

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Srđan R. Bojičić

**UNAPREĐENJE METODA ZA
NUMERIČKU SIMULACIJU ZVUČNOG
POLJA U PROSTORIJAMA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2019

UNIVERSITY IN BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Srđan R. Bojičić

**IMPROVING THE METHOD FOR
NUMERICAL SIMULATION OF SOUND
FIELD IN ROOMS**

Doctoral dissertation

Belgrade, 2019

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE:

Mentor:

1. 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 Milan Vojnović, naučni saradnik, Centar za unapređenje životnih aktivnosti u Beogradu

datum odbrane: _____

Zahvalnica

Zahvaljujem se prof. Dragani Šumarac Pavlović i prof. Miomiru Mijiću na pruženoj prilici da se bavim istraživačkim radom u oblasti akustike. Njihova svesrdna pomoć u toku proteklih godina, omogućila je da se ovaj rad dovede do kraja na najbolji mogući način.

Zahvaljujem se kolegama iz Laboratorije za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, koji su značajno doprineli svojim simulacijama, analizama i rezultatima.

Posebno se zahvaljujem porodici i prijateljima na podršci i razumevanju.

Naslov: Unapređenje metodologije za analizu zvučnog polja u prostoriji pomoću rej-trejsinga

Rezime

Predmet istraživanja ovog rada usmeren je na numeričku analizu zvučnog polja u prostoriji. Cilj istraživanja je razvoj poboljšanih softverskih alata za simulaciju polja. Poboljšani softverski alati omogućavaju simulaciju promena u impulsnom odzivu prostorije kao posledica geometrijskih promena na makro i na mikro nivou. Predložena metodologija omogućava definisanje i izračunavanje niza objektivnih parametara za kvantitativnu i kvalitativnu analizu zvučnog polja, kao i precizniju simulaciju prvih refleksija koje su najznačajnije za subjektivni doživljaj zvučnog polja. Kao prvi predmet istraživanja predložen je novi algoritam za modelovanje difuznih refleksija na bazi rej-trejsing simulacije. Rezultati simulacije omogućavaju mnogo preciznije modelovanje prvih refleksija u impulsnom odzivu. Rezultat simulacije omogućava finu predikciju različitih mera akustičkog dizajna na planu promene mikro geometrijske strukture površina. Posebno značajan aspekt kod modelovanja refleksija je način na koji se uključuje difuzno rasejanje refleksija od površi u slučaju kada je talasna dužina zvuka značajno manja od poluprečnika neravnina na toj površi. Specifičan problem u simulacijama je modelovanje difuznih refleksija kada je doprinos pojedinih površina značajan tj. parcijalni modeli prostorije. Modifikacije algoritma za rej-trejsing simulaciju, koje se ovde uvode, se odnose na formiranje sketering karakteristika koje dolaze do izražaja kada celokupan impulsni odziv nije cilj, već doprinos pojedinih površina. Poseban akcenat je stavljen na oblikovanje karakteristika usmerenosti zračenja difuzne refleksije. Istraživanje je posvećeno uvođenju poboljšanja u način na koji se modeluju difuzne refleksije u kombinaciji kada postoji i spekularna komponenta refleksije. Do sada su se u literaturi koristile formule na bazi ekstrapolacije koje uključuju obe vrste refleksije (spekularnu i difuznu) u način modelovanja refleksija zvuka od površi, a ovde je ostvaren cilj iznalaženja objedinjenog numeričkog modela koji ujedno predstavlja i analitički dokaz tačnosti predloženog načina modelovanja. Drugi predmet istraživanja baziran

je na analizi slobodnih putanja zvučnih talasa u prostoriji kao objektivnom parametru za ocenu pre svega difuznih karakteristika polja. Ova analiza zasnovana je na razvijenom algoritmu za softversku simulaciju zvučnog polja koja je prvi predmet istraživanja. Analiza slobodnih putanja obuhvata statističku analizu raspodele putanja kao i vremensku promenu statističkih parametara i nudi objektivne pokazatelje za kvantitativnu analizu uslova za uspostavljanje difuznog polja. Treći predmet istraživanja je analiza raspodele uglova incidencije i gustine zvučnih talasa na različitim površinama u prostoriji na bazi razvijenih algoritama za sintezu zvučnog polja. Analiza uglova incidencije je veoma značajna za procenu apsorpcionih svojstava materijala koji će oni ispoljiti u uslovima različitih makro i mikro geometrijskih karakteristika prostorije. Poznavanje uglova incidencije i gustine zvučne energije koja pogađa neki pregradni element koji razdvaja dva prostora omogućava i precizniju predikciju izolacionih svojstava pregradnih konstrukcija. Četvrti predmet istraživanja je fokusiran na simulaciju energetske impulsne odziva i impulsne odziva na bazi pritiska zvuka pomoću predloženog algoritma. Cilj je postizanje subjektivno što vernijeg impulsne odziva prostorije na bazi simulirane vremenske raspodele pristigle zvučne energije u tački posmatranja polja. Provera predloženog metoda je verifikovana subjektivnim testiranjima na bazi auralizacije, računarskom analizom dobijenih impulsne odziva i poređenjem vremena reverberacije sa eksperimentom i simulacijom pomoću jednog komercijalnog softvera.

Ključne reči: difuzne refleksije, rej-trejsing, akustika prostorija, sekundarni izvor, sketering model

Naučna oblast: elektrotehnika

Uža naučna oblast: akustika

UDK broj: 621.3

Title: Methodology improvement in sound field analysis of a room using ray-tracing

Summary

This work is dedicated to numerical analysis of sound field in a room. The intention is developing enhanced software tools for field simulation. Enhanced software tools enable simulation of changes in a room impulse response as a result of room geometrical changes on a macro and micro level. Suggested methodology enables defining and calculating a number of objective parameters for quantitative and qualitative analysis of sound field, and more precise simulation of first reflections which are most important for subjective sound field assesment. The first subject of the research is the new algorithm for diffuse reflections modelling using ray-tracing. Simulation results enable more precise modelling of first reflections in a room impulse response. Simulation results enable fine prediction of different acoustical design measures in the plan of micro geometrical structure changes. Especially important aspect in modelling of reflections is the way of including diffuse scattered reflections from a surface in the case when wavelength of sound is significantly less then radius of curves on that surface. A specific problem in simulations is the modeling of diffuse reflections when the contribution of individual surfaces is significant. Modifications of ray-tracing algorithm introduced here, are related to formation of scattering characteristics which are prevailing when the whole impulse response is not a goal, but contribution of individual surfaces ie. room partial models. A special emphasis is placed on the formation of the directivity characteristics of diffuse reflection radiation. The research is primarily devoted to the introduction of improvements in the way in which diffused reflection is modeled in combination when there is also a specular reflection component. So far, extrapolation formulas have been used in the literature that incorporate both types of reflection (specular and diffusive) into the modeling of reflection of sound from the surface, and here the goal of finding a unified numerical model was realized, which is also an analytical proof of the accuracy of the proposed modeling model. The second subject of the research is based on the analysis

of the free paths of sound waves in the room as an objective parameter for the evaluation of the diffuse field characteristics. This analysis is based on a developed software sound field simulation software which is the first subject of research. Free path analysis includes statistical analysis of the path distribution as well as time change of statistical parameters and provides objective indicators for quantitative analysis of the conditions for the establishment of a diffuse field. The third subject of the research is the analysis of the distribution of angles of incidence and density of sound waves on various surfaces in a room based on the developed algorithms for the sound field synthesis. Analysis of incidence angles is very important for estimating the absorption properties of materials that they will exhibit in conditions of different macro and micro geometric characteristics of rooms. Knowing the angle of incidence and density of sound energy affecting a partition element that separates the two spaces allows a more precise prediction of the insulating properties of the partition structures. The fourth subject of the research is focused on the simulation of the energy impulse response and the impulse response based on the sound pressure using the proposed algorithm. The goal is to achieve a subjectively as veritable impulse response of the room based on the simulated time distribution of the received sound energy at the point of observation of the field. The verification of the proposed method was verified by subjective tests based on auralization, computational analysis of the obtained impulse responses and the comparison of the reverberation time with experiment and simulation using one commercial software.

Keywords: diffuse reflections, ray-tracing, room acoustics, secondary source, scattering model

Scientific field: electrical engineering

Scientific subarea: acoustics

UDK code: 621.3

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Cilj modelovanja zvučnog polja u prostoriji.....	2
1.2	Motivacija i predmet istraživanja	3
1.3	Ciljevi istraživanja i polazne hipoteze	5
1.4	Organizaciona struktura disertacije	7
2	Istorija modelovanja zvučnog polja u prostoriji.....	9
2.1	Primitivni fizički modeli	13
2.2	Skalirani fizički modeli	17
2.3	Numerički modeli	22
3	Geometrijsko modelovanje zvučnog polja u prostoriji	31
3.1	Osnovi Geometrijske akustike	32
3.2	Geometrijska akustika u praktičnoj primeni	34
3.3	Geometrijska akustika i računarska grafika	36
3.4	Osnovni modeli geometrijske akustike	36
3.4.1	Propagacija zvuka u vazduhu, pritisak naspram energije	37
3.4.2	Modeli refleksije.....	38
3.4.3	Jednačina akustike prostorija u geometrijskom modelu	43
3.4.4	Modeli difrakcije	46
3.4.5	Modeli izvora i prijemnika	47
3.5	Tehnike geometrijske akustike zasnovane na putu refleksije	48
3.5.1	Metoda likova	48
3.5.2	Rej-trejsing tehnika	53
3.5.3	Bim-trejsing tehnike	58
3.5.4	Modelovanje difrakcije u rej-trejsingu i metodi likova	66
3.6	Tehnike zasnovane na površinskom zračenju	66
3.6.1	Uopšteno o metodi zračenja u geometrijskoj akustici.....	67
3.6.2	Prenos akustičkog zračenja u metodi površinskog zračenja	70
3.6.3	Rej-trejsing tehnika u proračunu površinskog zračenja	71
3.6.4	Hibridne metode u proračunu površinskog zračenja	72
3.7	Rezime tehnika modelovanja pomoću geometrijske akustike	74
3.7.1	Tačnost tehnika modelovanja geometrijske akustike	75
3.7.2	Budući pravci razvoja geometrijske akustike	77

4	Metoda rej-trejsing	79
4.1	Prijemna sfera	81
4.2	Algoritam rej-trejsing metode.....	82
4.3	Proračun energije primarnih zraka	85
4.4	Modelovanje refleksija.....	87
4.5	Lamberov zakon	88
4.6	Vektorsko modelovanje refleksija	91
4.7	Kosi Lamberov zakon.....	94
4.8	Proračun energije sekundarnih zraka	98
4.9	Određivanje impulsnog odziva na osnovu rezultata simulacije.....	98
5	Modifikacije algoritma za rej-trejsing simulaciju.....	105
5.1	Motivacija za uvođenje poboljšanja u rej-trejsing algoritam.....	105
5.2	Modifikacije modelovanja usmerenosti zračenja sekundarnih izvora.....	107
5.3	Modifikacija proračuna impulsnog odziva na osnovu energetskeg odziva ...	113
5.4	Numeričko testiranje predloženog rej-trejsing algoritma	115
5.5	Ekperimentalno testiranje predloženog rej-trejsing algoritma.....	119
5.6	Rezime.....	124
6	Realizacija softvera na bazi predloženog algoritma	126
6.1	Računarska realizacija metode rej-trejsing	126
6.2	Presek zraka i zida	129
6.3	Grafički prikaz simulacije pomoću računara	132
6.4	Statističke veličine kao rezultat rada softvera	133
6.4.1	Kratkovremenski usrednjena slobodna dužina puta	135
6.4.2	Ponderisana kratkovremenski usrednjena slobodna dužina puta	138
7	Analiza priraštaja energije pri difuznim refleksijama	139
7.1	Opis eksperimenta na fizičkom modelu	140
7.2	Analiza reflektovane energije na fizičkom modelu	142
7.3	Analiza simulacijom pomoću komercijalnog softvera	147
7.4	Analiza simulacijom algoritmom predloženim u ovom radu.....	152
7.5	Diskusija rezultata	155
8	Analiza vremenske raspodele srednje dužine slobodnog puta	158
8.1	Statistička raspodela dužine slobodnog puta	159
8.2	Kratkovremenski usrednjena slobodna dužina puta	161
8.3	Diskusija rezultata	168
9	Analiza raspodele incidentne energije u prostoriji.....	172

9.1	Analiza raspodele površinske gustine energije	173
9.2	Diskusija rezultata	180
10	Analiza raspodele uglova incidencije u prostoriji	181
10.1	Frekvencija koincidencije i izolaciona svojstva pregrada.....	182
10.2	Raspodela uglova incidencije	185
10.3	Raspodela pogodaka po stranicama.....	189
10.4	Diskusija rezultata	193
11	Provera tačnosti algoritma pri izračunavanju vremena reverberacije	194
11.1	Diskusija rezultata	200
12	Zaključak.....	201
13	Literatura	207
Prilog A	225
A.1	Računarsko modelovanje omnidirekcionog izvora	225
A.2	Računarsko modelovanje Lamberovog zračenja	226
A.3	Korisničko uputstvo za realizovani softver.....	228
Biografija autora	235
Изјава о ауторству	236
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	237
Изјава о коришћењу	238

1 Uvod

Modelovanje zvučnog polja u prostorijama je pokušaj da se odziv prostorije na zvučnu pobudu opiše analitički ili numerički i tako omogući njegova analiza i predikcija. Mogućnost predikcije je nužna u projektovanju budućih prostorija, s obzirom da je zahteve za akustički dizajn potrebno uključiti na samom početku projekta. To je posebno bitno kada je njihova namena akustički zahtevna kao što su razne sale, studijski prostori, sobe za slušanje reprodukovano zvuka i slično. Osim za predikciju odziva nekih budućih prostorija, modeli zvučnog polja su značajni i kao alat za tumačenje odziva koji se ostvaruju u postojećim prostorijama. Pomoću modela moguće je utvrditi šta treba menjati da bi se u postojećoj prostoriji korigovao odziv u skladu sa nekim postavljenim zahtevima.

Priroda zvučnog polja kakvo se javlja u prostorijama ne omogućava da se na jedinstven način opiše ponašanje prostorije pri bilo kakvoj pobudi. Tri dekade širok frekvencijski opseg zvukova (20Hz – 20kHz) koje čovek može da percepira i isti toliki raspon talasnih dužina čini da su procesi interakcije zvučnih talasa sa graničnim površinama pri tako različitim talasnim dužinama veoma različiti. Zbog toga se u formiranju modela zvučnog polja u prostorijama nužno uvode razne polazne pretpostavke kojima se vrši uprošćavanje i ograničenje u odnosu na realnost. Na taj način je važnost, odnosno tačnost njihove primene ograničena i uslovljena važnošću uvedenih pretpostavki [Mijić, 2000 a].

Odziv prostorije na zvučnu pobudu posmatra se preko njenog impulsnog odziva $h(t)$, pri čemu se prostorija posmatra kao prenosni sistem čiji je ulaz na mestu zvučnog izvora a izlaz na mestu prijemnika. Za razliku od električnih sistema prenosa u telekomunikacijama, gde su ulaz i izlaz jasno definisani i ne zavise od prostornih koordinata, ovde su i ulaz i izlaz sistema prenosa zadate svojim koordinatama kao tačke u prostoru. Zbog toga je impulsni odziv funkcija položaja predajne i prijemne tačke. Time se odziv vezuje za tačno određeni par tačaka za koje je definisan.

Impulsni odziv prostorije odražava pojavu propagacije zvučnih informacija duž višestrukih putanja (multipath) u zvučnom polju. U njegovoj strukturi se razlikuje početni deo (early part) iz koga se postepeno prelazi u rep reverberacione krive (late

reverberation). Rep reverberacione krive, ili kasniji deo reverberacione krive, karakteriše stanje zvučnog polja koje treba da ima attribute difuznosti, maksimalno moguće u datim uslovima. Šreder je definisao da je polje u nekoj tački kompletno difuzno kada je raspodela fluksa zvučne energije u okviru prostornog ugla uniformna. Na osnovu tako uvedenih pretpostavki statistička teorija definiše izvesne posledice, koje se takođe mogu smatrati karakteristikama difuznog polja. Jedna od takvih posledica je vrednost srednje dužine slobodnog puta $4V/S$. Klasična teorija zvučnog polja ne razmatra prelazni režim uspostavljanja polja, to jest ne razmatra kako se dolazi do stanja difuznosti. Predmet statističke teorije je analiza polja dovoljno dugo nakon stizanja direktnog zvuka.

1.1 Cilj modelovanja zvučnog polja u prostoriji

Pojam reflektovanog zvuka podrazumeva svu onu zvučnu energiju koja stiže u prijemnu tačku zato što joj zidovi ne dozvoljavaju da ode dalje već se refleksijama vraća i ostaje u prostoriji kružeći po njoj. Zbog konačnosti brzine prostiranja zvuka komponente koje se reflektuju od graničnih površina pre nego što stignu u prijemnu tačku manje ili više kasne u odnosu na direktan zvuk, pa impulsni odziv prostorije karakteriše "razvlačenje" energije u vremenu. Za razliku od direktnog zvuka, reflektovana zvučna energija stiže u prijemnu tačku sa svih strana zbog stohastičnosti (grč. "στόχος" što znači "ciljam, pogađam") kretanja refleksija kroz prostor.

Postojanje reflektovane zvučne energije koju čine brojne refleksije predstavlja osnovnu odliku prostorije kao akustičkog prenosnog sistema [Knudsen, 1934]. Predmet interesovanja je vremenska struktura reflektovane energije koja stiže u prijemnu tačku (impulsni odziv) i ukupni nivo reflektovane energije koja predstavlja energetske zbir svega što stiže do prijemne tačke u prostoriji (nivo reflektovanog zvuka). Akustika prostorija je naučna oblast koja se bavi merenjem i modelovanjem impulsnih odziva i nivoa reflektovanog zvuka [Everest, Pohlmann, 2009].

U telekomunikacijama poželjan oblik impulsnog odziva sistema prenosa je u opštem slučaju idealan Dirakov impuls, što bi značilo da sistem u idealnom slučaju ne sme da unosi promene u signal koji se prenosi. U prostorijama je nemoguće ostvariti takav idealan odziv zbog prirode reflektovanog zvuka i male brzine prostiranja. U

slučaju akustičkih prenosnih sistema idealan odziv je moguć samo u takozvanom slobodnom prostoru, što u praksi znači u anehoičnim prostorijama. Takav idealan impulsni odziv neophodan je, na primer, kada se testiraju razni zvučni izvori kao što su zvučnici ili razni izvori buke. U takvim merenjima posmatra se i analizira samo direktan zvuk koji stiže od izvora i svaka eventualna refleksija imala bi negativan uticaj.

U akustici pojam poželjnog oblika impulsnog odziva uvek podrazumeva njegovo odstupanje od idealnog. U prostorijama se zahtevi u odnosu na njen impulsni odziv mogu postaviti na dva načina: prema ukupnoj energiji koju nosi odziv i prema formi odziva u vremenskim i prostornim dimenzijama. Kada se odziv posmatra samo energetski, zahtevi u odnosu na impulsni odziv mogu biti usmereni ka tome da zvuk na mestu prijema bude dovoljno glasan ili dovoljno tih. Ukupna energija koja stiže do prijemnika srazmerna je integralu svih komponenti impulsnog odziva snimljenog na mestu prijema, pa se na taj način propisuje kompleksnost impulsnog odziva. Na primer, zahtev da zvuk u prostoriji bude što tiši podrazumeva da impulsni odziv što brže opada i da mu sve komponente budu što manje amplitude. Obrnuto tome, ako se zahteva da zvuk u prostoriji pri pobudi bude što višeg nivoa, onda je potrebno da impulsni odziv ima što više komponenti i da što duže traje.

Kada se u prostorijama zvukom prenose informacije, što je slučaj sa govorom i muzikom, onda se u njima postavlja zahtev da impulsni odziv ima neku zadatu poželjnu formu. To se može odnositi na opšti oblik odziva i detalje njegove strukture. Takav zahtev proizilazi iz potrebe dekodovanja relevantnih informacija u zvuku koji se čuje, ili kao zahtev estetike ukupne zvučne slike. Na primer, kada je u pitanju muzika čulo sluha postavlja izvesne estetske zahteve koji se ostvaruju podešavanjem oblika obvojnice odziva, pravaca iz koga dolaze prve refleksije, i slično.

1.2 Motivacija i predmet istraživanja

Simulacija metodom rej-trejsing je uobičajeni alat u akustičkom dizajnu prostorije za predikciju impulsnog odziva. Postoje brojni komercijalni alati koji koriste rej-trejsing. Specifičan problem u simulacijama je modelovanje difuznih refleksija kada preovlađuje doprinos pojedinih površina. Odzivi pojedinih površina

ostaju maskirani u celokupnom impulsnom odzivu prostorije, koji ima kompleksnu strukturu.

Pojedini komercijalni alati daju diskutabilne rezultate kada je u pitanju simulacija impulsnog odziva u slučaju refleksije zvučne energije od samo jedne površine. Posebno je interesantno posmatranje promena u reflektovanoj energiji od difuzne površine, kada se njen skatering koeficijent i veličina menjaju [Ristanović, Šumarac-Pavlović, Mijić, 2012]. Motivacija za ovaj rad je pre svega uvođenje alata koji bi preciznije odredio doprinos pojedinih površina prostorije u njenom impulsnom odzivu, čime bi dobili važan alat za akustički dizajn prostorije.

Jedan pristup u određivanju trenutka u impulsnom odzivu prostorije kada nastaje kasni deo reverberacione krive sa odlikama difuznog polja može polaziti od posledica koje nastaju uspostavljanjem difuznosti. Jedna od posledica je i očekivana statistika dužina slobodnih putanja i očekivana srednja slobodna dužina puta $4V/S$. U zaključcima iz rada [Šumarac-Pavlović, Mijić, 2007 a] uvedena je pretpostavka da se varijacije u nagibu reverberacione krive koje se javljaju tokom vremena mogu tumačiti vremenskim promenama statističkih osobina dužina slobodnih putanja zvučne energije tokom trajanja impulsnog odziva. Na osnovu toga se uvodi pretpostavka da razlike u statističkim osobinama putanja zvuka u početnom delu odziva u odnosu na njegov kasniji deo mogu biti mera za određivanje granice među njima.

Ideja je da se analiziraju promene statističkih osobina na ansamblu dužina slobodnih putanja tokom trajanja impulsnog odziva. Analiza je sprovedena uvođenjem veličine koja se može nazvati kratkovremenski usrednjena slobodna dužina puta i koja predstavlja indikator stanja u zvučnom polju. Vremenske promene vrednosti ove veličine tokom trajanja impulsnog odziva mogu ukazivati na trenutak u impulsnom odzivu kada nastaje kasni deo reverberacione krive. S obzirom da postojeći komercijalni alati nemaju mogućnost prikaza ovakve veličine, motivacija je uvođenje alata koji bi omogućio proračun i prikaz kratkovremenski usrednjene slobodne dužine puta.

Raspodela slobodnih putanja ne može da pruži odgovor na pitanje koja površina, i sa kolikim udelom utiče na odstupanja različitih parametara od statistički očekivanih vrednosti, već samo može da ukaže na tendenciju odstupanja od istih. Zbog

toga je i motivacija razvijanje softverskog alata baziranog na rej-trejsing simulaciji koji bi, pre svega, pružio precizniji uvid u procese koji se odvijaju na pojedinačnim graničnim površinama u prostori. Osim standardnih globalnih pokazatelja zvučnog polja, potreban je i precizan pregled niza karakteristika koje mogu biti od velikog značaja pri akustičkom dizajnu i optimalnoj primeni materijala. To su broj pogodaka određene površine, uglovi pod kojima su pogođene i energija sa kojom su pogođene. Od ovih pokazatelja zavisi efektivna apsorpciona moć neke površine, koja predstavlja važan ulazni podatak za proračun izolacionih svojstava pregrada koje razdvajaju prostori.

Rezultat rej-trejsing simulacije je zvučna energija u zavisnosti od vremena, dok je impulsni odziv funkcija zvučnog pritiska u zavisnosti od vremena. Iako u literaturi postoji predlog (Kuttruff, 1993) kako da se informacija sadržana u energetskom odzivu dobijenom pomoću rej-trejsinga konvertuje u „ekvivalentni impulsni odziv“, komercijalni alati najčešće koriste drugačije metode, kao što je sabiranje sa nultom fazom, sabiranje sa slučajnom fazom, i druge. U slučaju refleksije od jedne površine, simulacija pomoću postojećih komercijalnih rešenja daje kumulativnu funkcije energije koja najčešće ne pokazuje slaganje sa eksperimentom. Motivacija je uvođenje alata kojim bi bila realizovana metoda koja će energetski pokazati bolje slaganje sa eksperimentom, a istovremeno dati impulsni odziv pomoću koga bi se uradila kvalitetna auralizacija.

1.3 Ciljevi istraživanja i polazne hipoteze

Predmet istraživanja u ovoj tezi usmeren je na numeričku analizu zvučnog polja u prostori. Cilj istraživanja je razvoj poboljšanih softverskih alata za simulaciju polja. Cilj razvoja algoritama treba da omogući simulaciju promena u impulsnom odzivu prostori kao posledica geometrijskih promena na makro i na mikro nivou. Predložena metodologija treba da omogući i definisanje i izračunavanje niza objektivnih parametara za kvantitativnu i kvalitativnu analizu zvučnog polja, kao i za precizniju simulaciju prvih refleksija koje su najznačajnije za subjektivni doživljaj zvučnog polja.

U ovom istraživanju biće analizirano nekoliko aspekata metodologije proračuna akustičkog odziva prostori metodom rej-trejsing. Biće ispitane

mogućnosti za uvođenje izvesnih poboljšanja kojima bi se popravila tačnost simulacije, a takođe i razumno ubrzao proračun odziva prostorije.

Rad na predloženoj doktorskoj disertaciji zasniva se na četiri osnovne hipoteze:

- I. Postoji mogućnost za poboljšanje postojećeg algoritma za modelovanje difuznih refleksija pri simulaciji zvučnog polja u prostorijama pomoću rej-trejsing analize, posebno za modelovanje ranih refleksija u impulsnom odzivu.
- II. Uticaj makro i mikro geometrijskih karakteristika prostorije na njen impulsni odziv i karakter zvučnog polja može se kvantifikovati uvođenjem novog fizičkog pokazatelja stanja – kratkovremene srednje dužine slobodnih putanja.
- III. Analiza broja pogodaka površina unutar prostorije i upadnih uglova pod kojima su ove površine pogođene, koja bi se inkorporirala u rej-trejsing algoritam, donosi mogućnost preciznije analize akustičkog značaja pojedinačnih zidova i pregrada u prostoriji.
- IV. Analizom raspodele energije u vremenu, koja se dobija kao rezultat računarske simulacije impulsnog odziva prostorije, moguće je formirati monoauralne i binauralne impulsne odzive koji se subjektivno ne razlikuju bitno od snimljenih u realnim prostorijama.

Nekoliko naučnih metoda biće primenjeno tokom realizacije istraživanja u okviru rada na ovoj tezi, sve u cilju provere navedenih polaznih hipoteza i ostvarenja zadatih istraživačkih ciljeva. To su:

- analitičko modelovanje difuznih refleksija zvuka i proračun akustičkog odziva u različitim geometrijskim modelima prostorija;
- statistička analiza rezultata proračuna uvedenih akustičkih veličina pri različitim kombinacijama koeficijenata apsorpcije i difuznosti;
- analiza vremenskih dijagrama uvedenih akustičkih veličina sa ciljem da se utvrde razlike u odzivu pri različitim položajima prijemne tačke unutar prostorije;
- statistička obrada broja pogodaka i uglova pod kojim su pogođeni zidovi radi utvrđivanja njihovog akustičkog značaja u prostoriji;

- statistička obrada rezultata proračuna akustičkog odziva radi provere njegove usaglašenosti sa eksperimentalno snimljenim signalom.

Detaljniji i specifični proračuni akustičkih parametara prostorije biće izvedeni sledećim naučnim metodama:

- softverskom realizacijom proračuna akustičkih veličina prostorije,
- softverskim simulacijama akustičkog odziva prostorije.

Sva softverska rešenja su realizovana korišćenjem C i C++ programskih jezika.

1.4 Organizaciona struktura disertacije

Prvi deo disertacije predstavlja opšti deo, u kome su prikazani pregled, istorijat i trenutno stanje na polju nauke kada je u pitanju modelovanje zvučnog polja u prostoriji. Posle opštih poglavlja, prezentovana je nova metodologija za simulaciju zvučnog polja u prostoriji, koja predstavlja originalan doprinos ovog rada. Zatim su prikazane mogućnosti i poboljšanja koje ova metodologija nudi kroz različite primere njene primene. Disertacija je organizovana u osam 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 metoda modelovanja zvučnog polja u prostorijama, njihov pojam i značaj, kao i tri glavna tipa modelovanja (fizički, skalirani i numerički modeli).

Treće poglavlje detaljnije opisuje računarsko modelovanje zvučnog polja u prostorijama. Prikazan je istorijat računarskog modelovanja, kao i glavne metode koje su korišćene. Posebno su naznačene metode geometrijske akustike zasnovane na putu refleksije i na površinskom zračenju.

Četvrto poglavlje je posvećeno metodi rej-trejsing, kao najznačajnijoj metodi geometrijske akustike zasnovane na putu refleksije, i uopšte kao najznačajnijoj metodi računarskog modelovanja. Prikazani su i objašnjeni elementi rej-trejsing metode: algoritam rej-trejsinga, prijemna sfera, Lamberov zakon i vektorsko modelovanje refleksija.

Peto poglavlje prikazuje modifikaciju rej-trejsing metode, uvedenu u ovom radu. Prikazana je novina u načinu modelovanja sekundarnih refleksija, kao i način

proračuna njihove energije. Uvedeno poboljšanje postojećeg rej-trejsing algoritma je testirano poređenjem sa rezultatima eksperimenta i simulacijama pomoću jednog komercijalnog softvera.

U šestom poglavlju je opisan softver na bazi predloženog algoritma, koji je napravljen za potrebe ovog rada. Posebno su prikazani neki od najbitnijih elemenata računarske realizacije, kao što su presek zraka i zida, modelovanje omnidirekcionog izvora i modelovanje Lamberovog zračenja. Dato je korisničko uputstvo za realizovani softver, kao i delovi računarskog koda.

U sedmom poglavlju prikazani su primeri različitih specifičnih upotreba realizovanog softvera. Primeri obuhvataju određivanje vremenske raspodele srednje dužine slobodnog puta u prostoriji, analizu raspodele incidentne energije na unutrašnjim površinama prostorije i raspodelu uglova incidencije u prostorijama različitih proporcija.

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 daljih poboljšanja predložene metodologije za modelovanje zvučnog polja u prostorijama.

2 Istorija modelovanja zvučnog polja u prostoriji

U toku proteklog stoleća razvijeno je više metoda za modelovanje akustičkog odziva prostorije. Cilj svih metoda je da se akustički dizajn auditorijuma pomeri od pozicije slabo shvaćene umetnosti do naučno zasnovane oblasti inženjerstva [Rindel, 1995]. Sa najnovijim razvojem numeričkog modelovanja postalo je moguće kombinovanje najboljih karakteristika starijih i novijih metoda, za dobijanje pouzdane predikcije objektivnih akustičkih parametara [Mijić, Šumarac-Pavlović, Kurtović, 2005].

U početku razvoja modelovanja u akustici slušan je zvuk koji je sniman u modelu. Dugo vremena je takva subjektivna procena akustičkih osobina bila jedini način za ocenu akustičkih kvaliteta prostorije. Kasnije su uvedeni objektivni akustički parametri, koji su računati na osnovu impulsnog odziva prostorije. Sam proces akustičke obrade i akustičkog dizajna prostorije je znatno ubrzan. Dok su prvobitni modeli iziskivali skoro godinu dana za realizaciju i obavljanje merenja, kod današnjih modela taj proces je sveden na svega nekoliko dana [Rindel, 2002].

Iako je koncept slušanja zvuka u modelu prostorije radi procene akustičkih osobina napušten, savremene metode modelovanja u akustici nude način da se čuje zvuk koji nastaje u modelu. To je koncept auralizacije pomoću simuliranog impulsnog odziva prostorije. Auralizacija predstavlja tehniku stvaranja i reprodukcije zvuka zadatog zvučnog izvora u prostoriji, fizičkim ili numeričkim modelovanjem, namenjenju subjektivnim testovima slušanja [Naylor, 1993]. Zvuk se generiše na osnovu konvolucije impulsnog odziva prostorije i testnog zvuka. Na taj način se simulira zvuk koji čuje slušalac u zadatoj poziciji u prostoriji, čak i u slučaju potpuno virtuelnog modela kakav je slučaj kod numeričkog modelovanja pomoću računara.

Istorijski posmatrano akustički modeli se mogu podeliti u tri grupe prema načinu njihove realizacije: primitivni fizički modeli, skalirani fizički modeli i numerički modeli. Primitivni fizički modeli su modelovali propagaciju zvuka u prostoriji. Koristili su ih Sabin i drugi autori početkom prošlog stoleća, prvenstveno da bi analizirali prve refleksije u dvodimenzionalnom preseku prostorije. Ono na čemu su se ovi modeli bazirali je modelovanje kretanja talasnih frontova i zraka [Maus,

1976]. Na primer, rezervoari sa vodom u kojima su pravljene talasići pomoću generatora mogli su da modeluju talasnu prirodu zvuka u zatvorenom reflektujućem okruženju [Rindel, 2002].

Kasnije, sa pojavom mikrofona, postalo je moguće snimanje zvuka u skaliranim fizičkim modelima. Razvoj tehnike skaliranih fizičkih modela od 1930-tih do 1970-tih bio je prvenstveno usmeren na smanjivanje dimenzija modela od 1:5, u početnim modelima, do odnosa 1:50. Korišćenje zvuka visoke frekvencije učinilo je ovu tehniku efikasnim alatom za potrebe akustičkog dizajna prostorija. Zajedno sa njenim razvojem pojavili su se i objektivni akustički parametri koji su računati na osnovu impulsnog odziva prostorije [Mijić, Šumarac-Pavlović, 2007].

Prvi numerički modeli za akustički dizajn prostorija pojavili su se 1967. godine, a sazreli su 1990-tih godina. Razvoj numeričkih modela je tekao u pravcu korišćenja hibridnih metoda za modelovanje akustičkog odziva, pri čemu su najčešće kombinovane metode rej-trejsing i metoda likova [Krokstad, Strom, Sorsdal, 1983]. Akcenat je bio na povećanju brzine proračuna i pouzdanosti dobijenih rezultata. Jedan od postignutih rezultata je i kvalitetna auralizacija [Kleiner, Dalenback, Svensson, 1993]. Na međunarodnim konferencijama iz oblasti numeričkog modelovanja upoređivani su različiti pristupi i njihovi rezultati. Iz radova objavljenih u literaturi može se zaključiti da je za dobijanje pouzdanih rezultata ključan način na koji se modeluju efekti difuznosti refleksija zvučne energije na zidovima prostorije (scattering effects) [Cox et al., 2006]. Posledica ovoga je da je ISO (International Standardization Organization) objavio standard kojim se definiše metoda za merenje ovih efekata [ISO 17497, 2004].

Prema načinu numeričkog proračuna zvučnog polja u prostoriji, vremenom su se izdiferencirale tri osnovne teorije. To su statistički model, talasni model i geometrijski model (aproksimacija za slučaj visokih frekvencija). Svaki od ovih modela ima svoja specifična pojednostavljenja i ograničenu važnost. Bez obzira na sve nedostatke koje imaju, analiza zvučnog polja u prostorijama danas se zasniva na primeni ova tri modela proračuna. Preciznost modelovanja zvučnog polja u prostorijama primenom ova tri modela određena je polaznim pretpostavkama i ograničenjima koja se u startu uvode. Zbog toga u svim realnim prostorijama rezultati dobijeni nekim od modela u većoj ili manjoj meri odstupaju od stvarnog stanja u

zvučnom polju. Veličina te razlike zavisi od niza konkretnih osobina prostorije, odnosno od toga koliko polazna ograničenja uvedena pri definisanju modela važe u posmatranoj prostoriji. Ipak, postoji niz praktičnih problema u kojima se od modela ne zahteva velika tačnost rezultata, već samo kvalitativna procena stanja ili procena reda veličine vrednosti pojedinih pokazatelja stanja u zvučnom polju. Kada se, na primer, polje u prostoriji modeluje radi procene subjektivnog doživljaja nivoa zvuka, onda su tolerancije od par decibela u rezultatima modelovanja donja granica tačnosti koja ima smisla, jer su manje promene nivoa subjektivno neprimetne. To čini da navedeni numerički modeli zvučnog polja u prostorijama, i pored apriornog odstupanja od realnosti, imaju široku primenu u inženjerskoj praksi.

Statistički model se zasniva na zakonu održanja energije i primenjiv je za slučaj zvučnog polja u prostoriji kada u njoj postoji stacionarni zvučni izvor. Soba se tada posmatra na globalnom nivou kao rezervoar zvučne energije u kome se odigrava proces njenog generisanja i trošenja. Kada se u prostoriji uključi zvučni izvor snage P_a započinje njeno punjenje energijom. Sa porastom gustine energije u prostoriji rastu gubici na površinama zidova usled apsorpcije. Ovi gubici se kvantifikuju snagom disipacije P_a . Statistička teorija modeluje zvučno polje posmatrajući ravnotežu između ova dva suprotna procesa energetske punjenja i pražnjenja.

Statistički model zvučnog polja u prostoriji veoma je značajan u praksi jer daje jednostavne relacije za određivanje nivoa reflektovanog zvuka u okolnostima kada u njoj radi stacionarni izvor (na primer, neki izvor buke). Druga važna osobina ovog modela je u tome što objašnjava prelazne režime nakon uključivanja i isključenja zvučnih izvora. Iz njega je takođe proizašao i najšire primenjivan izraz za izračunavanje vrednosti vremena reverberacije (Sabinov obrazac).

Talasna teorija je opisivanje zvučnog polja u prostoriji na osnovu talasne jednačine koja definiše prostorno-vremensku promenu pritiska. Modelovanje zvučnog polja se zasniva na rešenju talasne jednačine, pri čemu se u postupku rešavanja polazi od činjenice da rešenja različita od nule postoje samo unutar zadatih intervala prostornih koordinata koje definišu prostoriju. Rešavanje talasne jednačine za neku posmatranu prostoriju zahteva definisanje graničnih uslova, to jest stanja polja na svim unutrašnjim površinama.

Osnovni problem ovakvog pristupa modelovanju zvučnog polja je u činjenici da je u opštem slučaju prostorije, nemoguće rešavanje talasne jednačine. Osnovni "kamen spoticanja" je utvrđivanje graničnih uslova. Zato je njeno analitičko rešenje moguće samo za najjednostavnije geometrijske forme prostorije, kao što je na primer, paralelopiped idealno tvrdih zidova. Čak i u tom najjednostavnijem slučaju talasni model samo retko može imati primenu u kvantitativnoj analizi zvučnog polja. Kada prostorija ima složenu geometrijsku formu analitičko rešavanje nije praktično izvodljivo.

I pored problema koji postoje u eventualnoj primeni talasnog modela za rešavanje praktičnih problema, ovaj pristup modelovanju ima veliki teorijski značaj. Naime, rešavanje talasne jednačine za prostoriju vodi ka pojmu njenih sopstvenih rezonantnih frekvencija. Fizička manifestacija postojanja sopstvenih rezonanci su stojeći talasi. U svakoj prostoriji njihov uticaj na akustički odziv primetan je u određenom opsegu frekvencija. Položaj tog opsega frekvencija zavisi od veličine prostorije. Zbog toga je talasni model, iako nije primenjiv za kvantifikovanje zvučnog polja, značajan za kvalitativnu analizu pojava u prostoriji.

Geometrijski model po svojoj prirodi odgovara slučaju veoma visokih frekvencija, to jest kada je talasna dužina zvuka dovoljno mala u odnosu na dimenzije prostorije i veličinu svih graničnih površina u njoj. Zračenje energije oko zvučnog izvora modeluje se skupom zraka koji se šire polazeći od njega. Svakom takvom zraku dodeljuje se jedan deo izračene energije koja u procesu prostiranja vremenom slabi usled širenja talasnog fronta i pri svakoj refleksiji od graničnih površina usled apsorpcije od njih. Sudbina zraka se prati dok njihova energija ne opadne ispod nekog praga.

Geometrijsko modelovanje zvučnog polja predstavlja pojednostavljenje realnosti, jer se apriorno zanemaruju svi talasni fenomeni. To pre svega znači da se ne modeluje difrakcija na preprekama, kao ni uticaj faznih stavova pri superponiranju talasa. Međutim, jedino ovaj model u praksi omogućava predikciju strukture impulsnog odziva prostorije. U tom smislu je njegova primena od velikog značaja u svim okolnostima kada se projektuju razne vrste sala i slični prostori čiji je akustički kvalitet važan.

Dok statistički modeli i talasna teorija opisuju stanje zvučnog polja u prostoriji, na osnovu njih nije moguće odrediti predikciju impulsnog odziva prostorije. Nasuprot tome, geometrijski modeli omogućavaju simulaciju impulsnog odziva prostorije, na osnovu kog je moguće računanje objektivnih akustičkih parametara. Stoga su numerički modeli išli u pravcu razvoja geometrijskih modela.

2.1 Primitivni fizički modeli

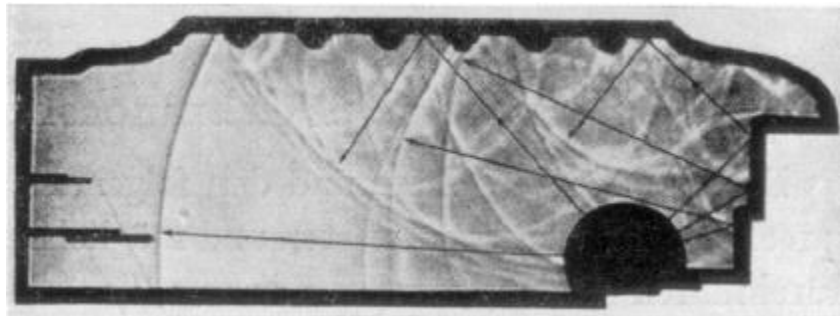
Najraniji sačuvani podaci o modelovanju zvučnih pojava datiraju iz 1844. god. od engleskog fizičara Skota Rasela. Iako nije ostao sačuvan njegov originalni rad, ostalo je zapisano njegovo uverenje da se zvučni talasi mogu modelovati pomoću vodenih talasa, „iako im nisu sasvim identični“, kako navodi Rasel. Međutim, pravi početak modelovanja zvučnih pojava se vezuje za početak XX veka.

U nastavku su objašnjene primitivne fizičke metode za modelovanje akustičkih pojava, hronološkim redom kako su se pojavljivale. To su: ultrazvučna Šliren fotografija, rezervoar sa vodenim talasima i tri optička metoda modelovanja, pomoću svetlosnih zraka, pomoću raspodele svetlosne energije i pomoću laserskih zraka.

Ultrazvučna Šliren fotografija: Sabin je 1913. godine objavio rad u kome opisuje upotrebu ultrazvučnih talasa i Šliren fotografije za proučavanje refleksija zvučnih talasa od tavanice i zidova u dvodimenzionalnom preseku jednog primitivnog fizičkog modela. Šliren fotografija (po nemačkoj reči „schlieren“ što znači žičica ili pruga) predstavlja metod vizuelizacije efekata neravnomerne zapreminske gustine u fluidima.

Zvučni izvor bila je električna varnica napravljena pražnjenjem električnog kondenzatora. Vazduh je bio zasićen dimom, a model osvetljen jakim pozadinskim svetlom, tako da su talasni frontovi postali vidljivi i mogli su se registrovati na fotografiji. Svetlost se refraktovala zato što je talasni front gušći od okolnog vazduha. Metoda je pružala vizuelnu predstavu difrakcije i rasejavanja talasnog fronta na nepravilnim preprekama. Na slici 2.1 prikazana je ultrazvučna Šliren fotografija dvodimenzionalnog preseka primitivnog fizičkog modela opere u Lajpcigu.

Rezervoar sa vodenim talasima: Osvetljavanjem plitkog vodenog rezervoara sa vodenim talasima, koji se stvaraju pomoću mehaničkog vibratora, može se napraviti fotografija koja daje predstavu o prostiranju vodenih talasa. Mehanički vibrator stvara vibracije u vodi i na taj način kreira „voz“ vodenih talasa. Frekvencija mehaničkog vibratora se može odabrati tako da predstavlja tipičnu frekvenciju zvuka. Na slici 2.2 prikazan je rezervoar sa vodenim talasima, na koji je postavljen projektor tako da se rezultat simulacije može pratiti na platnu.

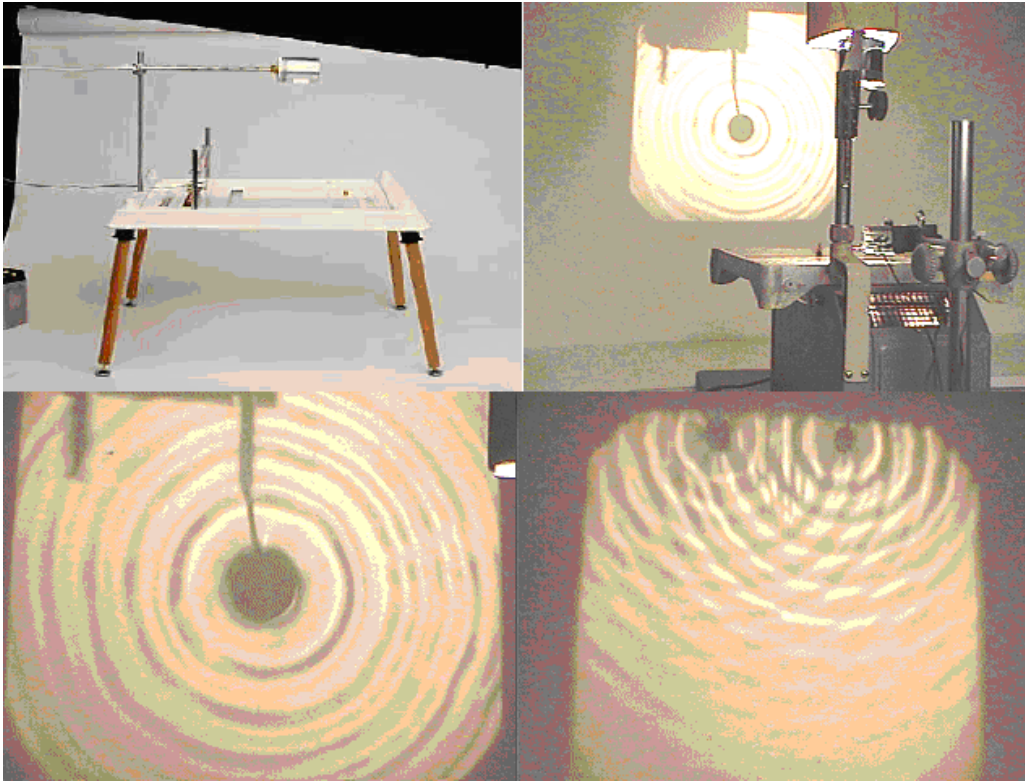


Slika 2.1. Šliren fotografija, prikazan je dvodimenzionalni presek primitivnog fizičkog modela opere u Lajpcigu [Rindel, 2002].

Optički metod modelovanja pomoću svetlosnih zraka: Kod ove metode iskorišćen je svetlosni izvor umesto zvučnog izvora. Metod koji je objavljen 1929. godine koristi svetlosni izvor smešten unutar cilindra na kome postoji mnogo proreza. U dvodimenzionalnom modelu sa površinama koje reflektuju svetlost moguće je dobiti sliku svetlosnih zraka i njenih prvih refleksija. Na slici 2.3 prikazano je ispitivanje refleksija svetlosnih zraka u jednom dvodimenzionalnom modelu. Površine koje treba da apsorbiraju energiju se mogu ofarbati u crno, da bi se izbegla refleksija od njih.

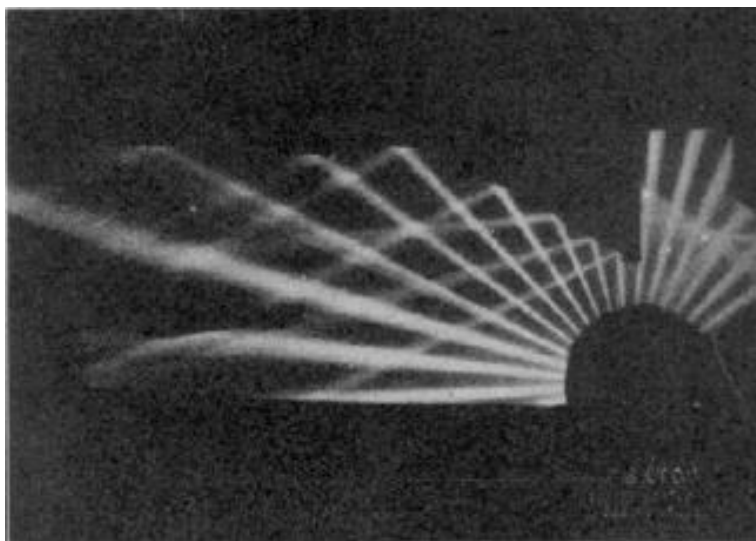
Optički metod modelovanja pomoću raspodele svetlosne energije: Da bi se ispitala raspodela energije u jednom auditorijumu, iskorišćen je sledeći optički metod 1930. godine. Prostor za publiku je modelovan pomoću staklene ploče od opala. Ostale površine prostorije su modelovane listovima aluminijuma sa optičkim koeficijentom refleksije 50%. Interesantno je da je svetlosni izvor imitirao zvučni izvor, a svetlina opalskog stakla koja je dobijena u stacionarnom stanju, raspodelu zvučnog pritiska u

oblasti prostora za publiku. Raspodela energije na podu mogla se posmatrati na fotografskoj ploči. Na slici 2.4 prikazan je optički model hale sa konkavnom tavanicom. Ovaj metod su iskoristili Vermeulen i de Boer za dizajniranje Phillips pozorišta u Ajndhovenu.



Slika 2.2. Rezervoar sa vodenim talasima [DKImages, 2010].

Optički metod modelovanja pomoću laserskih zraka: Osamdesetih godina prošlog veka (1986), firma „Nagata Acoustics“ iz Japana je iskoristila laserske zrake da istražuje refleksije prvog reda u trodimenzionalnom modelu hale „Suntory“ u Tokiju. Laseri se u principu koriste za korekciju impulsnog odziva prostorije na visokim frekvencijama. Posebno su se pokazali korisnim kod ispitivanja ranih refleksija tj. refleksija koje se pojavljuju u prvih 25 ms akustičkog odziva. Rane refleksije su veoma bitne za razumljivost slušanog sadržaja u datoj prostoriji [Meesawat, Hamershoi, 2002]. Zato je težnja da se rane refleksije pojačaju u prvih 25 ms akustičkog odziva, a da se kasnije refleksije utišaju.



Slika 2.3. Ispitivanje refleksija svetlosnih zraka u dvodimenzionalnom modelu Memorijalnog auditorijuma Okuma, 1929 [Rindel, 2002].



Slika 2.4. Optički model hale sa konkavnom tavanicom [Rindel, 2002].

Uporedni pregled primitivnih fizičkih modela: U tabeli 2.1 dat je uporedni pregled primitivnih fizičkih modela sa njihovim karakteristikama. Iz tabele se vidi da su prvi primitivni fizički modeli nastali početkom prošlog veka, ali da postoji i model (optički metod modelovanja pomoću laserskih zraka) koji datira s kraja prošlog veka. Zastupljeni su i 2D i 3D modeli. Prilikom modelovanja koriste se ultrazvuk, voda,

svetlost i laseri. Talasni front je vidljiv samo kod Šliren metode i rezervoara sa vodenim talasima. Talasna dužina je merljiva samo kod rezervoara sa vodenim talasima. Razmera primitivnih fizičkih modela se kreće od odnosa 1:10 do odnosa 1:200, u odnosu na dimenzije posmatrane prostorije. Rane refleksije se ne mogu uočiti samo kod optičke metode raspodele svetlosne energije, ali je samo kod te metode moguće utvrditi raspodelu energije. Apsorpciju refleksione površine nije moguće modelovati samo kod rezervoara sa vodenim talasima. Efekte difuznosti refleksija i difrakcione efekte zvučne energije moguće je modelovati samo Šliren metodom i rezervoarom sa vodenim talasima, dok to nije moguće sa ostalim metodama.

Tabela 2.1. Primitivni fizički modeli u akustici
(„X“ označava da je karakteristiku moguće modelovati).

	Šliren metoda	Rezervoar sa vodenim talasima	Optički – svetlosni zraci	Optički – raspodela energije	Optički – laserski zraci
Najraniji izveštaji	1913.	1921.	1929.	1936.	1985.
Dimenzije	2D	2D	2D	3D	3D
Fizika	Ultrazvuk	Voda	Svetlost	Svetlost	Laser
Talasni front	X	X			
Talasna dužina		X			
Tipična skaliranost	1:200	1:50	1:50	1:200	1:10
Rane refleksije	X	X	X		X
Raspodela energije				X	
Apsorpcija površina	X		X	X	X
Efekte difuznosti refleksija	X	X			
Difrakcioni efekti	X	X			

2.2 Skalirani fizički modeli

Glavna karakteristika skaliranih fizičkih modela, koja ih odvaja od primitivnih fizičkih modela je da se sve fizičke dimenzije modela, uključujući i talasnu dužinu zvuka smanjuju istim faktorom skaliranja. U primitivnim fizičkim modelima se i ne koristi zvučni izvor, nego se proučava pojava prostiranja talasa i to najčešće ultrazvučnih, vodenih ili svetlosnih. Sam zvučni izvor se modeluje električnom varnicom, mehaničkim vibratorom, svetlosnim izvorom i laserskim zracima. U

nastavku su objašnjene skalirane fizičke metode za modelovanje akustičkih pojava. To su: tehnikolor modeli, polutonski modeli i crno-beli modeli.

Tehnikolor modeli: Prvi izveštaj o metodi za subjektivnu procenu akustičkih osobina prostorije korišćenjem trodimenzionalnog modela napravio je F. Spandök 1934. godine. On je koristio skaliranost fizičkog modela 1:5 i voštani doboš kojim je reprodukovao zvuk brzinom od 60 obrt/min. Zvuk je prethodno emitovan i sniman na frekvenciji 300 obrt/min. S obzirom da je skaliranost modela bila 1:5, pri usporenoj reprodukciji od 60 obrt/min se čulo kako bi izgledala reprodukcija zvuka u pravoj prostoriji. V. L. Jordan je 1941. godine unapredio ovaj model koristeći magnetski snimač (Poulsen Telegraphone) sa uzorkom od 20 s snimljenog govora.

Ime “Technicolor models”, kao i ostala imena u ovom odeljku koji se bavi skaliranim fizičkim modelima, predložio je A.N.Burd 1975. godine. Ovo ime dolazi po američkoj firmi „Technicolor Motion Picture Corporation“ čuvenoj po pionirskim radovima na uvođenju filmova u boji početkom XX veka. Poznato je da se u filmskoj i TV tehnici koristi fizička veličina pod nazivom „osvetljaj“ (eng. „brightness“). Za neku površinu ona se definiše kao količina svetlosti primljena od te površine. Što se više svetlosti apsorbuje to je refleksija manja i površina izgleda tamnija, tj. ima manju svetlinu. Analogno tome, kod skaliranih fizičkih modela trebalo je pronaći materijale za pokrivanje površina zidova modela sa odgovarajućim koeficijentom apsorpcije na skaliranoj frekvenciji.

Razvijajući dalje ove modele W. Reichardt je 1956. godine povećao skaliranost na odnos 1:10 i 1:20. Jedan skalirani fizički model odnosa skaliranosti 1:10 je prikazan na slici 2.5. Da bi se smanjio uticaj slabljenja zvuka usled apsorpcije u vazduhu, u modelima je vazduh isušivan na oko 2% relativne vlažnosti. Osim modela prostorija pravljene su i minijaturne veštačke glave na istoj skaliranosti za snimanje binauralnih signala u modelu. Primer koji je prikazan na slici 2.6 korišćen je za redizajn Semper opere u Drezdenu. Tipičan savremeni skalirani fizički model jedne koncertne sale prikazan je na slici 2.7 [Commins et al., 2002].

Polutonski modeli: Korišćenjem skaliranih fizičkih modela za dizajniranje hala uvidelo se da je slušanje reprodukovanog zvuka nepraktično i oduzima previše

vremena za procenjivanje akustičkog kvaliteta. Merenje objektivnih akustičkih parametara prostorije je brža i preciznija metoda. Takva merenja su zasnovana na impulsnom odzivu, koji se lako može meriti korišćenjem električne varnice kao impulsnog zvučnog izvora. Tokom 1950-tih i 1960-tih godina prošlog veka ova tehnika je korišćena za dizajniranje opera, pozorišta i koncertnih dvorana, a u isto vreme je cvetao i razvoj novih objektivnih akustičkih parametara za ocenu akustičkog kvaliteta prostorija. Impulsni zvučni izvori počeli su prvo da se primenjuju kod tehnikolor modela, a zatim je njihova upotreba nastavljena i u svim modelima koji su usledili.

Polutonski modeli su nazvani tako zato što nije postojala namera da se apsorpcija površina modeluje sa visokom preciznošću, već približno. (Analogija je izvedena prema muzičkoj oktavi, koja sadrži 12 tonova na rastojanju od polutona i manji interval od polutona nije definisan.) Samo je prostor za publiku modelovan sa približno tačnom apsorpcijom. Ostale površine su pravljene sa što je moguće većom refleksijom, a slabljenje zvuka u vazduhu je uzimano pri proračunu kakvo i jeste, tj. bez isušivanja vazduha. Pre nego što bi model bio prihvaćen za upotrebu vršeno je podešavanje vremena reverberacije, kao funkcije frekvencije, dodavanjem zakrpa od apsorpcionog materijala na tavanicu i ostale pogodne površine. Sa malom veštačkom glavom ubačenom u model, uključivana je i aproksimativna auralizacija, kao konvolucija testnog zvuka sa izmerenim binauralnim impulsnim odzivom prostorije (BRIR – Binaural Room Impulse Response).

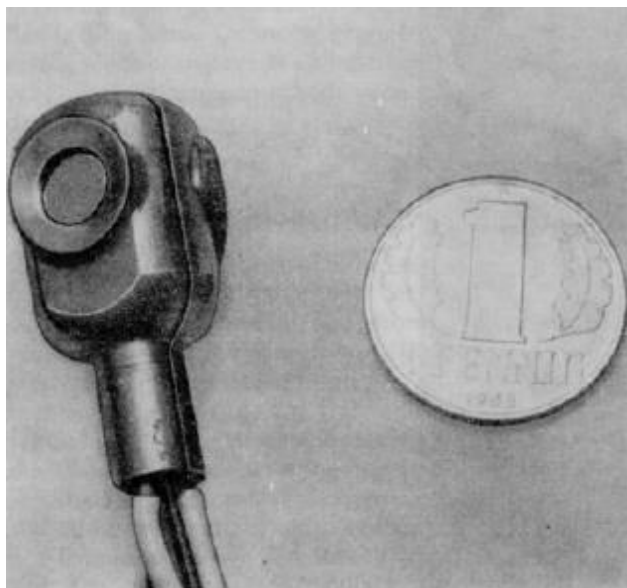
Crno-beli modeli: Sa ciljem da se smanji vreme potrebno za testove koji su rađeni na modelima, tehnika modelovanja je dalje razvijana 1970-tih godina sa veoma malim modelima razmera 1:50. Pri ovoj razmeri veoma teško je kontrolisati apsorpciju materijala, tako da su površine postajale ili samo apsorpcione ili samo refleksione, pa je stoga i sama tehnika dobila naziv "crno-beli modeli".

Uporedni pregled skaliranih fizičkih modela: Pregled skaliranih fizičkih modela prikazan je u tabeli 2.2. Iz tabele se vidi da su najraniji izveštaji o ovoj metodi zabeleženi u prvoj trećini prošlog veka i da su razvijani sledećih pola veka. Razmera skaliranih fizičkih modela se kreće od odnosa 1:8 do odnosa 1:50, u odnosu na

dimenzije posmatrane prostorije. Kao zvučni izvor korišćen je zvučnik i električna varnica. Usmerenost izvora je realizovana samo kod tehnikolor modela. U svim modelima je korišćen mikrofoni kao prijemnik, dok veštačka glava nije korišćena kao prijemnik samo kod crno-belih modela. Površinska apsorpcija je uspešno realizovana kod tehnikolor modela, dok je kod polutonskih i crno-belih to bilo moguće ispuniti samo delimično. U svim modelima je bilo moguće uočiti rane refleksije, efekte difuznosti refleksija i difrakcione efekte. U svim modelima je sniman impulsni odziv i bilo je moguće odrediti vreme reverberacije, kao i ISO 3382 parametre [ISO 3382, 1997]. Auralizaciju nije bilo moguće sprovesti samo kod crno-belih modela. Vreme konstrukcije modela se kretalo od 12-24 nedelje, koliko je bilo potrebno za tehnikolor modele, na svega 3 nedelje koliko je trebalo za realizaciju crno-belih modela. Takođe je i potrebno vreme merenja u modelima smanjeno sa 4-8 nedelja kod tehnikolor modela, na nedelju dana kod crno-belih modela.

