličine prostorije i njenih drugih geometrijskih osobina, kao i od karakteristika materijala unutrašnjih zidova date prostorije.

Rezultati testiranja predloženog algoritma pokazali su visoku tačnost u detekciji refleksija bez obzira na geometriju prostorije, vrednosti difuznosti, apsorpcije i položaj prijemnika. Pokazalo se i da broj refleksija koje se detektuju na ovaj način u određenoj meri ipak zavisi od izbora mere u „box-counting“ prilikom proračuna Hölderovih eksponenata, kao i metode koja se koristi za izbor opsega Hölderovog eksponenta α . Takođe, oblik posmatranih refleksija može imati uticaj na konačan ishod detekcije. Zaključuje se da se primenom predložene metodologije u postupku detekcije ranih refleksija ne analizira samo intenzitet ranih refleksija sa energetskog stanovišta, što je bio slučaj u do sada predloženim metodama, već i njihov oblik i sličnost sa direktnim zvukom. Kod realnih impulsnih odziva je teško proceniti tačne pozicije svih značajnih ranih refleksija, pa je teško proceniti efektivnost predložene metode. Rezultati dobijeni prilikom detekcije kontrolnih refleksija ubačenih u realne impulsne odzive, pokazuju da njihova detekcija zavisi od ishoda mešanja sa signalom impulsnog odziva prilikom njihovog umetanja u sam impulsi odziv.

U poslednjoj fazi istraživanja, analizirana je mogućnost klasifikacije impulsnih odziva na osnovu različitih parametara multifraktalnog spektra. Utvrđeno je da se impulsi odzivi u strogo kontrolisanim uslovima fizičkog modela promenljive difuznosti uspešno klasterizuju i klasifikuju na osnovu odabira

globalnih multifraktalnih parametara čije vrednosti su visoko korelisane sa vrednostima indeksa difuznosti u modelu. Postupak klasterizacije impulsnih odziva je pokazao dobre rezultate za izabrana dva, odnosno tri globalna multifraktalna parametra koji su uzeti kao kriterijumi za klasterizaciju i klasifikaciju impulsnih odziva. Zaključeno je da se impulsni odzivi prostorija bolje klasterizuju kada se pomoću multifraktala analiziraju reverberacioni delovi impulsnog odziva u odnosu na ranije delove.

U nastavku teksta prezentovani su osnovni doprinosi ove disertacije sa kratkim analizama i buduće smernice u cilju daljeg razvoja i unapređenja performansi algoritma. Važni doprinosi ove disertacije mogu se izdvojiti u niz konstatacija koje prikazuju razvojni put predloženog algoritma. Glavni doprinosi ove disertacije su:

Doprinos 1: Predloženi su novi parametri za utvrđivanje granice oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorije

Granica oblasti ranih refleksija određena je na osnovu analize raspodele 6 globalnih multifraktalnih parametara: desni nagib krive multifraktalnog spektra (DU), desna površina (DP), leva površina (LP), ukupna površina (UP) i odnos desne i leve površine (RP) multifraktalnog spektra, kao i, širina (S) krive multifraktalnog spektra. Multifraktalna analiza i korišćenje globalnih multifraktalnih parametara u postupku utvrđivanja granice oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorija predstavlja novinu u ovoj oblasti. Eksperimentalni rezultati su pokazali da se za dobijanje multifraktalnog spektra za potrebe analize impulsnog odziva sa multifraktalnog stanovišta može koristiti metoda Velikih devijacija, jer se tom metodom dobija mnogo više detalja i informacija o raspodeli singulariteta. Testiranjem je utvrđeno da su rezultati detektovanih granica po svih šest izabranih parametara u velikom broju slučajeva sličnih vrednosti uz mala odstupanja. Algoritam je univerzalan za impulsne odzive prostorija različitih akustičkih karakteristika, kao i za različite forme prikaza odziva (bipolaran, unipolaran ili kvadrirani unipolarni signal).