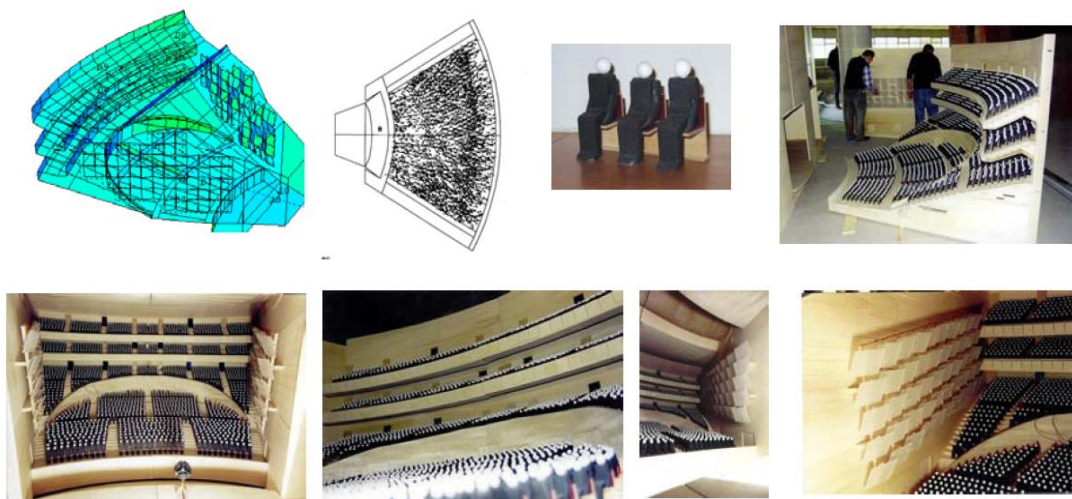


Slika 2.5. Pogled na skalirani model, 1:10, glavne sale Opere u Sidneju, prema dizajnu danskog arhitekta Jorna Utzona, 1966. godine [Rindel, 2002].



Slika 2.6. Veštačka glava sa dva mikrofona skalirana 1:20.

Primer prikazan na slici je korišćen za redizajn Semper opere u Drezdenu [Rindel, 2002].



Slika 2.7. Primer jednog savremenog skaliranog fizičkog modelanapravljenog za akustičku analizu koncertne sale u Milanu [Commins et al., 2002].

Tabela 2.2. Karakteristike skaliranih fizičkih modela
(X označava da je karakteristiku moguće modelovati,
dok (X) ili ((X)) označava da je to moguće samo delimično).

	Tehnikolor modeli, elektro- dinamički izvor	Tehnikolor modeli, impulsni izvor	Polutonski modeli	Crno-beli modeli
Najraniji izveštaji	1934.	1956.	1968.	1979.
Razmera	1:8 до 1:20	1:8 до 1:20	1:8 до 1:20	1:50
Izvor	Zvučnik	El. varnica	El. varnica	El. varnica
Usmerenost izvora	X	(X)		
Mikrofonski prijemnik	X	X	X	X
Veštačka glava kao prijemnik	X	X	(X)	
Površinska apsorpcija	X	X	(X)	((X))
Rane refleksije	X	X	X	X
Efekti difuznosti refleksija	X	X	X	X
Difrakcioni efekti	X	X	X	X
Impulsni odziv	X	X	X	X
Vreme reverberacije	X	X	(X)	(X)
ISO 3382 parametri	X	X	X	(X)
Auralizacija	X	X	(X)	
Vreme konstrukcije	12-24 nedelje	12-24 nedelje	8-20 nedelja	3 nedelje
Vreme merenja	4-8 nedelja	4-8 nedelja	3-8 nedelja	1 nedelja

2.3 Numerički modeli

Uvođenje digitalnih računara u akustiku prostorija zasluga je M. R. Šredera i njegovih saradnika 1963. godine. Od tada su ovu tehniku koristili mnogi autori da istražuju različite probleme u akustici prostorija [Kuttruff, 1991]. Prvi koji su upotrebili računare za simulaciju akustičkog odziva koncertnih dvorana bili su Krokstad, Strom i Sorsdal 1968. godine [Krokstad, Strom, Sorsdal, 1968]. Oni su generisali akustički impulsni odziv prostorije računarskom simulacijom, eksperimentišući sa mnoštvom parametara koje su lako mogli da menjaju pri simulacijama. U međuvremenu, računarska simulacija akustičkog odziva se više ne koristi samo za sve tipove auditorijuma (koncertne dvorane), već i za fabrike i druge radne prostore [Ozgur, 2003].

Glavna prednost računarskih modela u odnosu na primitivne i skalirane fizičke modele je u mogućnosti preciznog modelovanja efekata difuznosti refleksija, za koje se ispostavilo da su veoma značajni za predikciju akustičkog odziva prostorije [Kim, Jang, Jeon, 2011]. U nastavku su objašnjene softverske realizacije matematičkih modela, poznate u literaturi kao numerički modeli u akustici. To su: modeli na osnovu statističke teorije, modeli na osnovu talasne jednačine, model zasnovan na teoriji likova, model zasnovan na Markovljevim lancima, modeli zasnovani na praćenju čestica zvuka, rej-trejsing modeli, modeli zasnovani na praćenju prostiranja zvučnog konusa, modeli površinskog zračenja i hibridni modeli.

Modeli na osnovu statističke teorije: Najpoznatiju formulu za određivanje vremena reverberacije u prostoriji izveo je Wallace Clement Sabine 29. oktobra 1898. godine. Ona glasi:

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{A} [s] \quad (2.1)$$

gde je V zapremina prostorije u kubnim metrima, a A ukupna apsorpcija u prostoriji data formulom:

$$A = \sum_i S_i \alpha_i \quad (2.2)$$

gde je S_i površina i -te površi prostorije, a α_i njen koeficijent apsorpcije. Sabinova formula je ujedno najstarija, najpoznatija i najkorišćenija formula za računanje vremena reverberacije u prostoriji. Dugo je korišćena za određivanje koeficijenta apsorpcije materijala na osnovu izmerenog vremena reverberacije. Sabinova formula je zasnovana na pretpostavci da u prostoriji postoji savršeno difuzno zvučno polje. Tamo gde to ni približno nije slučaj javljaju se odstupanja u odnosu na eksperimentalno izmerene rezultate.

Modeli na osnovu talasne jednačine: Modeli zasnovani na talasnoj jednačini, kao što je Metod Konačnih Elemenata (Finite Element Method - FEM) i Metod Graničnih Elemenata (Boundary Element Method - BEM), daju veoma tačne rezultate na pojedinačnim frekvencijama. Ipak, s obzirom da broj sopstvenih frekvencija prostorije

raste sa trećim stepenom frekvencije, talasni modeli su ograničeni na niske frekvencije i manje prostorije.

Model zasnovan na teoriji likova: Ovaj metod je zasnovan na principu da se pravilna refleksija zvučnog zraka od ravni zida može geometrijski konstruisati kao lik u ogledalu izvora zraka u odnosu na ravan refleksije. U pravougaonoj prostoriji, nalik na kutiju za cipele, lako je konstruisati likove izvora do izvesnog reda refleksije. Međutim, u prostoriji nepravilnog oblika broj likova izvora raste eksponencijalno sa redom refleksija i stoga ovaj metod nije pogodan za prostorije nalik na koncertne sale. U tom slučaju je red refleksija od nekoliko stotina relevantan za dobijanje kvalitetnog akustičkog odziva.

Model zasnovan na Markovljevim lancima: Ruski matematičar Andrej Markov je početkom prošlog veka izneo teoriju koja opisuje prelasku sistema iz jednog stacionarnog stanja u drugo, sa određenom verovatnoćom. Pri tome verovatnoća prelaska u sledeće stanje ne zavisi od prethodnih stanja, tj. od istorije prelazaka, već samo od trenutnog stanja u kome se sistem nalazi. Ova teorija kasnije je dobila naziv „Markovljevi lanci“ po nizu prelazaka sistema između dva stanja.

Primenjen u akustici, ovaj model je zasnovan na funkciji verovatnoće, pri čemu se definiše verovatnoća prelaska zvuka sa jedne na drugu površinu prostorije. Jedno stanje sistema predstavlja slučaj kada se zvučni zrak nalazi upravo na jednoj površini prostorije. Verovatnoća prelaska sistema u naredno stanje zavisi od veličine posmatranih površina, kao i od njihovog međusobnog položaja.

Pretpostavimo da se prelasci dešavaju u tačno određenim intervalima vremena. Proces opadanja nivoa zvuka u prostoriji može se razmatrati kao proces apsorpcije zvuka u diskretnim vremenskim intervalima, koji odgovaraju srednjoj slobodnoj dužini puta u trodimenzionalnom zvučnom polju:

$$dt = \frac{4V}{cS} \quad (2.3)$$

gde je V zapremina prostorije, c brzina zvuka i S ukupna površina zidova prostorije. Pri tome treba uočiti da je $c \cdot dt = l$ srednja slobodna dužina puta u prostoriji. Na taj

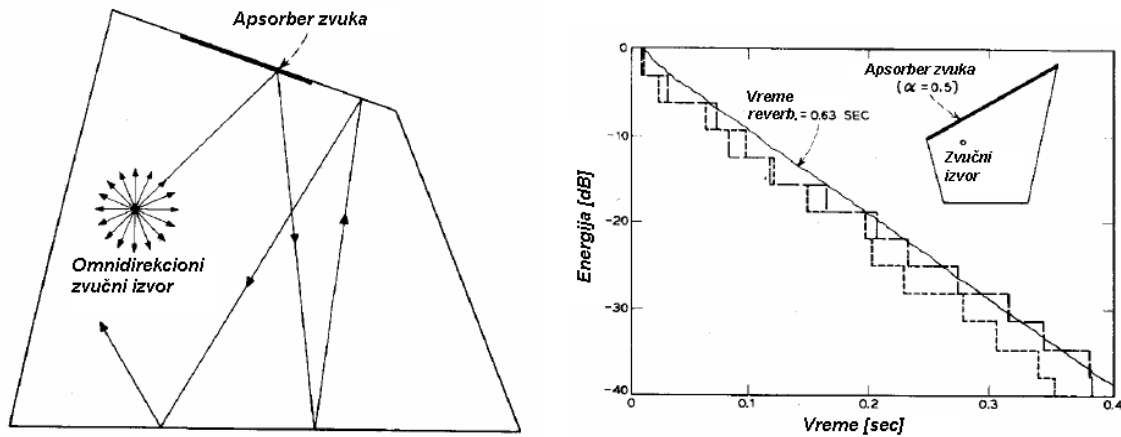
način se proračunava usrednjena kriva slabljenja zvuka, pri čemu se uzima u obzir lokacija apsorpcionog materijala na različitim površinama unutar prostorije.

Modeli zasnovani na praćenju čestica zvuka: Realističniji način da se simulira kriva opadanja nivoa zvuka je praćenje velikog broja zraka koje emituje zvučni izvor u svim pravcima unutar prostorije. Svaka čestica nosi izvesnu količinu energije zvuka, koja se redukuje posle svake refleksije srazmerno koeficijentu apsorpcije zida od koga se reflektovala. Kao što je prikazano na slici 2.8, rezultat je usrednjena kriva slabljenja zvuka prostorije, odakle se proračunava vreme reverberacije.

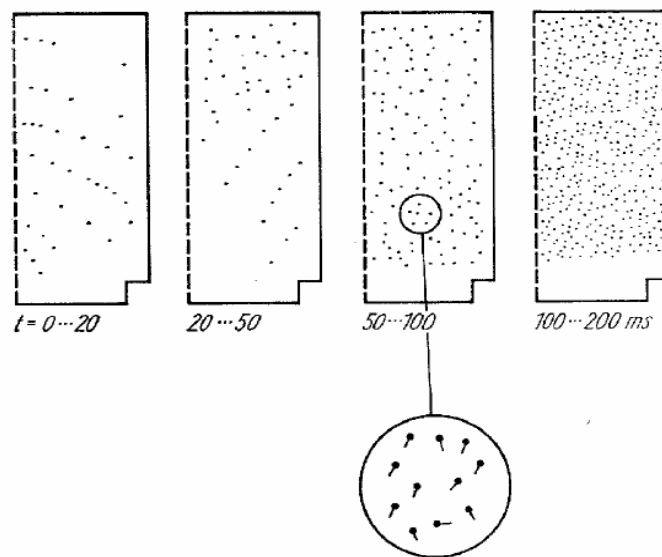
Rej-trejsing modeli: Prvi računarski model koji je korišćen za praktičan dizajn auditorijuma bio je rej-trejsing model. Pomoću geometrijskih zakona refleksije praćen je veliki broj zvučnih zraka od izvora do visokog reda refleksije [Rindel, 1997]. Glavni rezultat ovog ranog modela bila je raspodela pogodaka površina prostorije analizirana u podesnim vremenskim intervalima kašnjenja. To je predstavljalo kvalitativnu raspodelu zvuka u prostoru i vremenu. Za dublju analizu mogao se posmatrati i upadni ugao zraka prilikom refleksije od zida. Da bi dobili i kvantitativnu analizu bilo je potrebno uvesti prijemničke površine ili zapremine za detekciju zvučnih zraka (prijemna sfera) [Merkle, Mijić, 1986]. Tako je mogao biti izračunat aproksimativni impulsni odziv i korišćen za procenu nekih akustičkih parametara prostorije. Na slici 2.9 prikazane su tačke sudara zvučnih čestica sa zidom u različitim vremenskim intervalima (označeni na slici) nakon direktnog zvuka. Prikazani su uveličano i pravci zraka prilikom sudara sa zidom.

Modeli zasnovani na praćenju prostiranja zvučnog konusa: Alternativa prijemnoj zapremini, korišćenoj u rej-trejsing modelima, je tačkasti prijemnik u kombinaciji sa konusima koji imaju izvestan ugao otvorenosti oko zraka. Konusi sa kružnim poprečnim presekom imaju problem preklapanja sa susednim konusima. Konusi sa trougaonim poprečnim presekom rešavaju ovaj problem (piramidalni konusi) [Farina, 1995 a]. Na slici 2.10 prikazana je metoda praćenja prostiranja zvučnog konusa. Kružni konus određene otvorenosti tj. zadatog prostornog ugla polazi od izvora S i reflektuje se od prvog zida. Za konstrukciju refleksije koristi se lik izvora S'. Zatim

se reflektuje od drugog zida, S'' predstavlja lik izvora S drugog reda. Da bi pogodio prijemnik M reflektuje se i od trećeg zida. Na sličan način konstruiše se i refleksija trećeg reda.



Slika 2.8. Primer modela praćenja čestica zvuka; Levo: Prati se putanja nekoliko stotina zraka (samo jedan je prikazan); Desno: Usrednjena kriva slabljenja zvuka [Rindel, 2002].



Slika 2.9. Primer dobijenih rezultata iz prvog rej-trejsing računarskog modela [Krokstad, Strom, Sorsdal, 1968].

Modeli površinskog zračenja: Modeli površinskog zračenja predstavljaju tehniku proračuna razmenjene energije između dve površine. Razvijeni su '50-tih godina prošlog veka u oblasti termodinamike radi proučavanja zakona toplotnog zračenja, a

stekli su popularnost '80-tih godina u oblasti računarske grafike. Otprilike u to vreme predloženo je uvođenje ovakvog modelovanja i u akustiku. Nažalost, uvođenje vremenskog parametra koji je neophodan u akustici (za razliku od termodinamike) značajno povećava vreme potrebno za proračun.

U svom najjednostavnijem obliku, model zračenja pretpostavlja difuznu refleksiju od svih površina prostorije. To znači da pravci refleksija ne zavise od pravca upadnog zvučnog zraka i da podležu Lamberovom kosinusnom zakonu: $I(\theta) \sim \cos(\theta)$, pri čemu je I intenzitet zraka pod uglom θ u odnosu na normalu na površ refleksije. Uzimajući ovo u obzir i imajući u vidu apsorpciju zvuka od zidova i u vazduhu, zvuk propagira kroz prostoriju pri čemu svaka refleksiona površ postaje sekundarni zvučni izvor. Integraljenjem po svim površima dobijamo integralni oblik jednačine zračenja. Zatvoreni oblik rešenja jednačine zračenja postoji samo za nekoliko jednostavnih oblika prostorija, kao što su sferne i potpuno ravne prostorije.

U većini slučajeva jednačina zračenja se mora rešiti numerički. Ovo se radi diskretizacijom unutrašnjih površina prostorije na delove površi. Izvor zvuka zrači energiju ka svakom od ovih delova, koji zatim postaju sekundarni izvori zračenja. Korišćenjem Lamberovog zakona može se izračunati deo energije koji napušta jedan deo površi i upada na drugi. Prati se energija od jednog do drugog dela površi kroz celu prostoriju. Jednačina zračenja dobija oblik:

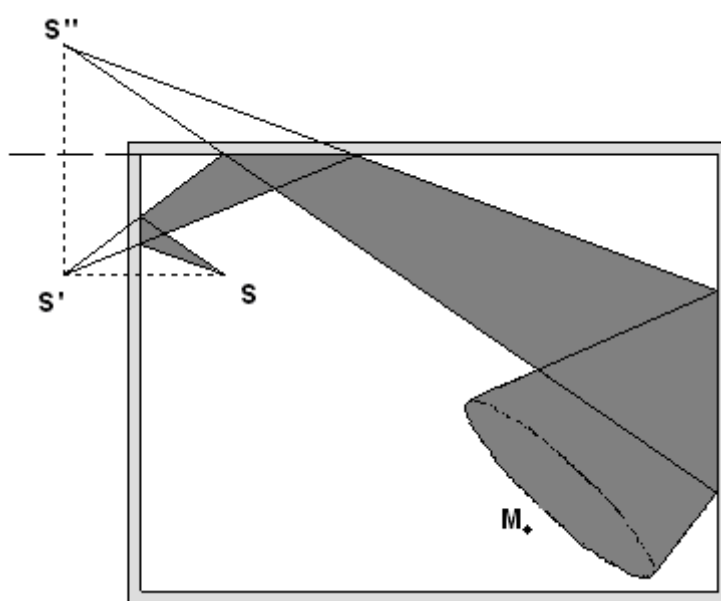
$$I_i(t) = E_i(t) + \rho_i \sum_{j=1}^n I_j(t - \frac{r_{ij}}{c}) F_{ij} e^{-mr_{ij}} \quad (2.4)$$

gde je n broj delova površi, ρ_i prosečan koeficijent refleksije dela i , $I_i(t)$ prosečan intenzitet energije koju emituje deo površi i u trenutku t kao sekundaran izvor, r_{ij} rastojanje između dela i i dela j , c brzina zvuka, m koeficijent apsorpcije zvuka u vazduhu, F_{ij} deo energije koju emituje deo i i koja upada na deo j , $E_i(t)$ prosečan intenzitet energije izračene sa dela i u trenutku t .

Hibridni modeli: Nedostaci klasičnih metoda su doveli do razvoja hibridnih modela, koji kombinuju najbolje osobine dve ili više metoda. Stoga moderni numerički modeli kreiraju pouzdane rezultate sa veoma malim vremenima potrebnim za proračun. Uključivanje efekata difuznosti refleksija zvuka i refleksije koje zavise od upadnog

ugla zraka sa pomerenom fazom učinili su mogućim proračun impulsnog odziva prostorije sa visokim stepenom realizma.

Kod hibridnih modela, kao i kod svih metoda koje su uključene u hibridni model, moguće je uvesti auralizaciju preko HRTF (Head Related Transfer Function) prenosne funkcije za dobijanje binauralnog impulsnog odziva prostorije. Za dobijanje auralizacije visokog kvaliteta vrši se konvolucija binauralnog odziva sa zvučnim snimkom napravljenim u anehoičnim uslovima (“gluva soba”). Na slici 2.11 prikazano je prvih 600 ms, ali je u ovom primeru proračunati impulsni odziv dugačak 2s.

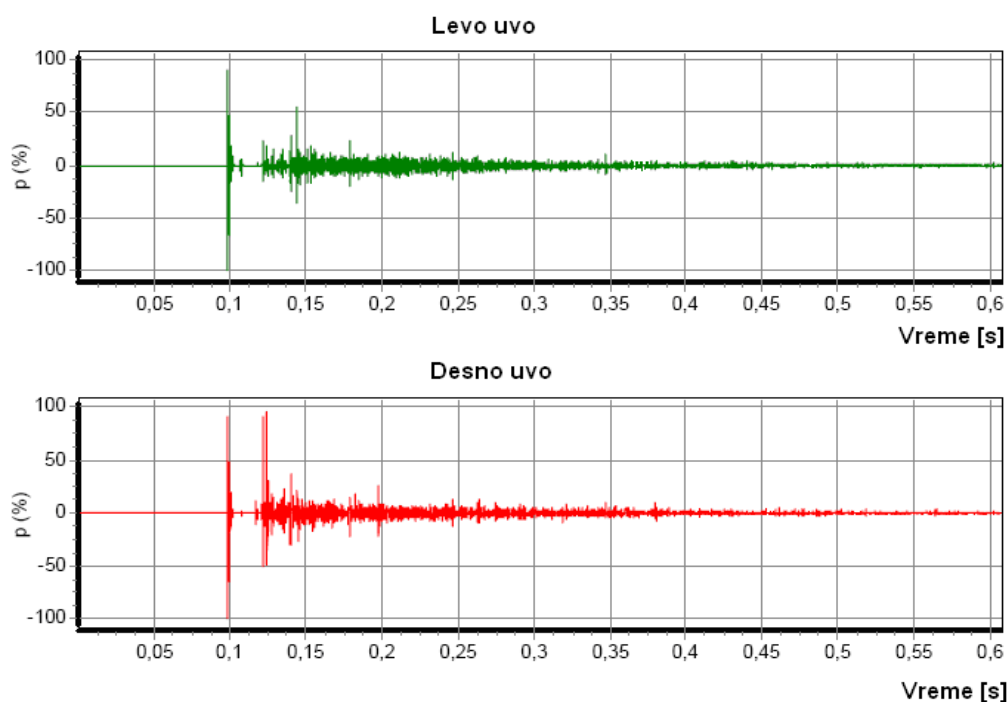


Slika 2.10. Praćenje kružnog konusa od izvora S do prijemnika M [Rindel, 2002].

Uporedni pregled računarskih modela: Poređenje računarskih modela dato je pregledno u tabeli 2.3. Iz tabele 2.3 se vidi da su numerički modeli razvijani tokom čitavog prošlog stoleća. Samo talasni modeli i donekle modeli zasnovani na teoriji likova kvalitetno modeluju akustički odziv na niskim frekvencijama, dok je većina ostalih metoda prilagođena visokim frekvencijama zvuka.

Tačkasti izvor se može modelovati u većini računarskih metoda, dok samo rej-trejsing, modeli površinskog zračenja i hibridni modeli mogu sadržati linijske i površinske izvore. Slično zapažanje važi i kada je u pitanju usmerenost zvučnog izvora, tačkasti prijemnik i prijemnik u obliku rešetke. Raspodelu zvuka mogu prikazati samo poslednje četiri metode, međutim zapreminsko usrednjavanje zvučne

energije mogu izračunati samo Statistička teorija, Markovljevi lanci i praćenje čestica. Površinska apsorpcija se može modelovati svim pobrojanim metodama. Rane refleksije i eho u 3D se mogu modelovati samo modelom likova, rej-trejsing metodom, metodom praćenja konusa i hibridnim metodama [Naylor, 1992]. Efekti difuznosti refleksija se modeluju u svim metodama od '70-tih godina naovamo, sa izuzetkom teorije likova i Markovljevih lanaca, tj. od kada je i utvrđen njihov značaj za proračun kvalitetnog akustičkog odziva.



Slika 2.11. Primer binauralnog impulsnog odziva prostorije izračunatog za projekat jedne nove opere; Na ordinati je relativna amplituda zvučnog pritiska [Rindel, 2002].

Efekti difrakcije se mogu modelovati samo talasnim modelima. Sprengnute prostorije nije pogodno modelovati Statističkom teorijom, teorijom likova i Markovljevimi lancima. To važi i za računanje impulsnog odziva. Za računanje vremena reverberacije nije pogodno koristiti talasne modele i teoriju likova. ISO 3382 parametre izračunavaju jedino modeli površinskog zračenja i hibridni modeli, dok se za dobijanje auralizacije još mogu koristiti i rej-trejsing i praćenje konusa [ISO 3382, 2009]. Interesantno je primetiti da je Statistička teorija najbrža za modelovanje i simulaciju, dok su talasni modeli najsporiji.

Tabela 2.3. Karakteristike računarskih modela.

Potrebno vreme vrednovano je na skali od 1 (veoma brzo) do 5 (veoma sporo)

(X označava da je karakteristiku moguće modelovati,
dok (X) označava da je to moguće samo delimično).

	Statistička teorija	Talasnici modeli	Teorija likova	Markovljevi lanci	Praćenje čestica	Rej-trejsing	Praćenje konusa	Modeli površinskog zračenja	Hibridni modeli
Najraniji izveštaji	1900		1979	1975	1970	1968	1986	1993	1989
Model niskih frekvencija		X	(X)						
Model visokih frekvencija	X		X	X	X	X	X		X
Tačkasti izvor		X	X	X	X	X	X	X	X
Linijski izvor						X		X	X
Površinski izvor						X		X	X
Usmerenost izvora			X			X	X	X	X
Tačkasti prijemnik		X	X			(X)	X	X	X
Rešetka prijemnika		X				X	X	X	X
Raspodela zvuka						X	X	X	X
Zapreminsko usrednjavanje	X			X	X				
Površinska apsorpcija	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Rane refleksije			X			X	X		X
Eho u 3D			X			(X)	(X)		X
Efekti difuznosti refleksija					X	X	X	X	X
Efekti difrakcije		X							X
Spregnute prostorije		X			X	X	X	X	X
Impulsni odziv			(X)			(X)	(X)	X	X
Vreme reverberacije	X			X	X	(X)	(X)	X	X
ISO 3382 parametri						(X)	(X)	X	X
Auralizacija			(X)			X	X	X	X
Vreme modelovanja	1	5	3	3	3	3	3	3	3
Vreme simulacije	1	5	5	1	1	4	4	3	2

3 Geometrijsko modelovanje zvučnog polja u prostoriji

Geometrijsko modelovanje akustike praktikuje se već skoro 50 godina. Ove tehnike modelovanja igraju važnu ulogu u akustičkom dizajnu prostorija danas, najčešće uključujući auralizaciju, ali takođe pomažu i pri konstrukciji virtuelnih okruženja kao što su računarske igrice, kognitivna istraživanja i razne vrste računarskih obuka i treninga [Svensson, 2002]. Ovde će biti prikazani pre svega glavni geometrijski principi računarskog modelovanja akustike prostorija, kameni temeljci na kojima ovi principi počivaju i trenutno stanje u ovoj oblasti do kojih su ove tehnike dovele. Fokus je dat pre svega mogućnostima modelovanja različitih aspekata propagacije zvuka, kao što su spekularne i difuzne refleksije [Nironen, 2004], i difrakcione pojave.

Motivacija za modelovanje akustike prostorija leži u potrebi da se omogući pravljenje konstrukcija sa boljim akustičkim okruženjem [Kamisinski, 2010]. Ovo je pre svega važno u koncertnim halama i drugim akustički izazovnim prostorima, kao što su pozorišta i studiji [Jeon, Lee, Vorlander, 2004]. Ne manje bitan je i akustički ambijent u učionicama, železničkim stanicama i drugim javnim mestima, pa čak i u privatnim stanovima. Modelovanje pruža akustičke attribute koji karakterišu akustičke uslove ili daju mogućnost slušanja akustike prostora koji se još uvek nalazi u fazi dizajna, što se zove auralizacija [Rindel, Christensen, 2003].

U geometrijskoj akustici, sve talasne pojave vezane za prostiranje zvuka se zanemaruju i uzima se pretpostavka da se zvuk prostire kao zraci. Ova pretpostavka važi na visokim frekvencijama, gde je talasna dužina zvuka kratka u poređenju sa dimenzijama površi i celokupnim dimenzijama prostora, ali na nižim frekvencijama ova aproksimacija dovodi do grešaka pri proračunu, koje rastu sa porastom talasnih fenomena kako oni igraju sve veću ulogu. Stoga se geometrijske tehnike smatraju bržim, ali manje tačnim tehnikama.

U praksi, tehnike geometrijske akustike su široko u upotrebi pri modelovanju akustičkog ponašanja prostorije na srednjim i visokim frekvencijama. To je slučaj već decenijama. Maa je primetio još 1941. godine [Maa, 1941] da na rigoroznim zakonima fizičke akustike insistiraju „teorijski istraživači“, ali da je geometrijska akustika

omiljena među praktičarima. Štaviše, on je izneo ovo sasvim tačno tvrđenje još mnogo godina pre nego što su računari počeli da se primenjuju za simulaciju akustike prostorija.

Posebno mesto imaju tehnike koje se mogu koristiti za simulaciju propagacije zvuka unutar trodimenzionalnih prostora (3D) kako bi se dobio impulsni odziv i/ili energetski odziv u vremenu. Hronološki gledano, to se odnosi na razvoj modelovanja u periodu posle čuvenog rada Krokstada i drugih [Krokstad, Strom, Sorsdal, 1968] iz 1968. godine, koji je koristio rej-trejsing za računanje energetskog odziva u vremenu i pokazao njegovu primenjivost pri praktičnom akustičkom dizajnu prostorije. Ove spadaju i tehnike modelovanja koje su razvijane za druge oblasti primene, kao što su aplikacije virtuelne realnosti, kognitivna istraživanja, akustička arheologija i različite obuke [Kudoh, Y. Aoki, N. Aoki, 1998]. Sa gledišta algoritma i računarskog vremena ove tehnike su veoma slične, iako su zahtevi za performansama i tačnošću različiti.

U ovom poglavlju je fokus na teorijskom aspektu različitih metoda geometrijske akustike, što znači da se mnoštvo praktičnih rutina koje se odnose na dobijanje i unos ulaznih podataka, neizvesnost podataka, i praktičnu realizaciju ovih tehnika zanemaruje. Praktično, fokus je na mogućnostima ovih tehnika. Ove mogućnosti određuju granicu postizanja tačnosti simulacije, ali finalna tačnost i sposobnost da se što bliže priđe merenju iz eksperimenta zavisi od velikog broja faktora. Takav slučaj je i sa detaljnim poređenjem brzine računarske simulacije na osnovu različitih tehnika.

3.1 Osnovi Geometrijske akustike

Glavni cilj pri simulacijama akustike prostorija je da se pruži energetski dijagram u vremenu i/ili impulsni odziv koji se mogu iskoristiti za računanje različitih atributa kao što su vreme reverberacije, T60, i indeks jasnoće, C50. Izazovnija primena rezultata modelovanja je pri auralizaciji, što je termin koji je formulisao Kleiner i drugi 1993. godine. Prema njihovoj definiciji, auralizacija je proces dobijanja čujnog zvučnog polja izvora u prostoru, pomoću fizičkog ili matematičkog modelovanja, na takav način koji simulira binauralno iskustvo slušaoca lociranog na datoj poziciji u modelovanom prostoru. Osnovni principi takvog auralizacionog

tako da pojedinačne refleksije nisu više važne. Ovo znači da zvučno polje započinje superpozicijom različitih individualnih refleksija koje postepeno postaju sve više i više difuzne [Christensen, Rindel, 2011]. Stoga, bilo koji refleksioni put na kraju postaje statistički umesto što predstavlja idealni spekularni put refleksije. Sa gledišta modelovanja ovo znači da tehnika treba da bude u stanju da adresira i difuzne refleksije, pored spekularnih, kako bi obezbedila realističnu predikciju [Dalenback, 1996]. Ovo je ranije utvrđeno na prvoj Round Robin konferenciji [Vorlander, 1995 a], na kojoj su poređeni alati za modelovanje akustike prostorija. Tehnike koje su uključivale difuzne refleksije su davale bolje rezultate od drugih tehnika.

3.2 Geometrijska akustika u praktičnoj primeni

Sabin je koristio model baziran na praćenju zraka u akustici, početkom prošlog veka, da ispita prostiranje zvučnih putanja korišćenjem Šliren fotografije [Sabine, 1922]. Njegove impresivne vizuelizacije prikazuju talasne frontove koji su pojačani zracima koji su normalni na talasne frontove. Takve slike, dobijene iz fizičkog skaliranog modela mogu se smatrati prvim korakom ka kompjuterizovanom rej-trejsingu. Koncept srednje vrednosti slobodne putanje je takođe blizak geometrijskoj akustici zato što meri prosečno rastojanje koje zrak pređe između susednih refleksija u datoj geometriji. Ova mera služi kao jedna od bazičnih veličina u formuli za vreme reverberacije koju su izveli Sabin i Ajring. Važnost pristupa geometrijske akustike kada je talasna dužina zvuka mala u poređenju sa dimenzijama prostorije je prikazana 1929. godine. Prvi računarski model koji je korišćen za proračun srednje dužine slobodnog puta predstavili su Allred i Newhouse 1958. godine [Allred, Newhouse, 1958]. Atal i Šreder su demonstrirali proračun globalne krive opadanja energije u dvodimenzionalnoj prostoriji (2D) korišćenjem rej-trejsinga 1967. godine [Atal, Schroeder, 1967], dok je prvi metod za računanje akustičkog odziva prostorije za različite pozicije prijemnika uveo Krokstad i drugi 1968. godine.

Prvi članak sa pregledom računarskog modelovanja u akustici objavio je Šreder 1973. godine. U ovom radu on izveštava o auralizaciji koncertne hale koje je iskorišćeno prilikom njenog renoviranja i tvrdi da će računari promeniti polje dizajna koncertnih hala. U to vreme, mogućnosti računara su bile toliko ograničene da on

smatra tehnike modelovanja zasnovane na talasnoj jednačini nemogućim za primenu i da je geometrijska akustika jedini praktični pristup akustičkom modelovanju prostorije. Opšte gledano, primenjivanje računarskog modelovanja je veoma sporo ulazilo u praksu. U 1981. godini Gilbert tvrdi da će proračun vremena reverberacije hemisferične kupole koštati „nešto više dolara“ i da „realističniji oblik auditorijuma je ostvarljiv, ali će koštati nekoliko stotina dolara po konkretnom slučaju“. Ipak, Krokstad i drugi su objavili sumarni rad 1983. godine u kojem opisuju nekoliko slučajeva izvedenih pomoću rej-trejsing sistema za vreme prethodnih 15 godina. Kao dodatak, 1989. godine Ondet i Barbry su izvestili o simulacijama pomoću rej-trejsinga za mape šuma u radionicama za koje su rezultati bili u dobroj saglasnosti sa merenjima [Ondet, Barbry, 1989]. U 1991. godini Kuttruff objavljuje pregled u kome još uvek vidi da praktična računarska primena modelovanja akustike prostorija, auralizacija i određivanje akustičkih atributa, pripada budućnosti.

Bum u istraživanju modelovanja akustike prostorija pomoću računara pojavio se ranih 1990-tih godina. Najnoviji komercijalni alati za modelovanje, kao što je ODEON, CATT-Acoustic i EASE, su pokrenuti baš u to vreme [Odeon, 2017]. Od tada, brojni naučni radovi su uveli poboljšanja u tehnike modelovanja, kao i studije slučajeva koje su imale za cilj da vrednuju takve tehnike. Tri Round Robin konferencije na kojima su poređeni rezultati dobijeni pomoću različitih tehnika modelovanja međusobno i sa rezultatima merenja, koje su održane 1995., 2000. i 2005. godine predstavljaju kamene temeljce u ovoj oblasti [Vorlander, 1995 b]. Iscrpan pregled različitih tehnika modelovanja akustike prostorija su predstavili 2002. godine Svensson i Kristiansen [Svensson, Kristiansen, 2002].

Upotreba računara u akustičkom dizajnu prostorija je postala sve više popularna tokom godina. Ipak, čak i danas se konstruišu skalirani fizički modeli kao podrška računarskim simulacijama u nekim projektima koncertnih hala. Kao dodatak akustičkom dizajnu prostorija, kompjuterske igrice su počele da koriste tehnike za modelovanje kako bi pružile igraču što realističniji zvuk. Osnovni cilj audia za igrice je da efikasno postigne prihvatljivu auralizaciju, dok je kod akustičkog dizajna tačnost simulacije primaran cilj a brzina proračuna sekundaran.

3.3 Geometrijska akustika i računarska grafika

Principi geometrijske akustike su veoma opšti, i slične tehnike modelovanja, posebno rej-trejsing i radiosity [Hodgson, Nosal, 2006], se primenjuju u brojnim drugim poljima kao što su optika i podvodna akustika [Davis, Fleming, 1926]. Takvi principi se ipak najviše uočavaju u računarskoj grafici, gde je analogni problem akustičkoj refleksiji definisan kao globalna osvetljenost, pri čemu se računarski simulira ponašanje svetla. Treba primetiti da čak i prvi rad koji se bavi računarskom grafikom datira iz iste godine kao i čuveni rad Krokstada i drugih. Mada su ove dve oblasti istraživanja potpuno nezavisne, postoje očigledna preklapanja, pa je svojevremeno razmatrano i postojanje konvergencije ove dve oblasti. Ovo je rezultovalo publikacijom nekih rezultata vezano za performanse akustičkog modelovanja koja je objavljena na forumu računarske grafike.

Ono što je zajedničko za sve tehnike geometrijske akustike je da ove tehnike zahtevaju izvestan broj geometrijskih proračuna, posebno kada se traži presek zraka i geometrijskih oblika u 3D prostoru. Opšti pristup za ubrzanje takvih operacija je korišćenje različitih prostornih struktura podataka, kao što su granične zapreminske hijerarhije, kd-drva, binarna podela prostora, i oni se veoma često nalaze u sistemima za modelovanje akustike.

3.4 Osnovni modeli geometrijske akustike

Propagacija zvuka u vazduhu i modeli refleksije zvuka za različite tipove površi predstavljaju dva osnovna aspekta geometrijske akustike [Antonacci et al., 2004]. Kombinovanje ova dva aspekta i njegova uzastopna primena čini kompletan model geometrijske akustike. Matematički formulisano ovaj model je integralna jednačina, koji daje okvir za opisivanje bilo koje tehnike zasnovane na geometrijskoj akustici. Postoji i nekoliko modela koji dodaju i efekte difrakcije na ivicama reflektujućih površina i na taj način proširuju važenje tehnika geometrijske akustike.

3.4.1 Propagacija zvuka u vazduhu, pritisak naspram energije

Metode geometrijske akustike najčešće adresiraju energiju i kašnjenje prostiranja svakog zvučnog talasa, kao i vidljivost energetske doprinosa posmatrano iz tačke prijema. Za tačkasti izvor zvuka, doprinos energije je:

$$p^2 \sim V \frac{1}{r^2} \quad (3.1)$$

gde je V faktor vidljivosti jednak 1 kada postoji vidljivost od izvora ka prijemniku (inače je 0), pri čemu je kašnjenje prilikom prostiranja $t = r/c$. U energetske baziranim tehnikama modelovanja, takvi energetske doprinosi se sumiraju u diskretizovanim vremenskim intervalima, dok se frekvencijska zavisnost adresira posmatranjem različitih opsega. Pri tome refleksije uvode neke dodatne faktore, a može se uvesti i disipacija zvuka u vazduhu. Osnovna osobina ovih tehnika je da ignorišu interferencione efekte koji su rezultat ovakvih energetske sumiranja. Ovaj pristup vodi do ehograma, ili energetske odziva u vremenu, $p^2(t)$, koji je dovoljan za određivanje vremena reverberacije i drugih akustičkih parametara zasnovanih na energiji zvuka.

U tehnikama modelovanja zasnovanim na pritisku zvuka, faza zvučnog pritiska se izvlači konstrukcijom kompleksne amplitude zvučnog pritiska, p , za svaki doprinos talasnog broja $k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$,

$$p = \sqrt{p^2} e^{-jkr} \quad (3.2)$$

gde su interferencioni efekti između zvučnih talasa na ovaj način uvedeni, zato što se sumiranje vrši nad zvučnim pritiscima a ne nad energijama. Razmatranjem kompleksnog pritiska mogu se uvesti fazni pomeraji prilikom refleksija, ako je poznata kompleksna impedansa zida. Konverzija iz impulsnog odziva $p(t)$ u energetske odziv $p^2(t)$ se izvodi pravolinijski kvadriranjem impulsnog odziva. Konverzija u obrnutom smeru nije trivijalna zato što energetske odziv sadrži manje informacija nego odgovarajući impulsni odziv. Ipak, impulsni odziv je najčešće potreban za auralizaciju. Kako bi razrešio ovaj problem, Kuttruff je predložio algoritam za takvu konverziju.

Najzad, geometrijska akustika se najčešće nedvosmisleno povezuje sa pristupom gde je doprinos izvora kao monopola

$$p \sim V \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (3.3)$$

što se očigledno slaže sa tehnikom restauracije faze pritiska iz konstrukcije kompleksnog pritiska, opisane iznad.

3.4.2 Modeli refleksije

Dodirna površ između dve različite sredine će modifikovati upadno zvučno polje na različite načine. Beskonačna površina generiše reflektovane i transmitovane talase. Konačna površina generiše difuzno talasno polje, i u specijalnom slučaju mnogougona, difuzno zvučno polje se može rastaviti na reflektovane i difraktovane talase. Najzad, za neravnu površ se obično kaže da generiše reflektovane talase i raspršene komponente [D'Antonio, Cox, 2000].

Beskonačna ravna površina: Za najjednostavniji slučaj beskonačne, ravne i glatke površi koja je pogođena upadnim talasom, generišu se reflektovani i transmitovani talasi. Iz trenutne perspektive posmatranja, samo su reflektovani talasi od interesa, i možemo sa sigurnošću pretpostaviti da je sredina kroz koju se kreće upadni talas vazduh. Druga sredina na dodiru vazduha i udarne površine upada u kategoriju ili lokalne reakcije ili produžene reakcije. Model lokalne reakcije je pojednostavljenije u kojem druga sredina je takvog tipa da je interakcija između dve sredine u jednom smeru. Ovo znači da talasi koji uđu u drugu sredinu se nikada ne vraćaju u prvu, dok u produženoj reakciji interakcija može biti komplikovanija. Model lokalne reakcije se najčešće koristi u akustici prostorija i primenjiv je u geometrijskoj akustici čak i sa poroznim materijalima koji potpadaju pod pretpostavku lokalne reakcije.

Eksplisitan izraz za reflektovani talas je dat teorijom likova, gde se lik izvora dobija od površi refleksije. Treba primetiti da se ovde teorija likova odnosi na refleksiju od samo jedne površine, dok se može uvesti i modelovanje pomoću teorije likova u celokupnoj prostoriji. Teorija likova je tačna za sferne talase i tvrdu površ. Teorija likova je takođe asimptotski tačna za visoke frekvencije, sferne upadne talase i bilo koju impedansu površine sa lokalnom reakcijom. Ova asimptotska validnost je

primenjena u geometrijskoj akustici, pri čemu se teorija likova koristi u smislu ekvivalentnog ravanskog koeficijenta refleksije R :

$$R(\theta) = \frac{Z_s \cos \theta - \rho c}{Z_s \cos \theta + \rho c} \quad (3.4)$$

gde je Z_s impedansa površine, θ upadni ugao i ρc označava impedansu vazduha. Koeficijent refleksije ravanskog talasa je tačan sve dok je izvor ili prijemnik na nekoliko talasnih dužina daleko od beskonačne refleksione površine. Tačno rešenje se može proračunati korišćenjem metode ekvivalentnog kompleksnog izvora, gde polubeskonačna linearna distribucija likova predstavlja reflektujuću površinu. Ipak, u praksi, koeficijent refleksije ravanskog talasa je uglavnom dovoljan i odgovarajući za tehnike geometrijske akustike bazirane na pritisku. Posebno, koeficijenti refleksije za normalan upadni talas, $\theta = 0^\circ$, su podaci koji se dobijaju merenjima impedansi materijala u cevima.

Za uobičajenije tehnike geometrijske akustike bazirane na energiji, koristi se koeficijent apsorpcije α :

$$\alpha(\theta) = 1 - |R(\theta)|^2 \quad (3.5)$$

gde je informacija o fazi očigledno izgubljena. Ugaono zavisani koeficijent apsorpcije $\alpha(\theta)$ ili koeficijent apsorpcije za slučajni upadni ugao α_{rand} usrednjen po upadnim uglovima θ je veličina koja se koristi pri različitim implementacijama tehnika geometrijske akustike. Ipak, podaci koji su dostupni za površinske materijale se tipično mere prema standardima za vreme reverberacije prostorije, sa oktavnim ili ternom rezolucijom za opseg 100Hz – 5kHz, i sistematske greške između takvih podataka i pravih α_{rand} koeficijenata su već dugo vremena predmet proučavanja. Rindel je preporučio metodu za procenu ugaone zavisnosti koeficijenta refleksije za slučajni upadni ugao α_{rand} uzimajući realnu vrednost za impedansu [Rindel, 1993], a procenu upotrebljivosti impedanse naspram graničnih uslova koeficijenta apsorpcije je prezentovao Jeong [Jeong, 2012].

Zakrivljene površi: Konkavne površi često proizvode problem u akustici prostorija zbog fokusiranja talasa. Modelovanje takvih površina zahteva specijalnu pažnju u metodama zato što teorija likova pomaže samo u slučaju ravnih površina. Tipična procedura u geometrijskoj akustici je podeliti zakrivljenu površinu na male

mnogougonaonike i primeniti teoriju likova na svaki delić zasebno. Ovaj pristup je dovoljno tačan u oblastima koje nisu bliske žiži, ali za modelovanje zvučnog pritiska u žiži potrebno je modelovanje na bazi talasne jednačine [Marbjerg et al., 2015].

U izvesnim metodama, kao što je rej-trejsing, nema potrebe za eksplicitnom podelom zakrivljenih površi, umesto toga rej-trejsing može biti lokalno primenjen u tački refleksije. U praksi, ovo zahteva da površ bude predstavljena u takvom obliku da presek zraka i površi, i pravac odgovarajuće refleksije, može biti efikasno izračunat. U nastavku ovog poglavlja, zakrivljene površi neće biti posebno tretirane u odnosu na ravne, primenjeni modeli refleksije se mogu primeniti na parčićima ravnih površina na koje su zakrivljene površi izdvojene.

Neravne površi: Površi u realnom svetu nisu idealno glatke i ravne, već uključuju različite nepravilnosti. Nepravilnosti koje su značajno manje od talasne dužine zvuka mogu biti zanemarene zato što ne utiču na refleksiju, dok nepravilnosti koje su znatno veće od talasne dužine mogu biti shvaćene kao zakrivljene površi ili lokalno čak kao ravne površine. Ipak, nepravilnosti koje su reda veličine kao talasna dužina zvuka mogu imati veliki uticaj na refleksiju zvuka. Ovo znači da jedan koeficijent apsorpcije ili kompleksna impedansa nisu dovoljni da opišu akustička svojstva takve površi ili materijala, čak i ako je koeficijent frekvencijski zavisna. Umesto toga, potrebna su kompleksnija merenja u modelovanju takvog materijala.

Sketering od valovitih zidova je razmatrao ranije [Rayleigh, 1945]. Ponašanje površi sa nepravilnostima je istraživao 1950-tih Twersky [Twersky, 1957] i između 1950. i 1960. Biot. Sa trenutne tačke gledišta, najvažnije rezultate je objavio Biot 1968. godine [Biot, 1968], s obzirom da je Biot-ov model veoma opšt i odnosi se na nekoliko tipova neravnina površi. Refleksija se može opisati skupom zračćih dipola. Ovo pruža jedan elegantan dodatak teoriji likova. U praksi, ovo znači da se refleksija od neravne površi razvlači u vremenu, dok u rešenju teorije likova jedan impuls ostaje jedan impuls u refleksiji. Siltanen i drugi su opisali kako primeniti ovaj model refleksije u praksi pomoću praćenja zvučnih snopova [Siltanen et al., 2007]. Njihov rezultat pokazuje da iako vrednosti akustičkih atributa prostorijske ostaju u okviru jedva primetnih razlika, model rezultuje u čujnim zvučnim razlikama pri auralizaciji.

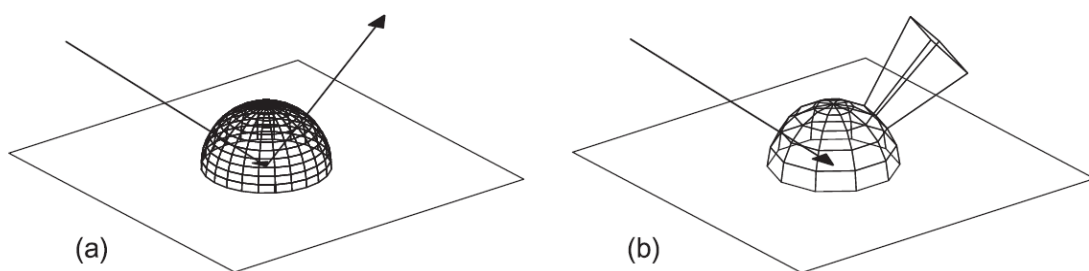
a. Sketering i koeficijent difuznosti. Umesto korišćenja celokupnog Biot-ovog modela, najčešće se primenjuje značajno jednostavnija aproksimacija. Sketering koeficijent je najčešće parametar koji se koristi da opiše neravnine na površi. Ovaj koeficijent se definiše kao odnos ne-spekularno reflektovane energije i ukupno reflektovane energije, i može se iskoristiti da se jednostavno podeli reflektovana energija na dve komponente, spekularnu i difuznu, dok vrednost 1 odgovara potpuno difuznoj refleksiji u kojoj nema spekularne komponente. Može se primetiti da vrednost 1 ne govori ništa o raspodeli ove difuzne energije. Obrnuto, vrednost 0 govori o idealno spekularnoj refleksiji. Sketering koeficijent se može izmeriti i najčešće se primenjuje u tehnikama modelovanja geometrijske akustike [Gomes, Vorlander, Gerges, 2004]. Difuzna komponenta se najčešće interpretira pretpostavkom Lamberove refleksije koja reflektuje difuznu energiju po prostornom uglu proporcionalno kosinusu ugla refleksije, stoga posmatrano iz svakog ugla prema tački refleksije ima isto zračenje. Lamberova refleksija vuče koren iz proučavanja refleksije svetlosti na neravnoj površi i posledično je model primenjen za visoke frekvencije, koji je ipak pronašao široku primenu u akustici.

Sketering koeficijent ne treba mešati sa koeficijentom difuznosti, koji opisuje neregularnosti u načinu refleksije, gde vrednost 1 odgovara potpuno uniformnoj raspodeli refleksije, što je kontrast u odnosu na Lamberov zakon, a vrednost 0 označava da se sva energija reflektuje u samo jednom pravcu [Hanyu, 2010]. Trenutne tehnike koriste samo sketering koeficijent, zato što nema jasnog objašnjenja kako treba primeniti koeficijent difuznosti. Odgovarajuće objašnjenje bi trebalo da pruži više informacija od jednog običnog koeficijenta. Ovi podaci mogu se predstaviti funkcijama bidirekciono raspodele refleksija (BRDFs), kao što se nadalje ovde opisuje.

b. BRDFs. Još jedan aspekt komplikovanih karakteristika refleksije je dat pomoću BRDFs (Bidirectional Reflectance Distribution Function) koje se mogu primeniti u tehnikama geometrijske akustike. Njihovo poreklo je iz sveta optike, i često se koriste u računarskoj grafici. Ove funkcije pružaju odnos upadne i reflektovane energije kao funkciju upadnog i odbojnog ugla za datu frekvenciju; ipak, u akustici, kompletnija forma uključuje i vremensku raspodelu (recimo kada je površina promenljive konfiguracije poput površine mora), iako se ona u praksi

zanemaruje. Dodatno, najčešće se pretpostavlja rotaciona nepromenljivost, na taj način smanjujući problem za jednu dimenziju, tako da se razmatra samo ugao elevacije upadnog zraka, a azimutalni ugao se zanemaruje. Ovako dobijamo 3D funkciju za datu frekvenciju tako da reflektovana energija pri izvesnim uglovima elevacije i azimuta zavisi samo od ugla elevacije upadne energije. Ovaj model refleksije se može iskoristiti u nekoliko različitih tehnika modelovanja akustike prostoriya.

Spekularna refleksija rezultuje u odzivu na vrhu nalik na Dirakovu delta funkciju tako da je sva energija reflektovana u jednom pravcu, dok funkcija uzima vrednost 0 drugde. Nasuprot tome, funkcija koja se koristi za modelovanje idealne difuzne refleksije je konstantna kroz celu polusferu refleksije. U praksi, akustičke BRDFs su kompleksnije i sadrže elemente obe ekstremne situacije. Bilo kako bilo, ne postoje podaci dostupni koji bi omogućili konstrukciju potpunih BRDFs za tipične materijale. Umesto toga, tipična BRDF je mešavina idealne spekularne i idealne difuzne refleksije. Na slici 3.2(a) prikazana je idealna BRDF koja uključuje ove dve komponente a na slici 3.2(b) tipična predstava diskretizacije koja transformiše idealnu spekularnu komponentu u više difuznu komponentu. Uzimanje idealno spekularne komponente u BRDF zahteva specijalno razmatranje zato što dovodi do beskonačno uskog snopa koji uvodi numeričke izazove u priču.



Slika 3.2. BRDF opisuje kako se zvučna energija reflektuje u različitim pravcima. (a) Idealizovana BRDF je sastavljena od polusfere u slučaju difuzne refleksije i od impulsa nalik na Diraka za spekularnu refleksiju. (b) Praktična diskretizacija u kojoj je spekularna refleksija raspršena u datom prostornom uglu [Savioja, Svensson, 2015].

Konačne površi: Prethodno su razmatrani različiti tipovi beskonačnih površi; ipak, za konačnu površinu moraju se uzeti u razmatranje dodatni efekti. Za slobodno viseći konačni reflektor bez apsorpcije ili površinskog sketeringa, reflektovani zvuk će imati efekat filtera visokih frekvencija, kao i interferencione efekte iznad gornje granične frekvencije filtra i asimptotski će težiti koeficijentu refleksije beskonačnog zida [Hargreaves, 2000]. Rindel je predložio pojednostavljeni model za ovaj efekat filtera visokih frekvencija zasnovan na Kirchoff-ovoj aproksimaciji. Dva ekvivalentna ali suprotstavljena pogleda mogu biti iskorišćena da opišu efekte konačne površine. Snaga refleksije može se modifikovati prema različitim modelima kao što je prikazano u literaturi [Farina, 2000]. Alternativno, difrakcioni talasi koji potiču od ivica i suprotnog polariteta mogu biti dodati refleksiji i proizvesti isti efekat filtera visokih frekvencija kao i interferencione efekte. Upravo spomenuti pristup omogućuje uglovima koji povezuju ravni da budu razmotreni. Treba primetiti da se može pojaviti slaba spekularna refleksija na niskim frekvencijama, kao i odgovarajući veći iznos sketeringa u svim pravcima [Schroder, Pohl, 2013]. Ipak, za konačnu površinu, slaba spekularna refleksija odgovara slučaju da talas nastavlja da putuje uprkos reflektoru i izlaže minimalni sketering u drugim pravcima.

3.4.3 Jednačina akustike prostorija u geometrijskom modelu

Opšti model geometrijske akustike se može elegantno zapisati u vidu integralne jednačine. Prva takva formulacija datira iz 1971. godine poznata kao Kuttruff-ova integralna jednačina [Kuttruff, 1995]. Ova verzija jednačine je još uvek ograničena na difuzne refleksije u konveksnoj prostoriji, ali je 1978. godine Joyce proširio kako bi obuhvatio proizvoljne funkcije refleksije [Joyce, 1978]. Osnovni princip predstavljanja takve karakteristike refleksije je isti kao gore pomenuti BRDF model, ali je nazvana matricom refleksije. Varijanta jednačine sa difuznom refleksijom je dalje usavršena od strane Nosal-a i drugih kako bi obuhvatila i pojam izvora zvuka koji omogućuje proračun energetskeg odziva u vremenu [Nosal et al., 2004], dok se prethodne verzije koriste samo da proučavaju energetski balans u prostoriji.

Naizgled nezavisno, iako dosta kasnije, preduzete su aktivnosti koje se tiču razvoja veoma slične jednačine a imaju koren u računarskoj grafici. Ova jednačina

pokriva većinu algoritama koji pokušavaju da izračunaju globalnu osvetljenost scene. Prvu verziju takve jednačine za akustiku prostorija su predstavili Tsingos i Gascuel [Tsingos, Gascuel, 1997]. Primenjena terminologija je sasvim različita od one u Kuttruff-ovoj integralnoj jednačini, iako su u suštini iste, sa izuzetkom da ova nova verzija uključuje termin vidljivosti koja omogućuje da se jednačina odnosi i na ne-konveksne prostorije. Glavna razlika između verzija računarske grafike i akustike prostorija je da akustička jednačina uključuje vremensku dimenziju i konačnu brzinu prostiranja zvuka, dok u računarskoj grafici, smatra se da se svetlo prostire beskonačno brzo, stoga svetlo od izvora trenutno stiže do svih površi u prostoru.

Temeljno izvođenje i prezentaciju ovog modela geometrijske akustike i jednačina koje se odnose na njega je uradio Alarcao [Alarcao, 2005]. Proizvoljne karakteristike refleksija su nazvane funkcijama zidnih refleksija umesto BRDFs, što je poznatiji termin u literaturi. Jednačina akustike prostorija je još jedna formulacija ovog modela. Ova jednačina pruža okvir unutar koga se većina modela geometrijske akustike može izraziti u domenu lokalne reakcije. Ova jednačina se može formulirati i u odnosu na pritisak zvuka, ali se uobičajeno koristi energija, posebno zato što je uopštena formulacija BRDF refleksije praktična za primenu samo za energije. Jednačina pretpostavlja da je geometrija predstavljena pomoću delića površi i rekurzivno proračunava odlaznu zvučnu energiju l u datoj tački površi x' u pravcu Ω :

$$l(x', \Omega) = l_0(x', \Omega) + \int_G R(x, x', \Omega) l(x, \Gamma) dx \quad (3.6)$$

gde je l_0 energija koju emituje sama površ; integral opisuje reflektovanu energiju dok je Γ odbojni ugao iz tačke površi x prema x' , kao što je ilustrovano na slici 3.3; i R je jezgro jednačine refleksije:

$$R(x, x', \Omega) = V(x, x') \rho(x', \Theta, \Omega) g(x, x') \quad (3.7)$$

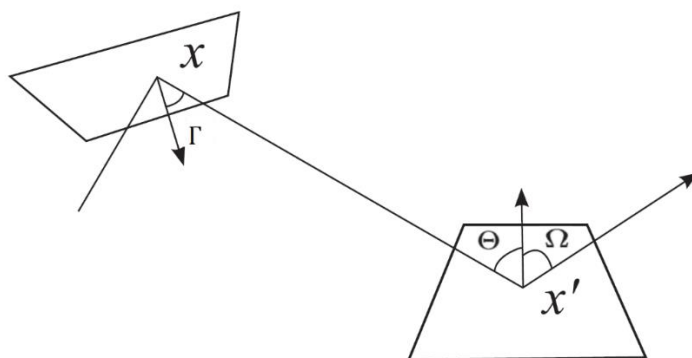
gde je $V(x, x')$ vidljivost i $\rho(x', \Theta, \Omega)$ je BRDF koja daje frakciju energije ($=1-\alpha$, vidi jednačinu (3.5)) koja je reflektovana iz upadnog ugla Θ u pravcu ugla Ω . Geometrijski faktor $g(x, x')$ razmatra kašnjenje pri prostiranju, apsorpciju u vazduhu i geometrijski oblik, koji je definisan relativnom orijentacijom i međusobnim rastojanjem površi. Geometrijski faktor između malih elemenata predstavljenih tačkama x i x' na slici 3.3 može biti napisan kao:

$$F(x, x') = \frac{\cos(\Theta) \cos(\Gamma)}{|x - x'|^2} \quad (3.8)$$

Kompletnija formula koja razmatra konačnu oblast površi je predstavljena od strane Lewers-a [Lewers, 1993]. Ta verzija je praktična ako se želi finija predstava, dok prethodna razmatra samo grube crte.

Većina pojmova u gornjim jednačinama je frekvencijski nezavisna, i samo BRDF i apsorpcija zvuka u vazduhu su funkcije frekvencije. To znači da većina tehnika modelovanja opisanih ovde može simultano pratiti sve frekvencijske opsege registrovanjem energije u svakom frekvencijskom opsegu paralelno. Ipak, u izvesnim tehnikama, put propagacije energije može divergirati za različite frekvencije. U takvim slučajevima, simulacije akustike prostorija treba izvesti nezavisno za svaki opseg.

Glavne razlike među različitim tehnikama geometrijske akustike leže u načinu na koji se integrali jednačina (3.6) (kolika je veličina geometrijskih segmenata po kojima se integrali) i tip BRDF koji je podržan.



Slika 3.3. Geometrijski faktor između delića koji pripadaju različitim površima je definisan relativnim uglovima Γ i Θ i njihovim međusobnim rastojanjem. Sveukupno, jednačina akustike prostorija daje energiju emitovanu u pravcu Ω iz tačke x' i integrali reflektovanu energiju po svim reflektujućim površima predstavljenim tačkom x [Alarcao, 2005].

Vredno je napomenuti da su izvedene i druge opšte verzije ove jednačine poznate kao jednačina transporta zvučne energije, ili jednačina prenosa akustičkog zračenja. Dok se jednačina (3.6) zasniva na formulaciji graničnih površina, ove jednačine primenjuju zapreminski pristup i mogu da obuhvate čak i zapreminski

sketering koji je prouzrokovan npr. turbulencijama vazduha; ovakav tretman nije moguć pomoću jednačine (3.6). Iako je jednačina (3.6) malo jednostavnija još uvek je dovoljno izražajna da pokrije tehnike modelovanja zastupljene ovde. U izvesnim slučajevima, modeli zasnovani na pojednostavljenoj verziji jednačine prenosa akustičkog zračenja, koja je poznata kao jednačina difuzije, se smatraju metodama geometrijske akustike, ali ove metode su izvan obima ove diskusije zato što ostaju u osnovi različite od metoda izloženih ovde. Suštinska razlika je da jednačina difuzije koristi zapreminsku rešetku u kojoj se zvučna energija kreće, umesto pristupa pomoću zraka koji je zajednički za ostale metode geometrijske akustike.

3.4.4 Modeli difrakcije

Pojava difrakcije se ne razmatra u klasičnim metodama geometrijske akustike. Ipak, moguće je modifikovati metode geometrijske akustike ili dodati difrakcionu komponentu i na taj način uzeti u obzir difrakciju do nekog stepena. Modelovanje difrakcije je tema sama za sebe, a ovde je dat kratak pregled koji je relevantan za kombinaciju sa metodama geometrijske akustike. Prostorije se najčešće modeluju poligonima, i jedan pristup koji se odnosi na difrakciju je dodati difrakcione talase koji se pojavljuju sa ivice u rešenje sa spekularnom refleksijom. Ova dekompozicija zvučnog polja potiče od slučaja beskonačno tvrdog klina, za koji su Biot i Tolstoy predstavili rešenje u vremenskom domenu [Biot, Tolstoy, 1957]. U kasnijem razvoju se koristio pristup sekundarnog izvora ivice koji omogućuje i proučavanje slučaja konačne ivice i difrakcija višeg reda. Ovi modeli sekundarnog izvora počivaju na integraciji duž svake ivice poligona, i višestruka difrakcija zahteva integraciju drugog i višeg reda.

Alternativni difrakcioni modeli koriste asimptotsku formulaciju gde doprinos beskonačne ivice (difrakcioni talas koji se pojavljuje sa ivice) je opisan eksplicitnim izrazom, i zato ovi modeli zahtevaju značajno manje proračuna nego modeli sa sekundarnim izvorom. Ovi modeli uključuju Geometrijsku Teoriju Difrakcije (GTD) i Uniformnu Teoriju Difrakcije (UTD). Drugo približno rešenje za visoke frekvencije je pristup u vremenskom domenu za sekundarni izvor čiji je autor Vanderkooy [Vanderkooy, 1991], koji može da se odnosi na tela, ali proizvodi izvesne greške pri niskim frekvencijama.

Posebna klasa difrakcionih modela je bazirana na Kirchoff-ovoj aproksimaciji, što vodi ka Kirchhoff-Helmholtz integralnoj jednačini koja se rešava veoma efikasno, kao i u Fresnel-Kirchoff aproksimaciji. Veoma bliska aproksimacija koja se odnosi na isto je Huygens-Fresnel aproksimacija. Krajem XIX veka je pokazano da Kirchoff-ova aproksimacija može da se iskoristi za konverziju Kirchhoff-Helmholtz integralne jednačine u linijski integral duž ivica konačnog poligonalnog reflektora, što je poznato kao Maggi-Rubinowicz transformacija, i takav linijski integral vodi do definicije ivičnog sekundarnog izvora. Ovaj pristup je korišćen u modelovanju akustike prostorija; ipak, za izvesne geometrije pristup difrakciji zasnovan na Kirchoff-ovoj aproksimaciji nije dovoljno tačan za visoke frekvencije i ima ugrađena ograničenja za niske frekvencije.

Druge difrakcione metode uključuju približne Pierce-ove izraze, i takođe se mogu primeniti na debele zvučne barijere za šum.

Veoma različit i računarski efikasan pristup modelovanju difrakcije kombinuje rej-trejsing sa principom „neizvesnosti“, i prvi ga je predstavio Stephenson 2010 [Stephenson, 2010]. Zraci koji prolaze blizu ivice se skreću i skretanje je veće što zrak prolazi bliže ivici. Ovaj pristup povlači da odziv iza tanke prepreke sasvim približno prati difrakcioni šablon usrednjavanja po opsegu, pre nego model diskontinuiteta koji daje čista geometrijska akustika. Originalni model je izveden za pojedinačnu ivicu, ili prorez, a 3D verziju su predstavili Schroeder i Pohl [Schroeder, Pohl, 2009]. Kao dodatak, Pohl je rešio probleme koji se odnose na reciprocitet u originalnoj formulaciji. Sličan metod su predložili Benedetto i Spagnolo 1984. godine [Benedetto, Spagnolo, 1984], a u optici je predstavljen 1971 [Heinisch, Chou, 1971].

Brojne kombinacije gore pomenutih difrakcionih modela i tehnika modelovanja zasnovane na geometrijskoj akustici su predložene tokom vremena, i o njima će ovde biti diskutovano.

3.4.5 Modeli izvora i prijemnika

U akustičkom prostoru zajedno sa kompletnim transmisionim putem akustičke energije postoje i izvor i prijemnik. Ipak, tretman izvora i prijemnika je ovde ograničen samo na opseg koji je relevantan za akustičko modelovanje prostorija. Sa ove tačke gledišta, važno je primetiti da realni izvori i prijemnici imaju neku svoju

usmerenost. Propagacija zvuka od usmerenog izvora može se izraziti proširivanjem jednačine (3.1) na sledeći način:

$$p^2 \sim V \frac{1}{r^2} DF(\theta, \varphi) \quad (3.9)$$

gde je faktor usmerenosti (DF) uopšteno funkcija dva ugla zračenja θ i φ .

Sa druge strane, standardizovana merenja akustičkih svojstava prostorije treba da se izvode sa omnidirekcionim zvučnicima, pa se stoga omnidirekcionni pristup koristi pri proračunu akustičkih atributa. U praksi, pri auralizaciji realnih izvora, kao što su recimo muzički instrumenti i zvučnici, uključivanje usmerenosti je od esencijalne važnosti. Nadalje, pretpostavka je da su takvi dijagrami usmerenosti raspoloživi, i biće predstavljen njihov tretman pri raznim tehnikama modelovanja. Treba napomenuti da je složenost zračenja muzičkih instrumenata nemoguće opisati fiksnim funkcijama usmerenosti.

Prijemnici u akustici prostorija su mikrofoni, pri čemu svaki ima svoju usmerenost tj. osetljivost, ili slušaoci. U trenutnom kontekstu možemo pretpostaviti za oba tipa da je dovoljno imati informaciju o usmerenosti dolazne akustičke energije. Ova informacija se može onda iskoristiti za postprocesiranje u bilo kojem tipu tehnologije za prostornu audio reprodukciju.

3.5 Tehnike geometrijske akustike zasnovane na putu refleksije

Ove tehnike predstavljaju način proračuna akustičkog odziva uzimanjem u proračun i spekularnih i difuznih refleksionih putanja. Finalni impulsni odziv se određuje kombinacijom doprinosa obe vrste putanja, kao i putanja koje potiču od difrakcije. Većina metoda u ovoj grupi su zasnovane na energetsom pristupu. Izuzetak su metode koje se odnose na spekularnu refleksiju i difrakciju od ivica, koje se mogu računati i pomoću pritiska.

3.5.1 Metoda likova

Glavni princip metode likova, koja se u literaturi zove i metodom likova izvora ili lika izvora u ogledalu, je prvi put razvijen u studiji o elektrostatici, a u akustici ga

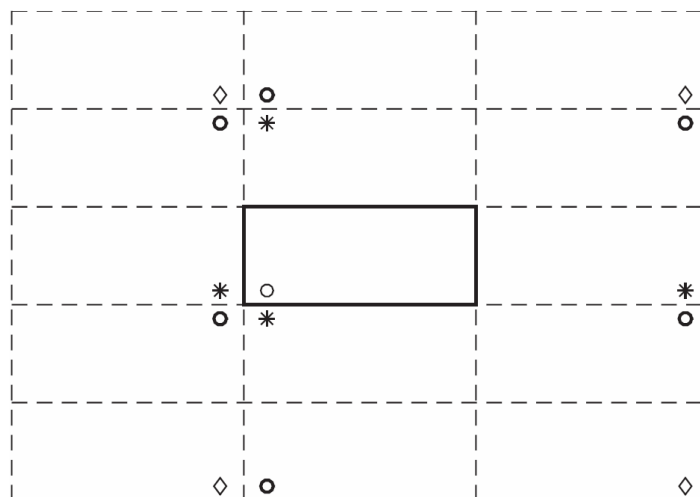
je prvi primenio Carslaw 1899. godine [Carslaw, 1899]. Ove rane studije se odnose na osnovne probleme, kao što je beskonačni klin. Njihovo proširenje na oblike u prostorijama je prezentovao Cremer 1948. godine [Cremer, 1948], a kasnije Mintzer 1950. godine [Mintzer, 1950], za proračun zvučnog pritiska u funkciji vremena u kvadarskoj prostoriji. Gibbs i Jones su upotrebili računare za određivanje pozicije likova izvora i nivoa zvučnog pritiska u pravougaonoj prostoriji [Gibbs, Jones, 1972]. Nešto kasnije Allen i Berkley su predstavili sličan sistem i objavili kod u programskom jeziku Fortran za proračun impulsnog odziva tehnikom likova [Allen, Berkley, 1979]. Elegantnost ovog metoda se nalazi u njegovoj jednostavnosti, i još uvek on pruža egzaktno rešenje talasne jednačine u prostoriji pravougaonog oblika sa rigidnim zidovima. U takvom prostoru, sve refleksije su idealno spekularne, i nema difrakcije, s obzirom da postoje samo normalni uglovi. Metoda likova pruža tačnu predikciju čak i za niske frekvencije za realističnije granične uslove kada se koriste kompleksni ugaono-zavisni koeficijenti refleksije.

Glavni princip metode likova je rekurzivna primena rešenja lika izvora, na izvor zvuka. U praksi ovo znači da se zvučni izvor reflektuje od svih površi u modelu, rezultujući skupom likova, koji se onda ponovo posmatraju kao novi izvori likova u prostoriji. Ovaj proces se ponavlja sve do zadovoljenja nekog graničnog uslova, kao što je dužina odziva ili red refleksije. Rezultujući likovi izvora se mogu smatrati sekundarnim izvorima zvuka, pri čemu rastojanje od sekundarnog izvora do izvora zvuka se računa duž stvarnog refleksionog puta unutar prostorije. Na slici 3.4 ilustrovan je ovaj proces u 2D prostoru u kome postoji četiri refleksije prvog reda, osam refleksija drugog reda (šest od njih je prikazano na slici 3.4), itd. Odgovarajući 3D slučaj bi imao 6 i 18 likova, respektivno.

U opštem slučaju broj likova do K-tog reda refleksije je $\sum_{k=1}^K N(N-1)^{k-1}$ za N površi. Ipak, u slučaju pravougaone prostorije neki likovi se gube, pa je stvarni broj likova manji nego što daje ova formula.

Rezultat proračuna metode likova može se posmatrati hijerarhijski pomoću strukture drveta, gde je izvor zvuka koren, a svaka grana predstavlja lik. Impulсни odziv se može konstruisati kao suma doprinosa svih likova u drvetu. Usmerenost zvučnih može se jednostavno uzeti u razmatranje dodavanjem funkcije usmerenosti sekundarnim izvorima [Rindel, 2004 a].

Brzinu proračuna pomoću metode likova u pravougaonoj prostoriji je povećao McGovern [McGovern, 2009]. Ovom tehnikom sve redundantne i nepotrebne kalkulacije su eliminisane korišćenjem sortiranih tablica. Dobijeni rezultat je tačan kao i korišćenjem originalne metode, ali je prijavljena 9 puta veća brzina proračuna.



Slika 3.4. Pravougaona prostorija prikazana punom linijom, sa originalnim izvorom (kružić). Likovi prvog reda su prikazani zvezdicama (4), drugog reda punim kružićima (ima ih 8 ali na slici se vidi 6), trećeg reda rombovima (na slici se vidi 4) [Savioja, Svensson, 2015].

Aproksimacija metode likova u pravougaonoj prostoriji: U dizajnu akustike prostorija, pravougaona geometrija je retko dovoljna [Long, 2006]. Ipak, ovaj jednostavan model se često primenjuje u studijama u kojima je odziv prostorije potreban pri nekom drugom istraživanju. Na primer, u obradi govora, signalima se često dodaje veštačka reverberacija kako bi zvučali prirodnije; pri ovoj primeni dovoljna je veoma jednostavna geometrija prostorije. Treba imati na umu da ovi odzivi treba da budu odgovarajuće dužine koja odgovara vremenu reverberacije prostorije. Do danas, različite tehnike mogu se upotrebiti za ekstrapolaciju rezultata simulacije ranih refleksija kako bi pokrili celo trajanje impulsnog odziva i izbegli sumiranje po svim likovima. Predložena je tehnika ekstrapolacije kako bi dobili duže odzive po cenu metoda aproksimacije, koja nije originalna tačna metoda likova. Takođe, u upotrebu je ušla tehnika multipolova kako bi omogućili efikasan proračun. Ova tehnika može se upotrebiti u slučajevima gde se zvučni izvor ili slušalac kreće ili gde postoji više slušalaca. Za kombinaciju jedan izvor – jedan prijemnik, performanse ostaju

nepromenjene. Lehmann i Johansson su uzeli standardnu metodu likova da odrede krivu slabljenja energije prostorije i onda da sintetizuju difuznu komponentu baziranu na toj krivoj [Lehmann, Johansson, 2010]. Testovi slušanja su pokazali da većina slušalaca nije mogla da razlikuje rezultate dobijene punom metodom likova i metodom kojoj je pridodata difuzna reverberacija. Međutim, ovi metodi su sasvim veštački i ne odgovaraju bilo kakvim realnim prostorima. Modelovanje realnih prostora zahteva korišćenje tačnijih tehnika koje su opisane nadalje.

Metoda likova u proizvoljnim geometrijama: Koncept da se pokrije proizvoljna poligonalna struktura metodom likova je pomenut još 1970-ih godina, ali je glavno poboljšanje metode likova kako bi se postigao ovaj cilj objavio Borish 1984. godine [Borish, 1984]. Rekurzivni princip refleksije je isti kao i za pravougaone geometrije, ali zahteva dodatne provere. Prvo, likovi treba da budu konstruisani samo za izvore i sekundarne izvore ispred reflektujuće strane poligona, dok sve pozadinske strane treba odbaciti kao reflektujuće površine. Slično tome, ako je reflektujuća površina potpuno iza prethodnog reflektora, nema potrebe za dodavanjem novih likova. Svi ovi proračuni mogu se izvesti nezavisno od pozicije slušaoca i stoga rezultujuće izvor-lik drvo važi za celu prostoriju. Ipak, postoji i test vidljivosti koji zahteva informaciju o lokaciji slušaoca. Ovaj test posmatra spekularnu putanju refleksije od izvora do slušaoca korišćenjem likova, kao što je prikazano na slici 3.5.

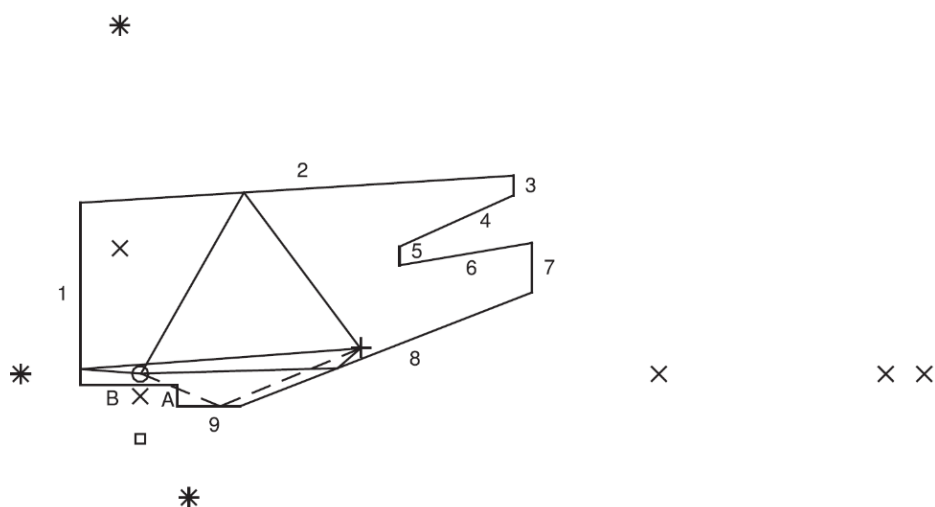
Ova putanja mora da pogodi sve refleksione površi unutar njenih granica, i istovremeno putanja ne sme da preseca bilo koju refleksionu površinu u modelu. U suprotnom lik nije vidljiv od strane prijemnika. Na slici 3.6 prikazano je rezultujuće drvo likova u slučaju geometrije prikazane na slici 3.5. Samo deo mogućih putanja je važeći za poziciju prijemnika kao na slici 3.5, s obzirom da postoje samo 3 validna lika prvog reda refleksije i 6 drugog reda.

U tradicionalnim varijantama metode likova drvo likova se konstruiše u slojevitom stilu. Ovo znači da se proces iterativno ponavlja po svim površinama za dati red refleksije pre započinjanja višeg reda refleksije. Proces se takođe može obavljati i po dubinskom principu, u kome svaka grana se može razvijati do određenog reda refleksije pre nastavljanja sa sledećim likom tj. sa sledećom granom drveta. Lee i drugi su predložili ovaj princip zato što eliminiše potrebu za značajnim memorijskim

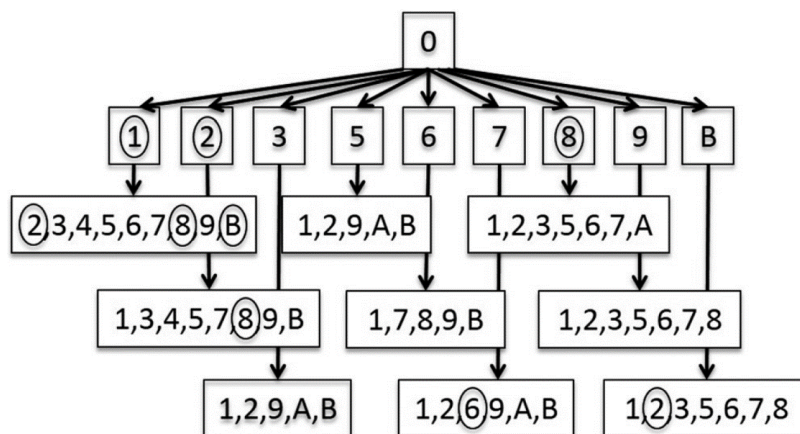
resursima originalne metode [Lee et al., 1988]. Dodatno, oni su predstavili refleksiju kao transformaciju koordinatnog sistema koja se može efikasno implementirati kao 4 x 4 matrica sa homogenim koordinatama. Takođe su predložili gašenje grane likova ako prijemnik nije vidljiv. Takav pristup nije korektan, jer mogu da postoje likovi višeg reda koji su vidljivi, iako likovi nižeg reda nisu vidljivi.

Glavni računarski problem sa metodom likova je eksponencijalni rast broja likova kao što se vidi u jednom sloju na slici 6. Metoda likova veoma efikasno računa rane refleksije. Ova metoda može se koristiti i u sistemima virtuelne realnosti kako bi se pružila informacija o auralizaciji u realnom vremenu. Ipak na višim redovima refleksije metoda postaje teška za praćenje i kontrolu.

Iscrpan izveštaj o metodi likova je napravio Mechel [Mechel, 2002]. U tom radu je predstavio i nekoliko poboljšanja tradicionalne metode likova. Posebno se bavio uglovima i načinom njihovog preciznog modelovanja.



Slika 3.5. Primer prostorije sa izvorom zvuka (kružić), prijemnikom (krstić). Važeći likovi prvog reda refleksije su označeni zvezdicom, likovi izvan poligona refleksije su označeni putačom. Lik sa važećom tačkom refleksije ali preprečenom vidljivošću je označen kvadratićem, pri čemu je njegova putanja označena isprekidanom linijom [Savioja, Svensson, 2015].



Slika 3.6. Drvo likova za geometriju sa slike 3.5. U kućicama su napisani mogući likovi generisani od strane površina označenih u kućici. Na primer, lik prvog reda refleksije koji daje površ 2 kreiraće 8 likova drugog reda. Stopa porasta broja mogućih likova je veoma velika. Imamo 9 likova prvog reda, a već 59 likova drugog reda. Zaokruženi su likovi koji mogu dati doprinos na mestu prijemnika tj. vidljivi su [Savioja, Svensson, 2015].

3.5.2 Rej-trejsing tehnika

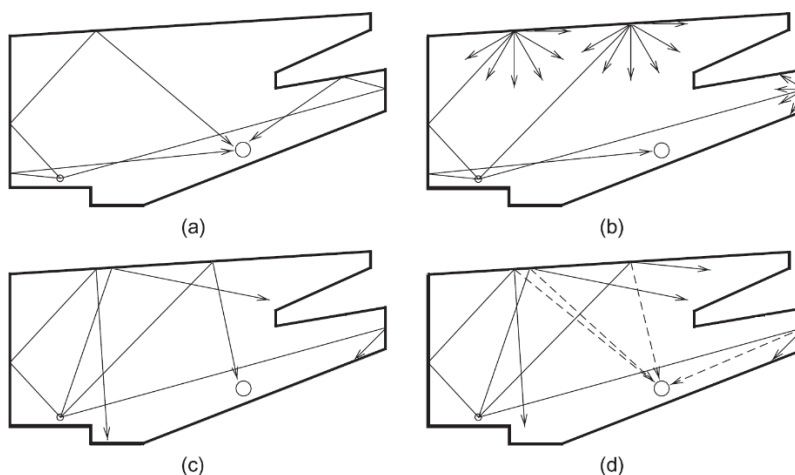
Dok metoda likova daje tačno geometrijsko rešenje koje sadrži sve putanje spekularne refleksije, pretpostavke od kojih polazi rej-trejsing tehnika su drugačije. Umesto određivanja svih putanja deterministički, rej-trejsing metode su stohastičke i određuju moguće putanje refleksije na bazi Monte-Carlo simulacija [Allred, Newhouse, 1958].

Rana istorija računarskog modelovanja pomoću rej-trejsing tehnike datira još iz 1958. godine kada su Allred i Newhouse objavili svoju studiju korišćenja rej-trejsinga za određivanje srednje dužine slobodnog puta u zatvorenoj pravougaonoj prostoriji. Ipak, upotreba rej-trejsinga za dobijanje energetskih odziva u vremenu u 3D prostoru je opisana u istorijskom radu Krokstada i drugih 1968. godine [Krokstad, Strom, Sorsdal, 1968]. U paraleli, Schroeder je objavio slične ideje, ali se ispostavilo da njegova tehnika ima više ograničenja i da se može upotrebiti samo u 2D prostoru [Atal, Schroeder, 1967]. Ubrzo posle toga, objavljeno je nekoliko radova koji uvode slične ideje, ali je trebalo puno godina da tehnika postane popularna u praksi [Mijić, Merkle, 1987]. Ovo se pojavilo tek kada su računari ušli u širu upotrebu i kada su

postali moćniji. Time je postalo moguće postavljati sve složenije geometrije prostorijske i računati sve duže vremenske odzive.

Osnovno izvođenje rej-trejsinga: U rej-trejsing tehnikama, glavni princip je puštati zrake iz izvora, reflektovati ih i registrovati validne putanje. Ovo je ilustrovano na slici 3.7(a).

Zraci mogu biti emitovani iz izvora ili prema predefinisanoj raspodeli ili u slučajnom pravcu Monte-Carlo metodom. Ipak, upotreba slučajnih pravaca sa premalo zraka uvodi fluktuacije u rezultatima simulacije i stoga treba preferirati upotrebu raspodele. Ako je dijagram zračenja izvora unapred poznat, zraci u prostoru mogu biti raspoređeni prema ovoj usmerenosti. Posle toga, propagacija zraka se prati tako da kada god zrak naiđe na zid pojavi se refleksija i zrak nastavlja u novom pravcu. Istovremeno, proračunavaju se preseki zraka i prijemnika kako bi se pratilo koji zraci prolaze kroz prijemnik. Vredno je napomenuti da se put zraka ne završava prolaskom kroz prijemnik, već oni nastavljaju dalje svojom pravolinijskom putanjom.



Slika 3.7. (a) Rej-trejsing baziran samo na spekularnim refleksijama će na kraju pronaći sve iste putanje kao i metoda likova, mada zapreminski prijemnici će možda dovesti do registrovanja nekih zraka koji nisu vidljivi. (b) Difuzne refleksije mogu biti modelovane ili deobom zraka u nekoliko novih zraka, (c) ili preusmeravanjem zraka u ne-spekularnom pravcu. (d) U tehnici „difuzne kiše“ pušta se sekundarni zrak ili fantomski zrak iz svake tačke difuzne refleksije ka prijemniku kako bi se ubrzala konvergencija simulacije [Savioja, Svensson, 2015].

Završetak praćenja putanje zraka i slabljenje energije zraka su međusobno povezani i mogu se modelovati na dva načina. Prvi način je da svaki zrak nosi informaciju o svojoj energiji i kada god se reflektuje od zida, njegova energija slabi zavisno od svojstava zida refleksije. Ovo se može modelovati u frekvencijskim opsezima tako da se energija beleži u svakom opsegu, a shodno tome i svaki materijal ima apsorpciju definisanu u tom opsegu [Rindel, 2004 b]. Ipak, najčešće se ne definiše koeficijent sketeringa koji zavisi od frekvencije i proizvodi različite putanje kao funkcija od frekvencije. Praćenje zraka se završava kada energija zraka opadne ispod predefinisane vrednosti za svaki frekvencijski opseg, ili kada dužina putanje pređe neku određenu vrednost. Drugi način izvođenja rej-trejsing metode je „Ruski rulet“. Ovaj način podrazumeva da pri svakoj refleksiji zrak nestaje sa određenom verovatnoćom koja zavisi od koeficijenta apsorpcije zida. Ipak, ovaj način nije pogodan za istovremeno praćenje više frekvencijskih opsega i nije efikasan kao prvi način.

Jedan od problema osnovne rej-trejsing tehnike je prouzrokovan zapreminskim prijemnicima. U idealnom slučaju, prijemnici bi trebalo da budu tačkasti, ali s obzirom da je verovatnoća da zrak preseče tačku beskonačno mala, prijemnici moraju da imaju neku zapreminu. Međutim, zapreminski prijemnici mogu da registruju putanje zraka koje nisu relevantne za datu poziciju slušaoca, posebno ako prijemnik svojom zapreminom preseca geometriju prostorije. Dodatno, neke od refleksionih putanja mogu biti registrovane nekoliko puta i ovo treba da se registruje ako rezultat treba da se iskoristi za konstrukciju likova. Takođe, moguće je imati prijemnike promenljive veličine, tako da se veličina prijemnika povećava linearno u zavisnosti od dužine putanje. Ovakva tehnika se može smatrati nekom vrstom praćenja snopova zvučne energije i razmatrana je kasnije u ovom tekstu. Pri praktičnom dizajnu akustike prostorije, prednost je imati više istovremenih prijemnika u jednoj simulaciji, kao na primer na svakom sedištu u publici neke koncertne hale, što je predložio Stephenson [Stephenson, 2007]. Stephenson je takođe sproveo ekstenzivno poređenje metode likova i rej-trejsing tehnike i pokazao da rej-trejsing pokazuje superiornu performansnu prednost u skoro svim slučajevima [Stephenson, 2013].

Najočigledniji put dobijanja energetskog odziva u vremenu je kumulativno registrovanje pogodaka u odzivu svaki put kada zrak prođe kroz prijemnik, i tu tehniku

je originalno primenio Krokstad i drugi [Krokstad, Strom, Sorsdal, 1968]. Ovaj pristup se može direktno iskoristiti bez ikakvog težinskog faktora za omnidirekcione sferne izvore, dok pogotke treba težinski obrađivati u zavisnosti od upadnog ugla u oblast prijemnika. Ipak, najtačniji rezultati se dobijaju uzimanjem u obzir dužine puta koje zrak provede unutar prijemnika, i ovo omogućuje upotrebu prijemnika različitih geometrija, ne samo sferičnih. Ovo je pokazao Stephenson u studiji zvučnih čestica, pri čemu pojam zvučne čestice predstavlja sinonim za praćenje zraka, uopšteno gledano [Stephenson, 1985].

Rej-trejsing i difuzne refleksije: Osnovna prednost rej-trejsinga nad metodom likova je mogućnost modelovanja proizvoljnih refleksionih svojstava, uključujući difuzne refleksije, a ne samo prosto spekularne refleksije [Christensen, Rindel, 2005 b]. Osnovna ideja difuznih refleksija je razmatrana prvobitno u radovima Krokstada i Schroeder-a, ali je Kuttruff prvi opisao idealno difuznu refleksiju [Kuttruff, 1971]. Još opštiji slučaj je kada je samo deo refleksije tretiran spekularno a deo difuzno, pri čemu je odnos određen koeficijentom sketeringa. Realizacija difuznih refleksija može biti postignuta na dva konceptualno različita načina. Prvi način je da zraci pri svakoj refleksiji budu podeljeni na dve komponente, primarni spekularni zrak i brojne difuzne zrake uniformno raspodeljene u poluprostoru refleksije što je prikazano na slici 3.7(b). Iako ovaj proces pruža relativno dobru aproksimaciju, računarski je izazovan s obzirom da broj zraka eksponencijalno raste. Računarski lakši, ali manje tačan, je način baratanja sa jednim zrakom, tako da pri svakoj refleksiji zrak putuje u slučajnom pravcu ako je sketering koeficijent zida veći od nekog slučajnog broja, ili u spekularnom pravcu ako je drugačije, kao je prikazano na slici 3.7(c). Još jedna varijanta održavanja jednog zraka refleksije je metoda vektorskog modelovanja refleksije, u kojoj se pravac refleksije određuje linearnim zbirom vektora spekularne refleksije i slučajnog pravca Lamberovog zračenja na bazi težinskog faktora koeficijenta sketeringa. Jedan od načina da se smanji računarsko opterećenje je da se iskoristi tehnika poznata pod nazivom „difuzna kiša“. Ovde se proverava vidljivost svih difuznih zraka prema prijemniku i registruje se svaka vidljiva putanja uzimanjem u obzir ugla refleksije i prostornog ugla pokrivenog prijemnikom, što je ilustrovano na slici 3.7(d). U računarskoj grafici, analogna tehnika je poznata pod nazivom „zraci

iz senke“. Ovom tehnikom je moguće ostvariti iste rezultate kao i bez nje, ali sa mnogo manje primarnih zraka.

Još jedan pristup modelovanju sketeringa su dali Mehta i Mulholland 1976. godine [Mehta, Mulholland, 1976]. Njihov pristup je zasnovan na računanju rastojanja od tačke refleksije do najbliže ivice. Ako je ovo rastojanje kraće od dve talasne dužine zvučnog talasa, onda će zrak biti raspršen kako bi se simulirala difrakcija u vidljivu zonu. Njihov eksperiment pokazuje da ova jednostavna aproksimacija poboljšava tačnost procene vremena reverberacije. Christensen i Rindel su upotreбили sketering koji potiče od ivica na drugi način [Christensen, Rindel, 2005 a]. Oni su prilagodili snagu spekularne refleksije kako bi dobili približno efekat filtera visokih učestanosti i pridružili redukovanu energiju sketeringu.

Tačnost rej-trejsing metode: Stabilnost rej-trejsing rešenja raste sa porastom broja zraka pri simulaciji, tako da rezultati metode likova i rej-trejsinga konvergiraju ako se koristi scenario samo spekularnih refleksija. Ovo znači da rej-trejsing uvek vodi aproksimaciji tačnih rezultata, gde neki od refleksionih puteva mogu nedostajati zato što se koristi konačan broj zraka. Ipak, u praksi, zadovoljavajući rezultati mogu se lako dobiti pomoću rej-trejsinga, ali je teško znati koliko zraka je potrebno kako bi se dobili pouzdani rezultati. Izazov je u tome što potreban broj zraka zavisi od geometrije prostorije i svojstava materijala zidova, tako da broj zraka nije moguće znati pre početka simulacije. Posledično, može se izračunati standardna devijacija između simulacija, kako bi se proverio kredibilitet simulacije. Zavisnost broja zraka i dobijene tačnosti pokazuje da je broj zraka srazmeran zapremini prostorije i površini apsorpcione oblasti u prostoriji. U svakom slučaju, menjanje broja zraka pri simulaciji je dobar osnov za testiranje validnosti dobijenih rezultata simulacije. Ako se izvede na odgovarajući način, rezultati treba da konvergiraju ka jedinstvenom rešenju kada se broj zraka povećava. Slično tome, rezultati treba da budu imuni na različitu podelu geometrije poput mozaika. Tipično se geometrija deli na konveksne mnogouglove, poput trouglova, i način na koji se ovo izvede ne bi trebao da utiče na rezultat simulacije.

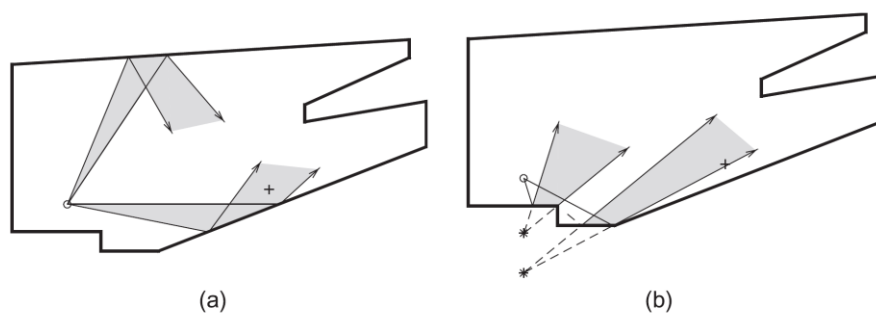
3.5.3 Bim-trejsing tehnike

Uopšteno bim-trejsing znači praćenje zapreminskih objekata, zvučnih snopova, u geometrijskom modelu kako bi se odredile moguće spekularne putanje refleksije. Ipak, postoje dve različite grane bim-trejsinga, jedna koja je bliža rej-trejsing tehnici i druga koja je bliža metodi likova. Iako bim-trejsing označava obe tehnike, postoji fundamentalna razlika u načinu na koji se radi konstrukcija. Zato se one ovde razmatraju odvojeno.

Bim-trejsing kao proširenje rej-trejsinga: Osnovna rej-trejsing tehnika odabira u prostoru putanje korišćenjem diskretnih zraka. Jasno, izvesne putanje će biti promašene ako je broj zraka premali u odnosu na veličinu prijemnika, i u odnosu na veličinu najmanjih površina u modelu. Osnovna ideja bim-trejsinga je proširiti ove zrake u zapreminske objekte, zvučne snopove, koji mogu biti otkriveni i pomoću tačkastih prijemnika, umesto pravolinijskih zraka koji mogu biti otkriveni samo zapreminskim prijemnicima. Ovaj pristup ima tu prednost da propagacijski put može biti određen egzaktno, i mogu se koristiti jednačine za pritisak zvuka prilikom zvučnog prostiranja. U ovom tipu bim-trejsinga prostor oko izvora zvuka je podeljen u snopove koji pokrivaju približno jednake prostorne uglove. Na slici 3.8(a) prikazan je 2D slučaj u kome dva označena snopa zraka su definisana svojim graničnim zracima, i njihova refleksija prvog reda je dobijena spekularnom refleksijom ovih graničnih zraka. Ako snop pogodi dve ili više površina, kao što je prikazano na slici 3.8(b), neophodno je podeliti ga i reflektovati odvojeno od svih takvih površina.

Prvi rad koji je uveo ideju zapreminskih zraka datira još iz 1973. godine kada su Haviland i Thanedar proračunavali impulsni odziv pravougaone prostorije korišćenjem koničnih snopova umesto jednostavnih zraka [Haviland, Thanedar, 1973]. Oni su predložili ideju piramidalnih snopova, koja je i trenutno najomiljenija geometrija u bim-trejsingu [Farina, 1995 b]. Ipak, oni nisu koristili reč „snop“ već su se služili terminom „zračna cev“. Piramidalni snopovi imaju poprečni presek u obliku trougla i mogu se efikasno definisati korišćenjem svega tri zraka. Jedna prednost ove strukture je što se površina sfere može izdeliti na trouglove prilično tačno i lako, i stoga ceo prostor oko izvora zvuka može biti pokriven piramidalnim snopovima.

Walsh i drugi su inicijalno koristili piramidalne snopove i dizajnirali su i implementirali alat za modelovanje akustike prostorija poznat pod imenom „Godot“ u ranim 1980-tim godinama [Walsh, 1980]. Njihov sistem za bim-trejsing je bio dizajniran kao opšte rešenje za problem skrivenih površi u računarskoj grafici. U sistemu Godot, njihova tehnika se koristila za proračun refleksionih putanja i za detekciju difrakcionih ivica. Sa računarskim resursima koji su bili dostupni u to vreme, oni su delili prostor u 384 snopa koje su pratili pojedinačno. U slučaju preseka snopa sa ivicom ili sa površinom oni su delili snop na dva dela, baš kao što je prikazano na slici 3.8(b). Ovi novi snopovi, koji se dobijaju deobom, ne moraju da imaju poprečni presek u obliku trougla, već mogu imati proizvoljni poligonalni poprečni presek, čak i takav da snopovi mogu završiti sa rupama. Dodatno, oni su prijavili da se difrakcioni snopovi generišu pomoću Geometrijske Teorije Difrakcije (GTD), iako je detaljan opis nedostajao.



Slika 3.8. (a) U rej-trejsing stilu bim-trejsinga prostor oko izvora je podjednako podeljen u snopove zvuka koji se reflektuju od površi. (b) Ako snop pogodi nekoliko površina prilikom refleksije, snop treba podeliti na delove tako da postoji samo jedan snop za svaku reflektujuću površinu [Savioja, Svensson, 2015].

Skoro paralelno sa radom Walsh-a i drugih, Van Maercke i Martin su razvili još jedan alat za akustiku prostorija pomoću snopova zraka poznat pod nazivom Epidaure (originalno nazvan EPIKUL) [Van Maercke, Martin, 1993]. Glavna razlika u njihovoj tehnici je što su snopovi imali oblik konusa i kružni poprečni presek. Takav snop može biti predstavljen samo jednim zrakom koji predstavlja osu konusa i jednim skalarom koji predstavlja vršni ugao konusa. Ipak, takva implementacija uvodi izvesne izazove zato što podela sfere na krugove je komplikovanija i vodi do

preklapanja snopova. Van Maercke i Martin su ovo rešavali ponderisanjem doprinosa pomoću težinskih faktora tako da putanja paralelna sa putanjom konusa dobija punu težinu dok u drugom ekstremnom slučaju putanje van konusa imaju težinski faktor nula. Međutim, glavna razlika između piramidalnih i konusnih zraka je u načinu na koji se oni mogu podeliti. Ako konusni snop pogodi nekoliko površina odjednom, nije moguće podeliti snop u nove konusne snopove sa istim pokrivanjem dok sa poligonalnim snopovima je generalno ovo moguće.

Veoma sličan princip sa konusnim praćenjem je predstavio 1989. godine Vorlander [Vorlander, 1989]. Tehnika je bazirana na rej-trejsingu sa sferičnim prijemnikom čiji se poluprečnik povećava linearno kao funkcija dužine propagacije. Kako bi prevazišao problem eventualnih lažnih detekcija, Vorlander predlaže upotrebu metode likova tako da stvarna putanja između tačkastog izvora i tačkastog prijemnika bude rekonstruisana i proverena kao važeća. Heinz uvodi hibridni metod koji dalje proširuje ovaj pristup korišćenjem rej-trejsinga kako bi se dodala i difuzna komponenta odzivu takođe [Heinz, 1993]. U ovoj tehnici, može se koristiti isti rej-trejsing motor za dobijanje i spekularnih i difuznih refleksija, razlika je samo što se spekularne refleksije nižeg reda pretražuju sa većom vremenskom rezolucijom nego difuzne refleksije.

Dobar uvid u varijante bim-trejsinga može se postići posmatranjem geometrijske tačnosti zato što razne varijante imaju tendenciju da budu fundamentalno različite. Prateća imena klasa su pozajmljena iz računarske grafike, gde se najčešće koriste vezano za proveravanje vidljivosti. Upotreba trougaonih snopova započinje kao tačna metoda zato što oni pokrivaju celokupnu sferu oko izvora tačno jednom. Nasuprot tome, metoda snopova u obliku konusa se može smatrati konzervativnom, zato što ona garantuje da će svi putevi refleksije biti pronađeni, međutim zbog izvesnog preklapanja snopova neki putevi će biti pronađeni više od jednom. Situacija postaje još komplikovanija kada se snop koji pokriva više površina reflektuje. Primenjene operacije se mogu smatrati približnim, zato što neke putanje mogu biti registrovane više puta, a neke mogu biti potpuno zanemarene, pri čemu u najgorem slučaju se mogu desiti lažne registracije na mestu prijema. Najzad, neki algoritmi se mogu smatrati agresivnim, zato što se za njih garantuje da ne pate od višestrukih ili lažnih detekcija, ali mogu potpuno izostaviti neke putanje.

Većina prvih softvera za bim-trejsing nije bila u stanju da razreši slučaj kada jedan snop pogađa više površina na pravilan način, zato što snopovi nisu bili podeljeni adekvatno prema granicama površi. Ovaj stil karakteriše sve napred pomenute principe, sem Godot-ovog sistema, koji funkcioniše kao momentalna aproksimacija bez obzira na oblik snopa. Gledano uopšteno, ovaj problem vodi ka precenjivanju energije detektovane na prijemniku, i nekoliko softvera za modelovanje, uključujući Epidaurus, ODEON i Ramsete, sadrže korekzione faktore kako bi kompenzovali ovaj nedostatak. Posle rada Walsh-a i drugih, potreba da se snopovi podele je primećena i predložena ponovo 1996. godine od strane Stephenson-a [Stephenson, 1996] i Dalenback-a [Dalenback, 1996], ali su samo 2000. godine predstavljena dva veoma slična rešenja za ovaj problem. Obe metode, adaptivna bim-trejsing tehnika čiji su predlagači Drumm i Lam [Drumm, Lam, 2000] i adaptivna tehnika piramidalnog praćenja koju su predložili Campo i drugi [Campo et al., 2000], su predlagale podelu snopova na manje snopove posle refleksije. Obe ove tehnike čuvaju tačnost početnog snopa. Dodatno, adaptivno piramidarno praćenje može se iskoristiti u različitim tehnikama za smanjenje računarskog vremena potrebnog za proračun i smanjenje zahteva za memorijom, spajanjem susednih uskih snopova, ali ovo dolazi po cenu gubitka tačnosti. Ipak, predložene operacije podele čine ove tehnike računarski neefikasnim. Umesto toga, čini se da se čak i bolje performanse sa tačnim algoritmima mogu postići sa dvofaznim pristupom koji izbegava podelu snopova u obliku odsečaka. U prvoj fazi, konstruiše se konzervativno bim drvo korišćenjem potencijalno vidljivih skupova, a u drugoj fazi, proveravaju se stvarno vidljivi likovi prema originalnoj metodi likova.

Kao dodatak tačnoj bim-trejsing metodi opisanoj iznad, različite računarski laganije približne tehnike mogu biti iskorišćene, ali one ne garantuju da će sve spekularne putanje biti pronađene. Ove tehnike imaju brojne primene, posebno u računarskim igricama i u drugim okruženjima u realnom vremenu. Tehnike praćenja odsečka preseka konusa ili piramide je takva varijacija na temu, pri čemu su snopovi modelovani pomoću odsečka slabo deformisani pri refleksiji od reflektujućeg poligona, tako da očuvaju svoj originalni paralelopipedni poprečni presek. Štaviše, praćenje adaptivnim odsečcima omogućuje kreiranje odsečaka i za difrakcione ivice,

što dalje poboljšava realnost akustičke simulacije. Proračun difrakcije je baziran na Univerzalnoj Teoriji Difrakcije (UTD).

Slično ostalim geometrijskim metodama koje se bave samo spekularnim refleksijama, moguće je izračunati stvarni impulsni odziv na bazi pritiska umesto energije. Jeong i drugi su uporedili tačnost ove dve metode sa sopstvenom kako su je nazvali faznom bim-trejsing metodom [Jeong et al., 2008]. Zaključili su da je rani odziv na srednjim frekvencijama tačniji ako se u bim-trejsing uključi praćenje promene faze usled propagacije umesto čistih energija. Ovo odgovara tehnici restauracije faze opisane u poglavlju „3.4.1 Propagacija zvuka u vazduhu, pritisak naspram energije“. Dodatno, pokazali su da upotreba ugaono-zavisnih koeficijenata refleksije samo marginalno poboljšava tačnost u odnosu na slučaj kada se koriste ugaono-nezavisni koeficijenti refleksije. Yousefzadeh i Hodgson su uporedili predikciju kada se koriste energetske zavisne koeficijenti refleksije ili koeficijenti refleksije bazirani na pritisku, posebno sa aspekta lokalne i produžene reakcije [Yousefzadeh, Hodgson, 2012]. Njihov zaključak je bio da je neophodan metod zasnovan na pritisku i produženoj reakciji, ako prostor koji se ispituje sadrži slojevite površi.

Dok većina bim-trejsing tehnika sadrži samo spekularne refleksije, pristup Dalenback-a [Dalenback, 1996] uključuje i difuzne refleksije. Njegova tehnika uključuje sukcesivno praćenje konusnih snopova na taj način da u svakom prolazu višeg reda je uključena difuzna energija iz prethodnih prolaza. Ovaj pristup omogućuje više slobode u kombinovanju različitih tipova refleksije na taj način da energija koja je bila difuzno reflektovana još uvek može biti spekularno reflektovana u kasnijoj fazi praćenja.

Bim-trejsing kao optimizacija metode likova: Cilj u ovoj klasi bim-trejsing tehnika je da se optimizuju performanse metode likova ograničavanjem porasta broja likova. Ovo je postignuto redukcijom likova koji nisu u stanju da pruže neku validnu refleksionu putanju. Osnovna metoda likova nudi brojne takve likove, ali je moguće dobiti značajne performanske boljitke orezivanjem drveta likova što je pre moguće. Osnovni princip ovog tipa bim-trejsinga je minimizovati broj praćenih snopova. Glavna razlika u odnosu na prethodno opisano je da se broj snopova povećava

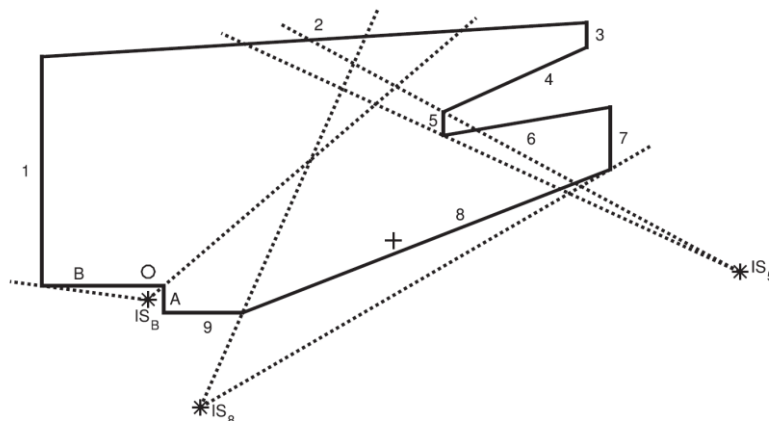
prilikom svake refleksije, dok u rej-trejsing stilu broj snopova ostaje konstantan u vremenu sve dok nema deobe snopova prilikom refleksije.

Dok je ranije prostor bio podeljen u snopove podjednake veličine koji su praćeni prethodno opisanim tehnikama bim-trejsinga, u ovoj familiji bim-trejsing metoda snopove formira reflektujuća geometrija. Likovi prvog reda refleksije se formiraju kao i u originalnoj metodi likova, ali se snop dalje formira od ivica reflektujuće površine koja je iskorišćena za formiranje lika. Ovo povlači da je postignuto drvo snopova minimalne veličine, dok u rej-trejsing stilu drvo tipično započinje mnoštvom snopova što smanjuje efikasnost tog pristupa. Posle proračuna refleksija prvog reda, svaki snop – ne samo likovi – se reflektuje od svih površina koje se bar delimično nalaze unutar snopa, nasuprot konceptu reflektovanja od svih površina u prostoriji, kako je u originalnoj metodi likova. Površni izvan snopa nisu vidljive od strane lika, pa stoga te površi ne mogu formirati validne reflektujuće putanje. Stoga ove površi mogu biti zanemarene kako bi sačuvali procesorsko vreme i memoriju, kao što je prikazano na slici 3.9.

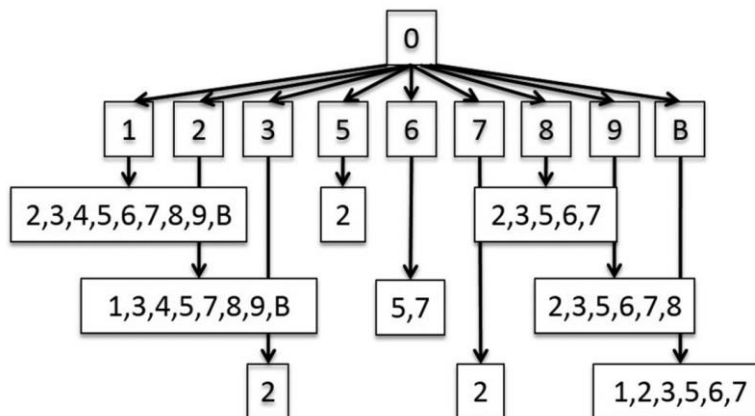
Rezultujuće drvo likova, kao što se može videti na slici 3.10, je mnogo uže nego rezultujuće drvo klasične metode likove (prikazano na slici 3.6). Ovo je vidljivo već sa refleksijama drugog reda mada su uštede uočljivije sa refleksijama viših redova. Slično tome, ukoliko je geometrija sastavljena od manjih površina benefiti će biti uočljiviji.

Osnovne principe ovog tipa bim-trejsinga za akustiku prostorija je predstavio 1996. godine Stephenson [Stephenson, 1996]. Predloženi kvantizovani piramidalni bim-trejsing je primenljiv takođe i na modelovanje difrakcija uvođenjem novih snopova na difrakcionim ivicama geometrije prostorije. Ključni princip ove tehnike je kvantizacija i ponovno spajanje snopova. U ovom procesu, difraktovani i reflektovani snopovi su prostorno grupisani i objedinjeni u datom vremenskom intervalu. Na ovaj način broj snopova koji se prate može biti redukovano. Ovo ima cenu u geometrijskoj tačnosti, ali s obzirom da se primenjuje na refleksijama viših redova, nema percepcijskog efekta na rezultat. Proces objedinjavanja je esencijalan sa aspekta računarskih performansi posebno u slučajevima u kojima se uzima u obzir modelovanje difrakcije i difuzije, jer oni prouzrokuju kontinualno cepanje snopova,

dok samo sa spekularnim refleksijama snopovi postaju sve uži i uži na višim redovima refleksije i cepanje snopova usled geometrije je retko.



Slika 3.9. Snopovi su prikazani isprekidanim linijama i definisani likom i ivicama reflektujućih poligona. Svaki snop je reflektovan samo od strane onih površi koje se bar delimično nalaze unutar snopa, dok klasična metoda likova bi formirala još mnogo više likova [Savioja, Svensson, 2015].



Slika 3.10. Drvo likova za geometriju sa slike 3.5 dobijeno bim-trejsingom. Broj refleksija prvog reda je isti kao i pomoću metode likova, ali je broj refleksija drugog reda smanjen sa 59 na 39 [Savioja, Svensson, 2015].

Funkhouser i drugi su bili prvi istraživači koji su predstavili funkcionalno izvođenje bim-trejsinga zasnovanog na metodi likova 1998. godine [Funkhouser et al., 1998]. Ovaj bim-trejsing je bio inspirisan Godot-ovim trejsingom, koji je opisan iznad, ali još više bim-trejsingom za računarsku grafiku koji je bio namenjen za

dobijanje slike. Cilj Funkhouser-ovog rada bio je konstrukcija sistema za auralizaciju koji bi uzimao u obzir i spekularne i difrakcione refleksije. Difrakcija, prema modelu Univerzalne Teorije Difrakcije (UTD), je demonstrirana baš korišćenjem ovog bim-trejsera od strane Tsingos-a i drugih [Tsingos et al., 2001]. Treba reći i da je poboljšanu tehniku likova uveo Mechel uključujući konstrukcije nalik na snopove [Mechel, 2002], ali u ovom algoritmu konstrukcije ostaju kao stvarni likovi koji se vide u ogledalu umesto stvarnih snopova.

Cilj obe ove vrste bim-trejsera je da budu tačne, dok omogućuju sve moguće spekularne refleksije poput originalne metode likova. Ovo znači da snopovi treba da budu tačno presečeni kada god se dogodi sudar sa reflektujućom površinom. Ovo lako stvara snop nepravilnog oblika, i preseći ovaj snop na odgovarajući način i proračunati presek postaje prilično zamorno. Zato su razvijene varijacije na ovu temu koje relaksiraju problem preseka snopova. One pojednostavljaju razmatranje snopova, ali zahtevaju dodatni računarski prolaz kako bi se verifikovalo da dobijena refleksiona putanja može biti realizovana. Ova operacija je slična poslednjem koraku računanja u klasičnoj metodi likova. Korišćenjem ovog pristupa moguće je postići visoke računarske performanse. Bilo kako bilo, korišćenjem ovog pristupa zajedno sa sinhronizacijom dešavanja na sceni, moguće je konstruisati sistem auralizacije u realnom vremenu u kome korisnik može slobodno da se kreće a zvučni prizor se interaktivno ažurira.

Jedan alternativni pristup efikasnom bim-trejseru na osnovu konstrukcije drveta likova je predstavio Antonacci i drugi [Antonacci et al., 2008]. Princip njihove tehnike je predstaviti bim-trejsing sa stanovišta vidljivosti i reparametrizovati zrake i linije u dualnom prostoru, koji je nazvan prostor zraka, tako da je snop u 2D prostoru predstavljen kao linijski segment u prostoru zraka. Ovaj pristup smanjuje dimenzionalnost problema tako da je efikasnost konstrukcije drva snopova moguća i za pokretni izvor i za pokretni prijemnik, i ključno ispitivanje vidljivosti je svedeno na jednodimenzionalnu pretragu. Ipak, ova tehnika ostaje ograničena na 2D i 2.5D (3D dobijen iz 2D) geometrije, i puna 3D implementacija do sada nije predstavljena.

3.5.4 Modelovanje difrakcije u rej-trejsingu i metodi likova

Proširenje metoda baziranih na geometrijskoj akustici kako bi se uključilo modelovanje difrakcije ima različit stepen važnosti za različite geometrije. Za prostiranje zvuka napolju, za zvučne barijere i određene geometrije grada može se svakako profitirati uključenjem difrakcionih pojava. U prostorija, primarni cilj za koji difrakcioni efekti imaju veliki uticaj uključuju reflektore koji vise sa plafona, ivice balkona, jama za orkestar, prisustvo stubova i otvora između pojedinih zapreminskih prostora.

Modelovanje difrakcije je uključeno u najnovije verzije komercijalnih softvera, poput CATT-Acoustic i ODEON, korišćenjem različitih pristupa [Christensen, 2008]. Praktično svi softverski paketi za modelovanje akustike prostorija koriste rej-trejsing, i dodatno mnogi od njih koriste metodu likova za efektno modelovanje refleksija niskog reda.

Kombinovanje metode likova i modelovanja difrakcije od ivica se tipično zasniva na nezavisnom detektovanju difraktujućih ivica. Kada su sve takve ivice poznate, one mogu biti smatrane ivičnim izvorima. Pristup pomoću sekundarnog izvora je primenio Torres i drugi [Torres et al., 2001] na modelovanje akustike prostorija, dok je računarski efikasnija ali manje tačna formulacija Univerzalne Teorije Difrakcije (UTD) primenjivana za kompleksnije geometrije. Radovi koji su usledili predstavljali su efikasnu implementaciju difrakcije drugog reda kako bi omogućili modelovanje kompleksnijih geometrija.

Kombinovanje rej-trejsinga i difrakcije je još jedan izazov. Kao što je napred rečeno, pristupi koji kombinuju rej-trejsing i difrakciju u 3D su već ranije predlagani. Kod ovih tehnika, neophodno je korišćenje transparentnih „prolaza“ na važnim ivicama, registrovati rastojanje od preseka zraka sa ovim „prolazom“ i difraktujuće ivice, i modifikovati putanju zraka zavisno od tog rastojanja.

3.6 Tehnike zasnovane na površinskom zračenju

Tehnike predstavljene u ovom odeljku koriste površi kao intermedijaciono skladište akustičke energije. Ovo znači da tehnike ove familije uključuju višestruko prebacivanje energije. U prvom prolazu zvučna energija se predaje od izvora ka

površima, a u sledećim prolazima se energija razmenjuje između površi. Konačno, energija se predaje prijemniku. Kao poređenje, tehnike bazirane na putanjama tipično sabiraju odziv od izvora do prijemnika u jedinstvenom prolazu, jedna putanja u jednom trenutku. Pristup preko površi ima izvesne prednosti u odnosu na pristup preko putanja. Jedan od glavnih boljitaka je taj što većina proračuna može biti obavljena nezavisno od mesta gde se nalazi prijemnik, zato što u ovom višestrukom prebacivanju energije samo poslednji deo uključuje predavanje energije prijemniku. Ovo je pre svega bitno u interaktivnim aplikacijama u kojima svi prethodni prolazi energije mogu biti unapred izračunati pre nego je stvarna interaktivna komponenta uključena, gde zvučna energija može biti sakupljena u realnom vremenu od površina do prijemnika u svrhu auralizacije. Takođe, prednost se vidi i za akustički dizajn prostorija gde se energija predaje od izvora ka više prijemnika, jer posle uvodnog prolaza energije procesorski je jevtino odrediti odziv u bilo kojoj prijemnoj tački slušaoca. Mana ovog pristupa je što je geometrijska tačnost neke određene putanje refleksije degradirana. Prikupljanje energije na površima uvek vodi ka nekim aproksimacijama, i u vremenu i u prostoru, u poređenju sa pravim putanjama nalik na zrake.

Odnos između ovih metoda i jednačine akustike prostorija, jednačina (3.6), je jasan, s obzirom da u oba slučaja površi prostorije igraju ključnu ulogu.

3.6.1 Uopšteno o metodi zračenja u geometrijskoj akustici

Metoda zračenja je potpuni kontrast metodi likova zato što je bazirana na površima i pretpostavlja idealno difuzne refleksije, dok je metoda likova bazirana na putanjama i modeluje jedino idealne spekularne refleksije. Metoda zračenja je sasvim direktna primena jednačine (3.6) gde BRDF $\rho(x', \Theta, \Omega)$ svake površi ima konstantnu vrednost koja je nezavisna od upadnih ili odlaznih uglova.

Tehnika zračenja je prvi put primenjena u oblasti termodinamike 1950-tih godina, mada glavna jednačina zračenja može biti pronađena još u radovima iz optike Yamauti-ja iz 1926. godine [Yamauti, 1926]. Još od 1980-tih godina tehnika zračenja je bila popularna u računarskoj grafici za proračune globalne osvetljenosti. U takvim primenama, glavni zahtev je pronaći energetska ravnotežu u kojoj odlazna energija sa jednog elementa se izjednačava sa dolaznom energijom na taj element koja je pomnožena koeficijentom apsorpcije tog elementa. U principu, ovo se može postići

predstavljanjem ove jednačine u matricnoj formi i invertovanjem matrice koja je formirana od koeficijenata refleksije.

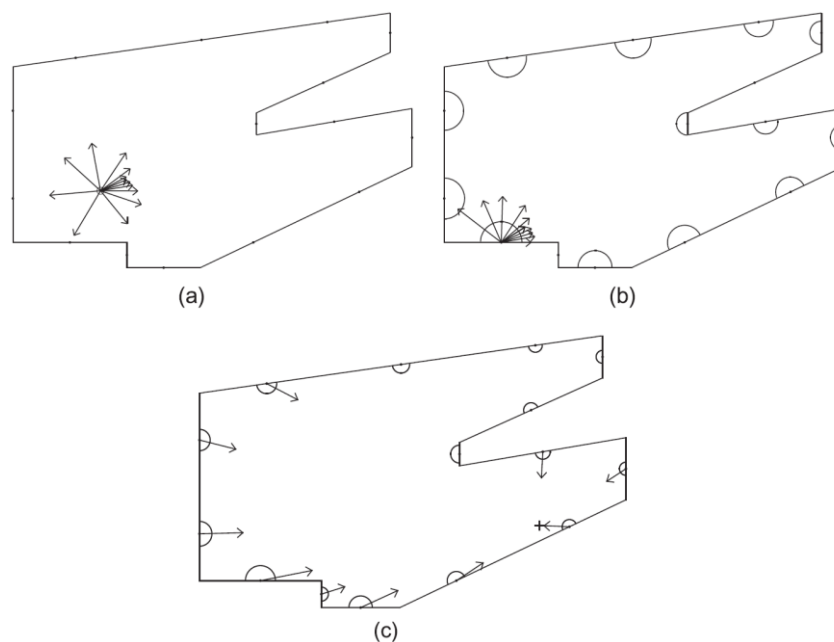
Tehnike zračenja u optici i računarskoj grafici daju rešenje koje predstavlja uspostavljeno stanje, vremenski nepromenljivo, koje ima ograničenu ali važnu upotrebu u akustici. Osnovnu jednačinu u akustičkom zračenju je predstavio Kuttruff 1971. godine [Kuttruff, 1971]. Ova jednačina i njeni naslednici su korišćeni za određivanje vremena reverberacije u prostoru. U ovim tehnikama nema potrebe računati stvarni odziv, već se integralna jednačina može koristiti za određivanje konstante slabljenja energije u direktnom smislu. Ipak, opšti cilj simulacije je dobiti energetske ili impulsne odzive u realnim prostorijama. Nadalje, fokus je na tehnikama koje mogu da pruže takva vremenski zavisna rešenja umesto proste skalarne vrednosti. One su bazirane na iterativnoj propagaciji zvučne energije koja polazi od izvora i prostire se sve dok većina energije ne bude apsorbirana od strane površi, kao što je šematski prikazano na slici 3.11 u 2D prostoru. Dobijanje takvih odziva zahteva upotrebu nekih iterativnih postupaka umesto matricne inverzije.