Doprinos 2: Unapređen je postupak utvrđivanja granice oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu korišćenjem multifraktalne analize u globalnom i lokalnom domenu

U postupku klasifikovanja impulsnih odziva različitih prostorija multifraktalna analiza je korišćena globalno na nivou cele sekvence signala impulsnog odziva. S druge strane, primenjena je iterativna analiza delova signala impulsnog odziva pomoću multifraktala, tokom koje su praćene promene vrednosti izračunatih globalnih parametara iz multifraktalnog spektra u zavisnosti od promene analiziranih uzoraka signala impulsnog odziva. Raspodela promena globalnih parametara omogućila je uvid u lokalne promene unutar impulsnog odziva. Preciznost i tačnost utvrđivanja granice je unapređena korišćenjem tri prozora različitih dužina za lokalnu selekciju uzoraka impulsnog odziva pri izračunavanju multifraktalnih spektara, i dodatnom obradom promena globalnih multifraktalnih parametara.

Doprinos 3: Utvrđeni su novi parametri za detekciju ranih refleksija u impulsnom odzivu

Lokalna struktura impulsnog odziva prostorije je detaljno sagledana i analizirana u domenu singulariteta dobijenih multifraktalnom analizom, što je omogućilo razvoj algoritma za detekciju ranih refleksija. Automatizovan je algoritam za detekciju naglih promena u impulsnom odzivu prostorije primenom transformacije impulsnog odziva u domen singulariteta multifraktalne analize. U ovom domenu svaki odbirak signala je predstavljen necelobrojnim "grubim" Holderovim eksponentom α koji opisuje lokalnu regularnost/neregularnost signala. Pored dobro poznatih mera za izračunavanje Hölderovih eksponenata u procesu formiranja slike α vrednosti korišćenih u postupku detekcije refleksija primenom 1D i 2D multifraktalne analize, predložena je i modifikovana mera u 2D analizi. Ova mera predstavlja maksimum horizontalne apsolutne devijacije i maksimum kvadrata horizontalne apsolutne devijacije u odnosu na centralnu poziciju boksa, unutar odabranog uzorka piksela iz slike spektrograma. Na ovaj način u obzir je uzeta samo relativna nagla promena spektralne gustine snage u vremenu. Poslednja predložena mera daje najbolje rezultate, što se može

obrazložiti činjenicom da su u ovom slučaju najbolje istaknute relativne nagle bočne promene u signalu, koje se koriste za procenu visokih vrednosti Hölderovih eksponenata. Praktična upotrebljivost metoda za detekciju refleksija pomoću multifraktala demonstrirana je kroz detekciju određenog broja refleksija koje odgovaraju onima koje se mogu identifikovati vizuelnim putem. U tom slučaju uspešnost detekcije ranih refleksija je približno 90% za refleksije koje nisu oslabljene više od 10dB u odnosu na direktni zvuk i koje su lokalno istaknute za 6dB u odnosu na susedne refleksije. Vremenski okvir u kojem su posmatrane refleksije iznosi 2ms.

Doprinos 4: Obezbeđena je precizna lokalizacija značajnih refleksija primenom inverznog mapiranja u multifraktalnoj analizi

Činjenica je da u multifraktalnoj teoriji visoke vrednosti Hölderovog eksponenta α označavaju mesta u kojima signal ima veliku relativnu promenu, pa je izdvajanje visokih vrednosti Hölderovog eksponenta iskorišćeno u postupku detekcije ranih refleksija. Predloženi algoritam daje mogućnost inverznog mapiranja odgovarajućih selektovanih vrednosti Holderovog eksponenta α i multifraktalnog spektra $f(\alpha)$ u vrednosti ulaznog signala. U postupku detekcije ranih refleksija, algoritam omogućava izdvajanje delova signala koji pripadaju tačno određenim delovima multifraktalnog spektra, odnosno moguće je zadati određeni opseg u raspodeli vrednosti Hölder-ovog eksponenta $\alpha \in [\alpha_{donja\ granica} - \alpha_{gornja\ granica}]$ i ustanoviti koji delovi ulaznog signala su odgovorni za formiranje tog opsega vrednosti parametra α .