Prva studija koja diskutuje principe zračenja za određivanje akustičkog odziva prostorije je bila doktorska teza Moore-a iz 1984. godine [Moore, 1984]. Ovaj rad predstavlja iscrpan izveštaj tadašnjeg stanja nauke u geometrijskoj akustici prostorija i uvodi tehniku zračenja. Rad je prilagođen iz literature toplotnog zračenja [Sparrow et al., 1962] i sama tehnika je nazvana razmena zračenja. Tehnika koristi faktore geometrijskih oblika i uvodi koncept faktora razmene, koji predstavlja kumulativni faktor za refleksije višeg reda. Ovo govori da tehnika nije bila limitirana samo na difuzne refleksije za koje se kaže da su bez-pamćenja (jer odlazna energija ne zavisi od upadnog ugla), već može da se odnosi i na spekularne refleksije sadržane unutar difuznih refleksija. Ova mogućnost je postignuta korišćenjem likova. Umesto propagacije zvuka do date površi, ona se prenosi i do svog lika koji odgovara spekularnoj refleksiji. Moore-ova teza pruža veoma detaljan opis implementacije, uvodeći novi programski jezik pod nazivom „Sabin“ koji liči na programski jezik Paskal, u kome je alat za modelovanje kodovan. Kao takva, tehnika je robustna ali memorijski zahtevna i nije doživela veliku popularnost u praksi. Dodatno, mora se obraćati pažnja da se ne koristi isti put refleksije više puta. Ovu grešku je napravio u inicijalnom radu Sparrow, a primetio ju je Moore. Isti princip je iskorišćen u akustici

kasnije od strane Korany i drugih [Korany et al., 2001]. Ipak, njihova formulacija pati od istog defekta višestrukih detekcija koje potiču od ponavljanja iste refleksione putanje.

Prva implementacija metode akustičkog zračenja koja je dobila više publiciteta bila je od strane Lewers-a u 1993. godini [Lewers, 1993], koja je uvedena kao deo hibridne metode za proračun kasne reverberacije. Još jedna metoda zračenja je kratko objašnjena od strane Tsingos-a i Gascuel-a 1997. godine [Tsingos, Gascuel, 1997]. Novost u njihovom pristupu je hijerarhijska priroda proračuna, gde su površi podeljene na manje i finije detalje samo kada je to potrebno.

Le Bot i Bocquillet su pokazali [Le Bot, Bocquillet, 2000], i numerički i praktično, da Monte-Carlo zasnovan rej-trejsing i metode zračenja zasnovane na razmeštaju površi su ekvivalentne i daju iste rezultate kada se računa vreme reverberacije u zatvorenim prostorima sa idealno difuznim reflektujućim površinama.



Slika 3.11. U tehnici zračenja, zvučna energija je (a) prvo ispućana od strane izvora ka svim površinama, (b) iterativno se prostire između površi na taj naćin da na kraju (c) krajnji odziv na prijemniku je sabran od svih površi. Stvarno prostiranje zvuka moće se proraćunati unapred i vaći za sve pozicije prijemnika (slušaoca) [Savioja, Svensson, 2015].

Ključni korak u modelu akustičkog zraćenja je preduzet 2004. godine kada su Nosal i drugi predstavili [Nosal et al., 2004], detaljno, kako se tehnika moće iskoristiti

za predikciju zvučnog polja u ne-pravougaonoj prostoriji sa idealno difuznim površinama. Njihov rad takođe uključuje proveru analitičkog rešenja u sfernoj prostoriji. Algoritam proračunava gustinu zračenja, koja je poznata u kasnijim radovima pod imenom zvučna sjajnost površi, i prati isti iterativni princip propagacije, kao što je ilustrovano na slici 3.11. Predstavljena tehnika je ograničena na konveksne geometrije gde nema potrebe za proverom vidljivosti. Ipak, u praksi, proračun međusobne vidljivosti delova površi je esencijalan za potvrdu da se energija prostire samo do onih površi koje imaju optičku vidljivost sa delovima površi koji emituju zvučnu energiju.

Jedno elegantno svojstvo tehnike zračenja je da je zvučna energija koja se emituje sa površi nezavisna od ugla, kao što implicira polazna pretpostavka, na taj način rezultujući smanjenim zahtevima za računarskom memorijom. Ovo čini tehniku izuzetno primenjivom za aplikacije u realnom vremenu gde se simulacija zračenja obavlja u pretprocesorskom koraku, i zvučna energija na mestu slušaoca može biti sakupljena u interaktivnoj brzini (tj. nekoliko puta u sekundi), čak i kada se slušalac pomera. Slično tome, simulacija se može izvesti u recipročnom maniru, gde se izvor zvuka pomera a slušalac je statičan. Ipak, ako se pomeraju i izvor i slušalac potreban je kompletan proračun iz početka.

3.6.2 Prenos akustičkog zračenja u metodi površinskog zračenja

Osnovna pretpostavka metode zračenja da su sve površine idealno difuzne je prilično ograničavajuća i upotreba naprednijih BRDF je potrebna za dobijanje tačnijih simulacija. Jedan pristup za proširenje tehnike zračenja je omogućavanje upotrebe proizvoljnih refleksionih svojstava, kao što je predložio Siltanen i drugi u metodi prenosa akustičkog zračenja [Siltanen et al., 2007]. Takva svojstva čine tehniku zračenja praktičnijom, dok istovremeno povećavaju zahteve za procesorskim vremenom i memorijom što se zasniva na granularnosti prostorne diskretizacije. Osnovni princip prenosa akustičkog zračenja ostaje isti kao i kod bazične metode zračenja, i rezultat simulacije je zvučna sjajnost površina, ali rezultat je sada u funkciji odlaznog pravca. Ovo je postignuto prostornom diskretizacijom odziva na delovima površi tako da svaki pravac diskretizacije može imati svoj odziv. Stoga refleksije nisu više bez-pamćenja, što je bio slučaj kod difuznih površi, već emitovana energija u

datom pravcu zavisi od upadnog ugla. Ako se rezultati čuvaju kao funkcija vremena, onda se mogu koristiti i za svrhu auralizacije. Za ovu namenu, izvođenje simulacija u frekvencijskom domenu je najefikasnije zato što je konvolucija sa anehoičnim signalom efikasnija u ovom domenu u poređenju sa vremenskim domenom.

Jedna oblast primene u kojoj je ovaj tip efikasne auralizacije bitan su računarske igrice. Ipak, u tipičnom igračkom scenariju pokretni su i izvor i prijemnik zvuka. Prvo poboljšanje je predstavio Antani i drugi [Antani et al., 2012]. Njihov glavni princip je bio smanjiti kompleksnost scene tako da se scena može predstaviti ograničenim skupom tačaka, i onda se za svaki takav par tačaka može izračunati akustička prenosna funkcija. Ovo znači da je operator zvučnog transporta razdvojen od geometrije i od izvora zvuka. Međutim, ovo povlači veliku redukciju podataka i stoga smanjuje dobijenu tačnost. Zvuk sa izvora se projektuje na ove tačke u realnom vremenu, i primenjuju se prenosne funkcije za izvođenje simulacije prostorne akustike. Na kraju, finalno prikupljanje zračenja se izvodi kao i u osnovnoj tehnici prenosa akustičkog zračenja i tehnikama zračenja kako bi se obezbedio impulsni odziv za auralizaciju.

3.6.3 Rej-trejsing tehnika u proračunu površinskog zračenja

Osnovne rej-trejsing tehnike pokušavaju da pronađu spekularne i difuzne putanje refleksije između izvora i prijemnika, dok tehnike opisane u ovom odeljku koriste rej-trejsing kao alat da proračunaju zvučnu energiju na površima. Tehnika za dobijanje rezultata poznata kao fotonsko mapiranje se koristi u računarskoj grafici. Ova tehnika je bazirana na bidirekcionom rej-trejsingu, u kojoj se svetlosna energija prostire od izvora svetlosti do površi i smešta na fotonskoj mapi, a zatim se radi dodatni rej-trejsing prolaz sa tačke gledišta posmatrača kako bi se sakupila globalna osvetljenost iz ovih fotonskih mapa. Sličan dvofazni pristup je predložen i za modelovanje prostorne akustike. U fononskom mapiranju predloženom od strane Bertram-a i drugih [Bertram et al., 2005], zvučna energija na površima se registruje na fononskoj mapi, sa kojih se prikuplja zvučna energija na mestu prijema prilikom drugog prolaza. Oni su koristili informaciju o sakupljenoj energiji da formiraju filtre za auralizaciju. Oni su pomenuli proizvoljna refleksiona svojstva, ali njihovo izvođenje je samo za spekularnu refleksiju. Ipak, fononska mapa ne sadrži nikakve

informacije o usmerenosti, stoga poslednja refleksija je uvek difuzna. Još jedna varijacija istog principa je sonelno mapiranje (ovde je sonel elementarni zvučni element, poput fonona), koji su predstavili Kapralos i drugi [Kapralos et al., 2004]. Njihova tehnika uključuje i spekularne i difuzne refleksije i takođe ima mogućnost razmatranja i frekvencijski zavisnih difrakcija od ivice tako da su rezultati tačniji od onih koji se dobijaju fononskim mapiranjem.

Metoda zračenja zvučnih čestica je još jedna varijacija na istu ovu temu. Ovaj metod se fokusira na modelovanje difrakcije i pažljivo razmatra upotrebu procesorskog vremena i memorije, zasnovano na procesu ujedinjenja poput simulacije zvučnim česticama kvantizovanog piramidalnog bim-trejsinga. Uprkos tome, ogromni memorijski zahtevi su još uvek usko grlo za ovu tehniku koja se još uvek razvija.

3.6.4 Hibridne metode u proračunu površinskog zračenja

Tehnike koje se trenutno primenjuju u praksi su tipično hibridnog tipa [Alarcao et al., 2002], pri čemu se početni deo odziva računa pomoću tehnika zasnovanih na putanji, a kasniji deo odziva pomoću tehnika zasnovanih na zračenju sa površi.

Osnovna bim-trejsing metoda se bazira samo na spekularnim refleksijama. Međutim, u realnim scenarijima neki deo reflektovane energije će biti raspršen difuzno. Lewers je 1993. godine predstavio hibridnu metodu za modelovanje akustike prostorija u kojoj se koristi piramidalni bim-trejsing za proračun spekularnih refleksija [Lewers, 1993], i za svaku refleksiju difuzna energija se odvojeno snima i procesira korišćenjem principa zračenja u drugom prolazu. Ovo ograničava refleksije na taj način što posle difuzne refleksije sve naknadne refleksije će takođe biti difuzne [Cox, D'Antonio, 2005].

Glavni pravac u razvoju hibridnih metoda bio je korišćenje metode likova ili bim-trejsing tehnika za detekciju ranih spekularnih putanja refleksije i različitih tehnika baziranih na zračenju za kasnu reverberaciju, s obzirom da nema potrebe za tačnu detekciju spekularnih refleksija za kasnije komponente impulsnog odziva već se može koristiti manje precizna a procesorski brža tehnika. Na primer, Lewers je koristio zračenje, a Dalenback konusne snopove kao što je prethodno objašnjeno. Prve hibridne tehnike koje kombinuju metodu likova i osnovne principe zračenja u pravougaonim prostorijama je predstavio Baines 1983. godine [Baines, 1983]. Sličan

hibrid koji kombinuje rej-trejsing za rane refleksije sa algoritmima površinskog prenosa energije je takođe predstavio Tenenbaum i drugi [Tenenbaum et al., 2007]. U tom modelu poseban akcenat je stavljen na to kako postići uniformnost raspodele zraka na sferi.

Najnoviju hibridnu metodu iz ove familije je predstavio Koutsouris i drugi 2013. godine [Koutsouris et al., 2013]. Glavna prednost ove metode je da ona uključuje tehniku vođenu podacima, za prebacivanje iz spekularnog u difuzni mod, koji se posebno definiše za svaku putanju refleksije. Ovo omogućuje tehnici da uhvati različite akustičke fenomene, kao što je pulsirajući eho, koji se lako propušta ako se tranzicija sa spekularne na difuznu refleksiju obavlja sa unapred definisanim redom refleksije.

Postoje takođe takvi hibridni modeli koji prave frekvencijsku podelu tako da su niske frekvencije modelovane pomoću tehnika zasnovanih na talasnoj jednačini dok se visoke frekvencije modeluju preko tehnika geometrijske akustike.

Približne hibridne tehnike u realnom vremenu pri auralizaciji: Hibridne tehnike u realnom vremenu najčešće žrtvuju izvesnu fizičku preciznost za performanse. Dodatno, takvi sistemi najčešće modeluju kompleksne prostore, koji mogu uključivati brojne sobe i hodnike. Ovo proizvodi sasvim različite zahteve za simulaciju u poređenju sa akustičkim dizajnom jednog prostora poput koncertne hale ili učionice. Za takva okruženja, prednost je podeliti prostor na odvojene sobe koje su međusobno povezane prolazima kako je predložio Schroeder i drugi. Ovi sistemi sprovode odvojeno praćenje putanja u svakoj sobi a rezultujući impulsni odziv se dovodi na ulaz mreže filtera čija je topologija izvedena iz geometrijskog modela.

Stavrakis i drugi uvode sličan koncept reverberacionih grafova 2008. godine za ovu svrhu [Stavrakis et al., 2008]. U ovoj tehnici praćenje putanja se koristi za proračun operatora transporta od izvora do prolaza, između prolaza i od prolaza do slušaoca. Svi zajedno operatori transporta formiraju reverberacioni graf u kome se zvuk efikasno prostire od izvora do prijemnika u bilo kojoj sobi, i tako omogućuje realističnu reverberaciju pri auralizaciji.

Jedan od najkompletnijih fizičkih sistema za auralizaciju je RAVEN razvijen na RWTH u Ahenu. Sistem je dobro dokumentovan u doktorskoj tezi Schroeder-a.

Sistem je hibridni pristup metodi likova i rej-trejsingu i razmatra i difrakciju od ivica. Sadrži brojne performansne optimizacije kako bi obezbedio svoju upotrebu u realnom vremenu. Jedna takva tema je upotreba različitih nivoa detalja (Level of Detail – LoD), na taj način da se geometrija blizu slušaoca modeluje sa puno detalja, a delovi udaljeni od njega grubom geometrijom.

Antani i drugi su nastavili svoj gorepomenuti rad građenjem hibridnog metoda koji koristi praćenje putanja da detektuje rane spekularne i difuzne putanje, kao i difrakciju od ivica u realnom vremenu. Ovo se kombinuje sa unapred izračunatim prenosom akustičkog zračenja za dobijanje impulsnog odziva pune dužine u realnom vremenu za korišćenje u interaktivnim aplikacijama. Tehnika je sposobna da razmatra pokretni izvor zvuka i pokretnog slušaoca, pa čak i pokretne prepreke u prostoriji. Najnoviji radovi u ovom pravcu pružaju dalje povećanje efikasnosti i mogu da razmotre difrakcije višeg reda pri interaktivnim brzinama. Njihova tehnika je zasnovana na rej-trejsingu i koristi vremensko slaganje zraka na taj način da ako se desi promena na sceni, to neće uticati na većinu zraka i stoga neće biti potrebna ponovna rekalkulacija.

3.7 Rezime tehnika modelovanja pomoću geometrijske akustike

Različite tehnike modelovanja geometrijske akustike imaju značajno različite mogućnosti. Nizovi u tabeli 3.1 prikazuju tipove putanja refleksije koju svaka tehnika može da primeni, B je najopštiji slučaj i pokriva sve od idealno spekularne refleksije S do idealno difuzne refleksije D, dok E označava mogućnost razmatranja difrakcije na ivicama. Sintaksa nizova je ista kao u regularnim izrazima, u kojima su neki delovi alternativni a neki delovi se mogu i ponavljati. Na primer, niz $S\{D|S\}^*D$ bi označavao da tehnika može da adresira refleksione putanje koje počinju sa spekularnom refleksijom i nadalje mogu biti spekularna ili difuzna refleksija proizvoljan broj puta, ali se završava difuznom refleksijom. Većina bim-trejsing tehnika su označene oblikom snopa, gde je presek snopa krug kod konusnog snopa, trougao kod piramidalnog snopa, i snopovi imaju konveksni četvorougao poprečni presek kod praćenja odsečaka.

Tabela 3.1 prikazuje da nijedna tehnika ne pokriva najširi izraz $\{B|E\}^*$ u kome može biti proizvoljan refleksija i difrakcija od ivice u bilo kom redosledu. Ovo bi

zahtevalo da spekularne refleksije budu tačno proračunate i difrakcija na ivicama tačno modelovana. Iz ove perspektive rej-trejsing tehnika postaje najprivlačnija opcija zato što je sposobna da adresira bilo koji tip refleksije i zato što se može kombinovati sa modelovanjem difrakcije. Slično tome, potencijalno sposobne tehnike su prenos akustičkog zračenja i rej-trejsing tehnike zasnovane na površinskom zračenju. Jedina razlika ovde je da ove tehnike nisu sposobne da tačno uključe difrakciju od ivica i moraju da se obrate aproksimacijama zasnovanim na energiji. Ipak, ovo je bitno samo za spekularne refleksije gde je faza esencijalna, dok je za difuzne refleksije faza irelevantna. Dodatno, konstrukcija potpuno spekularnih refleksionih putanja iz rej-trejsing rezultata zahteva odvojenu proceduru provere validnosti likova. U praksi, spekularne putanje su relevantne samo pri niskim redovima refleksije, dok većina odziva treba da se dobije tehnikama zasnovanim na energiji.

Tehnike modelovanja pomoću geometrijske akustike imaju različite performanse proračuna. U tabeli 3.2 odabran je podskup tehnika za prikaz najnaprednijih tehnika modelovanja. U tabeli su izlistane njihove osnovne performanske karakteristike u terminima efikasnosti. Ovo rangiranje je pomalo proizvoljno zato što su zahtevana tačnost modelovanja i efikasnost blisko povezane i zavise od konkretne primene. Bez obzira na to, tabela 3.2 je informativna za aplikacije gde je prihvatljiv rezultat dovoljan, dok sa aspekta dizajna akustike prostorija ne mora biti relevantan. Ovde je glavni zaključak da ako je scena potpuno dinamična, onda su tehnike zasnovane na praćenju putanja pomoću rej-trejsinga najadekvatniji izbor. U takvim uslovima, nema izvođenja pretporračuna, već samo vremenska koherencija može smanjiti proračunsko opterećenje, kao što je predložio Schissler i drugi [Schissler et al., 2014]. Umesto toga, ako su i geometrija i izvor ili slušalac statični, onda je najefikasniji metod za korišćenje baziran na površinskom zračenju kao što je prenos „zvučnog sjaja“ površi. U takvim tehnikama moguće je unapred proračunati prenos energije do svih površi, i rezultujući odziv ka slušaocu može biti efikasno dobijen od ovih površi.

3.7.1 Tačnost tehnika modelovanja geometrijske akustike

Zahtevi za tačnošću simulacija akustike prostorija prilično zavise od konkretne primene. Ovi zahtevi su najviši u dizajnu akustike prostorija, i zato se zahtevaju

softverski alati sa visokom pouzdanošću. Istovremeno, postoji izvesna odgovornost korisnika softvera gde se glavni principi i ograničenja modela geometrijske akustike moraju priznati. Važno je primetiti da je model geometrijske akustike samo aproksimacija kompleksnog ponašanja zvuka u prostoriji. U okviru takvih ograničenja, tačnost tehnika modelovanja još uvek zavisi od nekoliko faktora. Ovi faktori se bazično mogu podeliti u dve grupe.

Prvo, postoje slabosti u modelima i u njihovoj implementaciji. Od svih ovih slabosti osnovne pretpostavke geometrijske akustike mogu biti najviše ograničavajući faktor. Pri visokim frekvencijama model geometrijske akustike je relativno tačan, ali na nižim frekvencijama ove pretpostavke otpadaju i nedostatak talasnog fenomena počinje da igra glavnu ulogu i čini rezultate netačnim. Modelovanje difrakcije na ivicama može da zaleći ovaj problem samo do izvesne mere. Još jedan razlog netačnosti tehnika geometrijske akustike je što su one ograničene na model lokalne reakcije, dok su u stvarnosti produžene reakcije uobičajene. Implementacija različitih tehnika nije uvek trivijalna, što je stavka koja može lako rezultirati u netačnostima u rezultatu. Jedan takav faktor je nivo modelovanja detalja geometrije. Osnovni princip geometrijske akustike je da svi detalji koji se modeluju treba da budu jedan red veličine iznad najveće talasne dužine zvuka koji se simulira. Da li finije detalje treba izbaciti ili kako ih predstaviti ostaje otvoreno pitanje.

Drugi skup faktora koji utiče na praktičnu tačnost rezultata je kvalitet ulaznih podataka. Dostupni podaci o materijalima su tipično značajno grublji od onog što je u primeni pomoću modernih tehnika modelovanja. Na primer, materijali iz realnog sveta nemaju podatke o ugaono zavisnom koeficijentu apsorpcije. Poput toga, tačnost i nivo detalja geometrije najčešće postavljaju izazove u modelovanju. Ako je geometrija previše gruba greške će biti značajne. Slično, ako je geometrija previše detaljna, izvesne tehnike modelovanja će imati problema, kao što je ranije predočeno. U praksi, najkorisniji rezultati simulacije se dobijaju sa uprošćenim geometrijama, dok se u računarskim igricama preferira upotreba iste geometrije za vizuelno i zvučno simuliranje.

Dostupnost široko prihvaćenih referentnih slučajeva može da omogući razvoj tačnijih tehnika modelovanja. Takvi dobro dokumentovani slučajevi, sa

geometrijskim modelima, informacijama o materijalima, i javno dostupnim rezultatima merenja omogućuju proveru valjanosti za one koji razvijaju takve metode.

Tabela 3.1. Moguće refleksione putanje za svaku tehniku modelovanja [S – spekularna, D – difuzna, B – proizvoljna BRDF, E – Difrakcija od ivice, | – ili, x* – ponavljanje, x+ – pojavljuje se jednom ili nijednom, xq – pojavljuje se mali broj (q) puta]. Skraćenice za difrakcione modele su sledeće: HF – Huygens Fresnel, BTM – Biot Tolstoy Medwin, UTD – Univerzalna Teorija Difrakcije, HU – Heisenberg-ov princip neodređenosti.

Tehnika	Refleksione putanje
ISs (Refs. 41, 97, 104, and 105)	S*
Cone tracing (Refs. 121 and 176)	
Pyramid tracing (Refs. 122–124, 130, and 131)	
Frustum tracing (Refs. 36 and 132)	
Beam tracing (ISs) (Refs. 136, 137, and 140)	
Ray tracing (Refs. 3 and 110)	
Ray tracing + ISs (Ref. 109)	
Ray tracing (Ref. 58)	D*
Radiosity (Ref. 60)	
Ray tracing + ad hoc (Ref. 118)	{S E}*
Pyramid tracing + radiosity (Ref. 65)	S*D*
ISs + radiosity (Ref. 167)	
Ray tracing (Ref. 113)	{S D}*
ISs + ray tracing (Ref. 127)	
Cone tracing (Ref. 129)	
Phonon mapping (Ref. 161)	S*D
Sonel mapping + HF (Ref. 77)	{S D E}*
ISs + ray tracing + BTM + HU (Ref. 146)	
Ray tracing + HU (Refs. 85 and 149)	
ISs + BTM (Refs. 177 and 178)	S*{E}+
Ray tracing + UTD (Ref. 179)	
Frustum tracing + UTD (Ref. 147)	{S E}*
Frustum tracing + UTD + ray tracing (Ref. 180)	{S D}* E+{S D}*
ISs + BTM (Ref. 148)	
ART (Refs. 56, 64, and 159)	B*
Ray tracing + radiance transfer + HU (Ref. 174)	{S E}q{D S E}*{S E}q (prvi prolaz) D{S D E}*D (drugi prolaz)
Ray tracing + UTD (Ref. 175)	S* {D*E*}

3.7.2 Budući pravci razvoja geometrijske akustike

Trenutno, postoji jaz između zajednica koje proučavaju modelovanje akustike prostorija i onih koji se fokusiraju na industriju zabave. Ove oblasti bi profitirale od međusobne kolaboracije. Posebno, visoko performantne tehnike razvijene za igrice bi mogle profitirati od ozbiljnije razvijenih oblasti modelovanja. Mada se visoke performanse ne podudaraju sa povećanom tačnošću, različita unapređenja koja ne

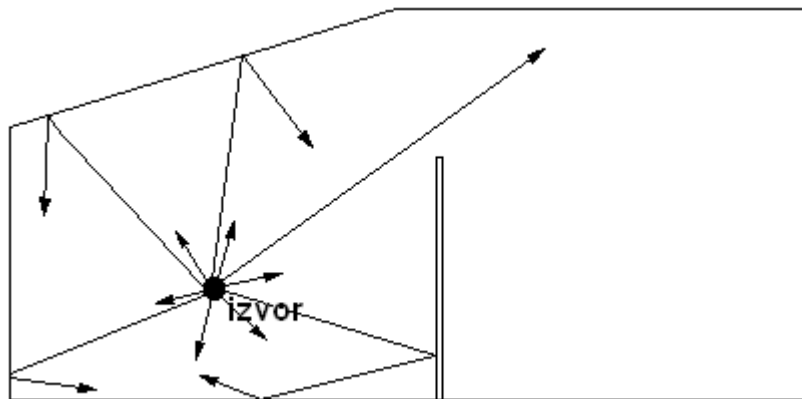
kvare tačnost mogu biti izvedena. Na primer, upotreba grafičkih procesorskih jedinica (GPU) za rej-trejsing omogućuje veći broj zraka pri simulaciji i više redove refleksije u poređenju sa onim što je trenutno uobičajeno na centralnim procesorskim jedinicama (CPU). Slično tome, napredne bim-trejsing tehnike za pronalaženje svih čisto spekularnih putanja refleksije su vredne proučavanja za upotrebu u akustičkom modelovanju prostorija. Najzad, potrebno je podvući potrebu za kolaboracijom sa istraživačima u polju vizuelnih simulacija u računarskoj grafici. Mada postoje fundamentalne razlike između ovih polja, postoje i brojne slične tehnike i sinergija ova dva polja je jasna.

Tabela 3.2. Performansne karakteristike najpopularnijih tehnika modelovanja pomoću geometrijske akustike. Poslednje četiri kolone označavaju pogodnost tehnike za dinamičke scenarije i hibridne metode.

Tehnika	Iskorišćenost memorije	Procesorsko vreme	Pokretni prijemnik	Puna pokretljivost	Rane refleksije	Kasni odziv
Beam tracing	Srednje	Nisko	+	-	++	-
Radiosity	Srednje	Srednje	+	-	-	++
Ray tracing (path-based)	Nisko	Srednje	-	+	++	+
Ray tracing (surface-based)	Visoko	Visoko	+	-	+	++
ART	Visoko	Visoko	+	-	+	++

4 Metoda rej-trejsing

Koncept na kome je zasnovana rej-trejsing metoda je u osnovi jednostavan. Osnova za ideju o rej-trejsing metodi može se naći još u ultrazvučnoj Šliren fotografiji. Ovaj koncept je predstavljen na slici 4.1, u dve dimenzije radi jasnoće, pri čemu je princip isti i u tri dimenzije.



Slika 4.1. Ilustracija dvodimenzionalne predstave rej-trejsing metode.

Zvuk koji emituje zvučni izvor modeluje se konačnim brojem zraka koji predstavljaju nosioce zvučne snage. Svaki od ovih N zraka nosi $1/N$ -ti deo zvučne snage izvora. Ovi zraci putuju kroz prostor brzinom zvuka i reflektuju se od zidova prostorije prilikom svakog sudara. Za to vreme njihova energija se smanjuje kao posledica apsorpcije zvuka u vazduhu i usled apsorpcije zvučne energije prilikom refleksije od zidova. Da bi dobili kvantitativnu analizu uvodi se prijemna sfera za detekciju zvučnih zraka. Kada zrak prođe kroz prijemnu sferu proračunava se energija koju ona registruje i taj podatak se čuva za dalju obradu. Od sačuvanih podataka se izračunava impulsni odziv prostorije i iz njega svi potrebni akustički parametri.

Ako je zvučni izvor omnidirekcionni, pravci prostiranja virtuelnih zvučnih zraka se određuju na osnovu uniformne raspodele. Takođe je moguće modelovanje i drugačijih usmerenosti zvučnog izvora. Na osnovu usmerenosti zvučnog izvora određuje se mogući pravac prostiranja svakog novog zvučnog zraka, koji polazi od izvora. Posmatrajući zrak kao vektor, koji menja svoj pravac prostiranja posle svake

refleksije, moguće je jednoznačno odrediti sa kojom narednom površinom će se zrak sudariti. S obzirom da se naredna površina s kojom će se zrak sudariti mora određivati posle svake refleksije potreban je algoritam koji će od mogućih površina određivati presečnu. Poželjno je da algoritam bude što brži kako bi mogli da obradimo i složene prostorije sa velikim brojem zidova. Posle određivanja presečnog zida i određivanja pravca nove refleksije potrebno je proveriti da li zrak preseca prijemnu zapreminu.

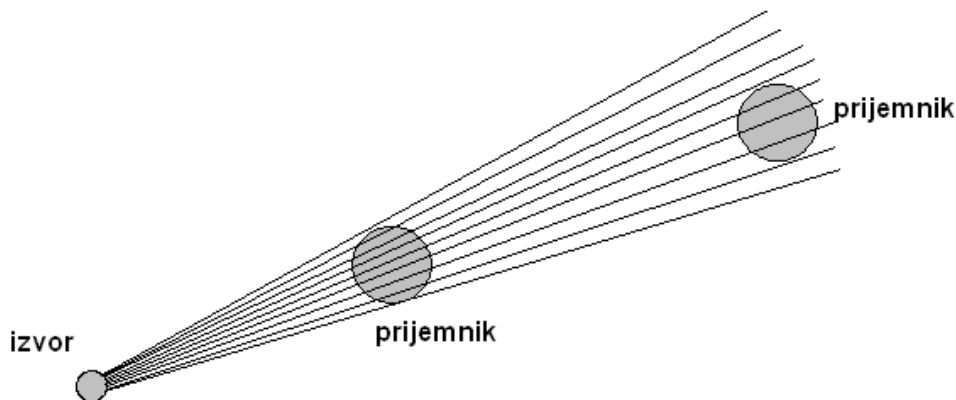
Energija koju registruje prijemna zapremina direktno zavisi od dužine pređenog puta unutar prostorije, kao i od dužine puta unutar same prijemne sfere. Slabljenje energije izračunava se saglasno veličini apsorpcije zvuka u vazduhu i veličini apsorpcije zvuka prilikom refleksije od zidova. Novi pravac prostiranja zraka, posle refleksije od zida, može se odrediti na dva načina. Prvi način je na osnovu pravilne geometrijske refleksije, Snelov zakon. Smatra se da je upadni ugao zraka u odnosu na normalu na zid jednak reflektujućem uglu zraka u odnosu na istu tu normalu. Drugi način je smatrajući da su svi pravci refleksije zraka mogući, tj. da se zraci difuzno reflektuju.

Posle refleksije određuje se presek zraka sa sledećim zidom i petlja algoritma započinje od početka. Proces se ponavlja sve dok energija zraka ne padne ispod određene granice ili dok ne istekne vreme u kome se posmatra odziv. Odabir ove granice je proizvoljan.

Apsorpcija zvuka u vazduhu i apsorpcija zvuka prilikom refleksije od zida zavisi od frekvencije zvuka. Međutim, što se tiče frekvencijske zavisnosti dobijenih rezultata, inherentno svojstvo rej-trejsing metode je da rezultati koji se dobijaju na niskim frekvencijama odstupaju od onih izmerenih u praksi. To je logično, s obzirom da se prilikom modelovanja pomoću rej-trejsing metode svesno zanemaruje talasna priroda zvuka koja je odgovorna za efekte difrakcije i interferencije. Ovi efekti postaju dominantni kada talasna dužina zvuka postane uporediva sa dimenzijama prostorije. Nasuprot tome, rej-trejsing metoda ima važnost kada je talasna dužina zvuka mnogo manja od veličine prepreke tj. od dimenzija prostorije.

U vezi rej-trejsing metode je važno napomenuti da je zakon divergencije zvučnog polja ili zakon slabljenja zvuka usled širenja talasnog fronta (poznat kao zakon $1/r^2$) implicitno ugrađen u samu metodu. Ovo potiče odatle što se sa udaljavanjem od izvora smanjuje broj zraka koji preseca prijemnu sferu, tj. gustina

zraka opada sa povećanjem rastojanja od izvora. Na slici 4.2 prikazan je zvučni izvor i zvučni zraci koji polaze od njega. Prikazane su i dve prijemne sfere na različitim udaljenostima od zvučnog izvora. Vidi se da udaljeniju sferu preseca manji broj zraka.



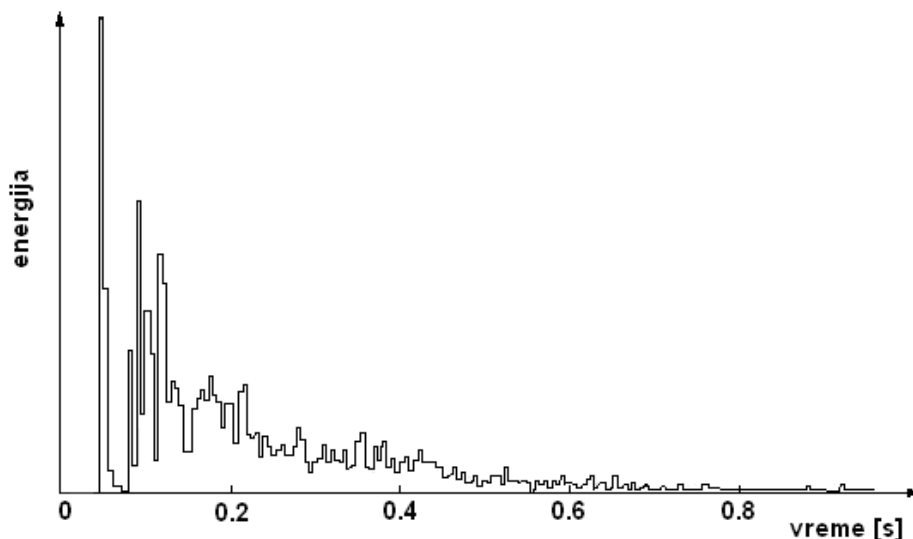
Slika 4.2. Ilustracija koja prikazuje kako udaljeniju sferu preseca manji broj zraka.

4.1 Prijemna sfera

Prijemna sfera predstavlja definisanu prostornu zonu koja registruje prolazak zraka. Kada god zvučni zrak prođe kroz prijemnu sferu beleži se njegova energija i vreme stizanja; ako je potrebno beleži se i pravac iz koga je naišao. Po završetku procesa simulacije energija se sortira po vremenskom redosledu i dobija se energetski dijagram. Na slici 4.3 prikazan je kratkovremenski integrisani energetski impulsni odziv. Odabir vremenskog intervala usrednjavanja nije beznačajan. Ako su intervali preveliki dobijeni dijagram će biti samo gruba aproksimacija impulsnog odziva, s obzirom da će značajni detalji biti izgubljeni usrednjavanjem. Suviše kratki intervali će uticati na rezultate popriličnim fluktuacijama dijagrama, što opet vodi težem uočavanju značajnih karakteristika impulsnog odziva. U literaturi se navodi da interval treba da bude 5-10 ms, s obzirom da je ovakav vremenski interval u vezi sa vremenskom rezolucijom slušanja kod krajnjeg slušaoca.

U svakom slučaju, postignuta tačnost dobijenih rezultata zavisi od broja zraka registrovanih u prijemniku. Zbog ovoga prijemna sfera ne sme biti suviše mala, tj. ukupan broj „uhvaćenih“ zraka u jednom vremenskom intervalu usrednjavanja mora biti dovoljno veliki. Ako se simulacija radi sa 10^5 - 10^6 zraka u literaturi

[Vorlander, 2008] se navodi da se dovoljno precizni rezultati dobijaju za dimenziju prijemne sfere oko 1m.



Slika 4.3. Ilustracija energetskog dijagrama;
Širina vremenskog intervala integraljenja je 5 ms.

Veličina prijemne sfere može biti konstantna, međutim u nekim slučajevima promenljiva veličina prijemne sfere daje bolje rezultate. U literaturi [Rindel, 1995] se definišu faktori od kojih zavisi veličina prijemne sfere: zapremina prostorije, rastojanje od izvora do prijemnika, broj zraka koji se koriste pri simulaciji, i predlaže se sledeća jednačina za određivanje veličine prijemne sfere:

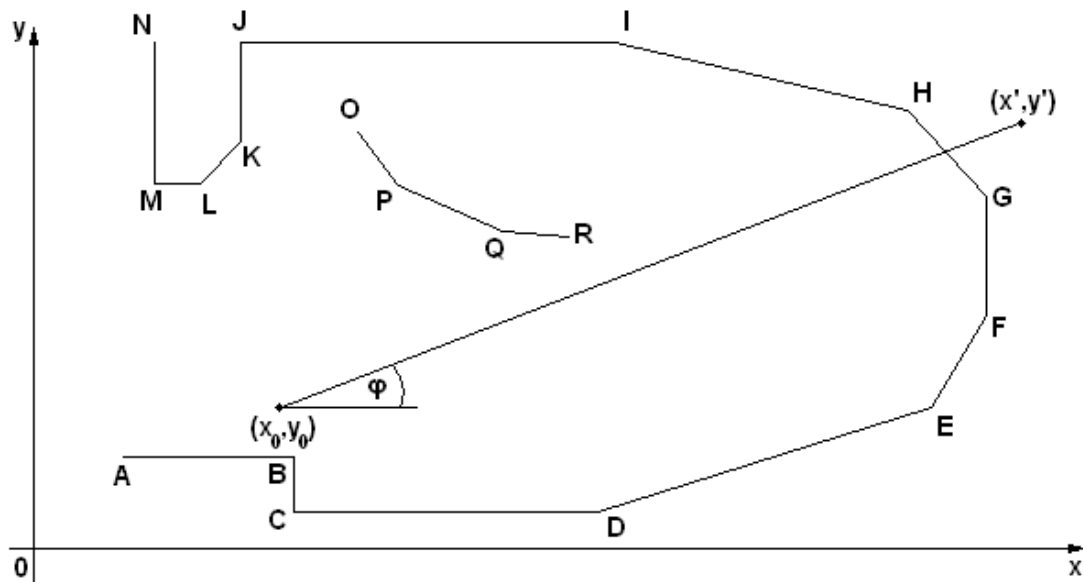
$$r = kd_{sr} \sqrt{\frac{4}{N}} \quad (4.1)$$

gde je r poluprečnik prijemne sfere, k težinski faktor koji predstavlja logaritam zapremine prostorije, d_{sr} rastojanje između izvora i prijemnika i N broj zraka.

4.2 Algoritam rej-trejsing metode

Pravci zraka koji polaze od zvučnog izvora odabiraju se pomoću slučajne promenljive. U slučaju da je izvor omnidirekcioni, prostorni ugao pod kojim se emituju zvučni zraci iznosi 4π . Na slici 4.4 prikazan je slučaj dvodimenzionalne predstave prostorije, dobijene njenim uzdužnim presekom, u kojoj dvodimenzionalni

zvučni izvor šalje zrake pod uglom φ [Mijić, Merkle, 1987]. Ugao φ predstavlja uniformnu slučajnu promenljivu koja uzima vrednosti u opsegu $(0,2\pi)$.



Slika 4.4. Dvodimenzionalna predstava prostorije, dobijena njenim uzdužnim presekom, na primeru jedne koncertne sale [Mijić, Merkle, 1987].

U slučaju trodimenzionalnog modela prostorni ugao se predstavlja u sfernom koordinatnom sistemu, pri čemu φ pripada opsegu $(0,2\pi)$, a θ opsegu $(0,\pi)$. Osnovne pretpostavke ovakvog modela su:

1. Sve površine prostorije predstavljene su konveksnim planarnim mnogouglovima, od 1 do m , koji su dati svojim temenima (T_1, T_2, \dots, T_n) . Koordinate temena $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)$ se unose ručno i predstavljaju ulazne podatke pri simulaciji.
2. Svaka od m ravni kojima pripadaju konveksni mnogouglovi je određena sa tri temena. Jednačina K -te ravni je data sa:

$$A_K x + B_K y + C_K z + D_K = 0 \quad (4.2)$$

gde se parametri A_k, B_k, C_k i D_k proračunavaju na početku rada algoritma, iz prva tri temena svakog mnogougla, korišćenjem poznatih relacija iz nacrtno geometrije.

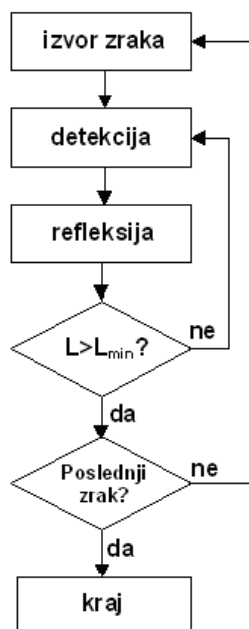
3. Zrak sa početkom u tački izvora (x_0, y_0, z_0) predstavljamo jednačinama:

$$\begin{aligned}
 x &= x_0 + t \sin \theta \cos \varphi = x_0 + \alpha t \\
 y &= y_0 + t \sin \theta \sin \varphi = y_0 + \beta t \\
 z &= z_0 + t \cos \theta = z_0 + \gamma t
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

pri čemu je $0 \leq t \leq t_{max}$, a t_{max} je maksimalno rastojanje između bilo koje dve tačke u prostoriji.

4. Algoritam praćenja zraka se svodi na: prati se zrak koji kreće od izvora; proverava se da li putanja zraka preseca prijemnu sferu; određuje se mnogougao kojim je modelovan zid prostorije, a sa kojim se preseca putanja zraka i njihova presečna tačka; određuje se novi zrak koji polazi iz presečne tačke pod uslovima refleksije koji se zadaju.

Opisani algoritam šematski se može predstaviti na način prikazan na slici 4.5. L_{min} je minimalni nivo intenziteta zvuka koji zrak treba da ima, da bi se nastavilo sa praćenjem njegovog kretanja. Za određivanje vremena reverberacije, ovaj minimalni nivo intenziteta zvuka će iznositi -60dB u odnosu na početni, koji zrak ima kada polazi od izvora.



Slika 4.5. Opšti dijagram toka rej-trejsing metode.

4.3 Proračun energije primarnih zraka

Znajući snagu zvučnog izvora od koga polaze zvučni zraci i broj zraka koji koristimo pri simulaciji, možemo dodeliti svakom zraku njegovu početnu zvučnu snagu deleći ukupnu snagu izvora sa brojem zraka N :

$$P_i = \frac{P_0}{N} \quad (4.4)$$

gde je P_i inicijalna zvučna snaga i -tog zraka, P_0 ukupna zvučna snaga izvora i N broj zraka pri simulaciji. Na sličan način može se napisati relacija za inicijalni intenzitet i -tog zraka:

$$I_i = \frac{I_0}{N} = \frac{P_0}{4\pi N} \quad (4.5)$$

gde je I_0 intenzitet zvučnog izvora i 4π prostorni ugao omnidirekcionog zvučnog izvora. Prilikom refleksije od zida zrak gubi određeni deo energije usled apsorpcije, tako da posle svake refleksije njegova snaga opada prema sledećem zakonu:

$$P_{i,refl} = P_{i,inc} \cdot e^{-ml} \cdot (1 - \alpha) \quad (4.6)$$

gde je $P_{i,refl}$ snaga i -tog zraka posle refleksije od zida, $P_{i,inc}$ upadna snaga i -tog zraka pre refleksije, m koeficijent apsorpcije zvuka u vazduhu (njegova srednja vrednost na sobnoj temperaturi sa prosečnom vlažnošću vazduha iznosi 0,003456 po metru pređenog puta), l dužina puta koju je zrak prešao od prethodne refleksije i α koeficijent apsorpcije zvuka od zida. Pri tome važi relacija za intenzitet i -tog zraka posle refleksije od zida:

$$I_{i,refl} = \frac{P_{i,inc}}{4\pi} \cdot e^{-ml} \cdot (1 - \alpha) = I_{i,inc} \cdot e^{-ml} \cdot (1 - \alpha) \quad (4.7)$$

gde je $I_{i,refl}$ intenzitet zvučnog zraka posle refleksije. Pretpostavimo da je energija kojom zrak doprinosi zvučnom odzivu prilikom prolaska kroz prijemnu sferu $E_{i,rec}$, pri čemu je njegova zvučna snaga pri nailasku na prijemnu sferu $P_{i,rec} = P_{i,refl} \cdot e^{-ml}$, gde je l -rastojanje od zida refleksije do preseka sa prijemnom sferom. Tada postoji sledeća relacija između ove dve veličine:

$$E_{i,rec} = P_{i,rec} \cdot T_{i,rec} = P_{i,refl} e^{-ml} \cdot T_{i,rec} = 4\pi I_{i,refl} e^{-ml} \cdot T_{i,rec} \quad (4.8)$$

gde je $T_{i,rec}$ vreme koje je zrak proveo prolazeći kroz prijemnu sferu. $T_{i,rec}$ se može odrediti na osnovu brzine zvuka c i rastojanja koje je zrak prešao unutar prijemne sfere.

Rastojanje koje je zrak prešao unutar prijemne sfere se može odrediti na dva načina. Prvi je prikazan na slici 4.6, na kojoj je prikazana prijemna sfera kroz koju prolazi jedan zvučni zrak. Tri relevantne veličine su predstavljene na slici: d_{ri} je rastojanje koje zrak pređe unutar sfere, d je najkraće rastojanje od zraka do centra sfere i r je poluprečnik sfere. Rastojanje koje zrak pređe unutar prijemne sfere se može odrediti na osnovu Pitagorine teoreme:

$$d_{ri} = 2\sqrt{r^2 - d^2} \quad (4.9)$$

Drugi način je iskoristiti rešenje jednačina za presek prave i sfere. Taj sistem jednačina daje dva rešenja, od kojih jedno predstavlja prvi presek prave sa sferom, a drugo rešenje predstavlja drugi presek prave sa sferom. Jedinstveno rešenje postoji samo u slučaju da prava tangira sferu, ali je tada pređeni put unutar sfere jednak nuli. Rastojanje se određuje kao apsolutna razlika rešenja sistema jednačina.

Može se izvesti relacija između energije zvučnog zraka i intenziteta zvuka koji apsorbuje prijemna sfera, na osnovu izračunatog rastojanja d_{ri} . Data je sledećim izrazom:

$$I_{i,rec} = \frac{E_{i,rec} \cdot c}{V_{rec}} = \frac{P_{i,rec} \cdot T_{i,rec} \cdot c}{V_{rec}} = \frac{P_{i,rec} \cdot d_{ri}}{V_{rec}} = \frac{4\pi I_{i,refl} e^{-ml} \cdot d_{ri}}{V_{rec}} \quad (4.10)$$

gde je V_{rec} -zapremina prijemne sfere. S obzirom da je $V_{rec} = \frac{4}{3}\pi r^3$ gde je r poluprečnik prijemne sfere, može se napisati sledeća relacija:

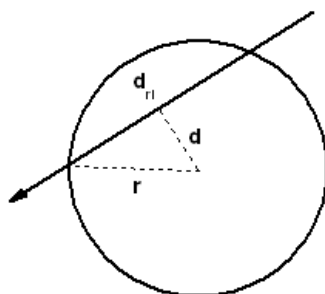
$$I_{i,rec} = \frac{4\pi I_{i,refl} e^{-ml} \cdot d_{ri}}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{I_{i,refl} e^{-ml} \cdot d_{ri}}{r^3 / 3} \quad (4.11)$$

gde je $I_{i,refl}$ intenzitet zvučnog zraka posle refleksije, m koeficijent apsorpcije zvuka u vazduhu, l dužina puta koju je zrak prešao od prethodne refleksije, d_{ri} je dat jednačinom (4.9). U njoj je prikazan odnos intenziteta reflektovanog zraka i intenziteta zraka koji registruje prijemna sfera [Elorza, 2005].

Nivo intenziteta zraka može se izračunati na osnovu formule:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (4.12)$$

pri čemu je $I_{ref} = 1 \text{ pW/m}^2$. Imajući u vidu da je $d = ct$, a $c = 340 \text{ m/s}$ brzina zvuka u vazduhu, dobijamo impulsni odziv prostorije $I(t)$ u vremenu, odnosno nivo zvuka $L_I(t)$.



Slika 4.6. Prijemna sfera i primarni zrak koji je preseca [Elorza, 2005].

4.4 Modelovanje refleksija

Osnovna tema u računarskom modelovanju akustičkih pojava je način na koji se modeluje refleksija zvuka od prepreke tj. zida prostorije. Ta dilema pre svega proističe iz same dvojake prirode zvuka, čestično-talasne prirode i fenomena koji se dešavaju prilikom sudara zvuka sa preprekom. Talasna priroda zvuka ukazuje da se ne smeju zanemariti efekti difuznosti refleksija zvuka koji nastaju usled nailaska zvuka na neravne površine i njegovom refleksijom od takvih površina, i usled nailaska zvuka na prepreke čija je veličina uporediva sa talasnom dužinom zvuka i na ivicama prepreka (difrakcija i interferencija) [Briggs et al., 1999].

Do sada su održane tri međunarodne konferencije (Round Robin), posvećene računarskim programima za simulaciju akustičkog odziva prostorija [Vorlander, 1995]. Na njima su upoređivani rezultati rada više softverskih paketa, dobijeni simulacijama akustičkog odziva nekoliko zadatih prostorija. Rezultati su poređeni i sa izmerenim eksperimentalnim vrednostima. Zaključak je bio da su samo oni programi koji su u svom algoritmu uvažavali efekte difuznosti refleksija zvuka davali rezultate dovoljno bliske izmerenim. Pokazalo se da procene vremena reverberacije, samo na osnovu pravilne refleksije zvučnih zraka, premašuju izmerene vrednosti u slučajevima kada je difuznost refleksija zraka značajna [Kuttruff, 1995]. Dobijeni zaključak je bio toliko značajan da se pristupilo donošenju standarda kojim bi se opisale metode za merenje difuznih refleksija zvuka u prostoriji [ISO 17497, 2004].

Posle refleksije od zida, zrak dobija novi pravac prostiranja. Taj novi pravac prostiranja se može odrediti na dva načina. Prvi je deterministički, pomoću zakona pravilne geometrijske refleksije, poznatog i kao Snelov zakon. Prema njemu je upadni

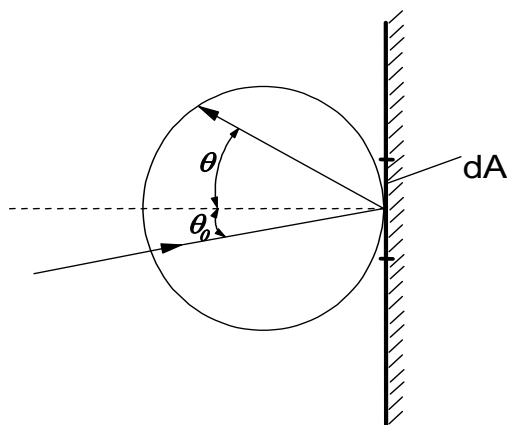
ugao zraka jednak odbojnom uglu. Drugi je probabilistički, pomoću Lamberovog zakona, kojim se modeluju difuzne refleksije zvuka.

4.5 Lamberov zakon

Iako potiče iz optike, Lamberov zakon je našao svoju primenu u akustici pri definisanju difuznih refleksija [Barron, 2009]. Difuznim refleksijama se smatraju one refleksije čiji pravac ne zavisi od pravca upadnog zvuka („bez memorije“). Na slici 4.7 prikazan je primer difuzne refleksije od akustički hrapave površine prema Lamberovom zakonu. Pretpostavimo da je element površine dA pogođen skupinom približno paralelnih zvučnih zraka intenziteta I_0 koji zaklapaju sa normalom ugao θ_0 . Tada je intenzitet zvuka u pravcu ugla θ u odnosu na normalu dat izrazom [Kuttruff, 2000]:

$$I = I_0 dA \cos \theta_0 \frac{\cos \theta}{r^2 \pi} \quad (4.13)$$

gde je I intenzitet zraka prema Lamberovom zakonu, a r rastojanje do prijemnika.



Slika 4.7. Ilustracija idealno difuzne refleksije od akustički hrapave površine prema Lamberovom zakonu.

Odavde se može izvesti formula za verovatnoću refleksije zraka po Lamberovom zakonu u okviru prostornog ugla $d\Omega$ pod uglom θ u odnosu na normalu na zid. Zvučna snaga koja se izrači u okviru prostornog ugla $d\Omega$ po definiciji je:

$$P(r) = I(r) dS = I(r) r^2 d\Omega \quad (4.14)$$

gde je $P(r)$ snaga zvučnog izvora na rastojanju r , a dS elementarna površina nasuprot prostornom uglu $d\Omega$.

Imajući u vidu jednačinu (4.13) može se pisati:

$$P(r) = I_0 dA \cos \theta_0 \cdot (1 - \alpha) \cdot \frac{\cos \theta}{\pi} d\Omega \quad (4.15)$$

pri čemu je α koeficijent apsorpcije zida. S obzirom da se reflektovana snaga, koja iznosi $I_0 dA \cos \theta_0 (1 - \alpha)$, izrači u okviru prostornog ugla od 2π možemo pisati:

$$\int_0^{2\pi} I_0 dA \cos \theta_0 \cdot (1 - \alpha) \cdot \frac{\cos \theta}{\pi} d\Omega = I_0 dA \cos \theta_0 \cdot (1 - \alpha) \quad (4.16)$$

ili, posle skraćivanja:

$$\int_0^{2\pi} \frac{\cos \theta}{\pi} d\Omega = 1 \quad (4.17)$$

što je upravo osobina funkcije verovatnoće. Odavde proizilazi da je verovatnoća da zrak bude izračen u okviru prostornog ugla $d\Omega$, pod uglom θ u odnosu na normalu:

$$\xi(\theta) d\Omega = \frac{\cos \theta}{\pi} d\Omega \quad (4.18)$$

gde je $\xi(\theta)$ opisana verovatnoća. Veoma je bitno razlikovati 2D i 3D slučaj, na šta se posebno skreće pažnja u literaturi [Pohl, Stephenson, 2014]. U 2D slučaju je $d\Omega = d\theta$ pa se integral (4.17) svodi na:

$$\int_0^{\pi/2} \cos \theta d\theta = 1 \quad (4.19)$$

pri čemu treba obratiti pažnju da se u 2D slučaju polazi od izraza $P(r) = I(r) dL$, gde je dL dužina luka. U 3D slučaju $d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$ pa se integral (4.17) svodi na:

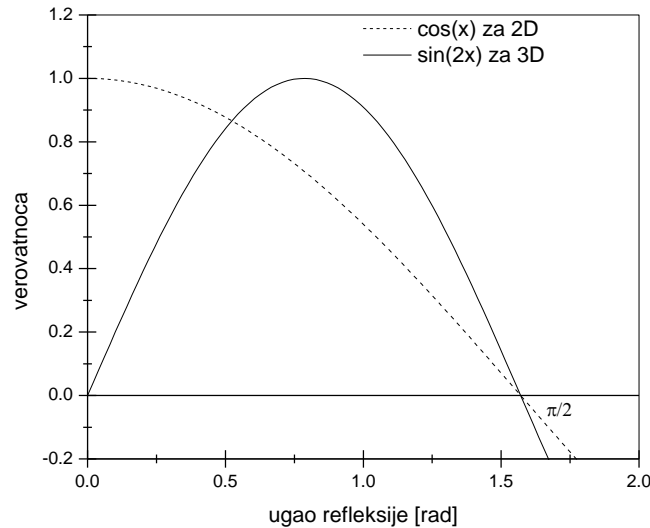
$$\int_0^{\pi/2} \sin 2\theta d\theta = 1 \quad (4.20)$$

što znači da se verovatnoća Lamberovog ugla razlikuje u 2D i 3D slučaju. Na slici 4.8 prikazane su verovatnoće Lamberovog ugla u 2D i 3D slučaju.

Lamberov zakon praktično opisuje da je zračenje sekundarnog zvučnog izvora konstantno duž svih pravaca refleksije. Zračenje je fizička veličina koja se koristi u optici. Definicija zračenja je:

$$L = \frac{P}{d\Omega dA \cos \theta} \left[\frac{W}{m^2 sr} \right] \quad (4.21)$$

gde je L zračenje svetlosnog izvora snage P koje uočava posmatrač, koji posmatra element površi dA u okviru prostornog ugla $d\Omega$ pod uglom θ u odnosu na normalu na površ. Jedinica zračenja je W/m^2sr .

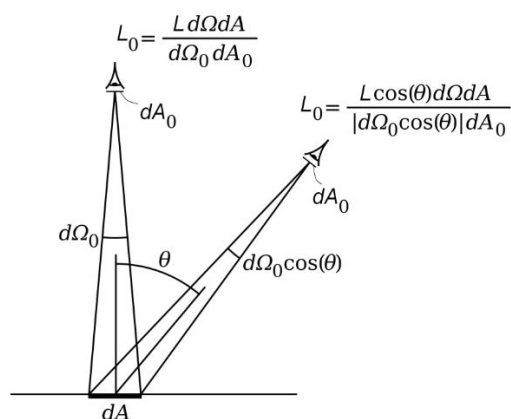


Slika 4.8. Verovatnoća ugla difuzne refleksije prema jednačinama (4.19) i (4.20).

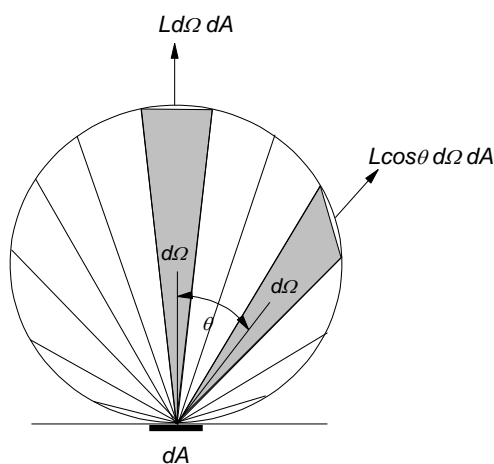
Na slici 4.9 prikazan je posmatrač koji posmatra element površi dA kroz otvor površine dA_0 normalno na površ i pod uglom θ u odnosu na normalu. Posmatrač vidi element površi dA pod prostornim uglom $d\Omega_0$ kada se nalazi na normalu, i pod uglom $d\Omega_0 \cos\theta = d\Omega$ kada se nalazi pod uglom θ . Može se pretpostaviti bez gubitka opštosti da se otvor dA_0 vidi pod prostornim uglom $d\Omega$, ako se „gleda“ iz perspektive izvora ka posmatraču. Ako zamenimo snagu zvučnog izvora prema Lamberovom zakonu dobijamo:

$$L_0 = \frac{L \cos \theta d\Omega dA}{d\Omega_0 \cos \theta dA_0} = \frac{L d\Omega dA}{d\Omega_0 dA_0} \quad (4.22)$$

gde je L zračenje duž pravca pod uglom θ u odnosu na normalu, a L_0 zračenje duž pravca normale. Odavde sledi da je zračenje podjednako i duž normale na površ i pod uglom θ u odnosu na normalu na površ. Na slici 4.10 prikazan je Lamberov zakon i relacije koje su iskorišćene za izvođenje jednačine (4.22).



Slika 4.9. Ilustracija zračenja po Lamberovom zakonu.



Slika 4.10. Ilustracija Lamberovog zakona difuzne refleksije zvuka.

4.6 Vektorsko modelovanje refleksija

Difuznost refleksija zvuka prilikom refleksije od površine kvantifikuje se pomoću sketering koeficijenta s , koji je potrebno odrediti za svaku površinu ponaosob [Kuttruff, 2000]. To znači da je svakoj površini u modelu, osim koeficijenta apsorpcije zvuka α , potrebno dodeliti još jedan parametar kojim se definiše hrapavost te površine i naziva se sketering koeficijent s .

Sketering koeficijent s je odnos između energije koja je prilikom refleksije izračena prema Lamberovom zakonu i ukupne energije koja je izračena prilikom refleksije:

$$P_{scat} = sP_{refl} = s(1 - \alpha)P_{inc} \quad (4.23)$$

gde je P_{scat} difuzno reflektovana zvučna snaga, P_{refl} ukupna reflektovana zvučna snaga, α koeficijent apsorpcije zvučne energije date površine i P_{inc} ukupna upadna zvučna snaga. Očigledno je da će ostatak ukupno reflektovane zvučne snage biti izračen pravilnom geometrijskom refleksijom i on iznosi $P_{prav} = (1-s)(1-\alpha)P_{inc}$ [Rindel, 1995].

Efikan način da se u računarski model refleksije zvuka prilikom nailaska na zid prostorije uključe obe pomenute vrste refleksije je vektorsko modelovanje refleksija [Christensen, Rindel, 2005 a]. Prema ovom modelu pravac reflektovanog zraka određuje se sabiranjem vektora pravilne geometrijske refleksije pomnoženog težinskim faktorom $(1-s)$, sa vektorom difuzne refleksije pomnoženog težinskim faktorom s . Težinski faktori su određeni na osnovu razmatranja o difuzno reflektovanoj i geometrijski pravilno reflektovanoj zvučnoj snazi. Na slici 4.11 prikazano je vektorsko modelovanje refleksije. Vektor difuzne refleksije se generiše pod slučajnim uglom u odnosu na normalu na zid, u okviru prostornog ugla od 2π [ster], sa verovatnoćom prikazanom na slici 4.8 (3D slučaj). S obzirom da rezultatni vektor određuje novi pravac refleksije zraka, da bi težinski faktori imali smisla potrebno je izvršiti normalizaciju vektora prema jednačinama:

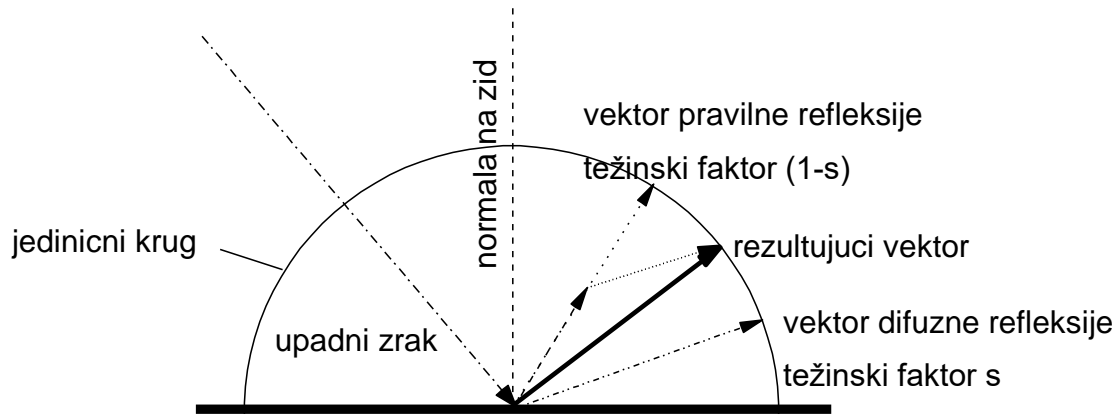
$$v_{xN} = \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}, v_{yN} = \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}, v_{zN} = \frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \quad (4.24)$$

gde su v_x , v_y i v_z komponente vektora u pravcu x, y i z ose respektivno, a v_{xN} , v_{yN} i v_{zN} normalizovane komponente vektora. Pre normalizacije vektori imaju moduo različit od jedinice zato što se oni dobijaju kao rezultat vektorskog računa u kome učestvuju vektori koji ne moraju biti normalizovani, kao što je vektor normale na ravan. Sem toga, čak i zbir dva normalizovana vektora ne daje vektor čiji je moduo jednak jedinici. Posle normalizacije moduo vektora postaje jednak jedinici tj.:

$$\sqrt{v_{xN}^2 + v_{yN}^2 + v_{zN}^2} = 1 \quad (4.25)$$

tako da samo uticaj težinskih faktora $(1-s)$ i s određuje koliko će vektor pravilne geometrijske refleksije, a koliko vektor difuzne refleksije učestvovati u određivanju pravca rezultatnog vektora tj. koliko će efekti difuznosti refleksija biti izraženi. Rezultatni vektor se dobija jednačinom:

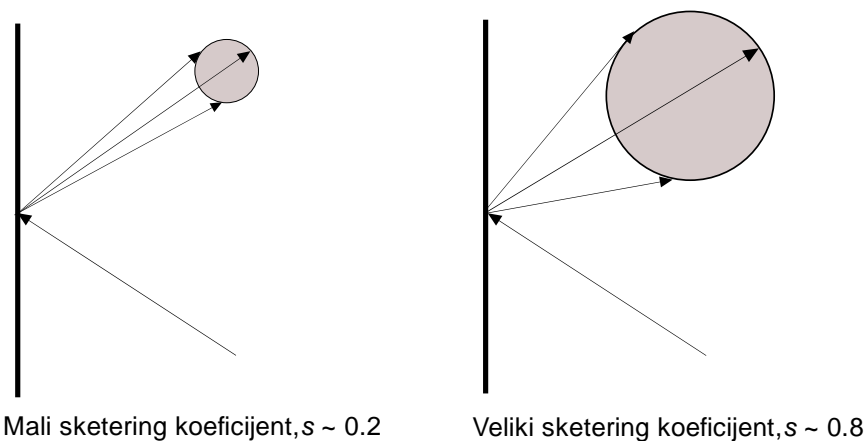
$$\vec{v}_{rez} = (1-s) \vec{v}_{prav} + s \vec{v}_{dif} \quad (4.26)$$



Slika 4.11. Vektorsko modelovanje refleksija [Christensen, Rindel, 2005 a].

U slučaju da je $s = 0$ zrak će se reflektovati isključivo pravilnom geometrijskom refleksijom, dok u slučaju da je $s = 1$ zrak će se reflektovati isključivo difuzno. Što je skatering koeficijent s veći to je zona verovatnoće u kojoj se može naći zrak prilikom refleksije šira. Na slici 4.12 prikazana su dva slučaja veličine zone verovatnoće, kada je koeficijent difuznosti refleksija mali $s = 0,2$ i kada je veliki $s = 0,8$.

Zona verovatnoće



Slika 4.12. Zona verovatnoće u kojoj se može naći reflektovani zrak u zavisnosti od veličine skatering koeficijenta s [Rindel, 2004 a].

Objašnjenje je da se vektor pravilne geometrijske refleksije može shvatiti kao centralni pravac prostiranja zraka, kome zavisno od veličine difuznosti refleksija dodajemo vektor difuzne refleksije. Što je veličina sketering koeficijenta s veća to je veća šansa da zrak više skrene sa pravca pravilne geometrijske refleksije tj. verovatnoća skretanja je veća. Govori se o verovatnoći i zoni verovatnoće, zato što konkretno skretanje rezultujućeg vektora zavisi od slučajno generisanog vektora difuzne refleksije u trenutku simulacije. Upravo zbir deterministički određenog vektora pravilne geometrijske refleksije i probabilistički određenog vektora difuzne refleksije daje kao rezultat zonu prikazanu na slici 4.12.

4.7 Kosi Lamberov zakon

Uključivanje efekata difuznosti refleksija zraka u modelovanje akustičkog odziva proizvelo je i jedno veoma važno poboljšanje algoritma za simulaciju. Pojavila se mogućnost modelovanja sekundarnih zvučnih izvora u tačkama refleksija zraka od zidova prostorije. Naime, deo difuzno raspršene zvučne energije sigurno odlazi i u pravcu prijemne sfere pod uslovom da postoji optička vidljivost između tačke refleksije i prijemne sfere.

Korišćenjem sekundarnih izvora zraka znatno je ubrzano dobijanje akustičkog odziva. Pre uvođenja sekundarnih izvora zraka bilo je potrebno i više stotina hiljada zraka da bi se dobio dovoljno gust akustički odziv, jer je bilo neophodno da primarni zrak (to je zrak koji se kreće u pravcu rezultujućeg vektora) direktno pogodi prijemnu sferu reflektujući se od zidova prostorije. Najviše “šupljina” u odzivu nastajalo je u početnom delu reverberacione krive, usled nedostatka pogodaka u prijemnu sferu. To je bila velika mana rej-trejsing algoritma i otuda je nastala potreba da se koristi hibridna metoda, uključivanjem metode likova za simulaciju početnog dela reverberacione krive.

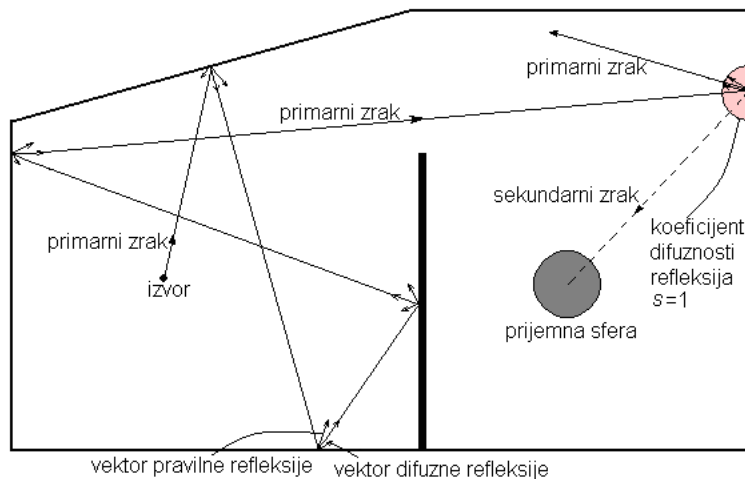
Sve do kraja 1990-tih godina sekundarnim zvučnim izvorima dodeljivana je pri simulacijama usmerenost zračenja prema Lamberovom kosinusnom zakonu zračenja. Međutim, mana takvog modela je što se refleksija zraka od sekundarnog izvora do prijemne sfere tretira sa sketering koeficijentom jednakim jedinici, iako se sve prethodne refleksije primarnog zraka generišu pomoću sketering koeficijenta s

dodeljenog odgovarajućem zidu refleksije. Time se odstupa od veličine difuznosti refleksija koja je dodeljena zidu refleksije sa koga polazi sekundarni zrak, pre pogotka u prijemnu sferu. Na slici 4.13 prikazana je putanja primarnog zraka punom linijom i putanja sekundarnog zraka isprekidanom linijom. Prilikom generisanja primarnog zraka uvažava se koncept vektorskog modelovanja refleksija i jednačina (4.26). Prilikom generisanja sekundarnog akustičkog zraka sketering koeficijent s uzima vrednost 1.

Ovo nije bilo optimalno rešenje. Zato je u literaturi [Christensen, Rindel, 2005 a] predložena usmerenost zračenja koja je nazvana “kosi Lamberov zakon”. Na slici 4.14 prikazan je tradicionalni i kosi Lamberov zakon. Prema ideji kosog Lamberovog zakona osa zračenja sekundarnog izvora dobija pravac koji je određen vektorskim modelovanjem refleksije. Pri određivanju pravca ose sekundarnog izvora koristimo jednačinu, slika 4.15:

$$\vec{v}_{osa} = (1-s)\vec{v}_{prav} + s\vec{v}_{norm} \quad (4.27)$$

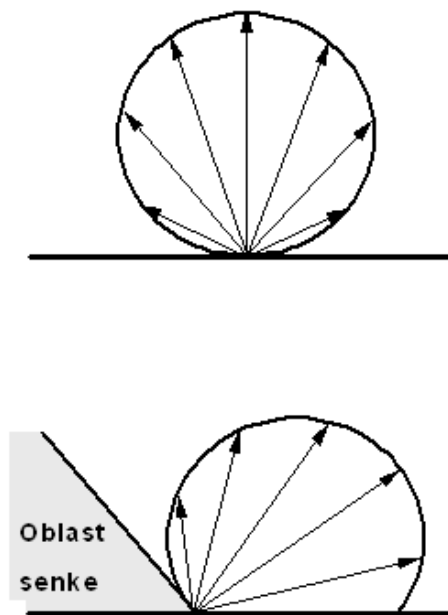
gde je v_{osa} vektor pravca ose sekundarnog izvora, v_{prav} vektor pravilne geometrijske refleksije, v_{norm} vektor normale na refleksionu površ i s koeficijent difuznosti refleksija date površi.



Slika 4.13. Primer usmerenosti zračenja sekundarnog izvora pre pojave modela kosog Lamberovog zračenja.

Na slici 4.15 prikazan je primer određivanja ose sekundarnog izvora prema kosom Lamberovom zakonu. Sa slike 4.15 se vidi da se pojavljuje oblast senke, koja

je određena ravni koja je normalna na vektor ose sekundarnog izvora. Nijedan sekundarni zrak ne može biti izračen u ovu oblast senke. Takođe, deo Lamberovog balona se zrači izvan prostorije, na slici 4.15 prikazan je šrafirano. Analizirajući jednačinu (4.27) zaključuje se da je oblast senke mala ukoliko je sketering koeficijent s veliki ili ukoliko je upadni zrak normalan na površ refleksije. S druge strane, ako je sketering koeficijent s mali i upadni zrak nagnut u odnosu na normalu na površ refleksije, oblast senke postaje velika. Što je veća oblast senke veći je i deo Lamberovog balona koji se zrači izvan prostorije.

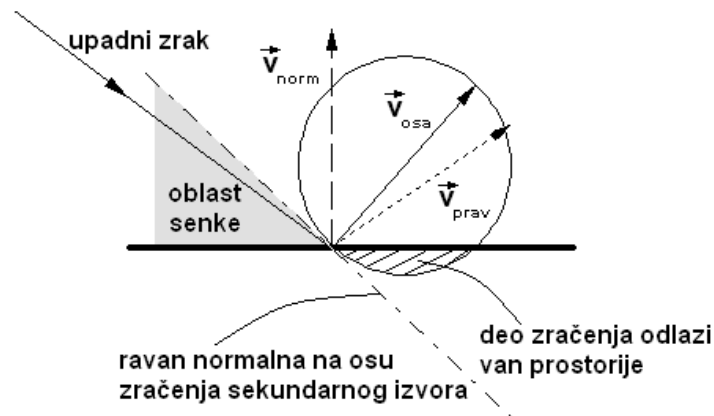


Slika 4.14. Tradicionalna Lamberova usmerenost difuznog zračenja prikazana na slici gore i kosi Lamberov zakon na slici dole [Christensen, Rindel, 2005 a].

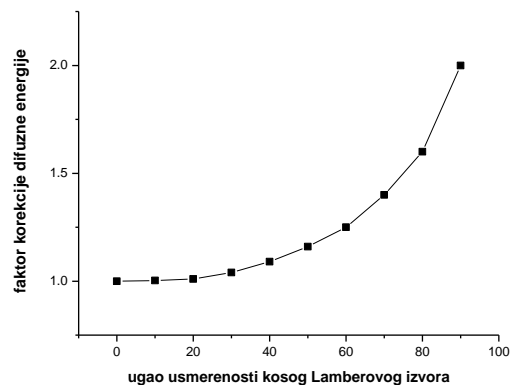
U slučaju da je $s = 0$ orijentaciju sekundarnog izvora određuje Snelov zakon, tj. osa zračenja će biti usmerena u pravcu pravilne geometrijske refleksije. U slučaju da je $s = 1$ osa sekundarnog izvora je normala na zid refleksije, tj. ima uobičajenu Lamberovu difuznu usmerenost. Za sve ostale vrednosti sketering koeficijenta usmerenost je određena rezultatnim vektorom, saglasno težinskim faktorima difuzne s i pravilne geometrijske refleksije $(1-s)$, jednačina (4.27).

Opisani način modelovanja sekundarnih izvora implicitno krije u sebi gubitak difuzne zvučne energije. Kao što se vidi sa slike 4.15, u slučaju kosog Lamberovog

zakona deo Lamberovog balona se zrači izvan prostorije. Takođe, kosi Lamberov zakon proizvodi zonu senke u koju nijedan zvučni zrak ne može biti izračen. Da bi se kompenzovao gubitak energije u literaturi [Christensen, Rindel, 2005 a] je uveden faktor korekcije difuzne energije kosog sekundarnog izvora. On ima svoj maksimum jednak broju 2 kada je osa zračenja pod uglom od 90° u odnosu na normalu zida, zato što se tada tačno polovina Lamberovog balona (polusfera) nalazi izvan prostorije. Kada je nagnutost sekundarnog izvora 0° , kosi Lamberov izvor postaje tradicionalni Lamberov difuzni izvor i korekcionni faktor je 1. Koristeći metodu numeričke integracije pronađene su vrednosti faktora korekcije za sve vrednosti ugla ose zračenja između 0° i 90° . Na slici 4.16 prikazan je faktor korekcije kosog Lamberovog zračenja.



Slika 4.15. Primer određivanja ose sekundarnog izvora prema kosom Lamberovom zakonu [Christensen, Rindel, 2005 a].

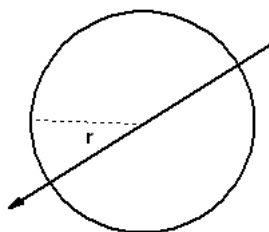


Slika 4.16. Faktor korekcije kosog Lamberovog zračenja [Christensen, Rindel, 2005 a].

4.8 Proračun energije sekundarnih zraka

Sekundarni zraci se generišu u pravcu prijemne sfere, pod uslovom da postoji optička vidljivost tj. ako se prijemna sfera ne nalazi u oblasti senke. Tačnije, sekundarni zrak se usmerava ka centru prijemne sfere. Na slici 4.17 prikazan je sekundarni zvučni zrak koji prolazi kroz centar prijemne sfere. Rastojanje koje sekundarni zrak pređe unutar prijemne sfere je $d_{ri} = 2r$. Sada na osnovu jednačine (4.11) može se odrediti i intenzitet zvučne energije sekundarnog zraka koji registruje prijemna sfera.

S obzirom da je broj pogodaka prijemne sfere od strane primarnih zraka zanemarljiv naspram broja pogodaka od strane sekundarnih zraka, pri softverskoj realizaciji moguće je sasvim isključiti primarne zrake u smislu doprinosa energetsom odzivu, osim pri registrovanju direktnog zvuka. Primarne zrake treba ostaviti samo kao nosioce geometrijskog mesta tačaka odakle će se generisati sekundarni zraci. Ovde treba uočiti da iako primarni zrak može otići u pravcu koji ne preseca prijemnu sferu, sekundarni zrak će poneti energiju primarnog zraka ka prijemnoj sferi. Ovime se zvučna energija ne gubi, jer prijemna sfera samo registruje prolazak zraka a ne apsorbuje njegovu energiju.



Slika 4.17. Ilustracija prijemne sfere i preseka sa sekundarnim zrakom.

4.9 Određivanje impulsnog odziva na osnovu rezultata simulacije

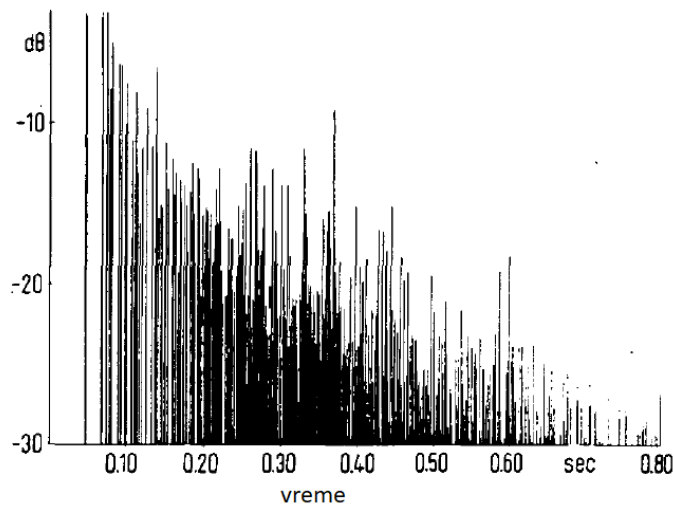
Kao što je napred već rečeno, kada se govori o impulsnom odzivu onda se misli na pritisak zvuka, $p(t)$. Sa druge strane, kao što je ovde prikazano glavne metode za modelovanje akustičkog odziva prostorije na svom izlazu daju intenzitet zvuka. Konverzija iz pritiska zvuka $p(t)$ u energetske odziv, $p^2(t)$, se izvodi pravolinijski

kvadriranjem pritiska. Konverzija u obrnutom smeru nije trivijalna zato što energetski odziv sadrži manje informacija nego odgovarajući impulsni odziv. Ipak, signal impulsnog odziva je potreban za auralizaciju. Kako bi se razrešio ovaj problem predlažu se različiti algoritmi za takvu konverziju. Ovaj pregled takvih metoda nema tendenciju da bude sveobuhvatan, već da prikaže nekoliko karakterističnih pristupa.

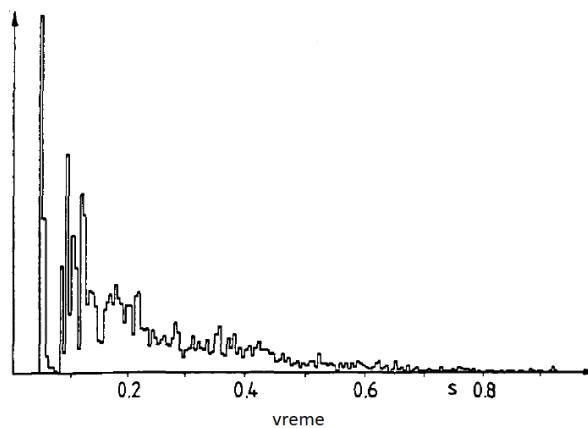
U tehnikama modelovanja zasnovanim na pritisku zvuka, čiji je tipičan predstavnik metoda likova, izvođenje započinje u frekvencijskom domenu, a onda se pomoću inverzne Furijeove transformacije dobija izraz za $p(t)$ u vremenskom domenu [Allen, Berkley, 1979]. Ako se uvrste i gubici usled propagacije zvuka u vazduhu i apsorpcije zvuka na površinama, onda dobijamo proizvod dva člana u frekvencijskom domenu. Imajući u vidu da je inverzna Furijeova transformacija proizvoda dva člana u frekvencijskom domenu jednaka konvoluciji njihovih pojedinačnih inverznih Furijeovih transformacija u vremenskom domenu, dobijamo izraz za $p(t)$ u vremenskom domenu u koji su uvršteni i gubici (tzv. Green-ova funkcija u vremenskom domenu). Na ovaj način dobija se rešenje talasne jednačine .

Kao rezultat simulacije pomoću metode likova na opisani način dobija se odziv u vremenskim tačkama koje nisu nužno ekvidistantno raspoređene. Primer toga prikazan je na slici 4.18. Treba primetiti da ovde nije reč o dijagramu sa ekvidistantnom vremenskom podelom. Prikazani su nivoi energije sa svojim vremenskim trenucima u kojima su pristigli. Nasuprot tome, kao rezultat simulacije metodom rej-trejsing dobija se energetski odziv u vremenu, u obliku dijagrama sa ekvidistantnom vremenskom podelom. Primer toga prikazan je na slici 4.19.

Kada je u pitanju metoda likova, baš zato što je konstrukcija sekundarnih izvora višeg reda ovom metodom veoma komplikovana u realnim geometrijama koncertnih sala, ona nije pogodna za simulaciju reverberacionog repa impulsnog odziva. Nasuprot tome, ona je veoma pogodna za određivanje prvih refleksija. Prve refleksije nastaju konstrukcijom likova nižih redova (recimo do trećeg reda refleksije). I njih je moguće odrediti i u složenijim slučajevima geometrije prostorija. Takođe, ako je geometrija prostorije jednostavna, kao što je to slučaj sa pravougaonim prostorijama nalik na “kutiju za cipele”, onda je moguće i pomoću metode likove dobiti sekundarne izvore visokog reda refleksije.



Slika 4.18. Ilustracija energetskog impulsnog odziva prostorije, dobijenog korišćenjem metode likova [Kuttruff, 1993].

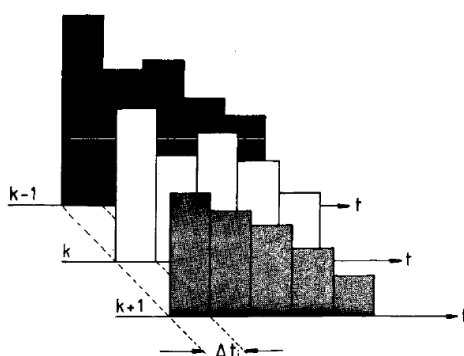


Slika 4.19. Ilustracija energetskog impulsnog odziva prostorije, dobijenog korišćenjem metode rej-trejsing [Kuttruff, 1993].

Kod metode rej-trejsing, za dobijanje signala impulsnog odziva koriste se energetski bazirane tehnike modelovanja. U energetski baziranim tehnikama modelovanja, takvi energetski doprinosi se sumiraju u diskretizovanim vremenskim intervalima, dok se frekvencijska zavisnost adresira vrednostima koeficijenta apsorpcije i sketering koeficijenta za taj frekvencijski opseg. Pri tome refleksije uvode neke dodatne faktore poput faznog pomeraja, a može se uvesti i disipacija zvuka u vazduhu. Osnovna osobina ovih tehnika je da ignorišu interferencione efekte koji su rezultat ovakvih energetskih sumiranja. Ovaj pristup vodi do energetskog odziva u

vremenu, $p^2(t)$, koji je dovoljan za određivanje vremena reverberacije i drugih akustičkih parametara zasnovanih na energiji zvuka [Alpkocak, Sis, 2010].

S obzirom da rezultati rej-trejsing metode ne predstavljaju impulsni odziv već vremensku raspodelu energije, potrebno je konvertovati ih u “ekvivalentni impulsni odziv” sa istom vremenskom i spektralnom kompozicijom, ali sa potpuno novom “mikroskopskom” strukturom [Kuttruff, 1993]. Celokupni frekvencijski spektar se deli u određeni broj frekvencijskih opsega, recimo 10 oktavnih opsega. Za svaki od njih izvodi se rej-trejsing simulacija sa parametrima (apsorpcija, sketering, slabljenje u vazduhu) koji odgovaraju tom frekvencijskom opsegu. Rezultati ovih simulacija mogu se predstaviti sa E_{ik} , pri čemu i označava broj vremenskog intervala a k frekvencijski opseg. Stoga, skup vrednosti sa konstantnim i predstavlja kratkovremenski energetski spektar reverberacije u vremenskom intervalu Δt_i . Ovo je prikazano na slici 4.20.



Slika 4.20. Rej-trejsing histogrami za različite frekvencijske opsege; i je oznaka za vremenski interval, k je oznaka za frekvencijski opseg [Kuttruff, 1993].

Svaki od ovako dobijenih energetskih spektara treba uglačati tj. interpolirati, a zatim uzeti koren iz energije, čime prelazimo u domen pritiska:

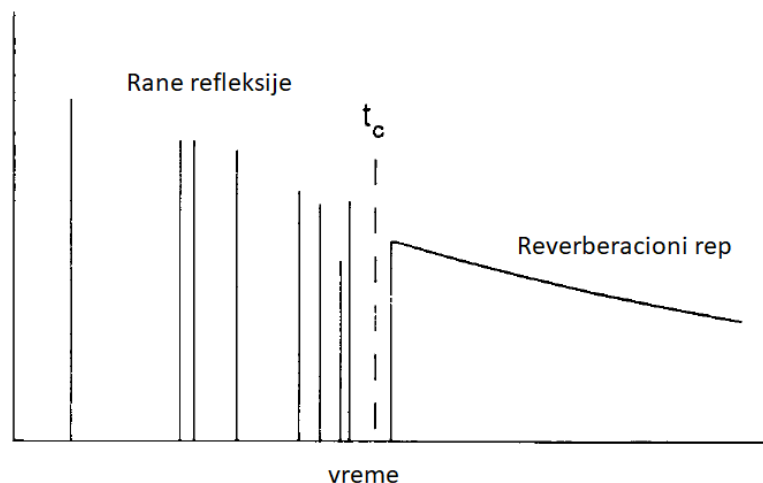
$$p_k(f) = \sqrt{E_k(f)} \cdot \exp[i\psi(f)] \quad (4.28)$$

pri čemu faza pritiska nije od subjektivnog značaja, tako da se može odabrati na neki pogodan način, samo treba voditi računa da su skokovi faze zabranjeni. U literaturi [Kuttruff, 2000] je predložen sledeći način za proračun faze:

$$\psi_k(f) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln[E_k(f - f')]}{f'} df' \quad (4.29)$$

Na ovaj način možemo dobiti kratkovremenski impulsni odziv $p_i(\Delta t_i)$ kao inverznu Furijeovu transformaciju $p_k(f)$, koji se onda sukcesivno koristi za dobijanje celokupnog impulsnog odziva $p(t)$, sumiranjem svih pojedinačnih impulsnih odziva $p_i(\Delta t_i)$ po svim intervalima Δt_i .

Postoji još jedna modifikacija generisanja impulsnog odziva na osnovu energetskog odziva, koja se koristi kod hibridnih tehnika simulacije. Kao što je već prethodno istaknuto kod hibridnih metoda simulacije, dok je metoda likova pogodna za simulaciju početnog dela impulsnog odziva, dotle je metoda rej-trejsing pogodna za simulaciju reverberacionog repa [Hidaka, Yamada, Nakagawa, 2007]. Na slici 4.21 prikazan je trenutak t_c u kome impulsni odziv prelazi od ranih ka kasnim refleksijama. Potrebno je pronaći način na koji bi se povezali delovi impulsnog odziva dobijeni pomoću metode likova sa delom impulsnog odziva dobijenog metodom rej-trejsing, pri čemu je važno izbeći zvučne smetnje prilikom ovakvog povezivanja. Kako bi se upravo ovo postiglo, najbolje je povezati dva dela odziva u unidirekcionom prolasku kroz nulu [Heinz, 1993], kao što je to prikazano na slici 4.22. Na slici 4.22(b) izabrani prolasci kroz nulu su označeni vertikalnim linijama. Na slici 4.22(c) prikazan je krajnji rezultat glatkog povezivanja signala. Štaviše, potrebno je da ne postoji velika razlika u spektralnim komponentama u tački povezivanja, jer je ljudsko uvo veoma osetljivo na takve promene.

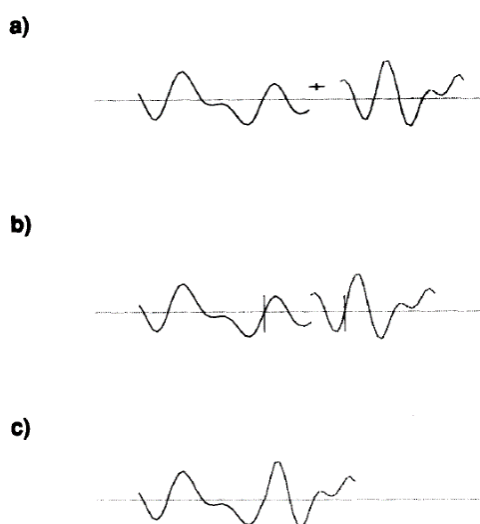


Slika 4.21. Rane refleksije i reverberacioni rep signala impulsnog odziva.

t_c je trenutak povezivanja ranih i kasnih refleksija [Heinz, 1993].

Primer povezanog impulsnog odziva prostorije na opisani način, u jednoj realnoj situaciji dat je na slici 4.23. Ovaj odziv realizovan je povezivanjem signala dobijenog pomoću jednog programa koji koristi metodu likova sa signalom dobijenim pomoću programa koji koristi rej-trejsing. Simulacija je bazirana na geometrijskim i akustičkim podacima jedne prostorije sa nekoliko zidova koji imaju veliki sketering.

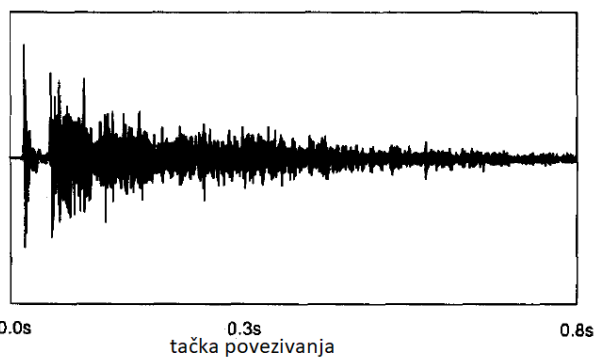
Iako tačka povezivanja nije vidljiva, razlika u boji tona se čuje u impulsnom odzivu. Posledično, konvoluirani signali nisu veoma slični onim izmerenim. Ovo se može objasniti uticajem difuznosti zidova sa velikim sketeringom na frekvencijski spektar signala. Najbolji način da se izbegnu ili reše problemi povezivanja dva signala je korišćenje sličnih metoda za sintezu različitih delova odziva ili obezbeđivanje oblasti preklapanja između dva dela.



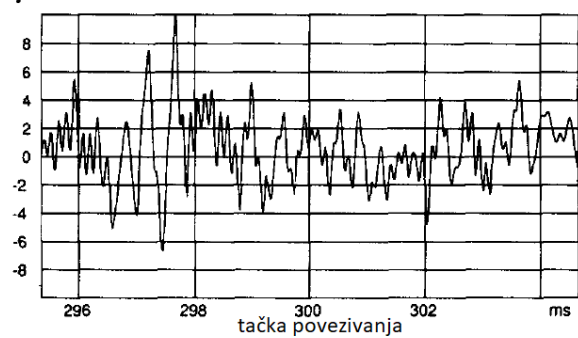
Sl. 4.22. Povezivanje dva signala pri unidirekcionom prolasku kroz nulu [Heinz, 1993].

Dakle, direktan način za dobijanje signala pritiska je kada se od izraza za pritisak i krene, što je praktično ostvarljivo u metodi likova. Zaobilazan način se primenjuje u metodi rej-trejsing, kada se kreće od energetskog histograma u vremenu i uvodi faza signala, rukovodeći se načelom da faza signala nema bitnog uticaja na kvalitet zvuka koji slušalac čuje. Ispostavlja se da se u oba slučaja samo približno dostiže rezultat iz eksperimenta. Preporuka je da se i za početni deo impulsnog odziva i za reverberacioni rep koriste slične metode, jer je tada razlika u boji zvuka najmanja [Heinz, 1993].

a)



b)



Slika 4.23. Primer povezanog impulsnog odziva prostorije. (a) Celokupni impulsni odziv prostorije, i (b) uveličani deo blizu tačke povezivanja. Levo od tačke povezivanja je signal dobijen metodom likova, desno je signal dobijen metodom rej-trejsing [Heinz, 1993].

5 Modifikacije algoritma za rej-trejsing simulaciju

Modelovanje zvučnog polja pomoću rej-trejsing metode ima izvesne imanentne probleme koji proizilaze iz specifičnosti geometrijskog modela zvučnog polja na kome se takav pristup zasniva. Jedan od njih je modelovanje difuznih refleksija koji se odražava kada je u ukupnom impulsnom odzivu doprinos pojedinih površina značajan. To može biti, na primer, slučaj kada se modeluju refleksije od usamljenih površina na otvorenom prostoru, gde nema drugog reflektovanog zvuka pa je tačnost opisivanja refleksija od malobrojnih tvrdih površina od najvećeg značaja za ukupnu tačnost. Drugi karakterističan primer mogu biti modelovanja refleksija u akustički veoma prigušenim prostorijama gde je impulsni odziv kratak, pa je opisivanje refleksija od malobrojnih tvrdih površina važno za ukupnu preciznost izračunatog impulsnog odziva. Najzad, uspešnost modelovanja difuznih refleksija je važna i u slučajevima prostorija sa veoma reljefnim površinama, a to su upravo najznačajniji zadaci akustičkog dizajna kao što su koncertne sale i njima slični prostori.

Zbog toga je jedan od zadataka ovog rada pokušaj da se predloži kvalitetna modifikacija algoritma za rej-trejsing simulaciju koja treba da poboljša modelovanje u svim takvim okolnostima, a posebno kada nije cilj izračunavanje kompletnog impulsnog odziva, već samo analiza doprinosa pojedinačnih reflektujućih površina. U formiranju modifikacije algoritma poseban akcenat je stavljen na oblikovanje karakteristika usmerenosti zračenja difuzne refleksije.

5.1 Motivacija za uvođenje poboljšanja u rej-trejsing algoritam

U prethodnom poglavlju je pokazano da se površine u prostoriji opisuju sa dva numerička parametra: koeficijentom apsorpcije (α) i sketering koeficijentom (s). Prvim se kvantifikuje energetska gubitak pri refleksiji, a drugim raspršavanje reflektovane energije. U okolnostima kada difuzne površine imaju bitan uticaj na odziv prostorije, izračunavanje refleksija čini veoma kritičnim način na koji se u rej-trejsing simulaciji modeluje sketering. U prethodnom poglavlju je takođe opisan način na koji se u numeričko modelovanje refleksije uključuju i spekularna i difuzna refleksija, a to je vektorsko modelovanje sketeringa. U određivanju pravca

reflektovanog zraka definišu se dva vektora, oba sa početkom u tački pogotka upadnog talasa. To su vektor difuzne refleksije i vektor spekularne refleksije. Pravac vektora spekularne refleksije određuje se prema Snellovom zakonu, a pravac vektora difuzne refleksije pomoću generatora slučajnih brojeva koristeći funkciju verovatnoće prema Lamberovom zakonu. Modul vektora difuzne refleksije množi se težinskim faktorom s , a modul vektora spekularne refleksije sa $(1 - s)$. Pravac reflektovanog zraka koji se dalje prati određuje se sabiranjem ova dva vektora. Ovakav način vektorski modelovane refleksije sa sketeringom uvodi zonu verovatnoće u kojoj se nalazi rezultantni vektor refleksije.

U prethodnom poglavlju je takođe prikazano poboljšanje modelovanja sketeringa označeno kao "Kosi Lamberov zakon". Prema ovoj ideji Lamberova usmerenost sekundarnog izvora dobija orijentaciju koja je određena vektorskim modelovanjem sketeringa, označena kao „kosa“ Lamberova kriva. Ovakav način modelovanja implicitno krije u sebi gubitak reflektovane zvučne energije, jer se deo Lamberove krive nakon okretanja u pravcu refleksije nalazi ispod refleksione ravni (što znači da deo zračenja odlazi van prostorije). Prikazano je da se za kompenzovanje gubitaka uvodi faktor korekcije slabljenja difuzne energije sekundarnog izvora. Maksimum faktora korekcije je kada je osa Lamberove krive pod uglom 90° u odnosu na normalu zida, jer je tada polovina dijagrama zračenja izvan prostorije.

Uočeno je da se ovakvim načinom modelovanja zračenja sekundarnih izvora javlja problem se za male vrednosti sketering koeficijenta s . Usmerenost zračenja sekundarnog izvora bi u tom slučaju dominantno trebala da bude u pravcu spekularne refleksije. Međutim, u takvom postupku je za male vrednosti sketering koeficijenta usmerenost zračenja previše rasuta, što ne odgovara realnosti.

Uopšteno govoreći, sketering pri refleksijama se u modelovanju pojavljuje u tri različite primene:

1. **Refleksija zraka u rej-trejsingu.** Sketering se koristi za proračun pravca zraka posle refleksije. Tada se primenjuje njegovo vektorsko modelovanje, pri čemu se podrazumevaju i sketering koji potiče od neravnina površi i sketering koji potiče od difrakcionih efekata blizu ivica površi. Pri tome se upotrebljava vrednost sketering koeficijenta na srednjim frekvencijama.

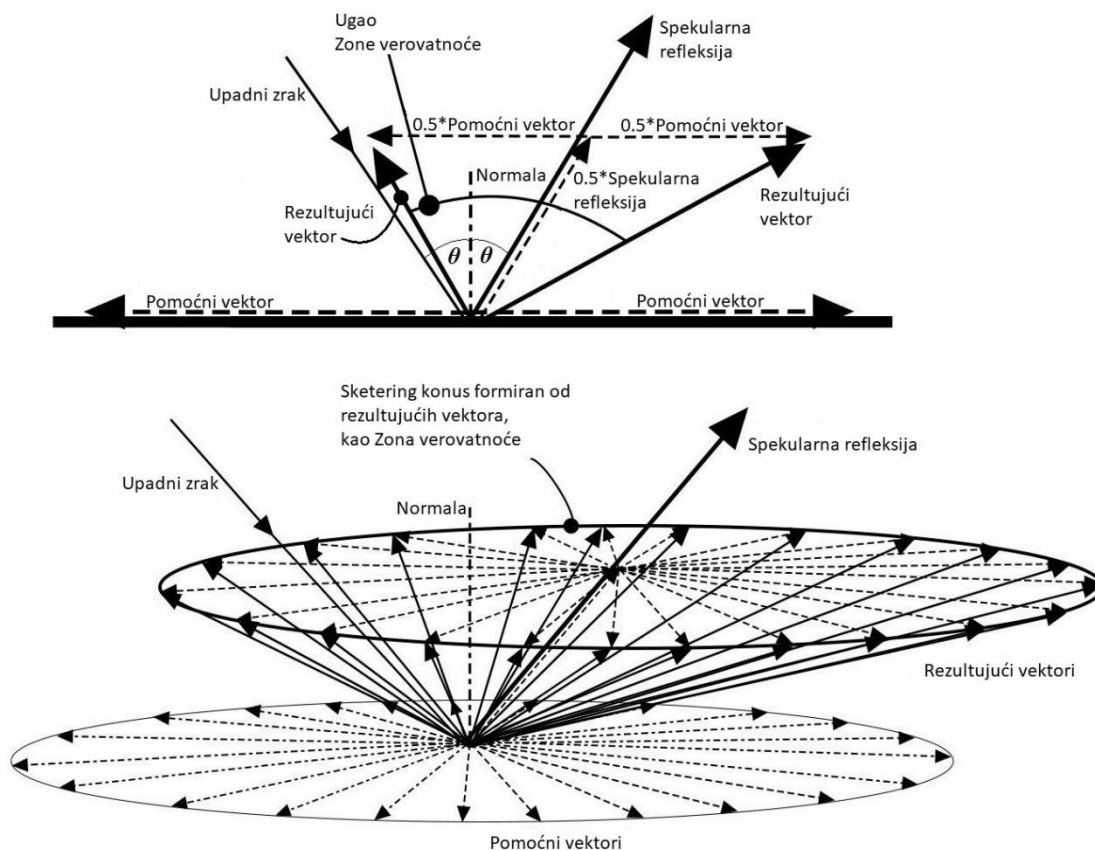
2. **Zračenje zvučne energije od sekundarnih izvora da bi se simulirale kasne refleksije.** Kasne refleksije se sastoje od gustog niza refleksija sa opadajućim intenzitetom koje tipično stižu do slušaoca sa mnogo većim kašnjenjem u odnosu na direktan zvuk. Kasne refleksije su u relaciji sa degradacijom anvelope signala na nižim frekvencijama koja je važna za razumljivost govora. Za proračun difuznog zračenja koristi se kosa Lamberova raspodela.
3. **Zračenje difuznog dela ranih refleksija.** Rane refleksije se pojavljuju približno u prvih 100 ms impulsnog odziva. Pripisuje im se svojstvo da doprinose razumljivosti govora, s obzirom da se u procesu slušanja vremenski integrišu sa direktnim zvukom. Rane refleksije imaju važan uticaj i na osećaj prostornog utiska kod slušaoca tj. na percepciju oblika prostorije u zvučnoj slici. U njihovom modelovanju difuzna energija se računa pomoću niza sekundarnih izvora slučajno raspoređenih na reflektujućim površinama. Za usmerenost zračenja ovih sekundarnih izvora primenjuje se Lamberova raspodela.

Poboljšanje koje se uvodi u ovom radu odnosi se na modelovanje sekundarnih izvora u rej-trejsing simulaciji, koje se koriste za dobijanje kasnih refleksija (to jest, odnosi se na broj 2 sa gornje liste). Predloženo poboljšanje je provereno poređenjem izračunatog odziva sa realnim odzivom snimljenim na fizičkom modelu, kao i sa odzivom dobijenim jednim komercijalnim softverom za simulaciju zvučnog polja u prostorijama koji je u literaturi označen kao dobar.

5.2 Modifikacije modelovanja usmerenosti zračenja sekundarnih izvora

Zbog uočenog nedostatka postojećeg algoritma pri malim vrednostima sketering koeficijenta s , predlog modifikacije se sastoji u promeni modelovanja usmerenosti zračenja sekundarnih izvora. Ideja ove modifikacije je u tome da se na neki način zona verovatnoće u kojoj se nalazi vektor difuzne refleksije menja u skladu sa promenom vrednosti sketering koeficijenta s . Za male vrednosti ovog koeficijenta

ta zona verovatnoće treba da bude veoma uska, orijentisana u pravcu spekularne refleksije, a sa povećanjem vrednosti s ona treba da se širi.



Slika 5.1. gore - 2D prikaz generisanja vektora difuzne refleksije i zona verovatnoće u kojoj se može naći rezultatni vektor (ilustracija za vrednost $s = 0.5$); dole - 3D prikaz zone verovatnoće rezultujućeg vektora difuzne refleksije koja je ograničena sketering konusom.

U ovom radu se predlaže način određivanja granice zone verovatnoće kakav je prikazan na slici 5.1. Ekstremni pravac vektora difuzne refleksije je kada je on blizak refleksionoj površini (označeno na slici 5.1 isprekidanom linijom kao pomoćni vektor). Tada i rezultatni vektor refleksije maksimalno skreće od pravca spekularne refleksije. U pojednostavljenom 2D prikazu na gornjem delu slike postoje dva takva pomoćna vektora koji formiraju ugao u kome se može naći rezultujući vektor, pa je zona verovatnoće ograničena tim uglom. U 3D prikazu granični rezultujući vektori formiraju konus koji ograničava prostor zone verovatnoće, što je prikazano na donjem delu slike 5.1, i on je u ovom konceptu nazvan sketering konus. Vidi se da sketering

konus daje vizuelni prikaz primenjenog sketering koeficijenta s . Za male vrednosti s , bliske 0, sketering konus će biti veoma uzak, koncentrisan oko pravca spekularne refleksije, a za velike vrednosti s , bliske 1, sketering konus će biti otvoren. Ovaj model je proizvoljno konstruisan na opisani način i nije u relaciji sa Lamberovim zakonom, izuzev u smislu mogućih ekstremnih pravaca difuznih refleksija označenih kao pomoćni vektori na slici 5.1. Model daje fizičku interpretaciju mogućih prostornih usmerenosti difuzne refleksije.

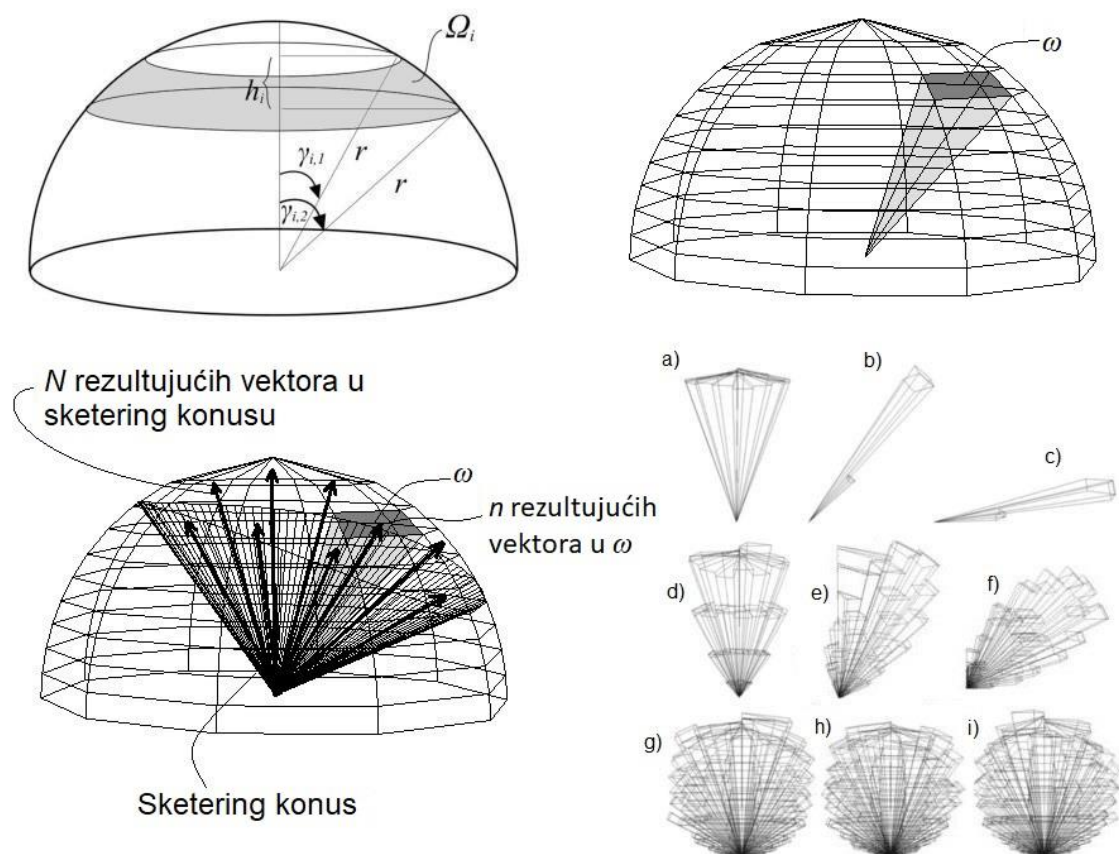
Prikaz na slici 5.1 formiran je za vrednost sketering koeficijenta $s = 0,5$ zbog jednostavnosti pri crtanju. U tom slučaju za proizvoljni upadni ugao zraka spekularna refleksija je u pravcu određenom Snelovim zakonom, a granice zone verovatnoće su određene rezultatnim vektorima (u 2D slučaju jedan rezultatni vektor je na levoj i jedan rezultatni vektor na desnoj strani). Kada upadni ugao u odnosu na normalu zida raste, pravac desnog rezultujućeg vektora se pomera bliže desnom difuznom vektoru koji klizi po površi zida refleksije, dok se pravac levog rezultujućeg vektora približava normalu na zid refleksije. Kada se upadni ugao u odnosu na normalu zida smanjuje, pravac desnog rezultatnog vektora se pomera ka pravcu $\pi/4$ na desno, a pravac levog rezultujućeg vektora se pomera ka pravcu $\pi/4$ na levo.

Sketering konus ograničava prostorni ugao u kome se može naći rezultatni vektor refleksije, ali je za modelovanje refleksije unutar njega potrebno odrediti dijagram zračenja sekundarnog izvora. Kada je $s \approx 1$ dijagram zračenja unutar sketering konusa treba da se približi Lamberovom zakonu. Prostorni ugao u toj tački na refleksionoj površi je 2π steradijana. U određivanju usmerenosti usvojeno je da se ovaj prostorni ugao se deli na podjednake elemente ugla. Prostorni ugao sfernog odsečka visine h_i i poluprečnika r , prikazan na slici 5.2 (gore, levo), je:

$$\Omega_i = \frac{2r\pi h_i}{r^2} = 2\pi (\cos \gamma_{i,1} - \cos \gamma_{i,2}) \quad (5.1)$$

pri čemu su $\gamma_{i,1}$ i $\gamma_{i,2}$ uglovi granica sfernog odsečka u vertikalnoj ravni. Ako se označi $\Delta\gamma_i = \gamma_{i,2} - \gamma_{i,1}$ dobija se:

$$\Omega_i = 4\pi \sin\left(\frac{\Delta\gamma_i}{2}\right) \sin\left(\gamma_{i,1} + \frac{\Delta\gamma_i}{2}\right) \quad (5.2)$$



Slika 5.2. (gore, levo) Izračunavanje zračenja unutar sketering konusa: prostorni ugao Ω_i sfernog odsečka visine h_i i poluprečnika r ; (gore, desno) rešetka 10×10 podjednakih prostornih uglova ω ; (dole, levo) primer N generisanih rezultujućih vektora unutar sketering konusa; (dole desno) primeri dijagrama zračenja sekundarnog izvora modelovanog pomoću sketering konusa: $s = 0.1$: $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 85^\circ$ (prvi red); $s = 0.5$: $\theta = 0$, $\theta = 45$, $\theta = 85^\circ$ (drugi red); $s = 0.99$: $\theta = 0$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 85$ (treći red).

Podela na podjednake prostorne uglove vrši se pomoću rešetke koja je prikazana na slici 5.2 (gore, desno). Gustina ove rešetke može biti proizvoljna, a na 5.2 (gore, desno) usvojena je rešetka 10×10 (100 podjednakih prostornih uglova). Za ovakvu rešetku potrebno je da bude $\Omega_i = 2\pi/10$. Iz ovog uslova rekursivnim postupkom određene su granice uglova $\gamma_{i,1}$ i $\gamma_{i,2}$ za svih 10 sfernih odsečaka. Ove granice prikazane su u tabeli 5.1, pri čemu je $\gamma_{i,2} = \gamma_{i+1,1}$. Jednačina (5.2) je rešavana grafički, pri čemu je u prvoj iteraciji uzeto da je $\gamma_{1,1} = 0$. U horizontalnoj ravni svaki sferni odsečak se deli na 10 podjednakih delova, pri čemu je veličina svakog dela $360^\circ/10 = 36^\circ$. Na ovaj način dobijena je rešetka prikazana na slici 5.2 (gore, desno).

Tabela 5.1. Vrednosti graničnih uglova $\gamma_{i,1}$, $\gamma_{i,2}$ dobijene iz jednačine (5.2).

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\gamma_{i,1}$	0	0.45	0.64	0.79	0.92	1.04	1.15	1.26	1.36	1.46
$\gamma_{i,2}$	0.45	0.64	0.79	0.92	1.04	1.15	1.26	1.36	1.46	$\frac{\pi}{2}$

U sledećem koraku ovakvog postupka generiše se N rezultujućih vektora prema principu vektorski modelovanih refleksija sa sketeringom, kao na slici 5.2 (dole, levo). Na osnovu toga određuje se broj reflektovanih zraka sekundarnog izvora unutar svakog pojedinačnog prostornog ugla rešetke. Princip određivanja snage zvuka unutar jednog prostornog ugla rešetke ω svodi se na brojanje rezultujućih vektora n koji ulaze u njega. Snaga zvuka unutar prostornog ugla, P_ω , pri čemu je $\omega = 2\pi/100$, računa se kao:

$$P_\omega = \frac{n P_{refl}}{N \omega} \quad (5.3)$$

gde je P_{refl} ukupna reflektovana snaga sekundarnog izvora. Da bi se dobio intenzitet zvuka u nekoj tački unutar prostornog ugla ω potrebno je još podeliti snagu P_ω sa kvadratom rastojanja do te tačke, $I_{\omega,r} = P_\omega/r^2$.

Ovakvom metodom napravljena je banka dijagrama zračenja za niz diskretnih vrednosti sketering koeficijenta s i upadnog ugla θ . Usvojena je diskretizacija upadnih uglova θ u koracima od 5° ($0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 85^\circ$) i sketering koeficijenta s u koracima od 0.1 ($0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$). Sve vrednosti usmerenosti dobijene na ovaj način čuvaju se u matricama, kao što je prikazano u tabeli 5.2. Zbir svih vrednosti iz tabele 5.2 daje 16.377, što posle množenja sa $\omega = 2\pi/100$ daje $1.092 \sim 1$. Ovo znači da vrednosti u tabeli 5.2 predstavljaju verovatnoće.

Vrednost snage zvuka unutar prostornog ugla ω u pravcu refleksije čita se iz matrice, za dati par (θ, s) i za željeni pravac refleksije. Na ovaj način umesto prijemne sfere uvedena je prijemna tačka. Ilustracija dijagrama zračenja iz formirane banke za neke vrednosti para (θ, s) prikazana je na slici 5.2 (dole, desno). Primećuje se da za $s = 0.99$ dijagram zračenja podseća na Lamberov zakon i ne zavisi od upadnog ugla θ . Za taj slučaj, u tabeli 5.3 prikazano je kvantitativno poređenje dijagrama usmerenosti u odnosu na Lamberov zakon.

Tabela 5.2. Matrica vrednosti P_{ω} za veličinu rešetke 10x10, $s = 0.99$,
 $\omega = 2\pi/100$, $P_{refl} = 1$, $N = 5000$ (prema jednačini (5.3)).

γ [rad] φ [rad]	0.157	0.314	0.471	0.628	0.785	0.942	1.099	1.256	1.413	1.570
0,628	0,325	0,265	0,186	0,239	0,223	0,158	0,130	0,097	0,031	0,018
1,256	0,302	0,305	0,258	0,170	0,160	0,154	0,106	0,122	0,063	0,010
1,884	0,217	0,277	0,232	0,214	0,168	0,138	0,130	0,090	0,031	0,029
2,512	0,317	0,230	0,241	0,250	0,145	0,150	0,090	0,104	0,049	0,025
3,14	0,360	0,198	0,169	0,203	0,188	0,177	0,078	0,097	0,059	0,014
3,768	0,286	0,258	0,232	0,207	0,188	0,127	0,134	0,100	0,038	0,014
4,396	0,302	0,238	0,211	0,236	0,145	0,142	0,157	0,097	0,049	0,025
5,024	0,286	0,242	0,186	0,221	0,192	0,185	0,114	0,093	0,049	0,021
5,652	0,372	0,285	0,309	0,228	0,204	0,188	0,146	0,079	0,045	0,018
6,28	0,337	0,297	0,232	0,246	0,157	0,138	0,138	0,093	0,038	0,010

Tabela 5.3. Kvantitativno poređenje dijagrama usmerenosti zračenja
sa Lamberovim zakonom za $s = 0.99$.

i	$\gamma = (\pi/2) * i/10$	Lamberov zakon, $\cos(\gamma)$	Dijagram usmerenosti, jedn. (5.3), sumiran po φ , gde je $\gamma = const$	Razlika (%)
1	0.15708	0.987688	1.143634	-15.5945
2	0.314159	0.951057	0.956148	-0.50912
3	0.471239	0.891007	0.83156	5.944681
4	0.628319	0.809017	0.816185	-0.71685
5	0.785398	0.707107	0.652727	5.438018
6	0.942478	0.587785	0.574295	1.348999
7	1.099557	0.45399	0.451559	0.243133
8	1.256637	0.309017	0.359357	-5.03405
9	1.413717	0.156434	0.168035	-1.16001
10	1.570796	6.13E-17	0.069488	-6.94883

Tabela 5.4. Uticaj veličine rešetke na vreme proračuna.

Simulacija je rađena za prostoriju oblika „kutija za cipele“ dimenzija 4m x 3m x 2.6m,
sa 1000 zraka i vremenom simulacije od 2 sekunde.

veličina rešetke	10x10	14x14	18x18	25x25	30x30	65x65
vreme proračuna[s]	475	930	1290	2230	3100	14080

Kada je reč o veličini rešetke, izvođeni su testovi kvaliteta za veličine rešetki od 10x10 do 65x65. Povećavanjem veličine rešetke smanjuje se prostorni ugao ω , ali istovremeno i opada broj rezultujućih vektora n koji ulaze u njega. Veličina rešetke

od 25x25 zadovoljava očekivanja sa aspekta kvaliteta dobijenih rezultata. Međutim, sa povećanjem veličine rešetke značajno raste vreme računarskog proračuna. Ilustracija zavisnosti vremena proračuna od veličine rešetke prikazana je u tabeli 5.4. Simulacija je rađena za prostoriju paralelopipedog oblika dimenzija 4 m x 3 m x 2,6 m, sa 1000 zraka i vremenom simulacije 2 sekunde.

5.3 Modifikacija proračuna impulsnog odziva na osnovu energetskog odziva

Modelovanje koje kao rezultat daje energetski odziv u prostoriji, što je rezultat primene rej-trejsing metode, ne može se koristiti za izračunavanje nekih važnih pokazatelja stanja zvučnog polja s kojim se vrši ocena kvaliteta, kao na primer u koncertnim salama. Takav rezultat takođe ne omogućava auralizaciju koja je značajna u mnogim analizama. Zbog toga se u ovom radu predlaže nova metodologija kojim se informacija sadržana u energetskom odzivu dobijenom pomoću rej-trejsinga konvertuje u „ekvivalentni impulsni odziv“.

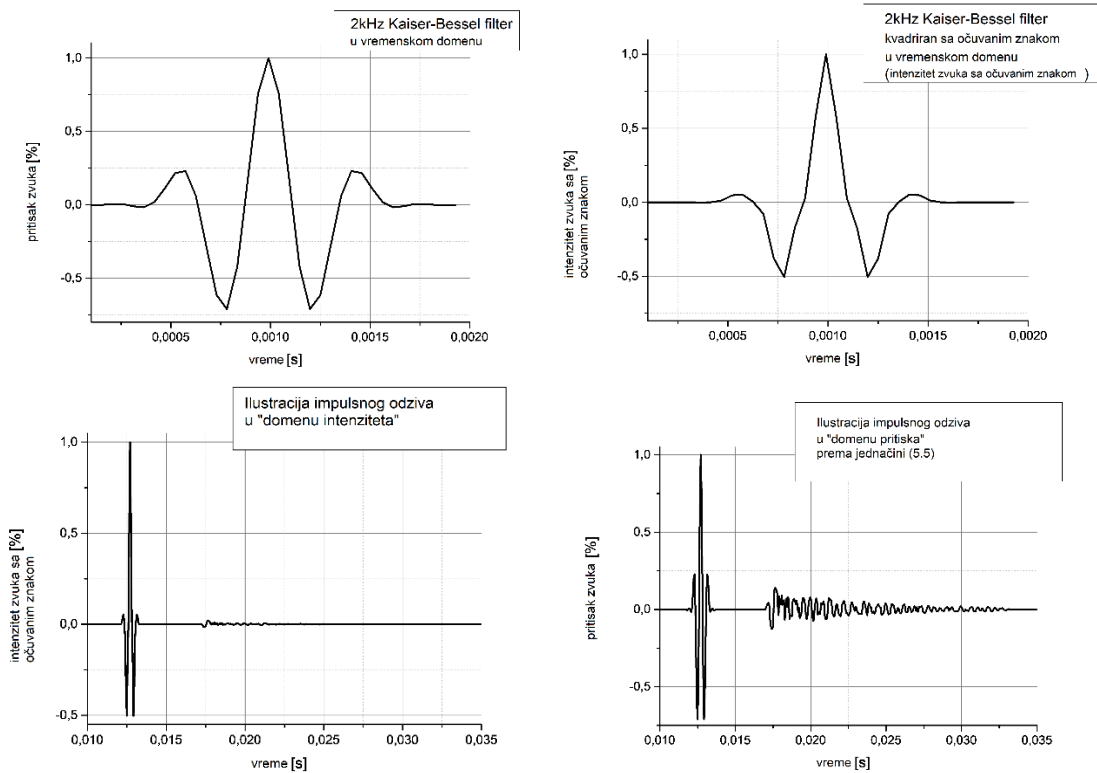
U modelovanju rej-trejsing metodom kada zrak pogodi prijemnu tačku registruje se njegov intenzitet definisan jednačinom (5.3), to jest sa $I_{\omega,r} = P_{\omega}/r^2$. Svi pogoci, odnosno zvučni intenziteti u nekom intervalu vremena $(t, t + \Delta t)$ sabiraju se i kao rezultat nastaje energetski odziv u vremenu. Frekvencija odbiraka se definiše kao $f_s = 1/\Delta t$. Jedan pogodak je u stvari tačka u vremenu i ima širokopojasni frekvencijski odziv. Ako se umesto jedne tačke registruje niz tačaka u vremenskim intervalima $(t, t + \Delta t)$; $(t, t + 2 \cdot \Delta t)$; $(t, t + 3 \cdot \Delta t)$; ..., $(t, t + n \cdot \Delta t)$; pri čemu n predstavlja broj tačaka oktavnog Kajzer-Besel FIR filtra u vremenskom domenu a amplitude tih tačaka odgovaraju koeficijentima ovog filtra, kao rezultat dobiće se oktavni frekvencijski impulsni odziv u vremenskom domenu.

Da bi se uzeo u obzir intenzitet zvuka koji je rezultat rej-trejsinga i skalirao zvučni pritisak koji je definisan Kajzer-Besel FIR filterima potrebno je povezati ove dve veličine. U skladu sa poznatom relacijom za ravanske zvučne talase, intenzitet zvuka je proporcionalan kvadratu zvučnog pritiska, $I \sim p^2$. Imajući u vidu činjenicu da se Kajzer-Besel filter u vremenskom domenu odnosi na pritisak, sumiranjem na ovaj način zanemaruju se fazne razlike i interferencioni efekti između zvučnih talasa u prostoriji (Savioja, Svensson, 2015). Alternativa koja se predlaže u ovom radu je

pokušaj sumiranja u “domenu intenziteta”. U tu svrhu, svaki oktavni Kajzer-Besel filter $p_{KB}(t)$ u vremenskom domenu biće modifikovan prema sledećoj formuli:

$$I_{KB}(t) = \text{sign}(p_{KB}(t)) \cdot p_{KB}^2(t) \quad (5.4)$$

gde je $I_{KB}(t)$ filter u “domenu intenziteta” tj. intenzitet zvuka Kajzer-Besel filtera sa očuvanim znakom.