Doprinos 5: Poboljšan je postupak detekcije ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorije primenom tehnike pragova u segmentaciji Hölderovih eksponenata multifraktalne analize

Bolja detekcija refleksija je postignuta primenom dodatnih alata u obradi vrednosti Hölderovih eksponenata i njihovom adekvatnom segmentacijom. Za potrebe izdvajanja pojedinih Hölderovih eksponenata u ovom istraživanju, korišćeni su lokalni pragovi unutar prozora čija je dužina menjana u vremenskom intervalu od dužine direktnog zvuka pa sve do 10ms, kako bi se razmatrao i uticaj maskiranja koji pojedinačna refleksija ima u svojoj okolini. U postupku realizacije

eksperimenta uzeti su u obzir relativni položaj refleksije u odnosu na susedne refleksije, maskiranje i njihov uticaj na subjektivni doživljaj zvuka u prostoriji. Ova tehnika dodatne obrade Hölderovih eksponenata poboljšala je selektivnost predloženog algoritma i povećala je preciznost u odabiru željenih refleksija. Nakon ovih modifikacija predloženi metodi detektuju najvažnije rane refleksije u impulsnom odzivu.

Doprinos 6: Pokazana je efikasnost predloženog algoritma za detektovanje refleksija u 1D i 2D domenu

Efikasnost algoritma za detektovanje refleksija primenom 1D i 2D multifraktalne analize je testirana umetanjem kontrolnih refleksija u impulsni odziv prostorije pod određenim uslovima. S tim u vezi predloženi su odgovarajući parametri za ocenu uspešnosti algoritma. Eksperimentalni rezultati su pokazali da u slučaju 1D multifraktalne analize, posmatranjem srednje vrednosti dobijenih rezultata, granica detekcije kontrolne refleksije ima maksimalnu vrednost od 15 dB u odnosu na direktni zvuk. Takođe, rezultati pokazuju napredak u efikasnosti detektovanja ranih refleksija primenom multifraktala nad vizualizovanim 2D impulsnim odzivom, jer je u tom slučaju prag detektovanja refleksije spušten u proseku za 5 dB, u odnosu na rezultate postignute 1D multifraktalnom analizom. Na kraju, detekcija refleksija primenom 2D multifraktalne analize spektrograma impulsnog odziva, omogućava analizu signala u željenim frekvencijskim opsezima i sagledavanje uspešnosti detekcije refleksija u frekvencijskom i vremenskom domenu.

Doprinos 7: Potvrđena je mogućnost korišćenja globalnih parametara multifraktalne analize u karakterizaciji impulsnih odziva prostorije

Utvrđena je korelacija između vrednosti globalnih MF parametara (DU, DP, S, LP, UP, RP) i stepena difuznosti u kontrolisanim uslovima fizičkog modela u kojem su impulsni odzivi snimljeni. Ovi parametri su izračunati MF analizom primenom metode Velikih devijacija nad celim signalom, ranim i reverberacionim delom signala impulsnog odziva.

Doprinos 8: Pokazana je efikasnost upotrebe predloženih globalnih multifraktalnih parametara u postupku klasterizacije impulsnih odziva prostorije

Ovim istraživanjem pokazana je efikasnost klasterizacije impulsnih odziva na osnovu akustičkog kriterijuma difuznosti, uparivanjem dva ili tri globalna multifraktalna parametra (DU, DP, S, LP, UP, RP). Najbolja rezultati klasterizacije postignuti su u slučaju analize kasnih, reverberacionih delova signala impulsnih odziva, snimljenih u kontrolisanim uslovima fizičkog modela prostorije promenljive difuznosti. U ovom slučaju postoji jasna zavisnost između vrednosti globalnih MF parametara i vrednosti difuznosti u modelu. Efikasna klasterizacija je postignuta uparivanjem 2-3 globalna parametra koji su visoko korelisani sa stepenom difuznosti. Primenjena metoda klasterizacije testirana je i na realnim impulsnim odzivima, gde je takođe pokazala visoke performanse. Pouzdana klasterizacija predstavlja polaznu osnovu za efikasnu klasifikaciju.

Doprinos 9: Utvrđena je mogućnost primene predloženih metoda na različitim impulsnim odzivima prostorija

Predložena metodologija je pokazala univerzalnost u svojoj efikasnosti nezavisno od analiziranog impulsnog odziva i njegovog porekla. Korišćen je veliki broj različitih impulsnih odziva snimljenih u realnim prostorijama ili u modelima prostorija (fizičkim ili softverskim), gde svaki impulsni odziv svojom teksturom nosi određeni akustički “pečat”, karakterističan za prostoriju u kojoj je snimljen.