Slika 5.3. Kajzer-Besel filter oktava 2kHz u vremenskom domenu $p_{KB}(t)$ (gore levo). Modifikovan Kajzer-Besel filter 2kHz u “domenu intenziteta” $I_{KB}(t)$, prema jednačini (5.4) (gore desno). Ilustracija impulsnog odziva u “domenu intenziteta” (dole levo). Ilustracija impulsnog odziva u “domenu pritiska” prema jednačini (5.5) (dole desno).

Kao ilustracija, na slici 5.3 (gore) prikazani su signali $p_{KB}(t)$ i $I_{KB}(t)$ za oktavu od 2kHz. Sada, posle sumiranja rezultat je intenzitet zvuka sa sačuvanim znakom, slika 5.3 (dole levo). Da bi se vratili u domen pritiska predložena je inverzna operacija:

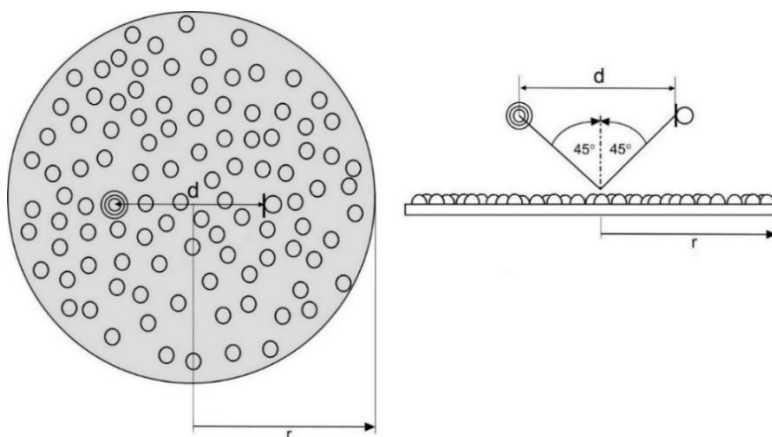
$$p_{\Sigma}(t) = \text{sign}(I_{\Sigma}(t)) \cdot \sqrt{\text{abs}(I_{\Sigma}(t))} \quad (5.5)$$

gde je $I_{\Sigma}(t)$ suma intenziteta u odgovarajućem oktavnom opsegu koja predstavlja intenzitet zvuka sa očuvanim znakom, a $p_{\Sigma}(t)$ predstavlja zvučni pritisak u odgovarajućem opsegu, slika 5.3 (dole desno). Signal dobijen na ovaj način ima skoro

iste karakteristike u frekvencijskom domenu kao i originalni Kajzer-Besel filter. Međutim, sumiran je u “domenu intenziteta” što znači da su prethodne primedbe koje se odnose na fazne pomeraje i interferencione efekte izbegnute.

5.4 Numeričko testiranje predloženog rej-trejsing algoritma

Razlike između različitih rej-trejsing algoritama i eventualni doprinosi njihovom potencijalnom unapređenju teško se kvantifikuju na kompleksnoj strukturi izračunatog impulsnog odziva prostorije. Da bi se proverilo algoritamsko poboljšanje predstavljeno u ovom radu pripremljen je test računarske simulacije u kome je proučavana ukupna reflektovana zvučna energija od samo jedne refleksione površi. Ideja takvog testa je posmatranje promena u reflektovanoj energiji od difuzne površi kada se njen skatering koeficijent menja.



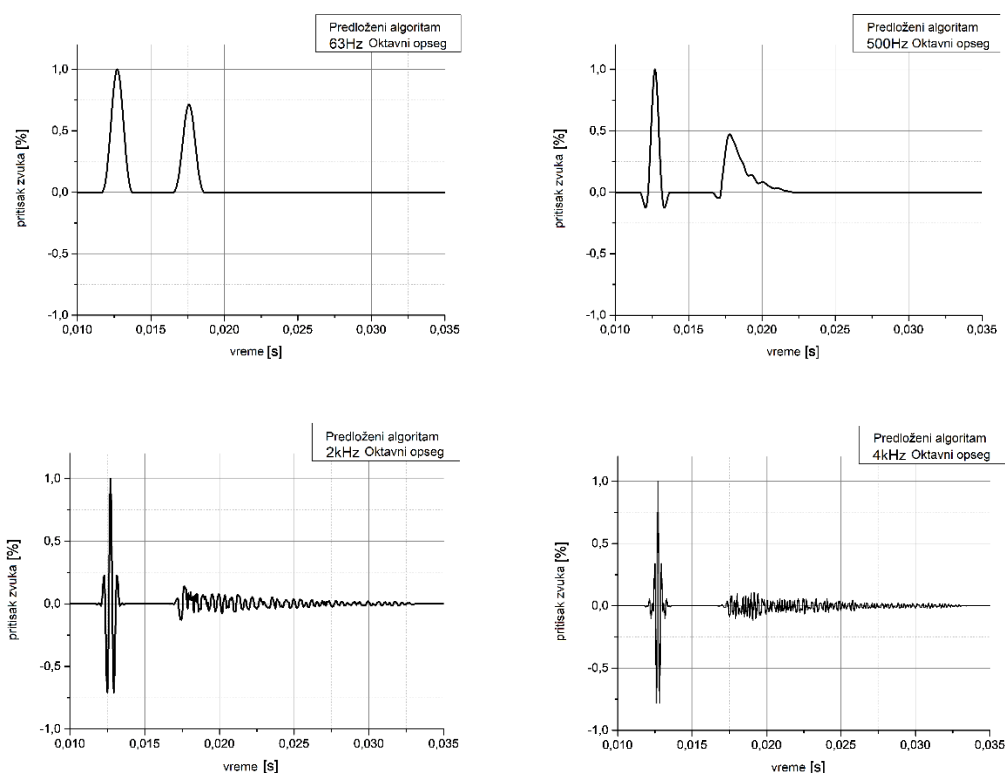
Slika 5.4. Difuzna površ koja je iskorišćena za numeričko i eksperimentalno testiranje. Za numeričke testove $r = 4.75\text{m}$, korišćen je skatering koeficijent s iz tabele 5.5. Za eksperiment u fizičkom modelu korišćen je skalirani model 1:10 sa $r = 47.5\text{cm}$, kružna površ je bila 50% popunjena drvenim poluloptama prečnika 4cm.

U testu je usvojena forma koja je kasnije realizovana i kao fizički model. Odabrana difuzna površina ima kružni oblik. Skica modela u testu je predstavljena na slici 5.4. Izabrani poluprečnik difuzne površine u računarskoj simulaciji je $r = 4.75\text{m}$. U računarskoj simulaciji vrednost koeficijenta apsorpcije $\alpha = 0,1$ primenjena je za sve frekvencije. Izvor zvuka i prijemna tačka su pozicionirani na rastojanju $d = 4\text{m}$ i na

visini tako da upadni ugao i pravac spekularne refleksije zaklapaju ugao od 45° sa normalom, kao što je prikazano na slici 5.4. Izvor zvuka i prijemna tačka su postavljeni tako da je tačka spekularne refleksije u centru kružne difuzne površi. Impulsni odziv se sastoji od direktnog zvuka i reflektovane energije od celokupne difuzne površi. Vrednosti sketering koeficijenta s po oktavama korišćene za računarsku simulaciju preuzete su iz literature i prikazane su u tabeli 5.5 [Mommertz, 2000].

Tabela 5.5. Vrednost sketering koeficijenta s difuzne površi sa slike 5.4 po oktavama [prema: Mommertz, 2000].

f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
sketering koeficijent, s	0.01	0.05	0.2	0.45	0.55	0.7	0.75	0.8



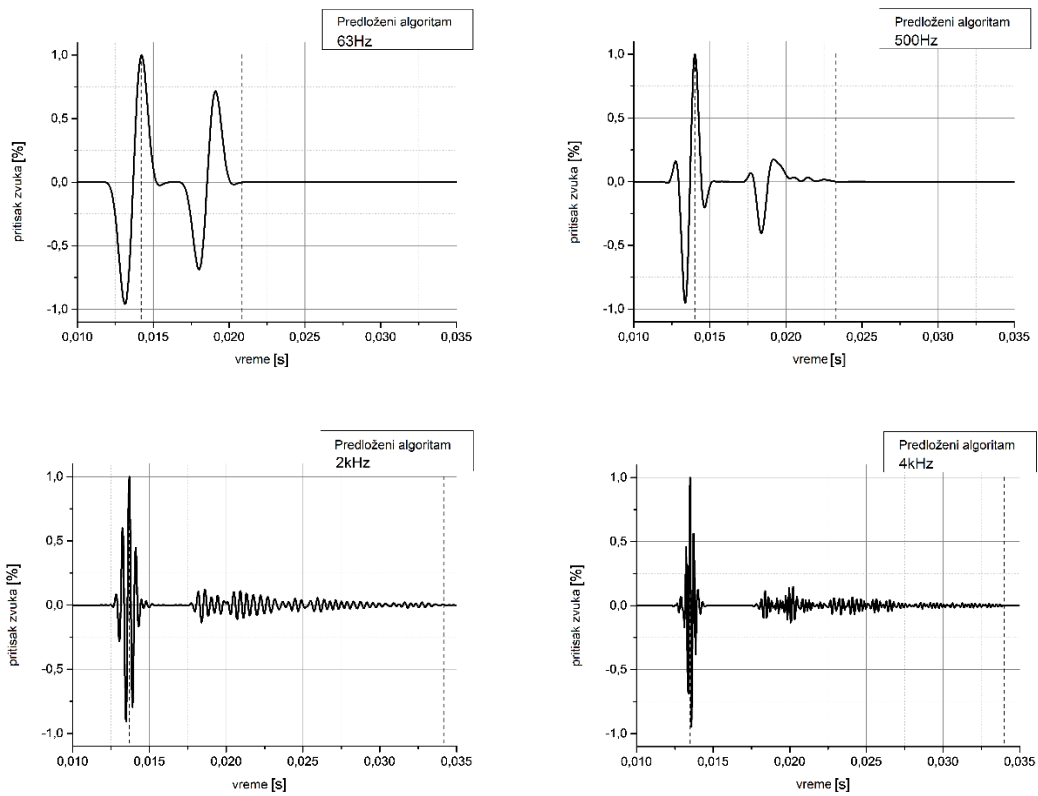
Slika 5.5. Ilustracija impulsnih odziva dobijenih predloženim algoritmom za difuznu površinu sa slike 5.4, kroz karakteristične oktave sa vrednostima sketering koeficijenta iz table 5.5.

Rezultati simulacije su prikazani na slici 5.5. Prikazani su odzivi samo za 4 karakteristične oktave radi preglednosti, ali su impulсни odzivi izračunati za svih 8 oktava. U simulacijama su korišćeni Kajzer-Besel oktavni filteri u 37 tačaka [Collins, 2017]. Ilustracija na slici 5.5 pokazuje da porast sketering koeficijenta produžuje impulсни odziv u vremenu, iako veličina difuzne površi ostaje konstantna.

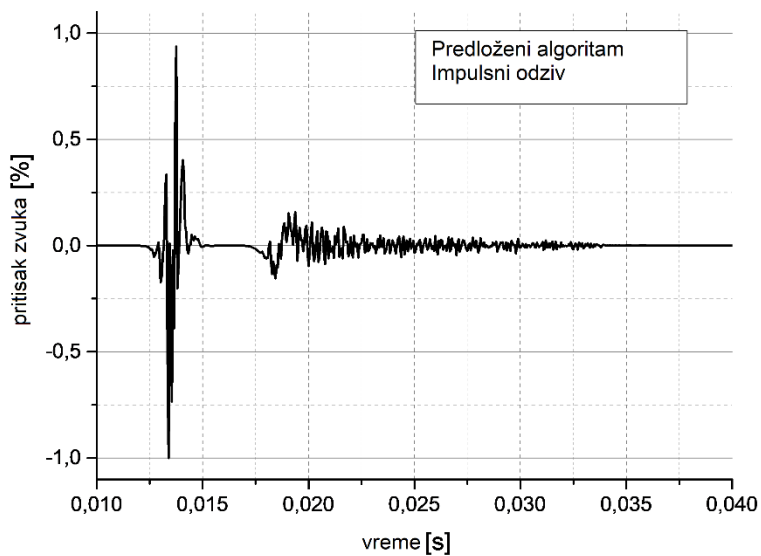
U realnosti, srednja vrednost impulsnog odziva (srednja vrednost pritiska zvuka) je 0. Kako bi se rezultat približio realnosti potrebno je uraditi konvoluciju impulsnih odziva sa slike 5.5 sa filtriranim realnim direktnim zvukom snimljenim u laboratorijskim uslovima. Detaljniji opis tog postupka prikazan je kasnije u delu koji opisuje proveru algoritma poređenjem sa merenjima na fizičkom modelu (direktan zvuk iz tog odziva prikazan je na slici 5.8). Pošto je snimanje izvršeno na fizičkom modelu napravljenom u razmeri 1:10 sa frekvencijom odabiranja 192 kHz, za potrebe ove konvoluceije izvršeno je njegovo resemplovanje na 19.2 kHz. Filtriranje je urađeno sa istim oktavnim Kajzer-Besel filterom u 37 tačaka. Konvolucija je urađena prema sledećoj C++ proceduri:

```
double * proc_convolution(double *signal, int num_signal, double *filter, int
num_filter)
{
double sum = 0;
double * convolution = new double[num_signal + num_filter - 1];
for (int i=0; i<(num_signal + num_filter - 1); i++)
{
for (int j=0; j<num_filter; j++)
{
if (((i - j) >= 0) && ((i - j) < num_signal))
{
sum = sum + filter[j]*signal[i - j];
}
}
convolution[i] = sum;
sum = 0;
}
return convolution;
}
```

U ovoj proceduri *convolution* je rezultat, *num_signal* je broj odbiraka u impulsnog odzivu označenom kao *signal*, *filter* je Kajzer-Besel oktavni filter, dužina Kajzer-Besel oktavnog filtera je *num_filter*.



Slika 5.6. Impulsni odzivi sa slike 5.5 posle konvolucije sa filtriranim direktnim zvukom snimljenim u eksperimentu.



Slika 5.7. Impulsni odziv dobijen pomoću predloženog algoritma.

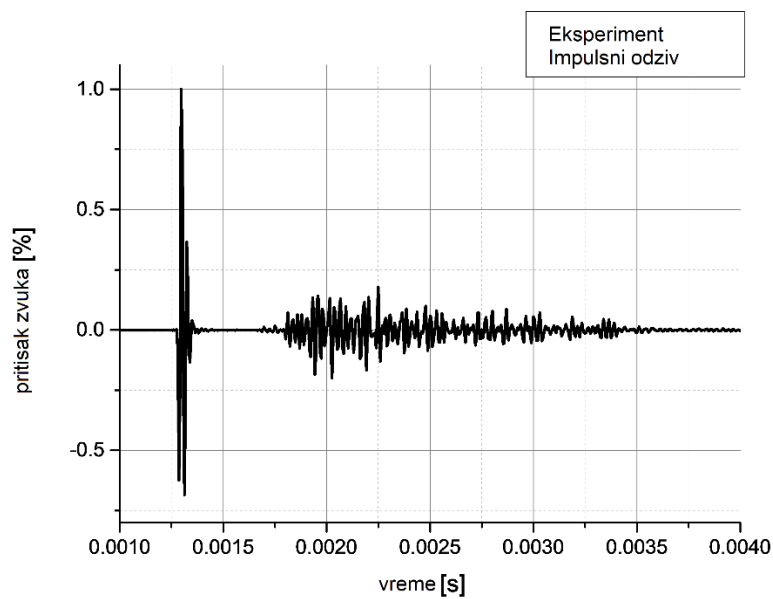
Odzivi posle konvolucije prikazani su na slici 5.6. Dužina dobijenih impulsnih odziva u vremenu u odnosu na svoj direktan zvuk, kroz oktave, je predstavljena u tabeli 5.6 (dužina impulsnog odziva je na slici 5.6 označena vertikalnim isprekidanim linijama).

Proces kreiranja jedinstvenog širokopojasnog impulsnog odziva na osnovu prethodno dobijenih impulsnih odziva po oktavama predstavlja njihovo sumiranje. Pri tome je važno da se prethodno ne radi normalizacija tih impulsnih odziva. Impulсни odziv dobijen na ovaj način je prikazan na slici 5.7.

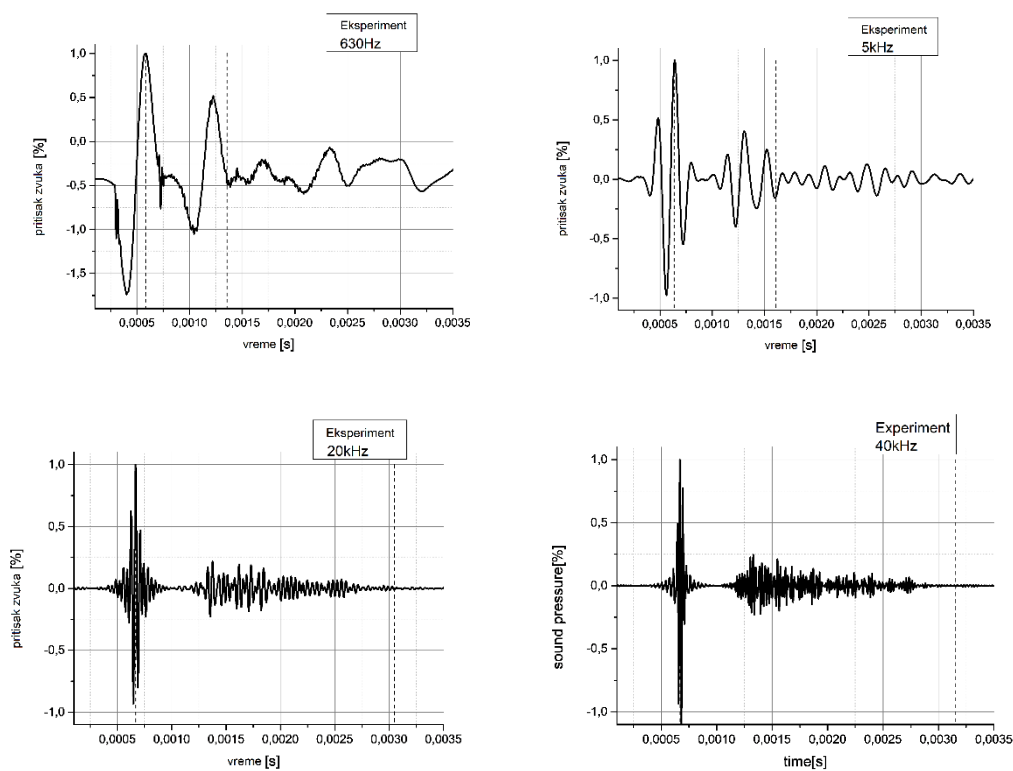
5.5 Eksperimentalno testiranje predloženog rej-trejsing algoritma

Provera predloženih modifikacija rej-trejsing algoritma izvršena je pomoću dve metode. Prva metoda je poređenje impulsnog odziva izračunatog to metodom sa impulsnim odzivom dobijenim snimanjem u fizičkom modelu iste površine, a druga je poređenje njegovog rezultata sa rezultatom simulacije pomoću jednog komercijalnog softvera koji radi sa rej-trejsing algoritmom na način koji je uobičajen.

Za prvu metodu napravljene je fizički model difuzne površine ranije prikazane na slici 5.4. Model je realizovan u razmeri 1:10. S obzirom na primenjenu razmeru, njegova difuzna struktura se sastoji od drvenih polulopti prečnika 4 cm. One su stohastički raspoređene na kružnoj površini pokrivajući oko 50% njene površine kao na modelu sa slike 5.4. Veličina prečnika polulopte je odabrana polazeći od činjenice da rezultati merenja sketering koeficijenta za takav tip reljefa sa poluloptama prečnika 4 cm već nalaze u literaturi [Vorlander, Mommertz, 2000]. U eksperimentu je kao izvor zvuka za pobudu korišćen generator električne varnice prikazan ranije u literaturi (Šumarac-Pavlović, Mijić, Mašović, 2015). Odziv je registrovan standardnim mernim mikrofonom prečnika 1/4". Akvizicija signala je izvedena sa frekvencijom odabiranja 192 kHz i rezolucijom 24 bita. Impulсни odziv je normalizovan na maksimalnu amplitudu pritiska 1.



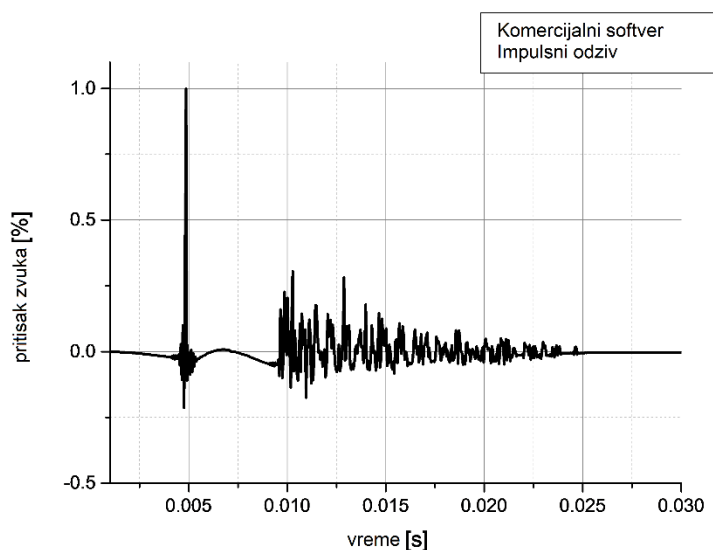
Slika 5.8. Jedan primer impulsnog odziva snimljenog u fizičkom modelu.



Slika 5.9. Impulsni odziv snimljen u eksperimentu filtriran oktavnim Kajzer-Besel filterima, čija je centralna frekvencije pomnožena sa 10 u odnosu na simulaciju; isprekidana vertikalna linija označava kraj dužine impulsnog odziva.

Rezultat eksperimenta u formi impulsnog odziva difuzne sistema sa slike 5.4 registrovan na poziciji prijemnika predstavljen je na slici 5.8. Rezultati njegovog filtriranja pomoću oktavnih Kajzer-Besel filtera su prikazani na slici 5.9. Imajući u vidu činjenicu da je odabiranje rađeno sa frekvencijom 192 kHz, centralne frekvencije oktavnih filtera su pomnožene 10 puta (630 Hz, 1250 Hz, 2500 Hz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 40 kHz, 80 kHz). Broj tačaka Kajzer-Besel filtera odabrani su kao (79, 79, 99, 119, 139, 139, 139, 139) respektivno, kako bi se dobili jasni rezultati. Za upoređivanje rezultata ovog eksperimenta sa računarskom simulacijom izvršeno je množenje vremenske ose snimljenih impulsnih odziva sa 10 kako bi rezultati bili međusobno uporedljivi.

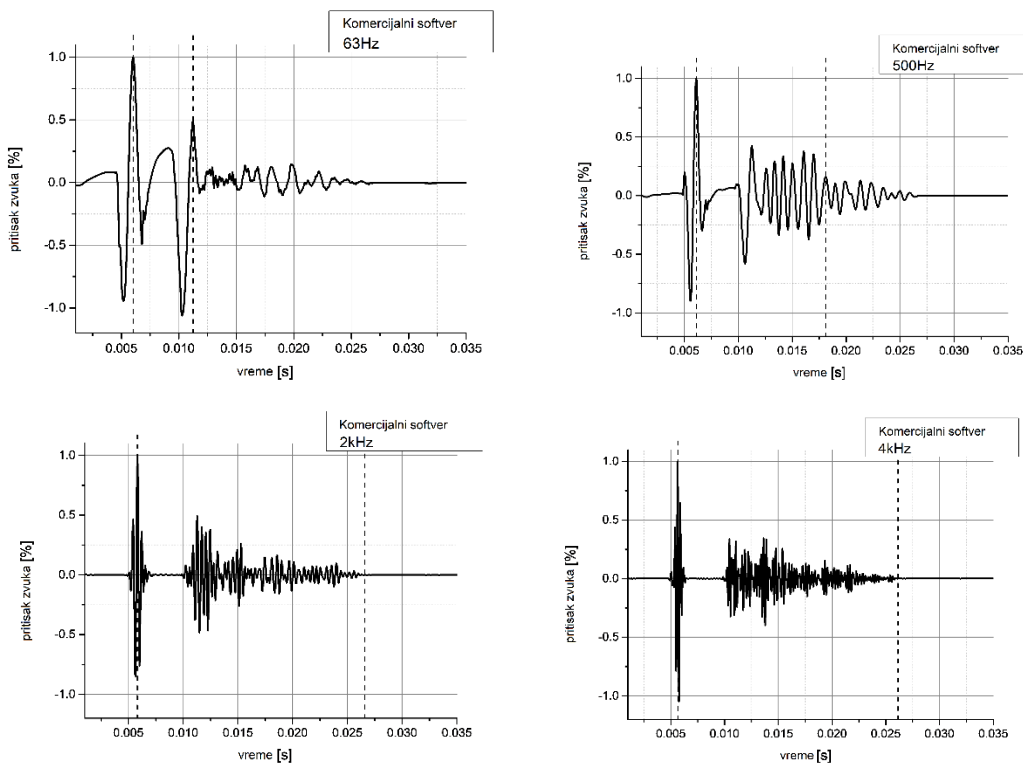
Za drugi način testiranja predloženog algoritma korišćeni su rezultati simulacije za isti model pomoću jednog komercijalnog softvera koji radi sa uobičajenim rej-trejsing algoritmom. U softveru je kreiran numerički model iste difuzne površi kao na slici 5.4. Rezultat simulacije je predstavljen na slici 5.10. Rezultati njegovog filtriranja oktavnim Kajzer-Besel filterima su predstavljeni na slici 5.11. Dužine impulsnih odziva dobijene u eksperimentu, predloženim algoritmom i simulacijom pomoću komercijalnog softvera prikazane su u tabeli 5.6.



Slika 5.10. Impulsni odziv simuliran jednim komercijalnim softverom.

Tabela 5.6. Dužine impulsnih odziva sa slika 5.6, 5.9 i 5.11 po oktavama.

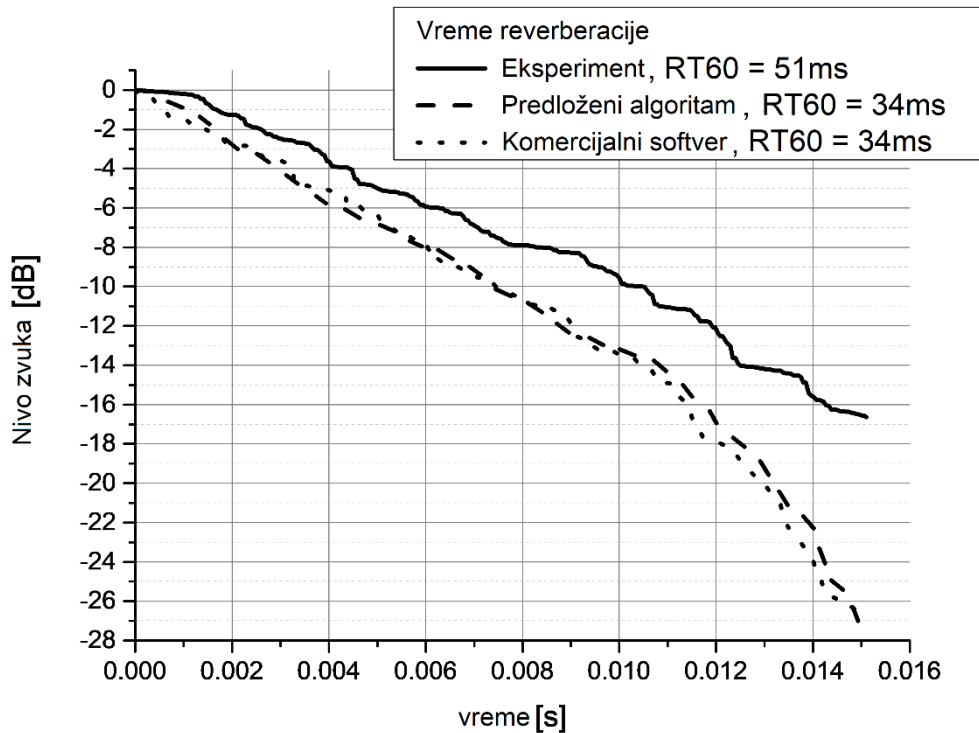
f [Hz]	630	5k	20k	40k
dužina impulsnog odziva iz eksperimenta [ms] $\times 10$	7.71	9.5	23.7	23.9
dužina impulsnog odziva iz predloženog algoritma [ms]	6.7	9.3	20.7	20.8
razlika predloženi algoritma u odnosu na eksperiment [%]	13	0.02	12.6	12.9
dužina impulsnog odziva iz komercijalnog softvera [ms]	5.1	11.2	20.1	20
razlika komercijalni softver u odnosu na eksperiment [%]	33	-17.8	15	16



Slika 5.11. Impulsni odzivi simulirani komercijalnim softverom, filtrirani Kajzer-Besel oktavnim filterima. Isprekidana vertikalna linija označava kraj dužine impulsnog odziva.

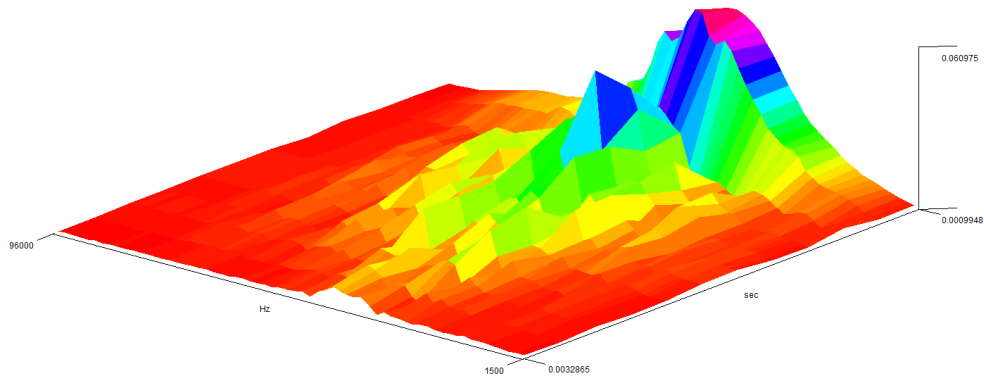
Kako bi se uporedili dobijeni rezultati na osnovu vremena reverberacije, na slici 5.12 prikazane su krive opadanja nivoa zvuka dobijene vremenskom integracijom kvadriranog impulsnog odziva sa slika 5.7, 5.8 i 5.10. Sa dobijenih krivih su proračunata i vremena reverberacije u ova tri slučaja, na bazi ISO 3382 standarda [ISO 3382, 2008]. Vreme reverberacije može biti procenjeno na bazi dinamičkog opsega od 30dB i ekstrapolirano na vreme opadanja od 60 dB. Na slici 5.12 prikazane su krive opadanja nivoa zvuka na bazi reverberacionog repa impulsnog odziva sa slika 5.7, 5.8

i 5.10, normalizovan na početnu poziciju (0,0) da bi se olakšalo njihovo poređenje. Pošto je snimanje impulsnog odziva izvršeno u fizičkom modelu napravljenom u razmeri 1:10, vremenska osa snimljenog signala je pomnožena sa 10 da bi bila poredljiva sa rezultatom simulacije.

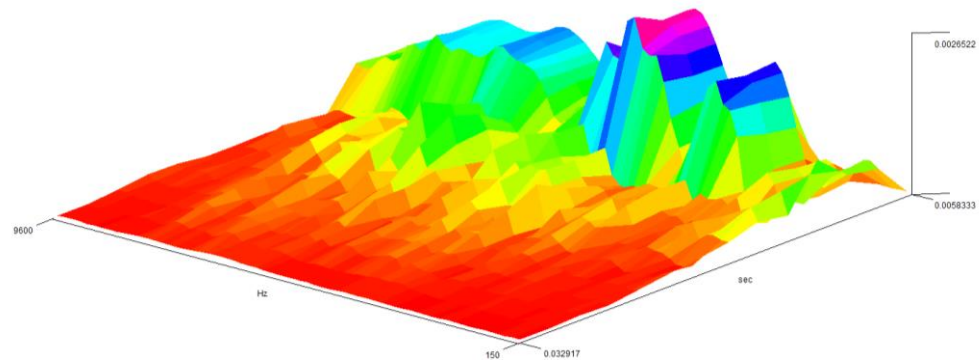


Slika 5.12. Poređenje kriva opadanja nivoa zvuka i vremena reverberacije za impulsne odzive iz eksperimenta, predloženog algoritma i komercijalnog softvera

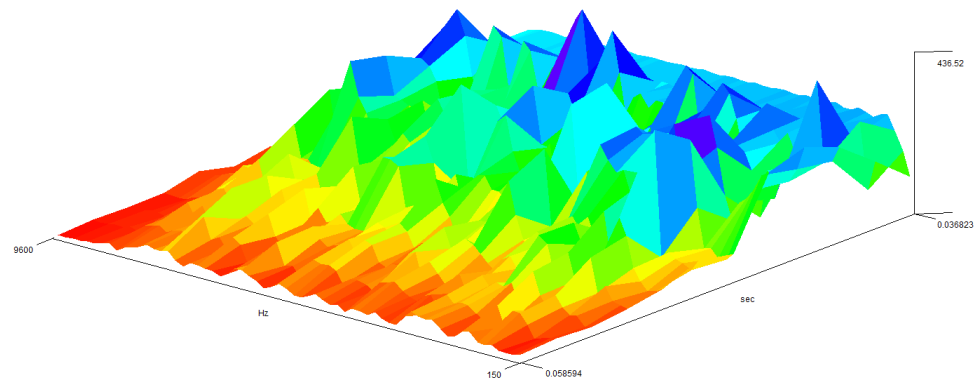
Kao dodatak, upoređivanje odziva se može vršiti i vizuelnim pregledom. Za takvu verifikaciju su na slikama 5.13, 5.14 i 5.15 prikazani impulsni odzivi dobijeni na tri opisana načina: pomoću eksperimenta u fizičkom modelu, predloženog algoritma i komercijalnog softvera za simulaciju. Prikazi su predstavljeni u formi slapa radi bolje predgednosti njihovog frekvencijskog sadržaja.



Slika 5.13. Slap impulsnog odziva snimljenog u fizičkom modelu.



Slika 5.14. Slap impulsnog odziva dobijenog simulacijom predloženim algoritmom.



Slika 5.15. Slap impulsnog odziva simuliranog komercijalnim softverom.

5.6 Rezime

Predloženi algoritam uvodi jedan inovativni model za predstavljanje sketering karakteristika pri akustičkoj rej-trejsing simulaciji. Akcenat je bio na modifikaciji usmerenosti zračenja sekundarnih izvora pri difuznim refleksijama, s obzirom da se

takav pristup uobičajeno koristi pri formiranju impulsnog odziva prostorije pri numeričkoj simulaciji zvučnog polja u prostorijama. Ova modifikacija simulacionog algoritma testirana je poređenjem rezultata sa realnim odzivom snimljenim u fizičkom domenu. Test je pokazao dobro slaganje simuliranog i realnog odziva. Predložena modifikacija je takođe testirana poređenjem sa jednim kvalitetnim komercijalnim softverom za simulaciju rej-trejsing metodom, koji se najšire koristi u akustičkom dizajnu prostorija. Ovo poređenje je pokazalo da modifikovani algoritam daje rezultate mnogo bliže realnosti nego korišćeni komercijalni softver.

6 Realizacija softvera na bazi predloženog algoritma

Uopšteno gledano konkretan programski kod bilo kog softvera za simulaciju akustičkog odziva prostorije pomoću rej-trejsinga se ne može naći u literaturi. To je i razumljivo ako se ima u vidu da su to uglavnom komercijalni softveri. Zato je za potrebe ovog rada bilo potrebno razviti ne samo modifikaciju rej-trejsing algoritma koja je ovde predložena, već i kompletan softverski kod za rej-trejsing od početka.

6.1 Računarska realizacija metode rej-trejsing

Na samom početku razvoja softvera postavila su se opšta pitanja vezana za računarsko modelovanje neke realne pojave. Iako naizgled neka od njih deluju jednostavno, bilo je neophodno pronaći adekvatan odgovor kako bi se razvoj softvera nastavio dalje. Ovde su pobrojana neka od najvažnijih pitanja:

1. Šta znači modelovati neku realnu pojavu? Kako se modeluju realne pojave pomoću računara?
2. Kako modelovati prostoriju? Na koji način modelovati zid?
3. Šta znači da se zrak „kreće“? Kako modelovati „kretanje“ zraka?
4. Na koji način modelovati refleksiju zraka od zida?
5. Koji programski jezik izabrati za realizaciju softvera?
6. Koji su to ulazni podaci u programu, a koji izlazni?
7. Na koji način organizovati obradu podataka i koji format podataka i fajlova usvojiti?

Iako se ova pitanja mogu sagledati sa više aspekata, usvojeni su odgovori koji su omogućili nastavak realizacije postavljenog cilja, na sledeći način:

1. Veoma je bitno razumeti da se realne pojave opisuju pomoću modela koji se kreiraju u tu svrhu. Od trenutka kreiranja i usvajanja modela kojim se opisuje realna pojava, realna pojava se poistovećuje sa dotičnim modelom. Međutim, nijedan model nije realnost. Valjanost modela tj. koliko model odgovara realnosti se proverava eksperimentom.

Računarski model predstavlja način da se matematički simulira neka realna pojava.

2. Prostorija se sastoji od zidova. Zid se modeluje jednačinom ravni. To znači da u modelu koji je usvojen zid nema debljinu (zid je 2D pojava). Zid ima pridružene attribute, kao što su apsorpcija i sketering koeficijent.
3. Kretanje zraka se modeluje uređenim parom podataka. To su put koji je zrak prešao od polazne tačke do refleksije od zida i vreme koje je proveo na tom putu. Očigledno, prate se samo diskretni trenuci sudara zraka sa zidovima prostorije, a ne prati se šta se dešava sa zrakom u toku puta. Ovo je veoma bitno shvatiti, jer to omogućuje da se u prijemnoj tački registruju i pogoci čiji izvor može da bude i na površini zidova (tzv. površinski izvori). Ono što je bitno je da zakon održanja energije bude očuvan.
4. Refleksija zraka od zida predstavlja rešenje jednačine preseka prave, koja predstavlja zrak, i ravni, koja predstavlja zid. Iz tačke preseka reflektovani zrak polazi duž novog pravca, koji se određuje na osnovu upadnog ugla i sketering koeficijenta zida.
5. S obzirom da se u programu pojavljuje veliki broj proračuna, prirodno programersko okruženje za razvoj je programski jezik C++ zbog brzine proračuna. Takođe, C++ omogućuje objektno orijentisano programiranje, što znači da je u njemu moguće realizovati objekte identifikovane unutar nekog složenog problema. U ovom slučaju, identifikovani objekat je zid.
6. Ulazni podaci u program su prostorija (data koordinatama svojih zidova i atributima zidova tj. apsorpcija zvuka i sketering koeficijent), položaj izvora i prijemnika, vreme simulacije i broj zraka pri simulaciji. Izlazni podaci programa su statističke veličine dobijene na osnovu simulacije i one su pobrojane u nastavku.
7. Obrada podataka je podeljena u dve faze. U prvoj fazi se rezultati simulacije beleže u tekstualnom log fajlu, u vidu uređene četvorke (redni broj refleksije, vreme stizanja, intenzitet zraka, srednja dužina slobodnog puta). U drugoj fazi se pristupa statističkoj obradi log fajla i onda se izvlače statističke veličine koje predstavljaju krajnji rezultat simulacije.

Na poteškoće se naišlo i pri programskoj realizaciji algoritma. Recimo, primer koji je autoru ostao u neizbrisivom sećanju je slučaj kada se zrak pri programskoj realizaciji refleksije od zida jednostavno „zalepi“ za zid. Debugovanjem se utvrdilo da prilikom određivanja preseka prave duž koje se kreće zrak i zida koji je dat jednačinom ravni se može desiti da rešenje jednačine bude računarski zaokruženo na stranu zida izvan prostorije. Pri tome su to greške na desetoj ili dvadesetoj decimali, jer današnji programski jezici koriste tipove podataka za brojeve i do 4 bajta. S druge strane, kada jednom izađe iz prostorije zrak više ne može da se vrati u nju jer mu je najbliži zid uvek onaj koga je „probio“ za decimalu na dvadesetom mestu! Takav zrak se u literaturi za rej-trejsing naziva „izgubljenim zrakom“. I onda se program zaglavi u mrtvoj petlji sve do trenutka dok ne krene novi zrak. Ovaj problem je rešen tako što se posle svakog preseka zraka sa zidom proverava sa koje strane je tačka preseka, i u slučaju da je van prostorije „uvlači“ se u prostoriju, duž prave kojom putuje.

Za razliku od opisanog problema, koji se može nazvati elementarnim za nekoga ko se bavi rej-trejsingom, bilo je i daleko složenijih problema. Ako se koordinate temena zida unesu tako da jedno teme nije komplanarno sa ostalima, makar i na dvadesetoj decimali, jednačina ravni više nije upotrebljiva za rej-trejsing! Odmah se pojavljuje problem izgubljenih zraka. Ovaj problem je rešen tako što se svaki zid, čije se koordinate daju u ulaznom fajlu, prvo rastavlja na trouglove, s obzirom da tri tačke svakako jesu komplanarne.

Uopšteno govoreći, ako bi se svi problemi sa kojima se susretalo prilikom realizovanja softverskog paketa mogli sažeti u jedan, onda bi to bilo pitanje: na koji način u datom slučaju rešiti zaokruživanje cifara koje predstavljaju rešenje jednačine? U svakom od tih slučajeva, a treba reći da program obiluje vektorskim i skalarnim proizvodima, potrebno je pozabaviti se smislom same jednačine i rešenja koje ona daje. Samo tako je moguće reći kako treba zaokružiti dato rešenje da bi ono imalo smisla.

Ono što je u prvi mah bilo iznenađujuće, a onda je ukazalo da se razvoj softvera nalazi na pravom putu prilikom realizacije programa, je činjenica da je potraga za izgubljenim zracima u rej-trejsingu tema koja se pominje u literaturi na nivou najpoznatijih programa razvijenih u svetu. Na primer program CATT Acoustic, jedan

od najpriznatijih za računarsku simulaciju akustičkog odziva, definiše neka četiri razloga usled kojih može doći do pojave „izgubljenih zraka“:

- Model prostorije može imati rupe. Čak i male rupe mogu doprineti da veliki broj zraka „pobegne“ iz prostorije.
- Neke ravni nisu tačno modelovane, tj. neka temena se nalaze izvan (ponekad i daleko izvan) ravni dobijene uzimanjem u obzir prva tri temena.
- U slučaju prevelike apsorpcije zidova, zraci neće biti izgubljeni, ali će veoma brzo nestati usled apsorpcije i neće doprineti odzivu. To dovodi do pojave otvorenog prostora, gde veoma malo zraka ostaje da se reflektuje od zidova.
- Izvor može biti postavljen na zid (ili čak van prostorije) čineći da pola (ili svi) zraci budu izgubljeni za simulaciju.

6.2 Presek zraka i zida

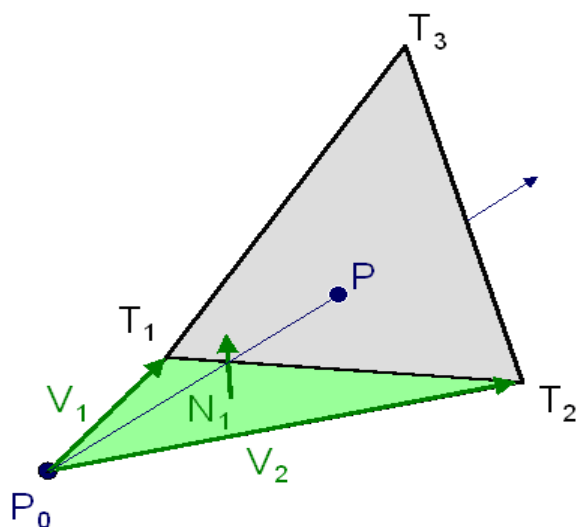
Postoji još jedan podjednako važan razlog, kao i komplanarnost temena zida, zašto je neophodno rastaviti zidove predstavljene mnogouglovima na trouglove. Taj razlog je utvrđivanje da li presek prave i trougla pripada unutrašnjoj oblasti trougla. U algoritmu za rej-trejsing u prethodnom poglavlju je objašnjeno da je prilikom određivanja zida refleksije potrebno proveriti moguće preseke prave sa zidovima, a onda na osnovu minimalnog rastojanja odrediti sa kojim zidom zapravo dolazi do refleksije. Ne samo što je najtačnije svaki zid posmatrati kao trougao da bi se izbegao fenomen „izgubljenih zraka“, već je u literaturi razvijen i vektorski račun pomoću koga se može odrediti da li presek prave i trougla pripada oblasti unutar trougla. Taj račun će biti prikazan ovde.

Na slici 6.1 prikazan je zid pomoću trougla $T_1T_2T_3$, na kome se nalazi presečna tačka zraka i zida P . Prilikom rešavanja ovog problema obilato se koristi vektorski račun, kao i na mnogim mestima u programu. Može se reći da su upotreba skalarnih i vektorskih proizvoda, kao i sabiranje i oduzimanje vektora osnovni alat koji je omogućio realizaciju softvera. Da bi se odredilo da li se zrak preseca sa zadatim zidom proverava se da li se vektor zraka algebarski nalazi unutar piramide čiji je trougao

osnova. Za svaku stranu trougla se proverava da li se zrak nalazi sa iste strane ravni kao i treće teme trougla. Posmatrajući sliku 6.1 pišemo:

$$\begin{aligned}
 V_1 &= T_1 - P_0 \\
 V_2 &= T_2 - P_0 \\
 V_3 &= T_3 - P_0 \\
 N &= V_2 \times V_1 \\
 P_{zrak} &= P - P_0
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

pri čemu je N normala na ravan dobijena vektorskim proizvodom vektora V_1 i V_2 i u programu se vrši normalizacija magnitude ovog vektora. Treba primetiti da je svaka tačka ujedno i vektor u odnosu na koordinatni početak. Sada, ako skalarni proizvod $P_{zrak} \cdot N$ ima isti znak kao i $V_3 \cdot N$, onda se zrak nalazi sa iste strane ravni određene tačkama $P_0T_1T_2$, pa to znači da može da preseca oblast trougla. Da bismo bili sigurni da zrak zaista i preseca oblast trougla ovu proveru moramo da izvršimo za sva tri temena trougla.



Slika 6.1. Ilustracija načina provere da li se zrak nalazi unutar piramide čija je osnova zid refleksije.

Sušтина metode određivanja tačke preseka zraka i oblasti trougla se sastoji u sledećem. Ne postoji matematički alat kojim bi se direktno mogla naći tačka preseka prave i oblasti trougla. Postoji alat kojim se određuje tačka preseka prave i ravni. Međutim, da bi se utvrdilo da li se tačka preseka prave i ravni nalazi u oblasti trougla

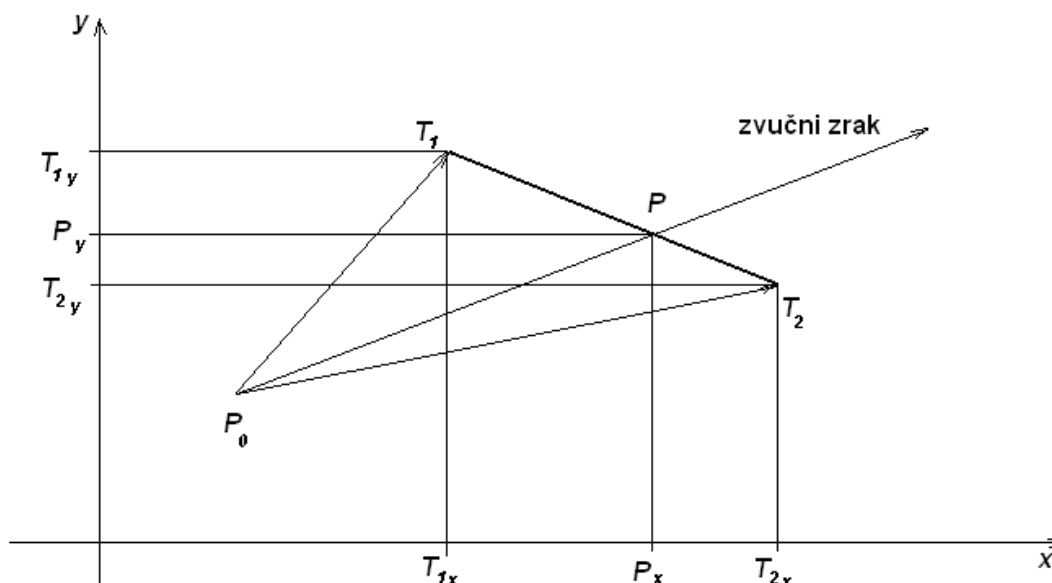
prvo se vrši provera da li se ceo zrak nalazi u oblasti piramide čija je osnova trougao (što je prikazano na slici 6.1). Zatim, ako je to ispunjeno, nalazi se presek prave i ravni kojoj pripada trougao. Tada se sa sigurnošću može tvrditi da se tačka preseka nalazi unutar oblasti trougla.

Ovde bi se mogla povući analogija sa dvodimenzionalnim slučajem, koji se takođe pojavljuje u literaturi. Naime, zbog složenosti algoritama za ispitivanje akustičkog odziva prostorije ranije se pribegavalo uprošćenim modelima. Uzeo bi se jedan poprečni presek sale koji je smatran reprezentativnim, recimo uzduž sale, i onda je pravljen dvodimenzionalni računarski model. Na slici 6.2 prikazan je dvodimenzionalni slučaj rej-trejsing metode pri čemu duž T_1T_2 predstavlja zid.

Pri dvodimenzionalnom modelovanju zid se predstavlja sa jednom duži. Uobičajena metoda za određivanje da li se presečna tačka nalazi na zidu je da se prvo odredi presek zraka i prave koja sadrži zid tj. duž. Dakle, prvo se određuje presečna tačka P prikazana na slici 6.2, a onda se vrše sledeće provere:

- naći $\max(T_{1x}, T_{2x})$
- proveriti da li je $P_x < \max(T_{1x}, T_{2x})$
- naći $\min(T_{1x}, T_{2x})$
- proveriti da li je $P_x > \min(T_{1x}, T_{2x})$

Zatim se ceo postupak ponovi i po y osi. Ako su sve provere zadovoljene, znači da presečna tačka pripada duži T_1T_2 . Treba primetiti da je ovo ranije bio način provere u dvodimenzionalnom slučaju, ali da se ta ista provera može izvršiti na već opisan način kod trodimenzionalnog slučaja. Treba samo utvrditi da li se teme T_2 nalazi sa iste strane poluravni prave P_0T_1 kao i zrak P_0P , za šta je dovoljno odrediti vektor normale na pravu P_0T_1 sa iste strane prave kao i tačka T_2 . Onda se postupak svodi na određivanje skalarnog proizvoda normale i vektora P_0P . Ako je algebarski znak ovog proizvoda pozitivan presek je sa iste strane poluravni, a ako je negativan nije. Ako provere za oba temena daju pozitivan znak znači da se zrak preseca sa pravom unutar duži T_1T_2 tj. da se zrak nalazi unutar ugla $T_1P_0T_2$.



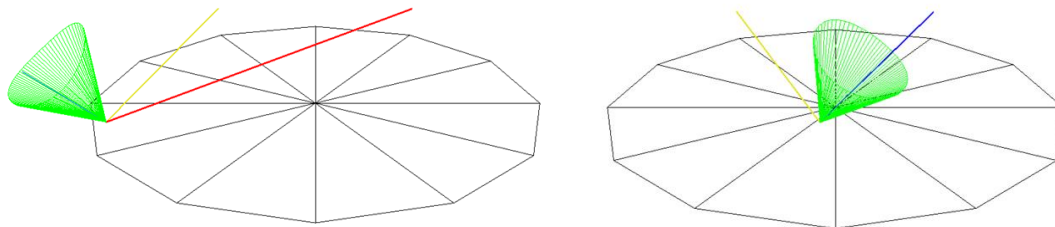
Slika 6.2. Ilustracija dvodimenzionalnog modela prostorije, P_0 je izvor, a duž T_1T_2 predstavlja zid.

6.3 Grafički prikaz simulacije pomoću računara

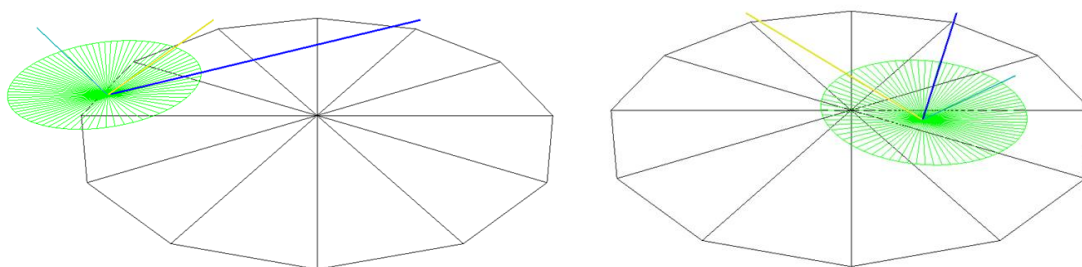
U programskom kodu je korišćen OpenGL softverski paket za grafičko predstavljanje algoritamskih zamisli, koje je osim za vizuelizaciju poslužilo i za proveru tačnosti. Na slikama 6.3, 6.4 i 6.5 prikazane su neke tipične upotrebe grafičkog prikaza algoritamskih zamisli. Na slici 6.3 dat je prikaz refleksije zraka od zida, pri čemu se proverava vidljivost prijemnika iz tačke refleksije. U slučaju malog sketering koeficijenta $s = 0.4$, upadni zrak označen žutom bojom formira konus rasejanja označen zelenom bojom, unutar koga se ne nalazi prijemnik. Stoga je prijemnik spojen sa tačkom refleksije linijom crvene boje. Na istoj slici 6.3 desno vidi se da kada upadni zrak pogađa zid refleksije tako da formira konus rasejanja unutar koga se nalazi prijemnik, onda je pogodak moguć i označen je linijom plave boje. Na slici 6.4 prikazan je sličan scenario kao na slici 6.3, ali je izabran veći sketering koeficijent $s = 0.8$, koji omogućuje da prijemnik bude pogođen praktično sa cele površine zida refleksije. Ovo ilustruje snagu koncepta konusa rasejanja u smislu koji je već ranije objašnjen.

Na slici 6.5 grafički je prikazano kako izgleda putanja zraka u jednoj prostoriji nalika „kutija za cipele“. Vidi se da je putanja zraka takva da pogađa sve zidove, ali

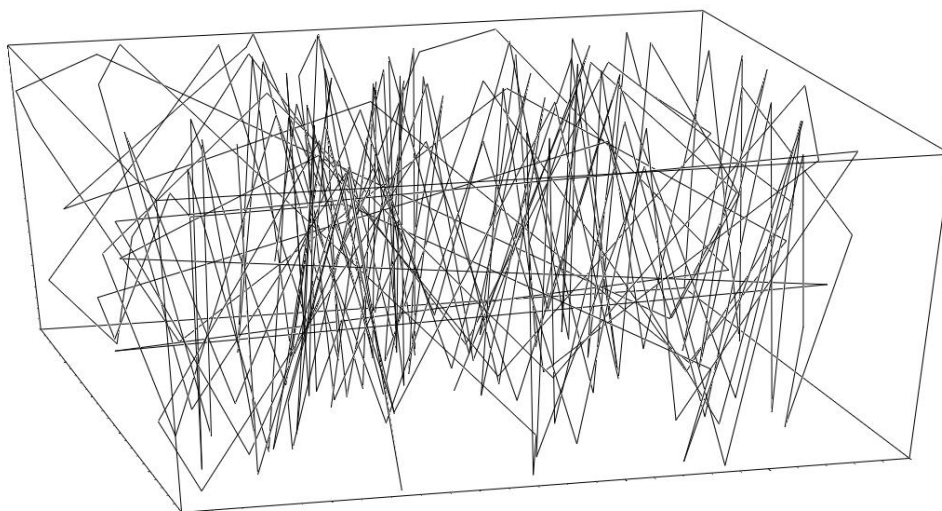
ne izlazi izvan prostorije. Vizuelna provera valjanosti algoritma za rej-trejsing pruža uverenje da su koncepti rej-trejsinga realizovani u kodu na valjan način.



Slika 6.3. Grafička simulacija sketering konusa za sketering koeficijent $s = 0.4$.



Slika 6.4. Grafička simulacija sketering konusa za sketering koeficijent $s = 0.8$.



Slika 6.5. Grafička simulacija refleksija zraka od zidova paralelopipedne prostorije.

6.4 Statističke veličine kao rezultat rada softvera

Koncepcija programa je takva da se prvo kreira fajl *log.txt*, u koji se upisuju fizičke veličine simulacije kod svakog pogotka u prijemnu tačku, a onda se na osnovu

tih podataka izračunavaju različite fizičke veličine odziva. Ove veličine jednim imenom možemo nazvati statističkim veličinama, s obzirom da se dobijaju usrednjavanjem podataka iz odziva. Prilikom svakog pogotka u prijemnu tačku beleže se sledeće fizičke veličine:

- ukupan broj refleksija od zidova prostorije, od izvora do pogotka u prijemnu tačku
- ukupno vreme putovanja zvučnog zraka od izvora do prijemne tačke dobijeno kao količnik ukupnog puta i brzine zvuka 340m/s
- intenzitet zraka prilikom pogotka u prijemnu tačku
- srednja dužina slobodnog puta zraka, od izvora do prijemne tačke, dobijena kao količnik ukupnog puta i ukupnog broja refleksija

Veličina izlaznog tekstuelnog *log.txt* fajla varira (može biti i nekoliko desetina ili čak stotina MB) u zavisnosti od zahtevanog broja zraka i veličine sketering koeficijenta. Što je difuznost veća ima više pogodaka u prijemnu sferu prilikom refleksija. Na osnovu ovako dobijenog izlaznog fajla određuju se sledeće veličine, kao akustički odziv prostorije:

- broj zraka koji je pogodio prijemnu tačku u određenom vremenskom intervalu, tj. vremenska raspodela broja zraka
- usrednjena srednja slobodna dužina puta svih zraka koji su stigli do prijemne tačke u određenom intervalu vremena, tj. vremenska raspodela srednje slobodne dužine puta
- usrednjena ponderisana srednja slobodna dužina puta u određenom vremenskom intervalu, pri čemu se kao faktor ponderisanja koristi vrednost intenziteta zvuka koji zrak ima prilikom pogotka u prijemnu tačku
- broj refleksija zraka do pogotka u prijemnu tačku u određenom vremenskom intervalu, tj. vremenska raspodela broja refleksija
- impulsni odziv prostorije
- Šrederov integral impulsnog odziva:

$$S(t) = \int_t^{\infty} p^2(t) dt \quad (6.2)$$

pri čemu ako se ima u vidu odnos zvučnog pritiska i intenziteta zvuka Šrederov integral se može napisati i kao:

$$S(t) = \rho_0 c \int_t^{\infty} I(t) dt \quad (6.3)$$

Drugim rečima, Šrederov integral odgovara energiji koju impulsni odziv još uvek sadrži u sebi u trenutku t . Kada se nacрта u dB relativno u odnosu na maksimalnu vrednost u trenutku $t = 0$, $S(t)$ će biti kriva opadanja nivoa zvuka u prostoriji dobijena posle isključenja stacionarnog izvora zvuka. Dakle, to je razlika u odnosu na impulsnu pobudu prostorije Dirakovim impulsom.

- nivo pritiska, koji se dobija na osnovu impulsnog odziva.
- raspodela verovatnoće slobodne dužine puta u prostoriji. Ona se računa zapisujući u izlaznom fajlu *raspodela.txt* sve slobodne dužine puteva koje zrak pređe unutar prostorije između dve refleksije, bez obzira da li pogađa prijemnu sferu ili ne. U tom slučaju generiše se statistika koja na apscisi sadrži slobodne dužine puteva u datom dužinskom intervalu, a na ordinati se nalazi verovatnoća da se veličina nalazi baš u tom dužinskom intervalu. Verovatnoća se dobija kada se broj slobodnih dužina putanja koje upadaju u dati dužinski interval podeli sa ukupnim brojem svih registrovanih slobodnih dužina puteva.
- raspodela energije po upadnom uglu za izabrani zid i raspodela broja pogodaka po upadnom uglu za izabrani zid.

6.4.1 Kratkovremenski usrednjena slobodna dužina puta

Srednja dužina slobodnog puta (MFPL) u prostoriji definisana je kao srednja vrednost svih mogućih putanja zvuka po vremenu i po ansamblu [Hunt, 1964]. Ansambl putanja na kome se vrši usrednjavanje determinisan je saobraćajem zvučne

energije po prostori, što je funkcija njenih geometrijskih atributa na makro i mikro planu (opšta geometrijska forma i difuznost refleksija na površinama). U literaturi je pokazano da varijacije geometrijskih osobina prostorije utiču na preraspodelu oblika statističke raspodele slobodnih dužina puteva, a time i na vrednost MFPL kao matematičkog očekivanja raspodele. Zbog toga se vrednost MFPL u prostori može u izvesnom opsegu menjati naviše i naniže u odnosu na teorijsku vrednost $4V/S$.