Ova disertacija predstavlja rezime višegodišnjeg intenzivnog istraživanja u oblasti nelinearne obrade signala i njene primene u akustici. Analiza pomoću multifraktala je pružila jedan drugačiji uvid u karakterizaciju zvučnog polja u prostorijama. Na ovaj način omogućena je analiza teksture impulsnog odziva posmatranjem stepena uniformnosti strukture signala u različitim skalama uvećanja. Predloženi algoritam uvodi određene novine u oblast akustike prostorija. Rezultati ovog istraživanja treba da posluže za kvantifikovanje onih osobina impulsnog odziva koje do sada poznati parametri ne obuhvataju. Takvi novi parametri mogli bi da se koriste kao dodatni alat prilikom akustičkog dizajna prostorija i za analizu njihovog impulsnog odziva. Ovim istraživanjem otvorene su nove mogućnosti za unapređenje karakterizacije i klasifikacije impulsnih odziva prostorija, kroz unapređenje postojećih alata i kreiranje novih. Posebno, uvođenjem novih mera u proračunima Hölder-ovih eksponenata i unapređenjem

tehnika njihove selekcije, kao i definisanjem novih globalnih multifraktalnih parametara, može se povećati tačnost detekcije ranih refleksija i efikasnija karakterizacija impulsnog odziva.

Literatura

[Šumarac-Pavlović and Mijić, 2017] D. Šumarac-Pavlović, M. Mijić, *Elektroakustika*, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2017. ISBN 978-86-7225-064-0

[Kuttruff, 2009] H. Kuttruff, *Room acoustics*, 5th Edition, Spon Press, 2009. ISBN 0-203-87637-7 (ebk), ISBN-13: 978-0415480215, ISBN-10: 0415480213

[Gover and Stinson, 2002] B. N. Gover, J. G. Ryan, M. R. Stinson, "Microphone array measurement system for analysis of directional and spatial variations of sound fields", *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 112, no. 5, pp. 1980-1991, 2002.

[Meyer and Elko, 2002] J. Meyer, G. W. Elko, "A spherical microphone array for spatial sound recordings", *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 111, no. 5.2, pp. 2346-2346, 2002.

[Mijić, 2011] M. Mijić, *Audio sistemi*, Akademska misao, Beograd, 2011.

[Rossing, 2007] T. D. Rossing, "Springer handbook of acoustics", *Springer-Verlag New York*, 2007, ISBN 978-0-387-30425-0, e-ISBN: 0-387-30425-0

[Mandelbrot, 1977] B. Mandelbrot, "FRACTALS-Form, Chance and Dimension", *W.H. Freeman and Co.*, San Francisco, 1977.

[Mandelbrot and Ness, 1968] B.B. Mandelbrot, J.W. Van Ness, "Fractional Brownian Motion, Fractional Noises and Applications", *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, Volume 10(4), 422-437, 1968. <https://doi.org/10.1137/1010093>

[Mandelbrot, 1983] B.B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, *WH Freeman and Co*, 1983. ISBN: 0716711869, 9780716711865

[Reljin and Reljin, 2002] I. S. Reljin, B. D. Reljin, Fractal geometry and multifractals in analyzing and processing medical data and images, *Archive of Oncology* 2002;10(4):283-93. UDC: 618.146-006:616.351-006:615.849.1:577.2

[Mandelbrot, 1967] B. Mandelbrot, "How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension", *Science* 156, pp. 636–638. 1967

[Peitgen et al., 2004] Peitgen H, Jurgens H, D. Saupe, *Chaos and Fractals: new frontiers of science*, second edition, *Springer Science + Business Media, Inc*, 2004. eBook ISBN: 0-387-21823-8, Print ISBN: 0-387-20229-3

[Russel et al., 1980] D. Russel, J. Hanson, E. Ott, "Dimension of strange attractors", *Physical Review Letters* 45 (14), 1175–1178. 1980.

[Lopes and Betrouni, 2009] R. Lopes and N. Betrouni. Fractal and multifractal analysis: A review. *Med. Image Anal.* 13 (4), 634–649. 2009.

[Evertsz and Mandelbrot, 1992] C. Evertsz, B. Mandelbrot, "Multifractal Measures", Appendix B, in: H. Peitgen, H. Jurgens, D. Saupe, *Chaos and*

fractals: new frontiers of science, *Springer-Verlag New York*, 1992. ISBN 978-1-4757-4742-3 ISBN 978-1-4757-4740-9 (eBook), DOI 10.1007/978-1-4757-4740-9

[Vehel, 1998] Jacques Lévy Véhel, Introduction to the Multifractal Analysis of Images, *Fractal Image Encoding and Analysis*, 159, Springer, pp.299-341, 1998, 3-540-63196-8.

[Vehel and Tricot, 2004] J. Levy Vehel and C. Tricot, On various multifractal spectra, *Fractal Geometry and Stochastics III, Progress in Probability*, Birkhauser Verlag, 2004, vol. 57, p. 23-42.

[Riedi, 1999] R. H. Riedi, *Introduction to Multifractals*, Dept. of ECE, MS 366, Rice University, Houston, 1999.

[Zajić, 2014] Goran Zajić, „Detekcija promena kadrova u video sekvenci primenom multifraktalne analize“, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 2014, <http://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/5813>

[Pavlov and Anishchenko, 2007] A. N. Pavlov, V. S. Anishchenko, “Multifractal analysis of complex signals”, *Physics-Uspekhi*, 50, pp. 819-834. 2007. doi:10.1070/PU2007v050n08ABEH006116

[Ristić, 2016] Dragan Ristić, „Karakterizacija teksture impulsivnog odziva prostorija primenom multifraktalne analize“, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 2016, <http://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/6144>

[Stojic et al., 2006] T. Stojic, I. Reljin and B. Reljin, “Adaptation of multifractal analysis to segmentation of microcalcifications in digital mammograms,” *Physica A*, Vol. 367, 2006, pp: 494–508. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2005.11.030>

[Reljin et al., 2006] I. Reljin, A. Samčović, B. Reljin, “H.264/AVC Video Compressed Traces: Multifractal and Fractal Analysis”, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Volume 2006, Article ID 75217, Pages 1–13, 2006, DOI 10.1155/ASP/2006/75217

[Reljin et al., 2008] Reljin, B. Reljin, M. Avramov-Ivic et al. “Multifractal analysis of the UV/VIS spectra of malignant ascites: Confirmation of the diagnostic validity of a clinically evaluated spectral analysis,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Elsevier 2008;387(14):3563-3573. Available online at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2008.02.029>. Accessed January, 25, 2009.

[Stojic and Reljin, 2010] T. Stojic, B. Reljin, "Enhancement of Microcalcifications in Digitized Mammograms: Multifractal and Mathematical Morphology Approach", *FME Transactions*, vol. 38, no. 1, pp. 1-9, 2010.

[Vehel, 1996] J Jacques Lévy Véhel, Numerical computation of the large deviation multifractal spectrum. CFIC'96 - *Chaos and Fractals in Chemical Engineering*, Rome, 1996.

[Barral and Gonçalves, 2011] J. Barral and P. Gonçalves, “On the Estimation of the Large Deviations Spectrum”, *Journal of Statistical Physics* (2011) 144: 1256. <https://doi.org/10.1007/s10955-011-0296-6>, Print ISSN: 0022-4715, Online ISSN: 1572-9613