Da bi se analizirao proces uspostavljanja zvučnog polja, za ocenu stanja može se posmatrati vremenski tok promene vrednosti srednje dužine slobodnih putanja energije koja stiže do prijemnika postavljenog u prostori. Zbog toga se uvodi veličina $l_{ST}(t)$ koja predstavlja kratkovremenski usrednjenu slobodnu dužinu puta (ST MFPL). Ona se definiše kao srednja vrednost po ansamblu slobodnih putanja energije koja stiže u prijemnu tačku u ograničenom vremenskom intervalu Δt . Pomerajući taj interval duž vremenske ose ST MFPL postaje vremenska funkcija. Ovako definisana vrednost može se predstaviti izrazom:

$$\overline{l_{ST}}(t) = \frac{1}{\sum N_{i,j}} \left[\sum_{i \in (t-\Delta t, t)} \left(\sum_{j=1}^{N_i} l_j \right) \right] \quad (6.4)$$

gde su l_j dužine putanja i -tog zraka koji u prijemnu tačku stiže u vremenskom intervalu Δt , N_i predstavlja broj slobodnih putanja koje je prešao i -ti zrak pre nego što je pogodio prijemnu tačku uključujući i putanju od poslednje refleksije do prijemne sfere, a $N_{i,j}$ je ukupan broj putanja svih zraka koji su u intervalu Δt stigli do prijemne tačke. Vidi se da je $l_{ST}(t)$ funkcija vremena i veličine perioda usrednjavanja Δt .

Vrednost ST MFPL definisana ovim izrazom predstavlja geometrijski pristup u analizi prelaznog režima zvučnog polja. Može se očekivati da će tokom početnog perioda impulsnog odziva vrednost ovog parametra u izvesnoj meri odstupati od srednje vrednosti MFPL koja važi za homogeno zvučno polje, kao i da će posle dovoljno dugog vremena ona težiti toj vrednosti. U ovom radu se uvodi pretpostavka da proces tog približavanja može da posluži kao indikator stanja tranzicije u zvučnom polju, odnosno pokazatelj prelaska odziva na kasni reverberacioni deo.

Primenom geometrijskog modela zvučnog polja u prostori ST MFPL se može dobiti kao srednja vrednost po ansamblu dužina slobodnih putanja između dve

sukcesivne refleksije svih zraka pristiglih u prijemnu tačku u zadanom intervalu vremena Δt , koji se pri tome pomera duž vremenske ose. U modelovanju rej-trejsing analizom ovakvo usrednjavanje slobodnih putanja lako se realizuje na osnovu podataka o istoriji kretanja svih zraka koji su pogodili prijemnu sferu. Komercijalno dostupni softveri za rej-trejsing modelovanje, koji se danas mogu naći na tržištu, nemaju takvu opciju. Raspodela slobodnih dužina puteva, koja postoji kao opcija u dostupnim softverima, bazira se na usrednjavanjima putanja svih zraka koji polaze od zvučnog izvora i koji se prate sve dok ne izgube svoju energiju. Tako se dobija takozvana globalna raspodela koja predstavlja stanje u zvučnom polju u celini.

Za potrebe ove analize napravljen je ovde prikazan softver za rej trejsing analizu. U njemu je uvedena opcija da se statistika dužina slobodnih putanja može analizirati samo na ansamblu putanja zraka koji iz zadanog izvora pogađaju postavljenu prijemnu sferu i ulaze u impulsni odziv za definisani par tačaka (izvor-prijemnik). Zbog toga statistika slobodnih putanja koja se ovde uvodi nije opšti pokazatelj prostorijske, već odgovara stanju u impulsnom odzivu koji se registruje u prijemnoj tački.

Kratkovremenski usrednjena slobodna dužina puta je vremenska funkcija $l_{ST}(t)$ i predstavlja derivat geometrijskog pristupa u modelovanju prelaznog režima pri uspostavljanju zvučnog polja u prostorijskoj. To je vremenska funkcija koja se tokom trajanja impulsnog odziva asimptotski približava konstantnoj vrednosti karakteričnoj za difuzno polje u prostorijskoj. Za razliku od globalne MFPL koja odslikava geometriju putanja u čitavoj prostorijskoj, ST MFPL je karakteristika koja se odnosi na usvojeni par tačaka izvora zvuka i prijemnika. U opštem slučaju, ona će se razlikovati za različito odabrane parove tih tačaka u prostorijskoj.

Varijacije vrednosti $l_{ST}(t)$ u početnom delu impulsnog odziva zavise od geometrijskih osobina prostorijske. Moguće su različite brzine približavanja ove krive njenoj konačnoj vrednosti, što je funkcija odnosa opšte geometrijske forme prostorijske i stanja difuznosti refleksija u njoj. Razlike postoje i u istoj prostorijskoj u zavisnosti od stanja difuznosti refleksija.

Na osnovu vremenske promene vrednosti ST MFPL zaključuje se trenutak prelaska početnog dela odziva u rep reverberacione krive.

6.4.2 Ponderisana kratkovremenski usrednjena slobodna dužina puta

Posmatranjem jednačine (6.4) može se uočiti da sve dužine slobodnog puta koje pogađaju prijemnu tačku imaju težinski faktor 1, što znači da ravnopravno učestvuju u usrednjavanju prilikom formiranja veličine $l_{ST}(t)$. Na ovaj način se zanemaruje energija koju pojedini zraci nose. Time se kroz veličinu $l_{ST}(t)$ ocrtavaju samo geometrijske karakteristike prostorije i položaja izabranog para tačaka izvor-prijemnik, ali se ne vidi veza sa impulsnim odzivom prostorije.

Kao poboljšanje navedene veličine ST MFPL, a u cilju uočavanja veze sa impulsnim odzivom prostorije, predlaže se modifikacija jednačine (6.4) na sledeći način:

$$\overline{el_{ST}}(t) = \frac{1}{\sum E_{i,j}} \left[\sum_{i \in (t-\Delta t, t)} \left(\sum_{j=1}^{N_i} E_j l_j \right) \right] \quad (6.5)$$

pri čemu je E_j energija (tj. intenzitet) zraka koji pogađa prijemnu tačku dužinom l_j , a $\sum E_{i,j}$ predstavlja zbir svih energija (tj. intenziteta) zraka koji upadaju u vremenski interval $(t - \Delta t, t)$. Na ovaj način uvodi se veličina EST MFPL koja uvodi težinski faktor energije zraka, koji ističe one slobodne dužine zraka koje nose veću energiju. Koliko se veličina $el_{ST}(t)$ razlikuje od $l_{ST}(t)$ i koliko nam govori o impulsnom odzivu prostorije i prelaznom režimu videće se na primerima u sledećem poglavlju.

7 Analiza priraštaja energije pri difuznim refleksijama

U akustičkom dizajnu sala jedan od pristupa podrazumeva upotrebu difuznih površina na pozicijama koje svojim položajem treba da u auditorijumu obezbede prve refleksije. Time se postiže veća ravnomernost pokrivanja auditorijuma ranim refleksijama i bolja tekstura impulsnog odziva. U literaturi je tekstura definisana kao subjektivni doživljaj koji slušalac dobija na osnovu obrasca po kome rane refleksije stižu do slušaoca [Beranek, 1996]. Opisno rečeno, dobra tekstura impulsnog odziva znači da u prijemnu tačku pristiže dovoljna količina rane energije, koja je pri tome ravnomerno raspoređena u vremenu, i bez izraženih pojedinačnih jačih refleksija. Značaj teksture u akustičkom dizajnu koncertnih i operskih sala je u tome što je ona u značajnoj meri korelisana sa subjektivnim doživljajem kvaliteta prostora za muzička izvođenja. Specifičnost teksture je u tome što nema ekvivalent u nekom numeričkom parametru koji bi se mogao izračunati iz snimljenog impulsnog odziva.

Dobra tekstura impulsnog odziva postiže se, pre svega, primenom difuznih elemenata na površinama koje svojim pozicijom u auditorijumu generišu rane refleksije. Difuzni elementi na njima razbijaju talasni front reflektovanog talasa. Kao posledica, nastaju različite putanje kojima energija nastavlja da se kreće nakon refleksije, pa se tako doprinosi kompleksnosti multipath prostiranja zvuka. Različitost putanja zvuka čini da prijemna tačka u auditorijumu bude „oblivena“ zvučnom energijom u nekom relativno dužem vremenskom intervalu, umesto da sva bude skoncentrisana u jednom trenutku kada stiže spekularna refleksija. Time se postiže da u prijemnu tačku dolazi energija čak i sa površina sa kojih ne postoji optička vidljivost izvora. Difuzni elementi se primenjuju i u akustičkom dizajnu studijskih prostora, gde je nepoželjna pojava izraženih ranih refleksija. Dva su razloga za to: one kvare preciznost stereo zvučne slike i koherentno se superponiraju sa direktnim zvukom iz zvučnika (češljasti filter), što na mestu slušanja menja boju zvuka [Ristanović, Šumarac-Pavlović, Mijić, 2012].

Osim na ranu reflektovanu energiju, difuzni elementi na unutrašnjim površinama prostorija imaju uticaja i na energiju koja će u kasnijim delovima impulsnog odziva pogoditi prijemnu tačku. Takav doprinos nastaje kao posledica

činjenice da se sa površina koje po svom položaju generišu rane refleksije energija raspršava po svim pravcima, a ne samo prema auditorijumu.

Da bi se na neki način kvantifikovala energija koja u prijemnu tačku stiže nakon refleksije od difuzne površine organizovano je nekoliko eksperimenata. Ideja eksperimenata je da difuzne refleksije dolaze sa sve veće površine. Oni su realizovani na fizičkim modelima reljefa, kao i softverskom simulacijom rej-trejsing metodom. Softverska simulacija je realizovana jednim komercijalnim softverskim paketom i softverom kojim je realizovana metodologija predložena u ovom radu. Rezultati takve analize prikazani su u daljem tekstu.

7.1 Opis eksperimenta na fizičkom modelu

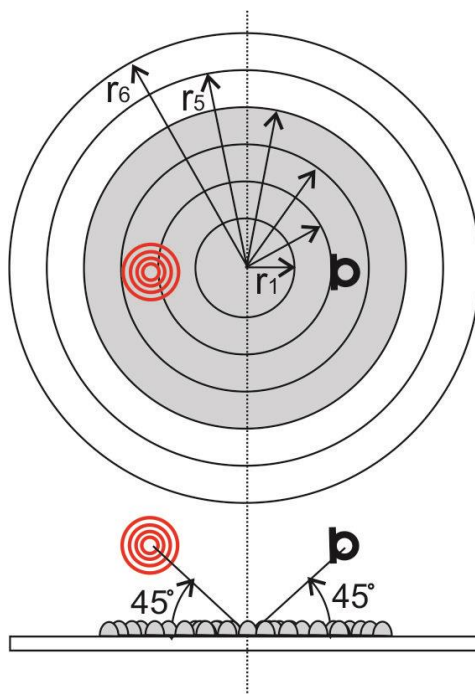
Eksperiment koji je realizovan na fizičkom modelu u razmeri 1:10 zasniva se na analizi prve refleksije od jedne površine koja difuzno reflektuje zvuk. Do prijemnika tada stiže direktan zvuk i energija koja je reflektovana difuzno. Difuzna površina je na modelu formirana s kalotama prečnika 4 cm koji su raspoređivane tako da pokrivaju 50% površine na kojoj se nalaze. Za kalote ove veličine i sa takvim procentom pokrivanja postoje podaci u literaturi o vrednosti sketering koeficijenta [Vorlander, Mommertz, 2000]. Ove vrednosti su prikazane u tabeli 1. Na slici 3 prikazana je skica sa označenim položajem izvora i prijemnika u odnosu na refleksionu površinu na kojoj su aplicirani difuzni elementi. Na slici 4 prikazana je fotografija eksperimentalne postavke.

Tabela 7.1. Vrednosti sketering koeficijenta u funkciji frekvencije za primenjenu difuznu strukturu (transponovani iz modela u realne dimenzije).

f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
sketering koeficijent, s	0.01	0.05	0.2	0.45	0.55	0.7	0.75	0.8

Kao pobudni signal za registrovanje refleksije korišćen je impuls električnog varničara, a na mestu prijema merni mikofon prečnika 1/4". Akvizicija signala je sa frekvencijom odmeravanja 192kHz, i rezolucijom 24 bita. Izvor i prijemnik zvuka postavljeni su na međusobnom rastojanju 40 cm (što u realnosti odgovara 4 m) i na

visini pri kojoj je upadni ugao spekularne refleksije 45° u odnosu na normalu na kružnu površinu, kao što je prikazano na slici 7.1.



Slika 7.1. Principijelna postavka eksperimenta (zatamljena površina šematski predstavlja deo prekriven kalotama čija se veličina menja).



Slika 7.2. Postavka eksperimenta u slučaju kada je čitava površina prekrivena kalotama.

Refleksiona površina je podeljena na šest koncentričnih krugova od kojih najmanji ima poluprečnik $r_1 = 10$ cm, a najveći $r_6 = 47,5$ cm. Popunjavanje površina difuznim elementima vršeno je na dva načina:

- U prvom delu eksperimenta snimanje odziva počinje sa ravnom površinom na koju se zatim sukcesivno postavljaju difuzni elementi počev od unutrašnjeg kruga do kruga najvećeg prečnika.
- U drugom delu eksperimenta snimanje odziva počinje sa površinom kompletno pokrivenom difuznim elementima, koji se zatim sukcesivno uklanjaju prvo sa najmanje unutrašnje površine, a zatim se prazna zona povećava.

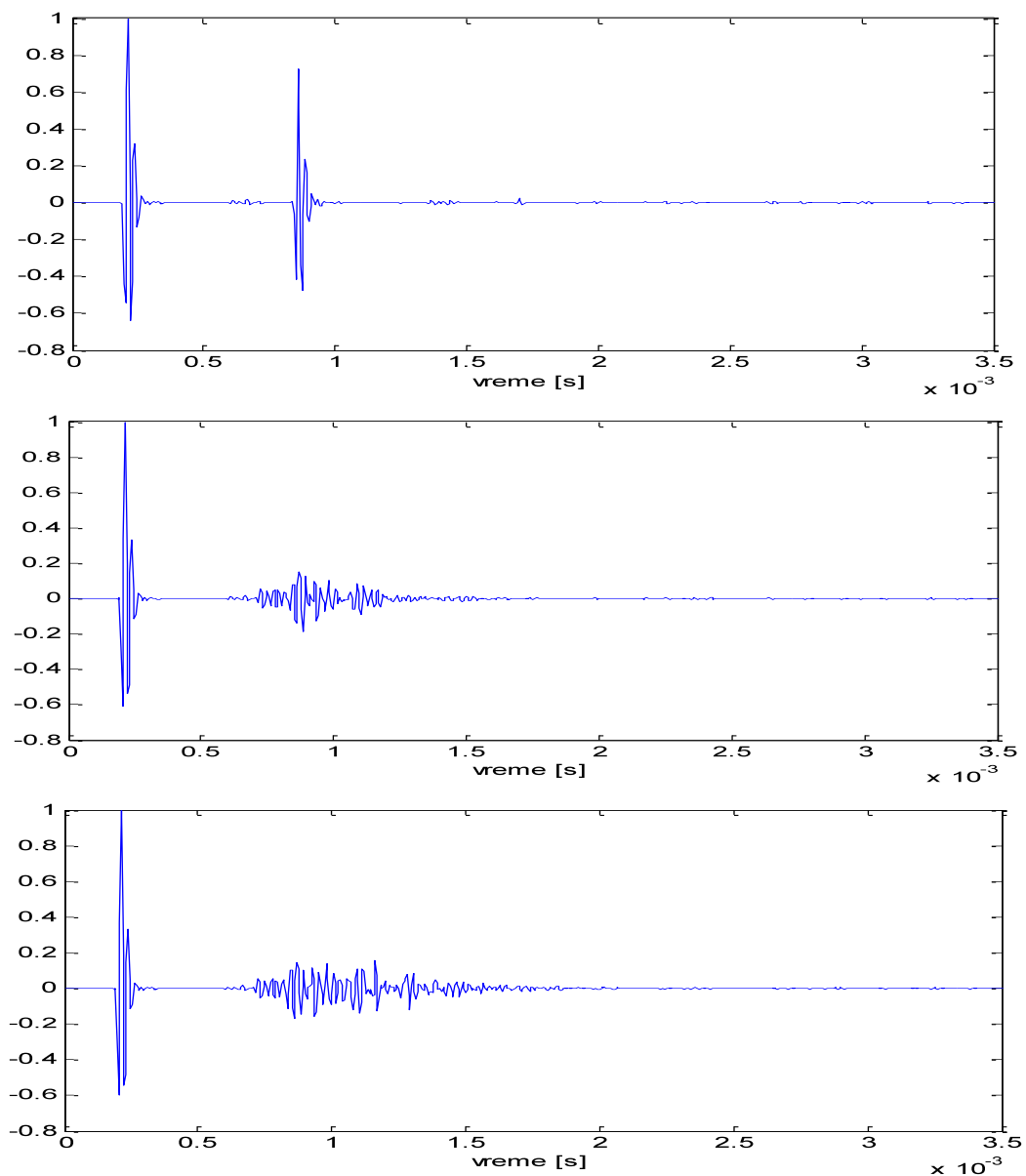
U oba slučaja na mesto prijema stiže direktan zvuk i neka reflektovana energija. Razlika je u tome što u prvom slučaju ne postoji spekularna refleksija, već samo neka difuzno reflektovana energija, dok u drugom slučaju postoji očuvana spekularna refleksija, ali se pojavljuje i energija koja pristiže od difuznih elemenata raspoređenih oko mesta njenog nastanka. Pozicija varničara i mikrofona je bila ista za sve analizirane situacije, čime je omogućeno međusobno poređenje signala odziva za različita stanja refleksione površine.

7.2 Analiza reflektovane energije na fizičkom modelu

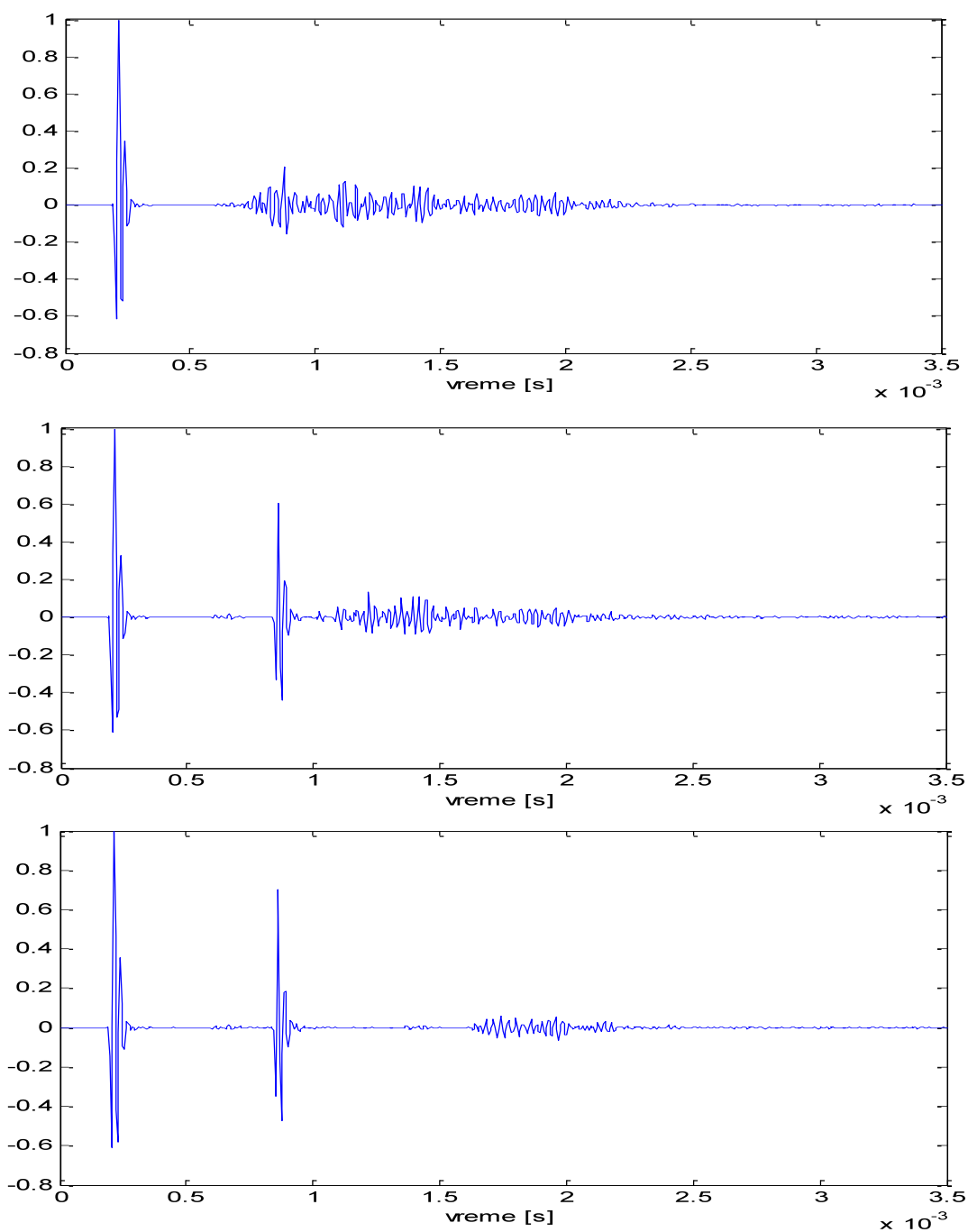
Analiza snimljenih impulsnih odziva zasniva se na njihovom poređenju pri različitim konfiguracijama difuzne površine i praćenjem priraštaja energije u vremenu.

Na slikama 7.3 i 7.4 prikazani su impulsnih odzivi signala za tri karakteristične situacije, u slučaju postepenog uvećavanja i redukovanja difuzne površine što se postiže dodavanjem ili uklanjanjem kalota od centra ka periferiji. Dodavanjem difuznih elemenata od centra (slika 7.3), nestaje spekularna refleksija. Umesto toga, do prijemnika dolazi samo difuzno reflektovana energija nižeg nivoa, ali koja je razvučena u vremenu. Kao posledica toga vidljiva je promena u teksturi impulsnog odziva. Što je difuzna površina veća, veća je i energija koja dolazi do prijemnika. Kada se od centra površine postepeno uklanjaju difuzni elementi odmah se pojavljuje spekularna refleksija, iza koje u vremenu sledi difuzno reflektovana energija, što je

prikazano na slici 7.4. Povećavanjem površine bez difuznih elemenata smanjuje se difuzna energija koja stiže do prijemnika.



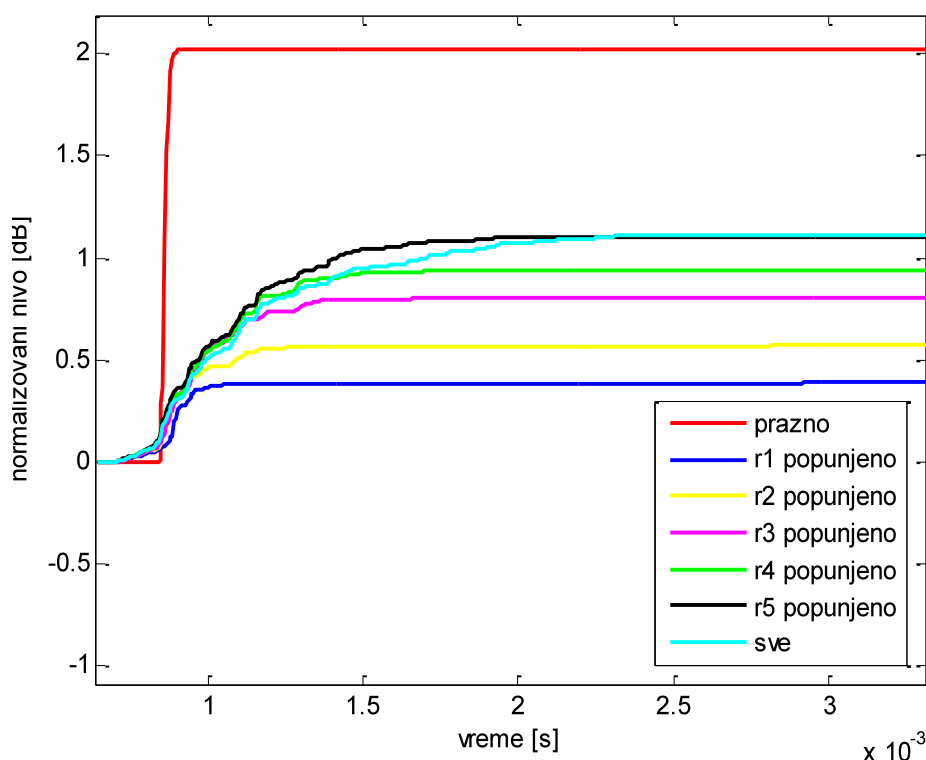
Slika 7.3. Impulsni odzivi snimljeni za slučaj kada se postepeno povećava difuzna površina (odozgo na dole): prazna, popunjeno kalotama do r2, popunjeno do r4 (oznake sa slike 7.1).



Slika 7.4. Impulsni odzivi snimljeni za slučaj kada se od centra postepeno redukuje veličina difuzne površine (odozgo na dole): sve popunjeno, prazno do r_3 , prazno do r_5 (oznake sa slike 7.1).

Priraštaj energije koja do prijemnika stiže u vremenu analiziran je kumulativnom funkcijom. Za slučaj kada se difuzno reflektujuća površina postepeno

povećava, odnosno smanjuje, one su prikazane na slikama 7.5 i 7.6, respektivno. Vidi se da postepenim dodavanjem difuznih elemenata na refleksionoj površini dolazi do povećanja ukupnog nivoa reflektovane energije. Međutim, priraštaj energije koji potiče od difuzne površine, ni kada je ona najveća, ne može da nadoknadi energiju koja bi se dobila spekularnom refleksijom od potpuno ravne prazne površine (na slici označeno crvenom bojom).



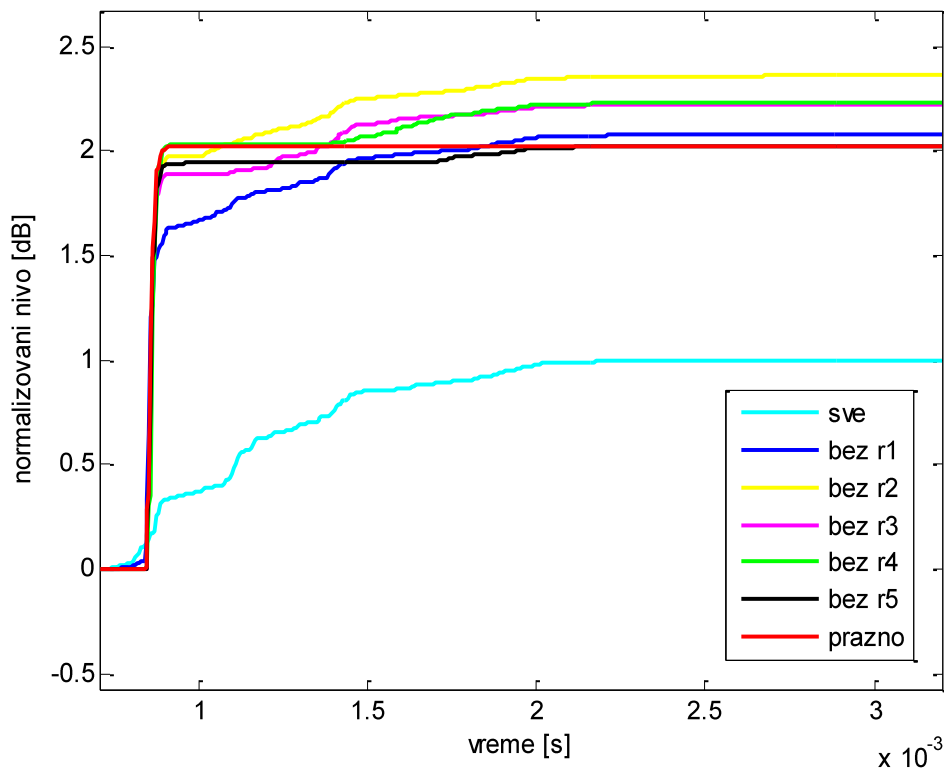
Slika 7.5. Kumulativna funkcija odziva (normalizovana na energiju direktnog zvuka) za slučaj kada se veličina difuzne površine postepeno povećava od centra.

Sa dijagrama na slici 7.6 vidi se da u okolnostima kada refleksiona ravan daje spekularnu refleksiju postojanje difuznih površina u okruženju povećava ukupnu reflektovanu energiju na mestu prijema. Taj doprinos postoji bez obzira što se difuzne površine nalaze u široj zoni oko geometrijskog mesta gde nastaje spekularna refleksija.

Za numeričko kvantifikovanje ovog rezultata može se koristiti parametar označen kao pojačanje (gain). On predstavlja odnos ukupne energije impulsnog odziva površine i energije direktnog zvuka u njemu:

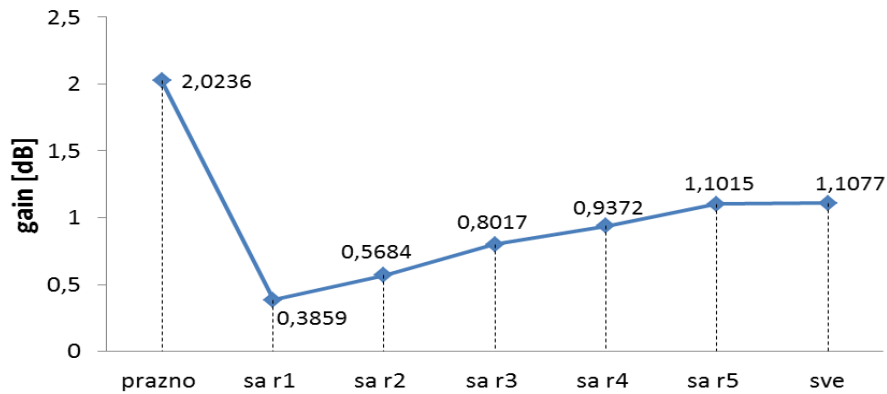
$$gain(dB) = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{t_D} h^2(t) dt} \quad (7.1)$$

gde je $h(t)$ signal snimljenog impulsnog odziva površine, a t_D vreme trajanja direktnog zvuka.



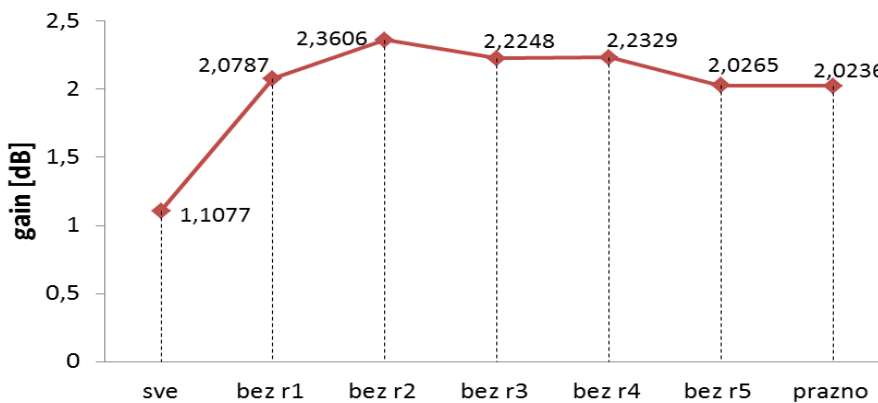
Slika 7.6. Kumulativna funkcija odziva (normalizovana na energiju direktnog zvuka) za slučaj kada se postepeno redukuje veličina difuzne površine.

Izračunate vrednosti pojačanja u prvom delu eksperimenta, kada se postepeno povećava površina prekrivena kalotama, prikazane su dijagramom na slici 7.7. Na apscisi su označeni poluprečnici dela površine koja je prekrivena difuznim elementima. Vidi se da eliminisanje spekularne refleksije umanjuje pristiglu energiju, koja zatim raste sa povećanjem veličine difuzne površine. Spekularna refleksija donosi pojačanje od oko 2 dB, relativno u odnosu na energiju direktnog zvuka. Sa veličinom refleksione površine koja je korišćena u ovom eksperimentu pojačanje kada je ona čitava pokrivena difuznim elementima približno je 1 dB.



Slika 7.7. Vrednosti pojačanja kada se postepeno povećava veličina difuznog dela površine.

Vrednosti pojačanja dobijene u drugom delu eksperimenta, kada se postepeno smanjuje površina prekrivena kalotama počevši od centra, prikazane su dijagramom na slici 7.8. Vidi se da uvođenje spekularne refleksije, koja nastaje oslobađanjem centralnog dela površine, povećava pojačanje za oko 1 dB.

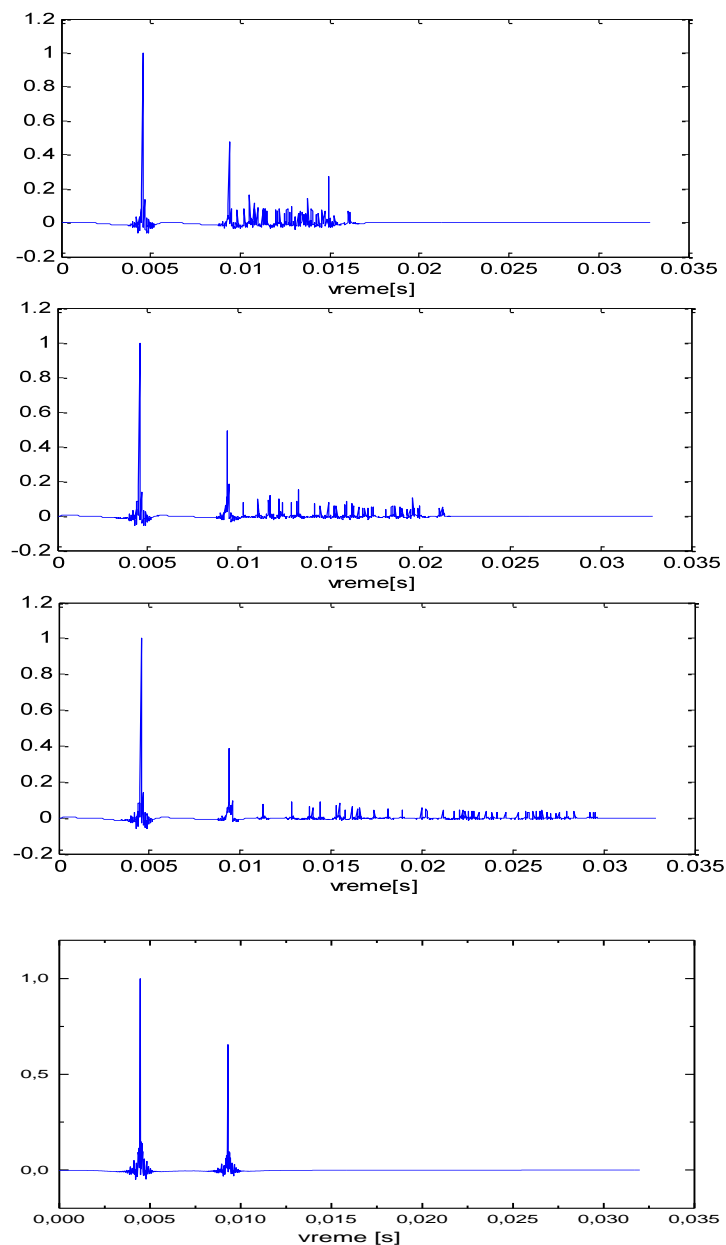


Slika 7.8. Vrednosti gain-a za slučaj kada se postepeno redukuje difuzna površina.

7.3 Analiza simulacijom pomoću komercijalnog softvera

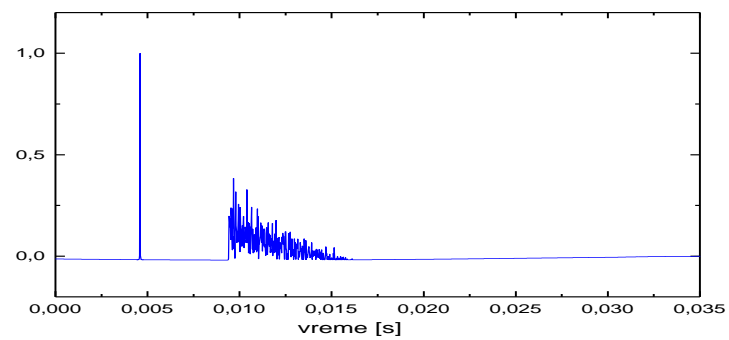
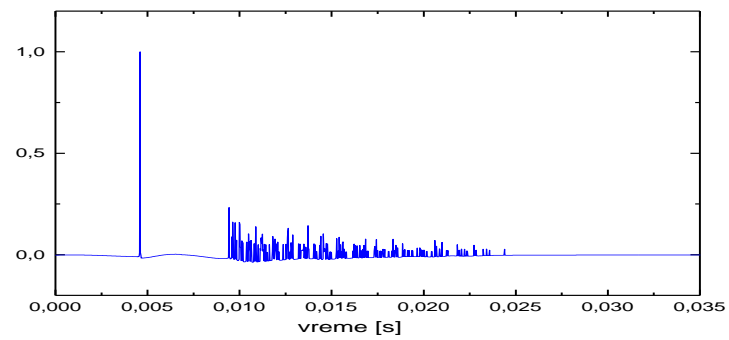
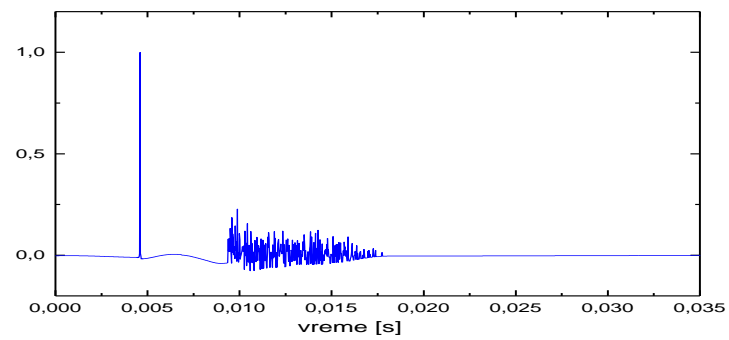
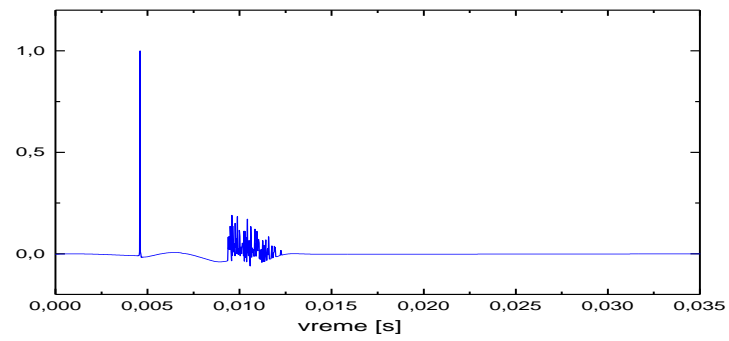
Impulsni odziv difuzne površine analiziran je pomoću jednog komercijalnog softverskog paketa, na dva načina. Prvo je odabrana metoda likova, a zatim metoda kosog Lamberovog zračenja. Simulacija je urađena za tri različite veličine kružne refleksione površine kojoj je površina sukcesivno udvostručavana (površine P, 2P i

4P). Pozicija izvora i prijemnika je bila fiksna u sva tri slučaja, na međusobnoj udaljenosti 4 m. Poluprečnik najvećeg kruga (površina 2P) takođe je 4 m, što odgovara veličini površine koja je bila u fizičkom modelu. Difuznoj površini je dodeljena vrednost sketering koeficijenta 0.9. Zatim je difuznoj površini 4P dodeljena vrednost sketering koeficijenta 0 i urađena simulacija. Rezultati su prikazani na slikama 7.9 i 7.10.



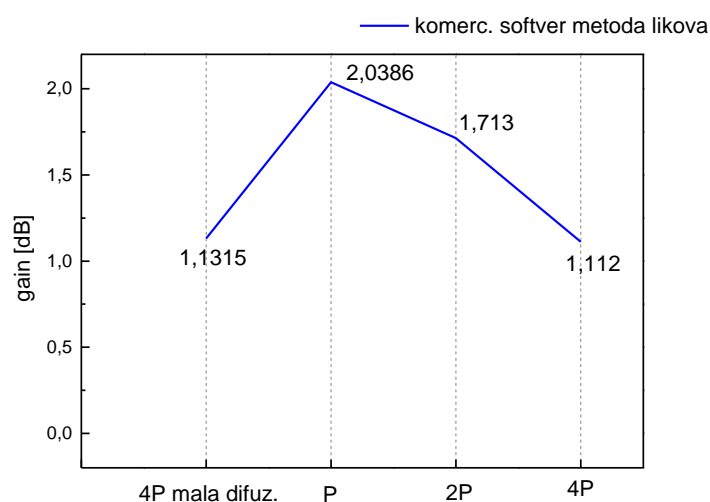
Slika 7.9. Impulsni odzivi dobijeni komercijalnim softverom simulacijom pomoću metode likova za tri različite veličine difuzne površine (odozgo na dole):

P, 2P i 4P i $s = 0.9$; i za 4P i $s = 0$.



Slika 7.10. Impulzni odzivi dobijeni komercijalnim softverom simulacijom pomoću metode kosog Lamberovog zračenja za tri različite veličine difuzne površine (odozgo na dole): P, 2P i 4P i $s = 0.9$; i za 4P i $s = 0$.

Analiza rezultata dobijenih metodom likova: Sa slike 7.9 se vidi da povećanjem veličine difuzne površine trajanje impulsnog odziva se produžava u vremenu, kao i u fizičkom modelu (slika 7.3). Međutim, tekstura odziva dobijenog simulacijom metodom likova ne odgovara činjenici da se reflektovana energija koja stiže u prijemnu tačku povećava usled povećanja difuzne površine (slika 7.7). Upoređujući odzive sa slike 7.9 za $s = 0.9$ vidi se da u njima postoje diskretne refleksije čiji je broj u sva tri slučaja približno isti. Sa povećanjem veličine difuzne površine one se samo razvlače u vremenu. Takođe se vidi da je struktura reflektovane energije diskretna, to jest nema difuzno reflektovane energije raspršene u vremenu, za razliku od fizičkog modela gde je energija reflektovana od difuzne površine „razmazana“ u vremenu, bez prepoznatljivih pojedinačnih diskretnih refleksija. Za slučaj $s = 0$ vidi se da metoda likova daje očekivani rezultat, tj. dobija se jedna spekularna refleksija.

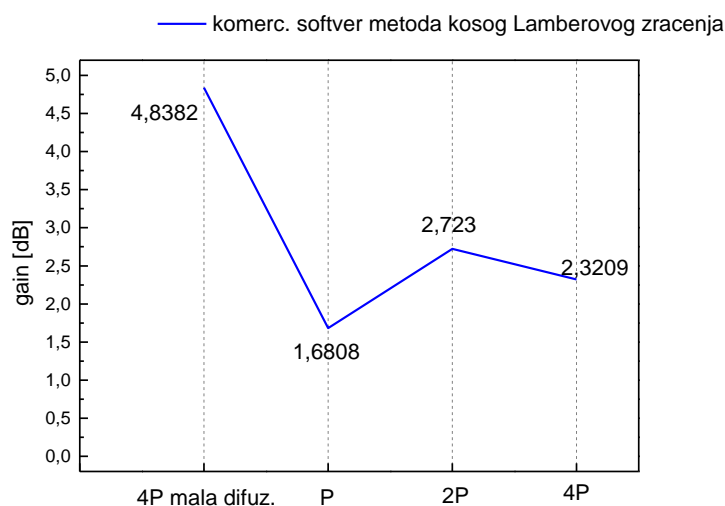


Slika 7.11. Vrednosti reverberacionog pojačanja izračunate na osnovu rezultata simulacije pomoću komercijalnog softvera metodom likova.

Kao u slučaju fizičkog modela, i na osnovu odziva dobijenih simulacijom izračunato je pojačanje. Rezultat je prikazan na slici 7.11. Vidi se da vrednosti pojačanja koje se dobijaju pri refleksiji od difuzne površine opadaju sa povećanjem njene veličine, što je suprotno od rezultata dobijenog u realnom zvučnom polju na fizičkom modelu. Prema tome, rezultat dobijen simulacijom komercijalnim softverom metodom likova ne odgovara realnosti, gde se energija signala povećava s povećanjem veličine difuzne površine (slika 7.7). Ni energija u slučaju $s = 0$, ne odgovara vrednosti

u eksperimentu, kada je dobijena najveća vrednost reverberacionog pojačanja u tom slučaju.

Analiza rezultata dobijenih metodom kosog Lamberovog zračenja: Sa slike 7.10 se vidi da povećavanjem veličine difuzne površine trajanje impulsnog odziva se produžava u vremenu, kao i u fizičkom modelu (slika 7.3). Međutim, tekstura odziva dobijenog simulacijom metodom kosog Lamberovog zračenja, u slučaju 4P i $s = 0.9$ ne odgovara činjenici da se reflektovana energija koja stiže u prijemnu tačku povećava usled povećanja difuzne površine (slika 7.7). Za slučaj $s = 0$ vidi se da metoda kosog Lamberovog zračenja ne daje očekivani rezultat, tj. ne dobija se jedna spekularna refleksija. Odziv je razmazan u vremenu, što potvrđuje napred izrečenu tvrdnju u poglavlju 5 da kosi Lamberov balon ima preširoko zračenje za male vrednosti sketering koeficijenta.



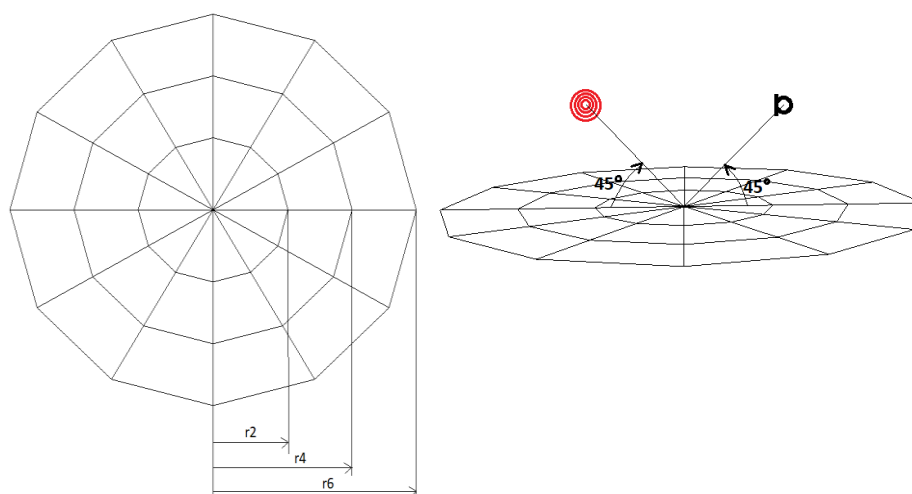
Slika 7.12. Vrednosti reverberacionog pojačanja izračunate na osnovu rezultata simulacije pomoću komercijalnog softvera metodom kosog Lamberovog zračenja.

Na osnovu odziva dobijenih simulacijom izračunato je pojačanje. Rezultat je prikazan na slici 7.12. Vidi se da vrednosti pojačanja koje se dobijaju pri refleksiji od difuzne površine u slučaju 4P i $s = 0.9$ opadaju sa povećanjem njene veličine, što je suprotno od rezultata dobijenog u realnom zvučnom polju na fizičkom modelu. Prema tome, rezultat dobijen simulacijom komercijalnim softverom metodom kosog Lamberovog zračenja ne odgovara realnosti, gde se energija signala povećava s

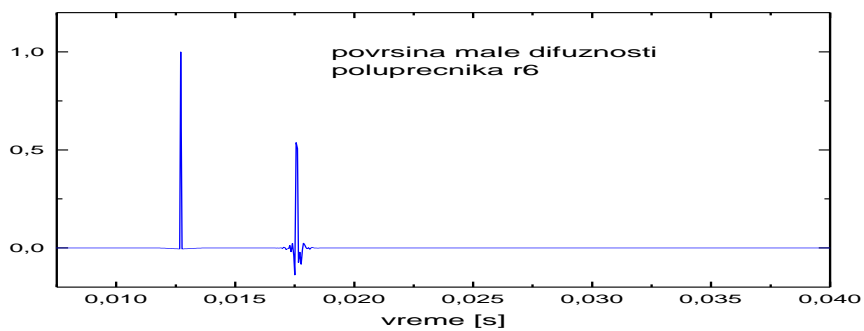
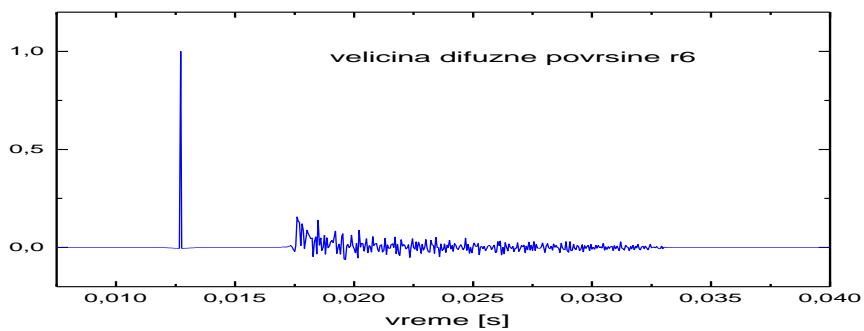
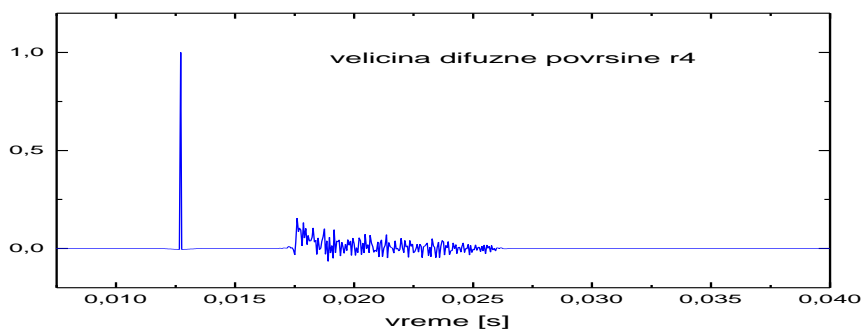
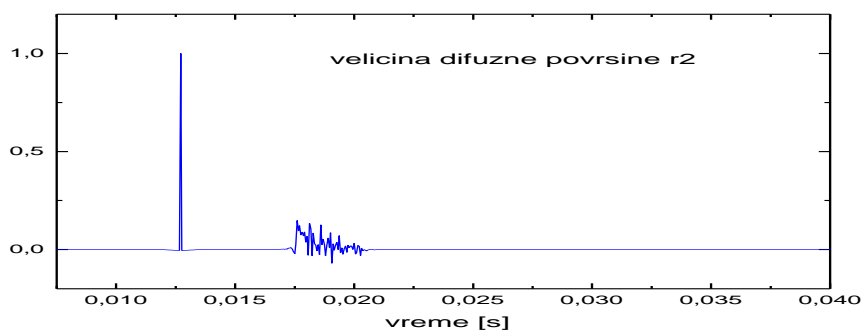
povećanjem veličine difuzne površine (slika 7.7). Energija u slučaju $s = 0$, ima najveću vrednost reverberacionog pojačanja, međutim osim što po svojoj teksturi ne odgovara eksperimentu, videće se nadalje u tekstu da je vrednost ovog pojačanja nesrazmerno velika spekularnoj refleksiji.

7.4 Analiza simulacijom algoritmom predloženim u ovom radu

Impulsni odziv difuzne površine analiziran je i pomoću predložene modifikacije rej-trejsing metode. Za potrebe analize organizovan je eksperiment u kome je simulacija urađena za tri različite veličine refleksione površine. Refleksione površine su predstavljene pravilnim dvanaestouglovima, koji približno predstavljaju kružne površine poluprečnika $r_2 = 1,75\text{m}$, $r_4 = 3,25\text{m}$ i $r_6 = 4,75\text{m}$, što je prikazano na slici 7.13. Imajući u vidu skaliranost fizičkog modela od 1:10, ove dimenzije odgovaraju veličini površine koja je bila u fizičkom modelu. Izvor i prijemna tačka postavljeni su na međusobnom rastojanju 4 m i na visini pri kojoj je upadni ugao spekularne refleksije 45° u odnosu na normalu na površinu. Difuznoj površini je dodeljena vrednost koeficijenta apsorpcije 0.1, i vrednosti sketering koeficijenta po oktavama prema tabeli 7.1. Kako bi se ispitala sposobnost predložene metodologije da simulira refleksije od površina sa malim vrednostima sketering koeficijenta, urađena je i simulacija impulsnog odziva za slučaj vrednosti sketering koeficijenta $s = 0.05$.

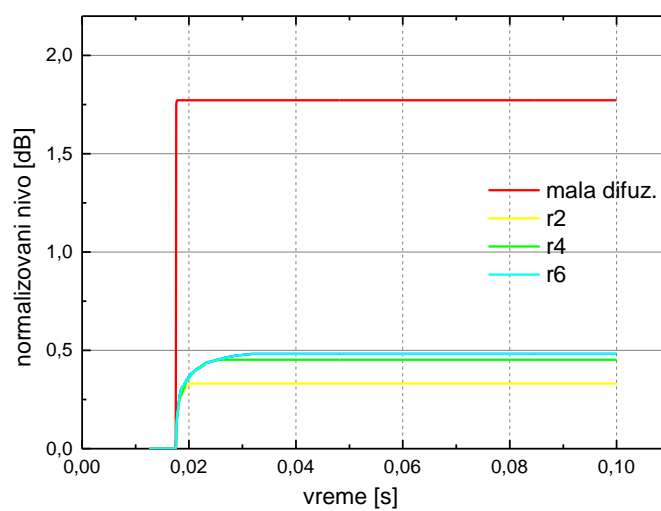


Slika 7.13. Postavka eksperimenta za analizu simulacijom predloženim algoritmom.

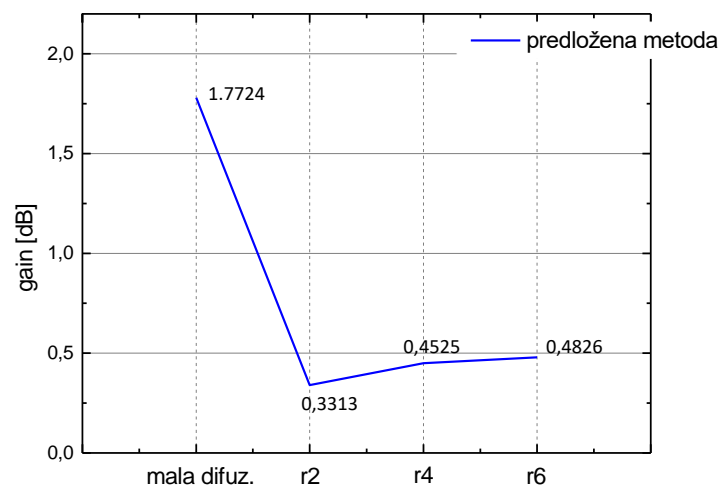


Slika 7.14. Impulzni odzivi dobijeni simulacijom za tri različite veličine poluprečnika difuzne površine (odozgo na dole): r2, r4 i r6, i za površinu male difuznosti poluprečnika r6.

Pomoću predložene metodologije izračunavani su impulsni odzivi za difuzne površine poluprečnika r2, r4 i r6, i vrednost sketering koeficijenta prikazan u tabeli 7.1. Takođe, urađena je i simulacija u slučaju kada površina r6 ima malu difuznost tj. izabran je sketering koeficijent $s = 0.05$ po svim oktavama. Rezultati su prikazani na slici 7.14, dok su kumulativne funkcije odziva i vrednosti reverberacionog pojačanja prikazane na slikama 7.15 i 7.16, respektivno.

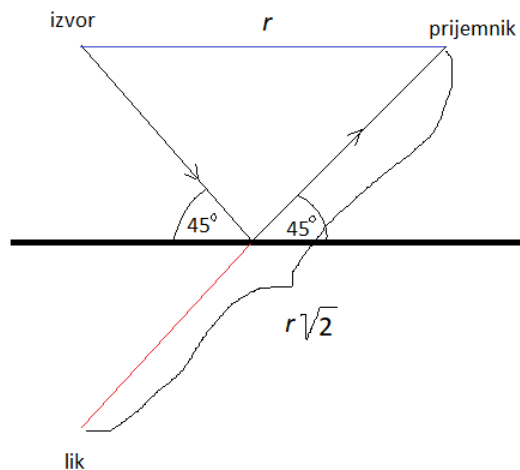


Slika 7.15. Kumulativna funkcija odziva (normalizovana na energiju direktnog zvuka) za tri različite veličine poluprečnika: r2, r4 i r6, i za površinu r6 male difuznosti.



Slika 7.16. Vrednosti reverberacionog pojačanja izračunat na osnovu rezultata simulacije pomoću predložene modifikacije.

Kako bi se uporedio rezultat prikazan na slici 7.14 za slučaj male difuznosti, sa matematičkim proračunom koji je u moguću u slučaju samo jedne refleksije od površine čiji je skatering koeficijent $s = 0$, treba posmatrati sliku 7.17.



Slika 7.17. Primer spekularne refleksije od površine čiji je skatering koeficijent $s = 0$.

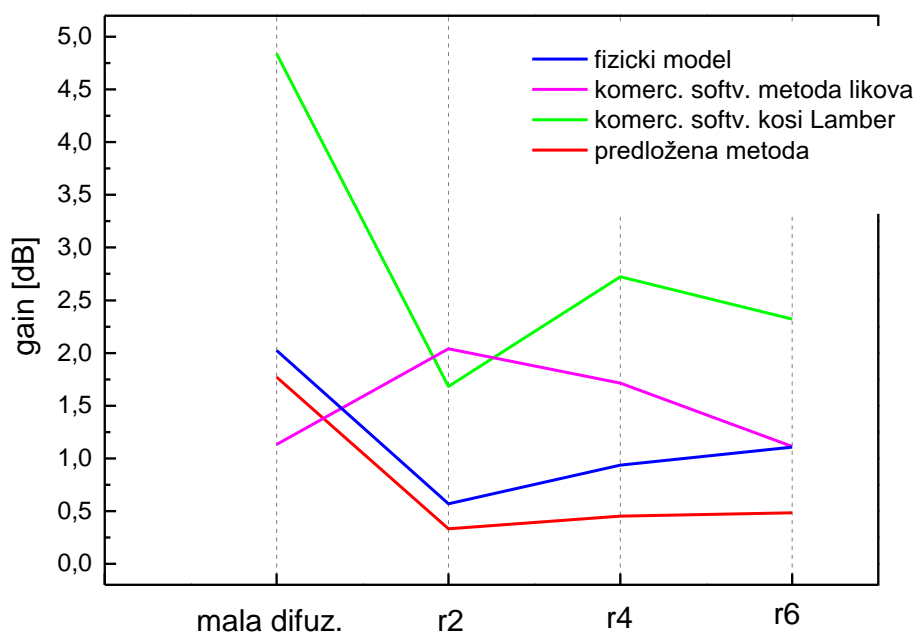
Intenzitet direktnog zvuka u tom slučaju se određuje prema izrazu $I_{dir} = P_{izvora}/4r^2\pi$, dok se intenzitet refleksije određuje kao $I_{refl} = P_{izvora}/4(r\sqrt{2})^2\pi = P_{izvora}/8r^2\pi$. Na ovaj način zaključujemo da je intenzitet refleksije duplo manji od intenziteta direktnog zvuka. Kada se uradi kumulativna funkcija i normalizuje na intenzitet direktnog zvuka, dobijamo vrednost od $10 \cdot \log_{10}(1,5) = 1,76$, što je blisko rezultatu predložene metode od 1,7724.

Ovde treba dodati da uvedena metodologija proračunava impulsni odziv širokopojasno, dok je u eksperimentu na fizičkom modelu korišćen impuls električnog varničara koji ima određenu frekvencijsku karakteristiku tj. nisu sve frekvencije podjednako zastupljene. Time se mogu protumačiti izvesne apsolutne razlike u rezultatima prikazanim na slikama 7.7 i 7.16, ali je relativni odnos priraštaja energija isti.

7.5 Diskusija rezultata

Kako bi se lakše uporedili rezultati dobijeni eksperimentom na fizičkom modelu i simulacijama pomoću komercijalnog softvera i predložene metodologije,

vrednosti reverberacionog pojačanja su prikazane na dijagramu na slici 7.18 za sva četiri slučaja. Vidi se da u slučaju simulacije komercijalnim softverom metodom likova vrednosti pojačanja koje se dobijaju pri refleksiji od difuzne površine opadaju sa povećanjem njene veličine, što je suprotno od rezultata dobijenog u realnom zvučnom polju na fizičkom modelu. U slučaju simulacije komercijalnim softverom metodom kosog Lamberovog zračenja vrednost pojačanja u slučaju male difuznosti je nerealno velika, što potiče od preširokog ugla zračenja, što je već objašnjeno ranije. Rezultat dobijen predloženom metodologijom pokazuje rastuće vrednosti pojačanja kako se veličina difuzne površine povećava, i vrednost pojačanja za malu difuznost koja je uporediva sa fizičkim modelom, što je u saglasnosti sa eksperimentom. Prema tome, rezultat dobijen simulacijom komercijalnim softverom ne odgovara realnosti, dok rezultat dobijen predloženom metodologijom pokazuje slaganje sa eksperimentom.



Slika 7.18. Uporedni prikaz vrednosti reverberacionog pojačanja za fizički model, komercijalni softver i predloženu metodu.

Zaključak je da uvedena metodologija pomoću sketering konusa objedinjuje metode likova i rej-trejsinga pomoću kosog Lamberovog zračenja na takav način da

zadovoljava i slučajeve malog i velikog sketering koeficijenta. Dok je metoda likova dobra za $s \approx 0$, metoda kosog Lamberovog zračenja ne daje rezultate bliske izmerenim u tom slučaju. Obrnut slučaj je kada je $s \approx 1$, tada metoda likova ne daje rezultate bliske eksperimentu, dok metoda kosog Lamberovog zračenja ima tendenciju praćenja rezultata u eksperimentu (sem za slučaj najveće difuzne površine). Predložena metoda pomoću sketering konusa daje rezultate koji su u skladu sa izmerenim u fizičkom modelu, i za male i za velike vrednosti sketering koeficijenta s .