- [Broniatowski and Mignot, 1995] M. Broniatowski, P. Mignot, "A self-adaptive technique for the estimation of the multifractal spectrum", *Statistics and Probability Letters* 54 (2), pp.125–135. 2001.
- [Touchette and Beck, 2005] H. Touchette, C. Beck, "Nonconcave entropies in multifractals and the thermodynamic formalism", *Journal of Statistical Physics* 125 (2), pp. 455–471. 2005.
- [Abadi and Grandchamp, 2006] M. Abadi, E. Grandchamp, "Texture features and segmentation based on multifractal approach", *The 11th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition* 4225, pp. 297–305. 2006.
- [Gavrovska, 2013] Ana Gavrovska, „Analiza kardiosignala pomoću druge generacije talasića“, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 2013, <http://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/5830>
- [Loutridis, 2009] S. J. Loutridis, "Quantifying sound-field diffuseness in small rooms using multifractals," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(3), 1498–1505 (2009); <https://doi.org/10.1121/1.3075560>
- [Pavlovic and Ristic, 2011] 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, pp. 116-120, ISSN: 1821-3251 (Print Issue), ISSN: 2334-9905 (Online)
- [Vehel and Legrand, 2004] J. L. Vehel, P. Legrand, "Signal and Image processing with FracLab," in Proc. of FRACTAL04, Complexity and Fractals in Nature, 8th International Multidisciplinary Conference, Vancouver, Canada, 2004
- [Ristić et al., 2013] Dragan M. Ristić, Milan Pavlović, Dragana Šumarac Pavlović and Irini Reljin, „Detection of early reflections using multifractals“, *Journal of the Acoustical Society of America*. 133(4), EL235-EL241, 7 pages (2013); IF=1.55, (5/30), DOI: 10.1121/1.4793767, ISSN: 0001-4966
- [Pavlović et al., 2016] M. Pavlović, D. M. Ristić, I. Reljin, and M. Mijić, "Multifractal analysis of visualized room impulse response for detecting early reflections“, *Journal of the Acoustical Society of America*. 139(5), EL113-EL117, 5 pages (2016); IF= 1.736, (9/31), DOI: 10.1121/1.4947015, ISSN 0001-4966
- [Beranek, 2003] L. L. Beranek, "Subjective Rank-Orderings and Acoustical Measurements for Fifty-Eight Concert Halls“, *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 89 (2003) 494-508(15)
- [Beranek, 2004] L. Beranek, Concert Halls and Opera Houses. *Music, Acoustics, and Architecture*, Springer, 2nd. ed., 2004
- [Hidaka and Beranek, 2000] T. Hidaka, L. L. Beranek: Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan and the Americas. *J. Acoust. Soc. Am.* 107 (2000) 368-383.
- [Hidaka and Nishihira, 2002] T. Hidaka, N. Nishihira: On the objective measure of texture. Proc. of Forum Acusticum Sevilla 2002, *3rd EAA Congress on Acoustics*, Sevilla, 2002, Paper RBA-O1002- IP.

- [Allen and Berkley, 1979] J. B. Allen and D. A. Berkley. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 65(4):943–950, 1979.
- [Borish, 1984] J. Borish, “Extension of the image model to arbitrary polyhedral,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 75(6):1827–1836, 1984. <http://dx.doi.org/10.1121/1.390983>
- [Olive and Toole, 1989] S. E. Olive and F. E. Toole, “The Detection of Reflections in Typical Rooms,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 37, pp. 539–553 (1989 July/Aug).
- [Hidaka et al., 2007] T. Hidaka, Y. Yamada, and T. Nakagawa, “A new definition of boundary point between early reflections and late reverberation in room impulse responses,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(1):326–332, July 2007. <http://dx.doi.org/10.1121/1.2743161>
- [Kuster, 2008] M. Kuster. Reliability of estimating the room volume from a single room impulse response. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(2):982–993, August 2008.
- [Noxon, 1992] 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.
- [Defrance et al., 2008] 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.
- [Kelly and Boland, 2014] 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.
- [Guillemain et al., 1996] 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.
- [Loutridis, 2005] S. J. Loutridis, “Decomposition of impulse responses using complex wavelets,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 53, no. 9, pp. 796–811, 2005.
- [Schönle et al., 1993] 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.
- [Daubechies, 1992] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, SIAM, Philadelphia, 1992.
- [Jeon and Imran, 2013] J. Y. Jeon and M. Imran, “Detection of specular and diffuse reflections in concert halls using continuous wavelet transforms, “ *J. Acoust. Soc. Am.* 134, 4005. (2013); <http://dx.doi.org/10.1121/1.4830609>

- [Belanger, 2005] Z. Belanger, "Wavelet transform use for reflection analysis in architectural acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.* 118, 1999 (2005); <http://dx.doi.org/10.1121/1.4785658>
- [Vesa and Lokki, 2006] S. Vesa and T. Lokki, "Detection of room reflections from a binaural room impulse response," in *Proceedings of the 9th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-06)*, Montreal, Canada, September 2006, pp. 215–220
- [Vesa and Lokki, 2010] S. Vesa and T. Lokki, "Segmentation and analysis of early reflections from a binaural room impulse response," *Technical Report TKK-ME-R-1, TKK Reports in Media Technology, Helsinki University of Technology*, 2010.
- [Gover et al., 2004] B. N. Gover, J. G. Ryan, and M. R. Stinson, "Measurements of directional properties of reverberant sound fields in rooms using a spherical microphone array," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(4):2138–2148, October 2004. doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.1787525>
- [Vesa, 2009] S. Vesa, "Studies on Binaural and Monaural Signal Analysis — Methods and Applications," *Ph.D. thesis, Rep. TKK-ME-D-1*, Helsinki University of Technology, Department of Media Technology, Espoo, Finland (2009).
- [Roman and Woodruff, 2013] N. Roman and J. Woodruff, "Speech intelligibility in reverberation with ideal binary masking: Effects of early reflections and signal-to-noise ratio threshold," *J. Acoust. Soc. Am.* 133, 1707 (2013); <http://dx.doi.org/10.1121/1.4789895>
- [Jeong et al., 2010] C. Jeong, J. Brunskog, and F. Jacobsen, "Room acoustic transition time based on reflection overlap (L)," *J. Acoust. Soc. of Am.*, 127, 2733–2736 (2010), doi: 10.1121/1.3365251.
- [Jot et al., 1997] JM. Jot, L. Cerveau, and O. Warusfel, "Analysis and synthesis of room reverberation based on a statistical time-frequency model," in *103rd AES Convention*, New York, NY, September 1997. <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7150>
- [Polack, 1993] Jean-Dominique Polack, "Playing billiards in the concert hall: the mathematical foundations of geometrical room acoustics," *Applied Acoustics*, Vol. 38, Issues 2–4, pp. 235–244, 1993. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X\(93\)90054-A](http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X(93)90054-A)
- [Stewart and Sandler, 2007] Stewart, R.; Sandler, M., "Statistical Measures of Early Reflections of Room Impulse Responses," in *Proceedings of the 10th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-07)*. Bordeaux, France, September 2007, pp. 59–62
- [Harwood and Burd, 1970] H. D. Harwood, A. N. Burd, "Acoustic scaling: General outline," BBC Research Department Report No. 1970/13, April 1970.
- [Mijić and Šumarac-Pavlović, 2007] 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.

[Šumarac-Pavlović and Mijić, 2008] D. Šumarac-Pavlović, M. Mijić, “Analiza uticaja geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv – merenja na fizičkim modelima,” LII Konferencija za ETRAN, Palić, juni 2008.

[Šumarac-Pavlović and Petrović, 2010] Šumarac-Pavlović D., Petrović M., „Influence of diffusivity in room on its acoustic response“, *Telfor Journal*, Vol. 2, No. 2, 92-97, (2010)

[Vorlander and Mommertz, 2000] M. Vorlander, E. Mommertz, “Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients,” *Applied Acoustics* 60, 2000.

[Everest and Pohlmann, 2009] Everest, F.A., and Pohlmann, K.C. 2009. *Master Handbook of Acoustics: McGraw-Hill*, Fifth edition, ISBN: 978-0-07-160332-4, MHID: 0-07-160332-8.

[Mijić and Perolo 1992] M. Mijić, Z. Perolo, “Design of reverberation chamber scaled model”, *14th ICA*, Beijing, 3-10 september, China, 1992, Proceedings, F5-9

[Mijić et al., 2014] 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 Association* 16.-17. October 2014 Graz, Austria

[Vasov, 2012] Miomir Vasov, "Uticaj arhitektonske forme i materijalizacije na akustički komfor pravoslavnih crkvenih objekata", doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, 2012.

Biografija autora

Milan (Jovan) Pavlović rođen je 29.03.1978. godine u Zaječaru. Diplomirao je septembra 2004. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Odseku za elektroniku, telekomunikacije i automatiku (smer Telekomunikacije). Tema diplomskog rada je: „Arhitektura hibridne optičko - koaksijalne mreže u CATV distributivnim sistemima“, mentor prof. dr Irini Reljin.

Od novembra 2004. godine Milan Pavlović je zaposlen u Visokoj školi strukovnih studija za informacione i komunikacione tehnologije u Beogradu, Zdravka Čelara 16, gde u zvanju saradnika u laboratoriji učestvuje u realizaciji nastave iz brojnih telekomunikacionih predmeta. Objavio je tri praktikuma za predmete iz oblasti računarskih mreža na Visokoj školi strukovnih studija za informacione i komunikacione tehnologije:

- **Milan Pavlović**, Milanko Kragović, Marija Zajeganović, Praktikum iz mrežnih uređaja, II izdanje, Visoka ICT škola, Beograd, 2014. ISBN 978-86-88245-21-0, reizdanje, 2017. ISBN 978-86-88245-28-9
- **Milan Pavlović**, Milanko Kragović, Marija Zajeganović, Praktikum iz mrežnih uređaja, Visoka ICT škola, Beograd, 2013. ISBN 978-86-88245-09-8
- **Milan Pavlović**, Milanko Kragović, Marija Zajeganović, Praktikum iz računarskih mreža, Visoka ICT škola, Beograd, 2013. ISBN 978-86-88245-10-4, reizdanje, 2017. ISBN 978-86-88245-29-6

Učestvovao je u realizaciji dva naučno-istraživačka projekta:

- Inovacioni projekat Ministarstva nauke Republike Srbije za 2008/2009 godinu, “Razvoj sistema za digitalizaciju medicinskih snimaka, arhiviranje u bazi podataka i pretraživanje baze podataka“, čiji je nosilac Inovacioni centar Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, a realizatori:

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu i

Visoka škola za informacione i komunikacione tehnologije u Beogradu

- Evropski projekat, COST Action 292 “Semantic Multimodal Analysis of Digital Media”, 2004-2008, radna grupa 5 - rukovodilac prof. dr Branimir Reljin.

Milan Pavlović je upisao doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, marta 2008. godine (modul Telekomunikacije), sa rukovodiocima naučno-istraživačkog rada dr Irini Reljin i dr Miomir Mijić, redovnim profesorima Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

Područje istraživačkog rada Milana Pavlovića obuhvata, između ostalog, segmentaciju slike, nelinearnu obradu signala u 1D i 2D domenu, multifraktalnu analizu, akustiku prostorija, neuralne mreže, računarske mreže.

Tokom diplomskih i postdiplomskih studija, Milan Pavlović je do sada objavio 31 naučni i stručni rad. Radovi su objavljeni u:

- naučnim časopisima sa SCI liste (1 rad M21, 1 rad M22);
- naučnim časopisima (2 rada M51, 1 rad M53);
- međunarodnih konferencija štampani u celini (6 radova M33);
- zbornicima radova međunarodnih konferencija štampani u izvodu (1 rad M34);
- zbornicima radova nacionalnih konferencija štampani u celini (19 radova M63).

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а МИЛАН ПАВЛОВИЋ
број уписа 5038/2016

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ЗВУЧНОГ ПОЉА У ПРОСТОРИЈАМА
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, 26. 06. 2018.

Милан Павловић

Прилог 2.

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

Име и презиме аутора МИЛАН ПАВЛОВИЋ
Број уписа 5038 / 2016
Студијски програм ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ
Наслов рада КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ЗВУЧНОГ ПОЛЈА У ПРОСТОРИЈАМА
ПРИМЕНОМ МУЛТИФРАКТАЛНЕ АНАЛИЗЕ
Ментор Др ИРИНИ РЕЋИН РЕДОВНИ ПРОФЕСОР
Др МИОМИР МИЋИЋ, РЕДОВНИ ПРОФЕСОР
Потписани МИЛАН ПАВЛОВИЋ

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, 26. 06. 2018.

Павловић Милан

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ЗВУЧНОГ ПОЉА У ПРОСТОРИЈАМА
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, 26.06.2018.

Табора Мисан