8 Analiza vremenske raspodele srednje dužine slobodnog puta

Različito između početnog i kasnijeg dela impulsnog odziva dovela je do uvođenja početnog vremena reverberacije (EDT) kao parametra kojim se ta razlika opisuje. Uvođenje različito definisanih vrednosti vremena reverberacije T10, T20 i T30 takođe su načini da se numerički kvantifikuju razlike između početnog dela odziva i ostatka. U literaturi su prikazani pokušaji da se preciznije definiše trenutak u impulsnom odzivu kada njegov početni deo prelazi u kasni deo reverberacione krive [Hidaka, Yamada, Nakagawa, 2007], što znači trenutak kada zvučno polje postaje dovoljno difuzno. Demonstrirani su različiti pristupi u proceni te granice. Napravljen je pokušaj da se trenutak nastanka difuznog polja utvrdi na osnovu fizičkih karakteristika signala impulsnog odziva snimljenog u jednoj tački prostorije.

U literaturi je pokazano da nagib reverberacione krive, pa tako i vreme reverberacije, zavisi od usmeravanja tokova kretanja energije po prostoriji [Mijić, Šumarac-Pavlović, 2003]. U tom radu je prikazana zavisnost vremena reverberacije od geometrijskih atributa prostorije koji učestvuju u preusmeravanju kretanja zvučne energije. Geometrijske osobine prostorije kvantifikuju se statističkom raspodelom dužina slobodnih putanja. Oblik ove raspodele zavisi od opšte geometrijske forme prostorije i difuznosti refleksija na njenim unutrašnjim površinama [Mijić, Šumarac-Pavlović, 2005].

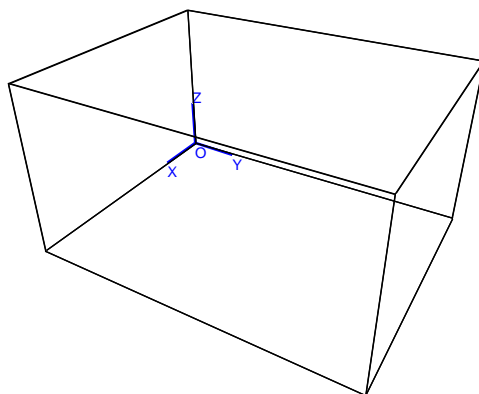
Jednobrajni indikator oblika raspodele dužina slobodnih putanja je srednja slobodna dužina puta (MFPL) definisana kao matematičko očekivanje. U literaturi je na osnovu geometrijskog pristupa pokazano da se u opštem slučaju vrednost MFPL u manjoj ili većoj meri razlikuje od statistički utvrđene vrednosti $4V/S$ i da veličinu tog odstupanja određuje složena sprega između opšte geometrijske forme prostorije i vrednosti sketering koeficijenta na unutrašnjim površinama.

Jedan pristup u određivanju trenutka u impulsnom odzivu prostorije kada nastaje kasni deo reverberacione krive sa odlikama difuznog polja može polaziti od posledica koje nastaju uspostavljanjem difuznosti. Jedna od posledica je i očekivana

statistika dužina slobodnih putanja i očekivana srednja slobodna dužina puta. U zaključcima iz rada [Šumarac-Pavlović, Mijić, 2007 a] uvedena je pretpostavka da se varijacije u nagibu reverberacione krive koje se javljaju tokom vremena mogu tumačiti vremenskim promenama statističkih osobina dužina slobodnih putanja zvučne energije tokom trajanja impulsnog odziva. Na osnovu toga se ovde uvodi pretpostavka da razlike u statističkim osobinama putanja zvuka u početnom delu odziva u odnosu na njegov kasniji deo mogu biti mera za određivanje granice među njima. U ovom primeru prikazan je pokušaj da se analiziraju promene statističkih osobina na ansamblu dužina slobodnih putanja tokom trajanja impulsnog odziva. Analiza je sprovedena uvođenjem veličine koja se može nazvati kratkovremenski usrednjena slobodna dužina puta i koja predstavlja indikator stanja u zvučnom polju. Vremenske promene vrednosti ove veličine tokom trajanja impulsnog odziva analizirane su u zvučnom polju u nekoliko različitih prostorija.

8.1 Statistička raspodela dužine slobodnog puta

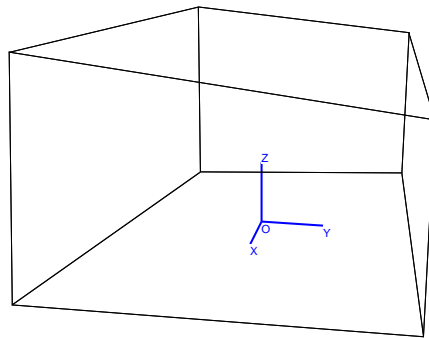
Već je rečeno da se geometrijske osobine prostorije kvantifikuju statističkom raspodelom dužina slobodnih putanja [Šumarac-Pavlović, Mijić, 2005]. Da bi se upustilo u dublju teorijsku analizu pojava vezanih za prelazak iz početnog dela u rep reverberacione krive biće analizirane prostorije prikazane na slikama 8.1, 8.2 i 8.3. U tu svrhu prvo će biti određene njihove statističke raspodele srednje dužine slobodnog puta pomoću opisanog softverskog paketa. One su date na slici 8.4.



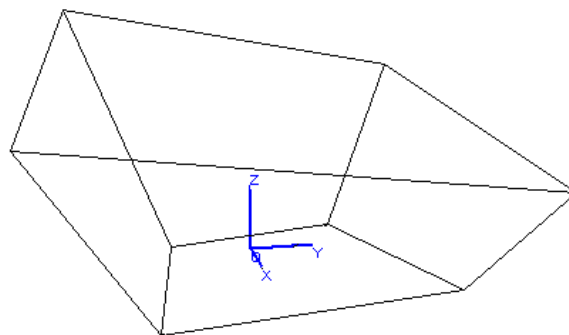
Slika 8.1. Model No.1 u obliku pravilnog paralelopipeda.

Sve tri prostorije imaju praktično identičnu zapreminu, dok im je oblik više ili manje deformisan od pravilnog paralelopipeda, koji je prikazan na slici 8.1 [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008]. Koeficijent apsorpcije na svim unutrašnjim površinama u modelima ima istu vrednost, podešenu na 0.1. Za ovu vrednost se pretpostavlja da je bliska praktičnom minimumu. Zapremine sve tri prostorije su približno 2200m^3 .

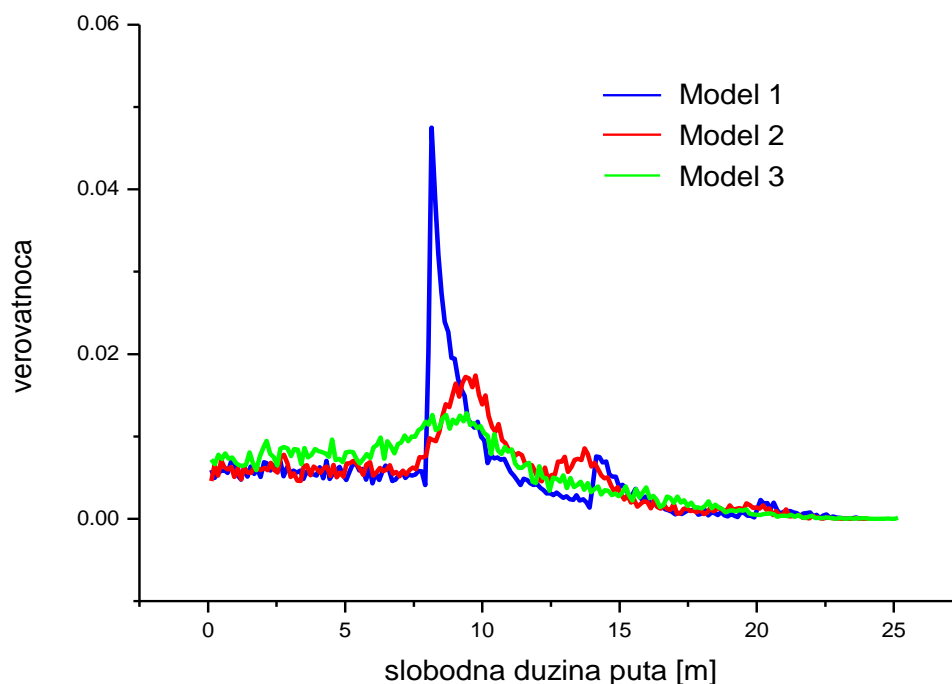
Na slici 8.4 uočavamo da postoji prelaz od oštih pikova na dimenzijama prostorije u slučaju modela broj 1, datih na 8, 14 i 20 m, preko blažih pikova za model broj 2 na 10, 13 i 19 m, do skoro potpuno izgubljenih pikova za model broj 3. Ovo ukazuje na uticaj geometrijskog oblika prostorije na raspodelu dužina slobodnih putanja, a time i na srednju dužinu slobodnog puta u prostoriji koja je u vezi sa impulsnim odzivom prostorije.



Slika 8.2. Model No.2 u obliku blago deformisanog paralelopipeda.



Slika 8.3. Model No.3 u obliku veoma deformisanog paralelopipeda.



Slika 8.4. Statističke raspodele slobodne dužine puta za prostorije sa slika 8.1, 8.2 i 8.3.

8.2 Kratkovremenski usrednjena slobodna dužina puta

Za prikazane tri prostorije, slike 8.1, 8.2, i 8.3, napravljeni su softverski modeli. Forme prostorija su odabrane na osnovu primera iz literature [Šumarac-Pavlović, 2007], kada je pokazano da akustički odziv u njima ima dovoljno različite reakcije na promenu sketering koeficijenta na unutrašnjim površinama.

Geometrijske karakteristike na mikro nivou tri analizirane prostorije su modelovane kontrolom difuznosti refleksija na refleksionim površinama. Veličina difuznosti refleksija je modelovana vrednošću sketering koeficijenta s . Kao i sa koeficijentom apsorpcije, pretpostavljeno je da je sketering koeficijent uniforman duž svih unutrašnjih površina prostorije. U analizi je sketering koeficijentu dodeljivano sedam različitih vrednosti: 0, 0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 0.75 i 1. Pri tome se u modelovanju izbegavaju krajnje vrednosti 0 i 1, već se zamenjuju približnim vrednostima 0.01 i 0.99.

Proračun vremena reverberacije pomoću rej-trejsing simulacije je ponovljen za sedam različitih vrednosti sketering koeficijenta s na unutrašnjim površinama. Izračunato vreme reverberacije u prostoriji je bilo u intervalu 2.3 – 3.1s, zavisno od

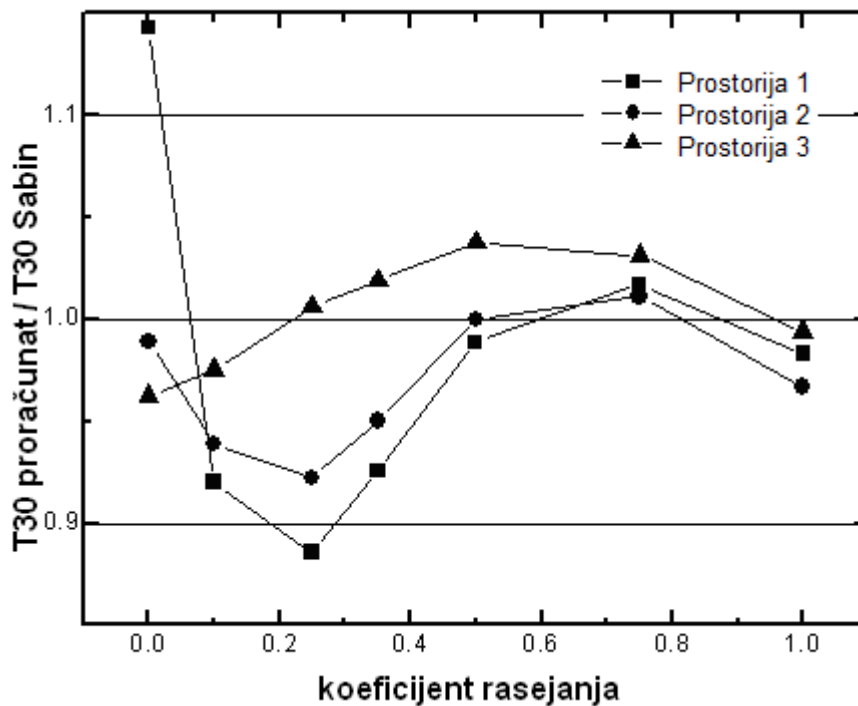
oblika prostorije i vrednosti sketering koeficijenta. Pored rej-trejsing simulacije, u svim prostorijama vrednost vremena reverberacije je takođe proračunata pomoću statističke teorije kao funkcija zapremine V , unutrašnje površine S i vrednosti koeficijenta apsorpcije $\alpha=0.1$. Proračuni su izvedeni pomoću Sabinove formule. U svakoj prostoriji je ova vrednost korišćena za normalizaciju vremena reverberacije dobijenog rej-trejsing simulacijom. Vrednost 1 normalizovanog vremena reverberacije znači da je izmereno vreme reverberacije u simuliranom zvučnom polju identično statistički očekivanoj vrednosti proračunatoj pomoću Sabinove formule, a vrednosti normalizovanog vremena reverberacije manje ili veće od 1 pokazuju postojanje devijacije u akustičkom odzivu proračunatom pomoću simulacije.

Vrednosti normalizovanog vremena reverberacije proračunatog u tri prostorije za sedam različitih vrednosti sketering koeficijenta s su predstavljene na slici 8.5. Vidi se da ove tri prostorije različito reaguju na promene sketering koeficijenta. U prostorijama 1 i 2 postoji značajna negativna devijacija normalizovanog vremena reverberacije za male vrednosti sketering koeficijenta između 0.2 i 0.3. U prostoriji 3 normalizovano vreme reverberacije kao funkcija sketering koeficijenta ima konkavan oblik sa lokalnim maksimumom u intervalu između 0.5 i 0.75.

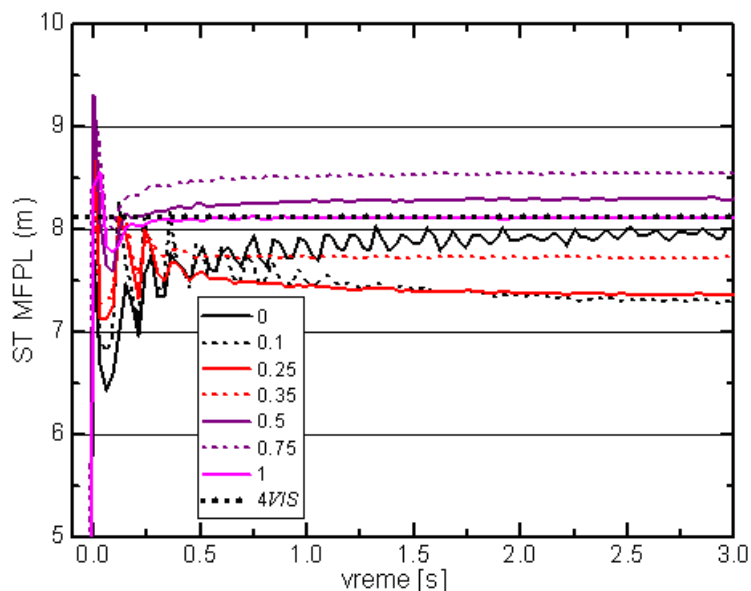
Na slikama 8.6, 8.7 i 8.8 prikazani su rezultati izračunavanja ST MFPL u prostorijama 1, 2 i 3, respektivno, za svih sedam vrednosti sketering koeficijenta uniformno raspoređenih na unutrašnjim površinama. Dijagrami su nacrtani za prvih $3s$ odziva, što je uporedivo sa trajanjem vremena reverberacije u ovim prostorijama. Na sva tri dijagrama je radi poređenja označena statistička vrednost slobodne dužine puta $4V/S$.

Sa dijagrama na slikama 8.6, 8.7 i 8.8 može se videti nekoliko karakterističnih osobina ST MFPL. Njena vrednost uvek se asimptotski približava konačnoj vrednosti koja se dostiže kada $t \rightarrow \infty$. Iz toga se može zaključiti da difuzno polje u prostoriji karakteriše $l_{ST}(t)=const$, a da u prelaznom režimu od trenutka stizanja direktnog zvuka rane refleksije karakteriše promenljiva vrednost $l_{ST}(t)$. Na osnovu prikazanih rezultata vidi se da za razne vrednosti sketering koeficijenta na unutrašnjim površinama ta konačna vrednosti $l_{ST}(\infty)$ kojoj teži ST MFPL može biti veća i manja od statistički očekivane vrednosti $4V/S$. Pojava ovakvih razlika odgovara činjenici da u prostorijama takođe postoje razlike između vrednosti vremena reverberacije pri

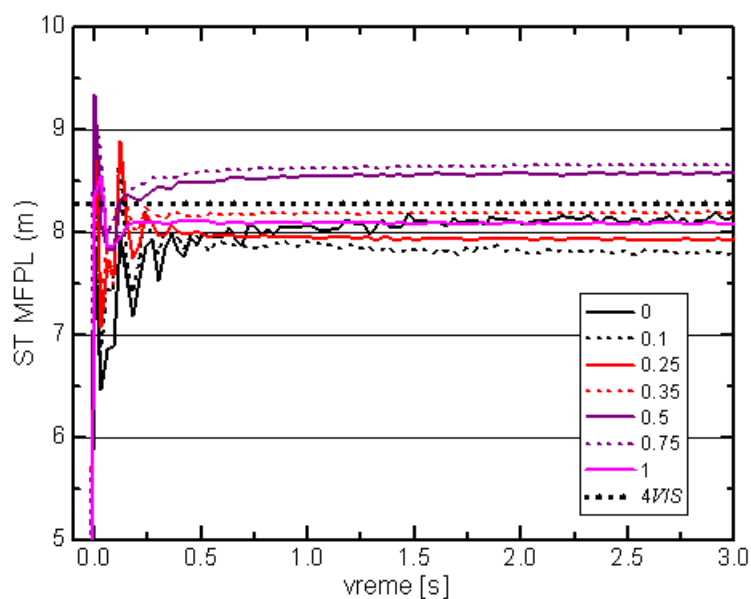
različitim vrednostima sketering koeficijenta i statistički očekivane vrednosti vremena reverberacije. Za analizirane prostorije te razlike su prikazane na slici 8.5.



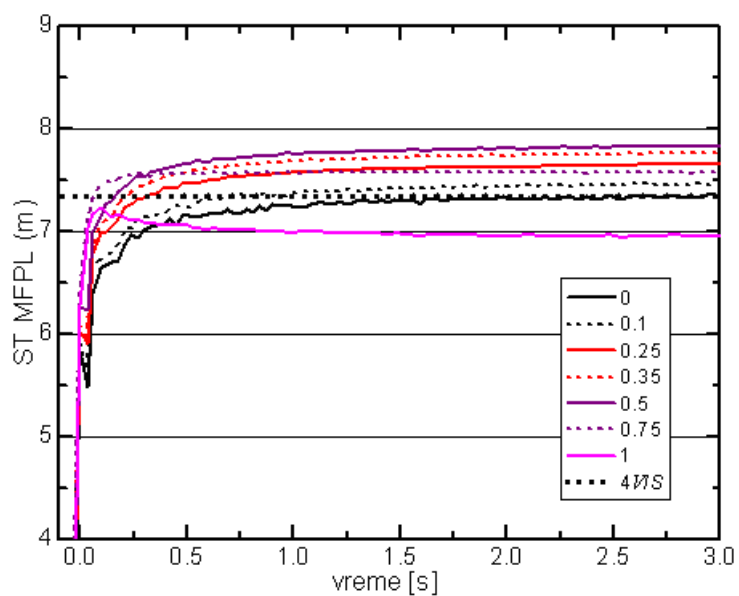
Slika 8.5. Proračunata normalizovana vremena reverberacije u tri prostorije kao funkcija sketering koeficijenta s [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008].



Slika 8.6. ST MFPL za prostoriju 1 proračunato za različite uniforme raspodele vrednosti koeficijenta difuznosti refleksija [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008].



Slika 8.7. ST MFPL za prostoriju 2 proračunato za različite uniforme raspodele vrednosti koeficijenta difuznosti refleksija [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008].



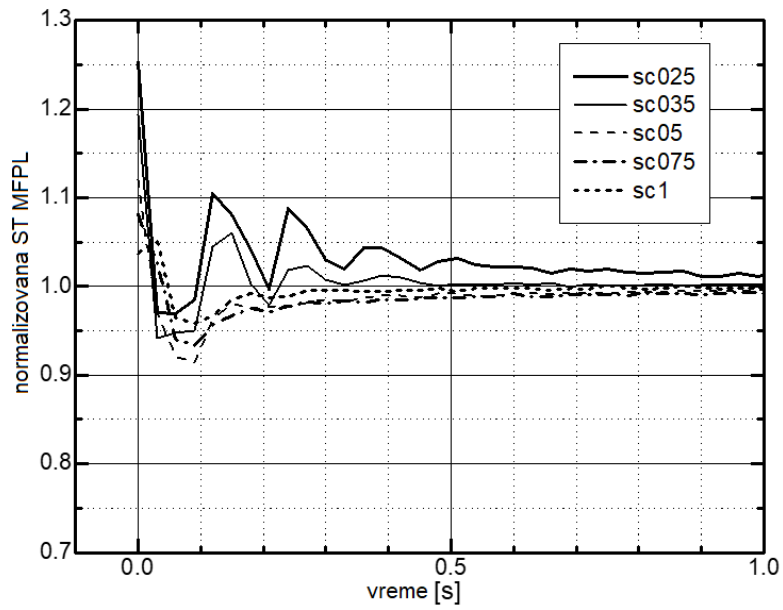
Slika 8.8. ST MFPL za prostoriju 3 proračunato za različite uniforme raspodele vrednosti koeficijenta difuznosti refleksija [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008].

Brzina kojom se kriva $l_{ST}(t)$ u vremenu približava svojoj konačnoj vrednosti tokom trajanja odziva zavisi od geometrijskih atributa prostorije: od njenog oblika i

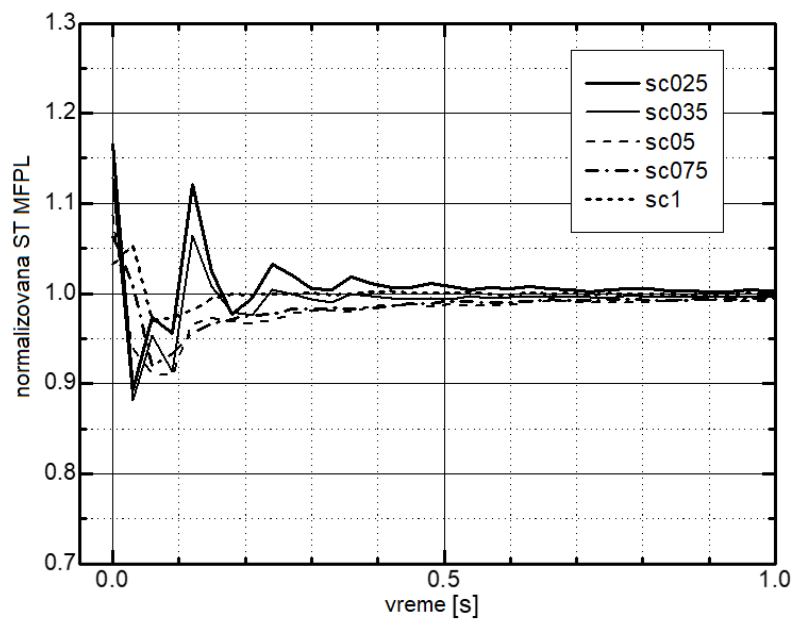
vrednosti sketering koeficijenta s . U nekim okolnostima taj proces je relativno spor (na primer, prostorija 1, $s = 0.25$, sa slike 7.6), a u nekim je vrlo brz (prostorije 1 i 2, $s = 1$, slike 8.6 i 8.7). Pri nekim kombinacijama oblika prostorije i vrednosti sketering koeficijenta kriva se postupno povećava u vremenu, dok za neke kombinacije kriva u početnom periodu odziva pokazuje vrednosti slobodnih putanja veće od vrednosti $l_{ST}(\infty)$, pa kriva asimptotski teži svojoj konačnoj vrednosti s gornje strane.

U prostorijama čija geometrijska forma sama po sebi ne garantuje difuznost (prostorije 1 i 2) pri malim vrednostima sketering koeficijenta kriva $l_{ST}(t)$ pokazuje izražene fluktuacije u vremenu. Najveće fluktuacije su u prostoriji 1, čija paralelopipedna forma najmanje doprinosi difuznosti, u prostoriji 2 koja ima malo deformisan oblik te fluktuacije su manje, dok su u prostoriji 3 fluktuacije veoma male. S povećanjem vrednosti sketering koeficijenta u svim prostorijama fluktuacije nestaju i krive postaju monotone. Ove fluktuacije za slučaj kada je sketering koeficijent $s = 0$ traju sve vreme. To znači da one nisu posledica neravnomernosti pristizanja energije usled malog broja usamljenih prvih refleksija karakterističnih za početak impulsnog odziva, već su nastale geometrijskim uslovljenostima kretanja energije po prostoriji tokom čitavog trajanja odziva. U prostorijama 1 i 2 čak i za $s = 0.35$ ove fluktuacije traju približno prvih 0.5s odziva, što je očigledno posledica geometrijskih uticaja.

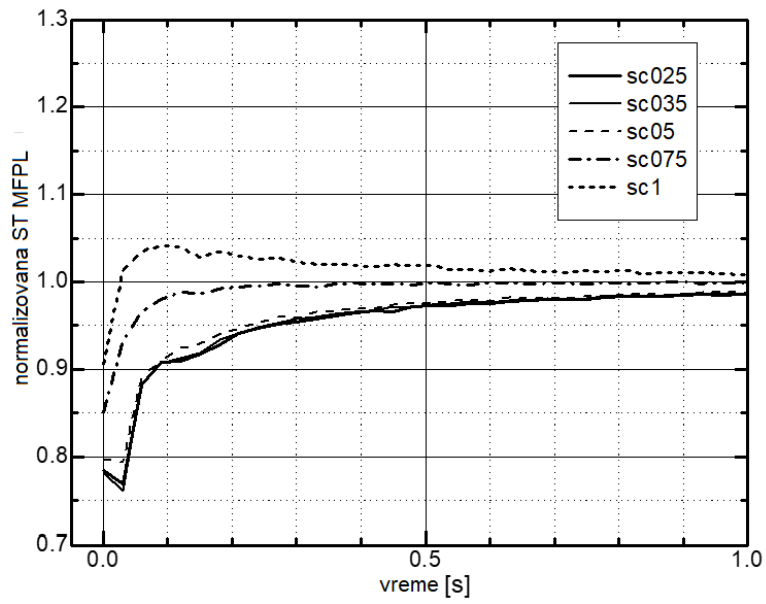
Da bi se lakše sagledale razlike u brzini kojom $l_{ST}(t)$ teži konačnoj vrednosti izvršena je normalizacija svih krivih na vrednost kojoj ona teži za $t = \infty$. Pri tom izračunavanju normalizacija je izvršena u odnosu na vrednost koju krive dostižu 6s nakon stizanja direktnog zvuka, što je približno dva puta duže od vremena reverberacije u prostorijama. Analizom toka krivih $l_{ST}(t)$ ocenjeno je da nakon tog vremena je praktično dostignuta vrednost kojoj krive asimptotski teže (razlike su manje od 0.1%). Dijagrami sa tako normalizovanim krivama za prostorije 1, 2 i 3 prikazani su na slikama 8.9, 8.10 i 8.11, respektivno. Nacrtane su krive za sketering koeficijenta od 0.25 do 1, smatrajući da okolnosti u kojima bi ovaj koeficijent imao vrednost 0 ili 0.1 imaju samo teorijski značaj. Na vremenskoj osi prikazan je vremenski interval prve sekunde odziva, gde su varijacije vrednosti krive $l_{ST}(t)$ najveće.



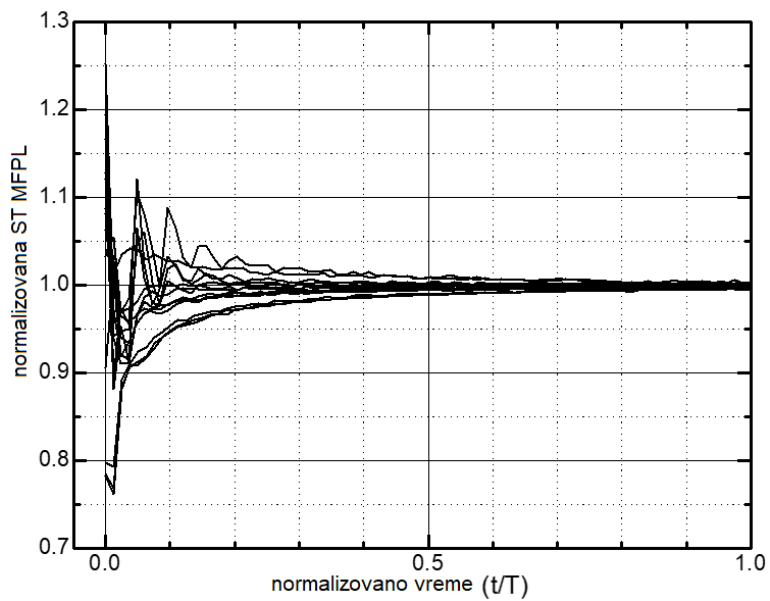
Slika 8.9. Rezultati za prostoriju 1 pri vrednostima sketering koeficijenta (0.25;1) [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008].



Slika 8.10. Rezultati za prostoriju 2 pri vrednostima sketering koeficijenta (0.25;1) [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008].



Slika 8.11. Rezultati za prostoriju 3 pri vrednostima sketering koeficijenta (0.25;1) [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008].

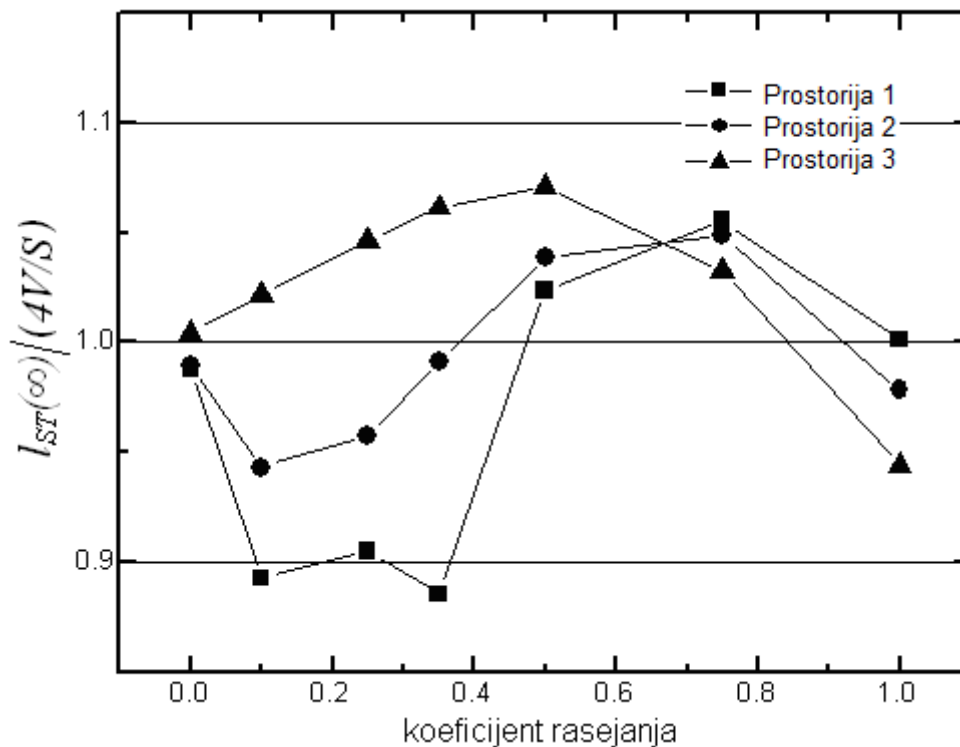


Slika 8.12. Normalizovane krive za vrednosti sketering koeficijenta (0.25;1) sa slika 8.1, 8.2 i 8.3, prikazane na vremenskoj osi normalizovanoj prema vremenu reverberacije u prostoriji [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008].

Zbog činjenice da vreme reverberacije u tri analizirane prostorije nije isto, i da se u svakoj od njih ta vrednost menja sa promenama sketering koeficijenta, uvedena je normalizacija vrednosti i na vremenskoj osi. Za svaku krivu posebno vreme je normalizovano na vrednost vremena reverberacije koje odgovara zadatim uslovima. Vreme reverberacije je određeno na osnovu Šrederove krive izračunate iz impulsnog odziva za dati par tačaka (izvor-prijemna sfera). Dobijene normalizovane krive za sve tri prostorije prikazane su na slici 8.12. Nacrtane su krive za vrednosti sketering koeficijenta od 0.25 do 1, smatrajući i ovde da okolnosti u kojima bi ovaj koeficijent imao vrednost 0 ili 0.1 imaju samo teorijski značaj.

8.3 Diskusija rezultata

Stacionarno stanje zvučnog polja u prostoriji, sa dostignutim stabilnim statističkim vrednostima kojima se opisuje stanje u njemu, manifestuje se i stacionarnom vrednošću ST MFPL. Ona se dostiže posle dovoljno dugog vremena nakon početka impulsnog odziva. Te stacionarne vrednosti se u svakoj prostoriji razlikuju u funkciji sketering koeficijenta. Da bi se detaljnije sagledala ta zavisnost, na slici 8.13 prikazane su vrednosti $l_{ST}(\infty)$ normalizovane na statistički očekivanu vrednost $4V/S$ u funkciji vrednosti sketering koeficijenta s uniformno raspoređenog po prostoriji. Dijagram pokazuje da tok krivih u tri prostorije odgovara toku krivih za vrednost vremena reverberacije sa slike 8.5. U prostorijama 1 i 2 postoji negativna devijacija normalizovane ST MFPL za male vrednosti sketering koeficijenta između 0.2 i 0.3 i pozitivna devijacija za sketering koeficijente veće ili jednake 0.5. U prostoriji 3 normalizovana ST MFPL ima konkavni oblik sa lokalnim maksimumom na 0.5. Vidi se da odstupanja ST MFPL od statističkih vrednosti pokazuju istu zavisnost od sketering koeficijenta kao i odstupanja vrednosti vremena reverberacije.



Slika 8.13. Normalizovane vrednosti $l_{ST(\infty)}$ u tri prostorije u funkciji sketering koeficijenta [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008].

Postoji tvrdnja u literaturi da je 20 – 40 sukcesivnih refleksija neophodno za uspostavljanje difuznog polja. Da bi uporedili dobijene rezultate s ovim stavom, vremenska osa na slikama 8.9, 8.10 i 8.11 je transformisana u broj refleksija koristeći u svakoj prostoriji njenu statistički estimiranu frekvenciju broja refleksija u sekundi $cS/4V$. Rezultati za sve tri prostorije prikazani su zbirno na slici 8.14. Kao i na slici 8.12, i ovde su nacrtane krive za vrednosti sketering koeficijenta od 0.25 do 1. Sa prikazanih dijagrama može se proceniti prosečan broj refleksija koji je potreban da bi se vrednost ST MFPL približila svojoj konačnoj vrednosti.

Proces asimptotskog približavanja krive $l_{ST}(t)$ njenoj konačnoj vrednosti koju ima za $t = \infty$ može se kvantifikovati trenutkom kada ona dostigne dovoljno blisku vrednost. Ovde je usvojeno da to bude trenutak kada kriva dostiže 95% svoje konačne vrednosti. Razvoj krive $l_{ST}(t)$ ovde je bio prikazan na tri načina: u vremenskom domenu (slike 8.9, 8.10 i 8.11), relativno u odnosu na vreme reverberacije u prostoriji (slika 8.12) i u domenu prosečnog broja refleksija (slika 8.14). Trenutak kada kriva dostiže 95% svoje konačne vrednosti određen je u sva tri domena i rezultati su

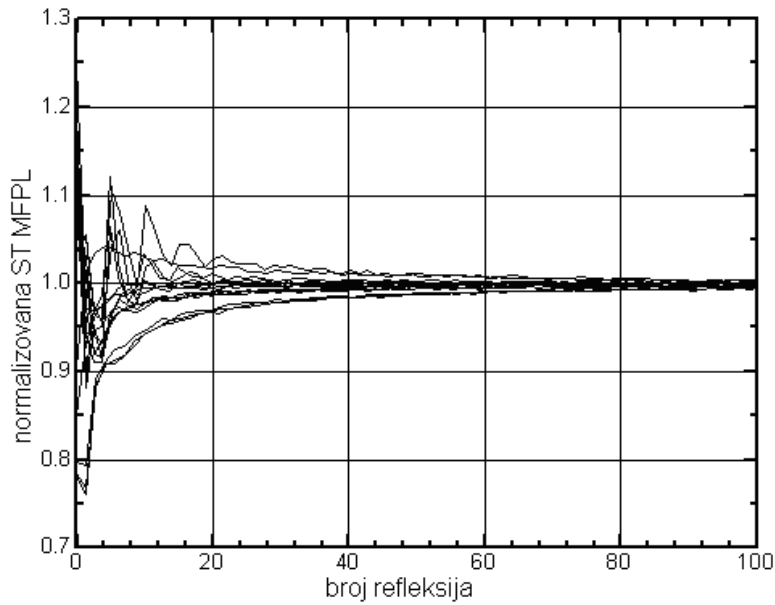
prikazani u tabeli 8.1. Prikazani su rezultati za sve tri analizirane prostorije i za pet vrednosti uniformno raspoređenog sketering koeficijenta s .

Iz podataka prikazanih u tabeli 8.1 vidi se da u analiziranim prostorijama krive $l_{ST}(t)$ dostižu 95% svoje konačne vrednosti nakon vremena koje je u intervalu od 20 ms (prostorija 3, $s = 1$), za velike vrednosti sketering koeficijenta, do 280 ms za mali sketering (prostorija 1, $s = 0.25$). Za strožije postavljen uslov približavanja konačnoj vrednosti te vrednosti bi bile veće.

Kratkovremenski usrednjena slobodna dužina puta je vremenska funkcija $l_{ST}(t)$ i predstavlja derivat geometrijskog pristupa u modelovanju prelaznog režima pri uspostavljanju zvučnog polja u prostoriji. To je vremenska funkcija koja se tokom trajanja impulsnog odziva asimptotski približava konstantnoj vrednosti karakteričnoj za difuzno polje u prostoriji. Za razliku od globalne MFPL koja odslikava geometriju putanja u čitavoj prostoriji, ST MFPL je karakteristika koja se odnosi na usvojeni par tačaka izvora zvuka i prijemnika. U opštem slučaju, ona će se razlikovati za različito odabrane parove tih tačaka u prostoriji.

Varijacije vrednosti $l_{ST}(t)$ u početnom delu impulsnog odziva zavise od geometrijskih osobina prostorije. Moguće su različite brzine približavanja ove krive njenoj konačnoj vrednosti, što je funkcija odnosa opšte geometrijske forme prostorije i stanja difuznosti refleksija u njoj. Razlike postoje i u istoj prostoriji u zavisnosti od stanja difuznosti refleksija.

Na osnovu vremenske promene vrednosti ST MFPL zaključuje se da trenutak prelaska početnog dela odziva u rep reverberacione krive predstavlja pitanje kriterijuma dovoljno male razlike. Za tri analizirane prostorije postavljen je kriterijum približavanja 95%, i to stanje se dostiže za vreme koje pri malom sketering koeficijentu iznosi 11% vremena reverberacije ili 12 prvih refleksija, a za velike vrednosti sketering koeficijenta za to je potrebno 2-3% vremena reverberacije ili 1-2 prve refleksije.



Slika 8.14. Dijagrami sa slike 7.12 preračunati za svaku prostoriju na broj refleksija $cS/4V$ [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008].

Tabela 8.1. Trenuci kada kriva $I_{ST}(t)$ dostiže 95% svoje konačne vrednosti koju ima za $t = \infty$ u sve tri prostorije i za pet vrednosti sketering koeficijenta s , izraženi u vremenu trajanja impulsnog odziva $t_{95\%}$, relativnog vremena u odnosu na vreme reverberacije $(t/T)_{95\%}$ i u prosečnom broju refleksija $n_{95\%}$.

prostorija	s	$t_{95\%}$	$(t/T)_{95\%}$	$n_{95\%}$
1	0.25	0.28s	0.11	12
	0.35	0.16s	0.06	6
	0.5	0.11s	0.05	5
	0.75	0.11s	0.04	4
	1.0	0.09s	0.03	2
2	0.25	0.14s	0.06	6
	0.35	0.15s	0.05	5
	0.5	0.12s	0.04	4
	0.75	0.11s	0.04	4
	1.0	0.03s	0.02	2
3	0.25	0.26s	0.11	12
	0.35	0.25s	0.10	12
	0.5	0.25s	0.10	12
	0.75	0.04s	0.02	2
	1.0	0.02s	0.02	1

9 Analiza raspodele incidentne energije u prostoriji

Predikcija akustičkog odziva nekog prostora u njegovom akustičkom dizajnu uobičajeno se vrši softverskom simulacijom zvučnog polja. Simulacijom se generiše impulsni odziv (monauralni ili binauralni) i na osnovu toga se izračunavaju svi relevantni objektivni pokazatelji stanja u zvučnom polju. Osnova za svaku takvu simulaciju je geometrijski model prostorije u kome se definiše materijalizacija unutrašnjih površina pomoću parametara koji opisuju apsorpcione i difuzne karakteristike za svaku pojedinačnu površinu. Ulazni parametar za svaku takvu softversku simulaciju je frekvencijska zavisnost apsorpcije površina izražena vrednostima koeficijenta apsorpcije. Ova karakteristika se zadaje na osnovu izmerenih vrednosti koeficijenta apsorpcije koju materijali ispoljavaju u difuznom polju reverberacionih prostorija gde se vrši laboratorijsko testiranje. U takvim uslovima poznata je ugaona raspodela incidentne energije i njena veza sa prosečnim nivoom zvuka u prostoriji, jer zvučno polje u reverberacionim prostorijama u dovoljnoj meri zadovoljava uslove difuznog polja.

Koeficijent apsorpcije materijala po svojoj prirodi je ugaono zavisna veličina i njegova jednobrojna vrednost zavisi od dve veličine: od ugaone raspodele incidentne energije i od površinske gustine energije koja pogađa površinu. Od toga kolika je stvarna gustina energije koja neku površinu pogađa u datim okolnostima i kakva je njena ugaona raspodela zavisice ukupna apsorpcija te površine u prostoriji. Navedene karakteristike opisuju ne samo efektivnu apsorpcionu moć neke površine, već predstavljaju važan ulazni podatak za proračun izolacionih svojstava pregrada koje razdvajaju prostorije.

Komercijalni softveri za modelovanje zvučnog polja u prostorijama ne pružaju detaljan uvid u dešavanja na svim pojedinačnim površinama, već se o posledicama različitih raspodela gustina energije po površinama saznaje posredno analizom globalnih objektivnih parametara [Šumarac Pavlović, 2007].

U literaturi je pokazano da globalni geometrijski oblik prostorije kao i mikro geometrija (reljef) na unutrašnjim površinama utiču na način na koji se zvučna enerija kreće po prostoriji, a time i na njen globalni akustički odziv [Šumarac-Pavlović, Mijić,

2007 a]. Kao pokazatelj stanja može se analizirati raspodela slobodnih putanja i odstupanje srednje dužine slobodnih putanja od statistički očekivanih vrednosti za zadate geometrijske karakteristike. To su sve informacije koje se mogu dobiti pomoću komercijalnih softvera.

Međutim, raspodela slobodnih putanja ne može da pruži odgovor na pitanje koja površina, i sa kolikim udelom utiče na odstupanja različitih parametara od statistički očekivanih vrednosti, već samo može da ukaže na tendenciju odstupanja od istih. Zbog toga je razvijen softverski paket baziran na rej-trejsing simulaciji. Osnovna ideja pri relizaciji ovog softvera bila je da se unaprede algoritmi za modelovanje difuznih refleksija koji bi, pre svega, dali precizniji uvid u procese koji se odvijaju na pojedinačnim graničnim površinama u prostoriji. Realizovani softver, osim standardnih globalnih pokazatelja zvučnog polja, daje precizan pregled niza karakteristika koje mogu biti od velikog značaja pri akustičkom dizajnu i optimalnoj primeni materijala.

U ovom primeru akcenat je stavljen na utvrđivanje doprinosa koje pojedinačne površine imaju na ukupan energetski bilans u prostoriji, a to zavisi od energije koja ih pogađa. Analizom su obuhvaćena tri modela prostorije različitih globalnih geometrijskih karakteristika. Mikrogeometrijske karakteristike varirane su kroz različite difuzne karakteristike koje se dodeljuju površinama. Izabrani modeli nemaju značajno različite raspodele slobodnih putanja, ali i pored toga imaju međusobno velike varijacije u raspodeli površinske gustine energije na unutrašnjim površinama.

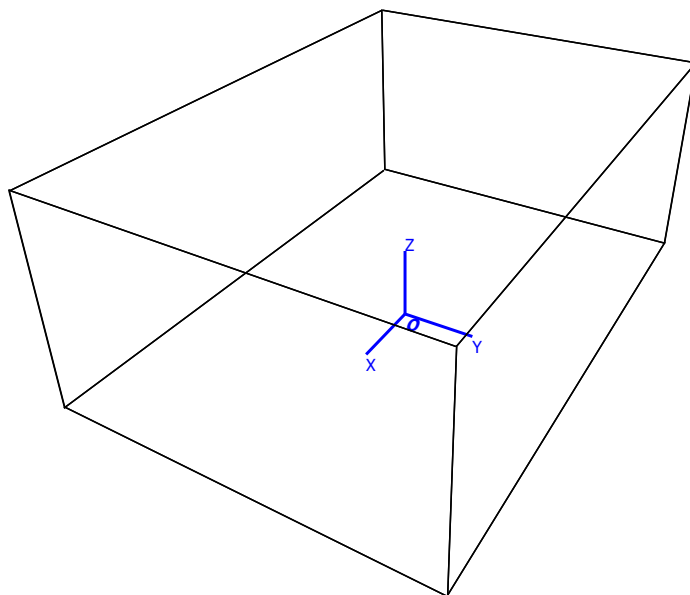
9.1 Analiza raspodele površinske gustine energije

U difuznom polju postoji jasna veza između srednjeg intenziteta (nivoa) zvuka u prostoriji i incidentne energije koja pogađa svaku unutrašnju površinu. Pretpostavljajući jednaku verovatnoću svih uglova incidencije i jednaku energiju koja napada površinu iz svih uglova, što je svostveno za homogeno i difuzno polje, može se izvesti veza između srednjeg intenziteta zvuka J u prostoriji i normalnog intenziteta koji pogađa granične površine. Prema statističkom modelu zvučnog polja u prostorijama taj intenzitet na površinama je $J/4$ [Kurtović, 1978].

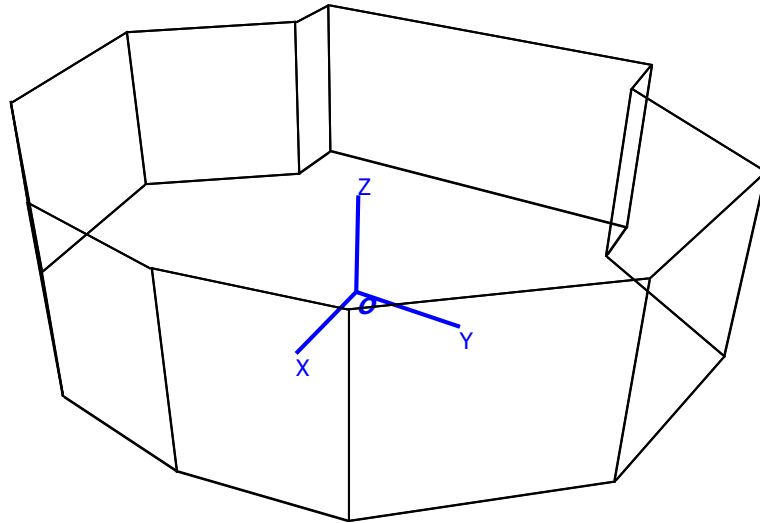
U realnim prostorijama ne postoji difuzno polje, što znači da postoje manja ili veća odstupanja raspodele uglova incidencije od onog koji se pretpostavlja u difuznom polju. Posledica toga je da energija koja dolazi do površina iz raznih pravaca, to jest

površinska gustina energije, nije jednaka na svim delovima unutrašnjosti prostorije [Šumarac-Pavlović, 2004]. Da bi se prikazala moguća odstupanja površinske gustine energije od teorijske vrednosti za difuzno polje analizirana su tri modela prostorija prikazana na slikama 9.1, 9.2 i 9.3 [Bojičić et al., 2017]. Prva prostorija je jednostavnog paralelepipednog oblika i prikazana je na slici 9.1. Druga prostorija je kompleksnijeg oblika. To je scenski prostor u kome su pod i plafon ravni i paralelni, a oblik u osnovi je mnogougao. Njen model je prikazan na slici 9.2. Najzad, treća prostorija je geometrijski najkompleksnija. To je hala „Morača“ u Podgorici koja ima vrlo kompleksan oblik sa mnogo pojedinačnih unutrašnjih površina. Njen model je prikazan na slici 9.3.

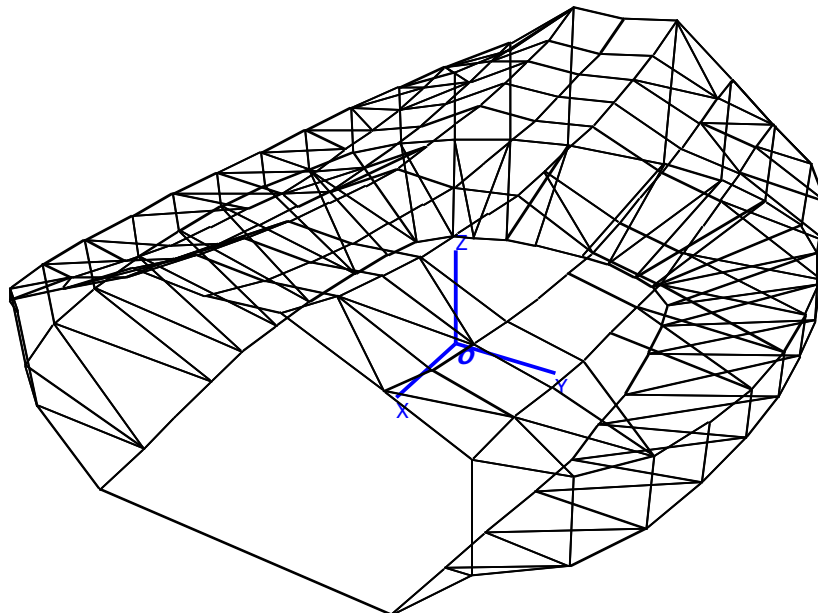
Svi prikazani modeli realizovani su tako da imaju uniformu raspodelu koeficijenta apsorpcije na površinama, i usvojeno je da to bude vrednost 0.1. Cilj toga je da se umanja efekat apsorpcije i tako učini prepoznatljivim uticaj geometrijskih karakteristika na tokove saobraćaja zvučne energije po prostoriji i po pojedinim površinama. Zvučno polje u modelima je simulirano sa slučaj uniformne raspodele skatering koeficijenta i njegova vrednost je varirana u sledećim koracima: 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 i 0.9.



Slika 9.1. Model paralelepipedne prostorije.



Slika 9.2. Model prostorije sa mnogougaonom osnovom i ravnim podom i plafonom.



Slika 9.3. Model sportske dvorane "Morača" u Podgorici [Šumarac-Pavlović, 2004].

Izračunate raspodele slobodnih putanja u posmatranim modelima prikazane su na slici 9.4. Sa ovih dijagrama se vidi da se u svim modelima u raspodeli slobodnih putanja javlja jedan izraziti maksimum. Kod modela 1 i 2 taj maksimum je nesimetričan, što je posledica postojanja velikih paralelnih površina. Nasuprot tome, u modelu 3 maksimum raspodele je simetričan u odnosu na maksimalnu vrednost. To je posledica složenog oblika prostorije i složenosti slobodnih putanja u njoj. Promena

vrednosti koeficijenta difuznosti površina utiče na oblik maksimuma u raspodeli, ali se pri tome ne menja njen oblik.

Iz oblika raspodela sa slike 9.4 ne može se naslutiti uloga pojedinih površina u ukupnom energetsom bilansu u zvučnom polju unutar prostorija. Zbog toga je pomoću realizovanog softvera izračunata energija koja pogađa svaku pojedinačnu površinu. Ona je izražena relativno u odnosu na ukupnu energiju koja saobraća u prostoriji i u odnosu na udeo svake pojedinačne površine u ukupnoj unutrašnjoj površini prostorije. Na osnovu toga je za svaku površinu izračunata površinska gustina energije na njoj normalizovana na srednju površinsku gustinu incidentne energije za čitavu prostoriju dobijenu statističkim modelom zvučnog polja u prostoriji.

Na slikama 9.5, 9.6 i 9.7 prikazani su rezultati takvih proračuna. Prikazana su procentualna premašenja srednje površinske gustine energije po pojedinim površinama ili grupama površina za tri analizirana modela prostorija. Na slikama je srednja vrednost intenziteta zvuka prema statističkom modelu označena crvenom horizontalnom linijom (100%), pa se sve ostale vrednosti mogu porediti sa njom.

Količina energije koja pogađa svaku površinu u prostoriji određena je strukturom saobraćaja zvučne energije po prostoru, a to znači geometrijom prostorije i difuznim karakteristikama svih unutrašnjih površina. To znači da se sa varijacijama difuznosti površina menja i količina energije koja pogađa pojedine površine.

Analiza odziva u prostoriji paralelopipednog oblika pokazala je da je najveća površina u njoj (pod, plafon) pogođena najvećom površinskom gustinom zvučne energije. Za vrednosti koeficijenta difuznosti od 0.3 gustina energije koja pogađa najveću površinu u prostoriji premašuje statistički očekivanu vrednost za oko 20%, što je prikazano na slici 9.5. Ove dve velike površine pogađa veća gustina zvučne energije u svim analiziranim stanjima difuznosti. Istovremeno, najmanja površina u istoj prostoriji pri istoj vrednosti koeficijenta difuznosti 0.3 pogođena je površinskom gustinom energije koja je za 25% manja od srednje vrednosti.

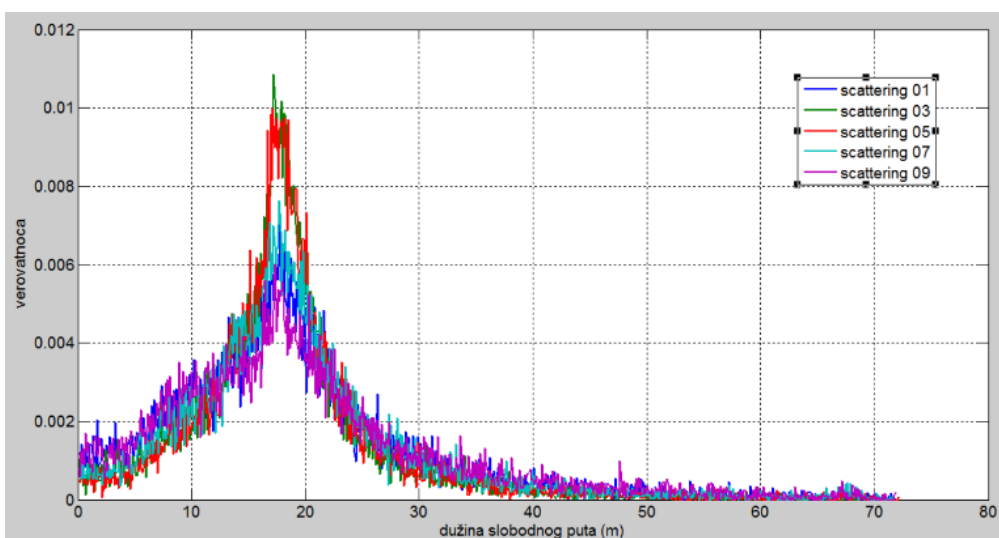
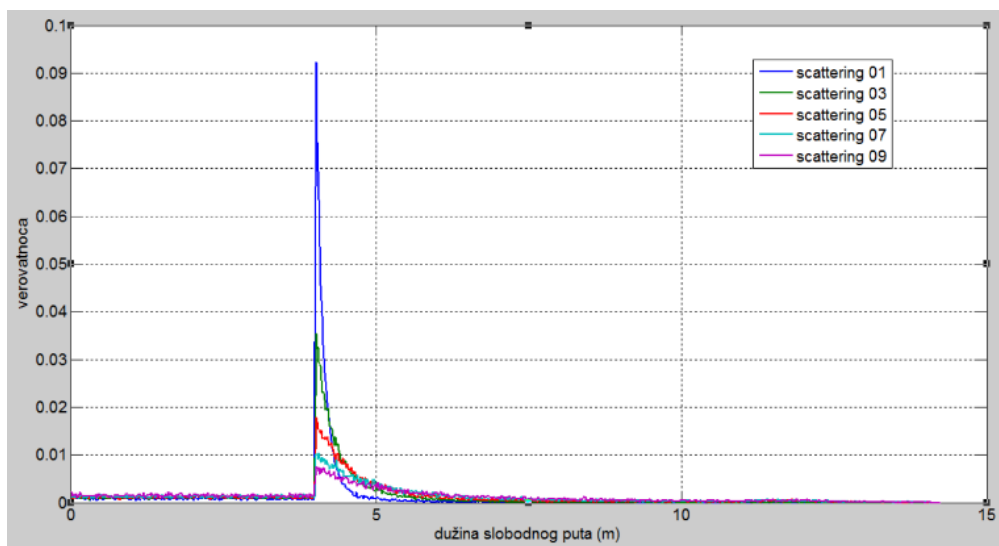
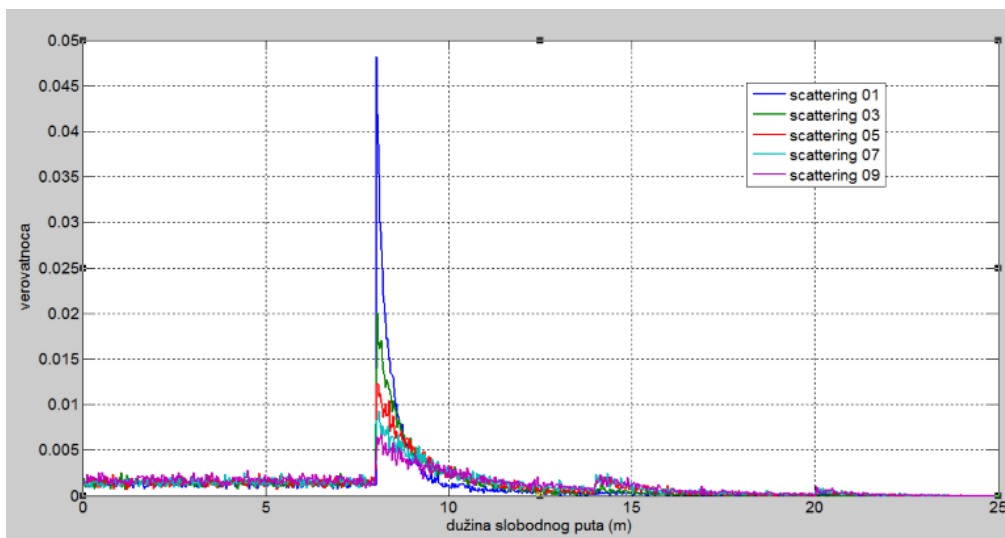
Sve ove činjenice posredno govore o efektivnoj apsorpciji koju će neki materijal ispoljiti kada se nađe na određenoj poziciji u prostoriji. Primenjeno na praktične okolnosti akustičkog dizajna jedne takve prostorije to znači da će isti apsorpcioni materijal biti efikasniji na njenom plafonu, nego na najmanjem zidu. Pri tome se njegova efikasnost meri uticajem na reverberacioni proces i dobijenu vrednost

vremena reverberacije. Drugim rečima, sa istom površinom apsorpcionog materijala više će se smanjiti vreme reverberacije ako se on postavi na plafon, nego na dva najmanja zida.

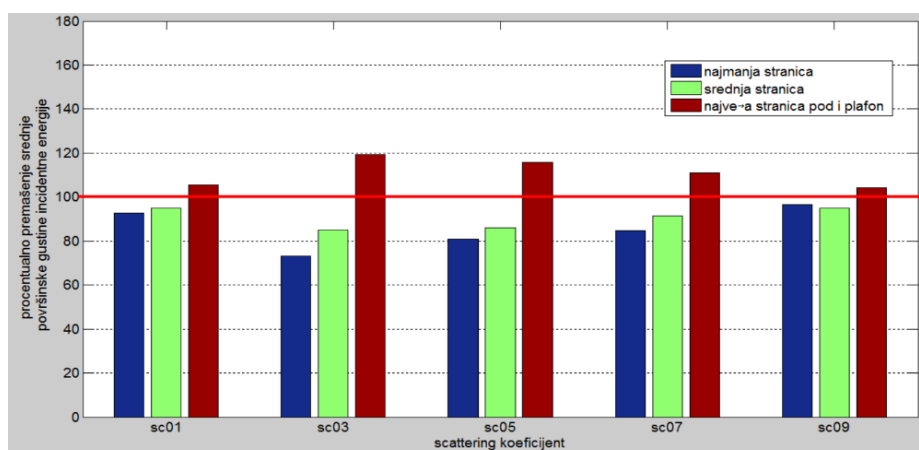
Drugi model prostorije prikazan na slici 9.2 ima sličnu raspodelu slobodnih putanja, što se vidi na slici 9.4. Analiza kretanja zvučne energije po ovoj prostoriji pokazuje da su najveće površine u njoj, međusobno paralelne pod i plafon, takođe pogođene sa procentualno većom gustinom energije nego ostale površine. Prema tome, to je ista osobina kao u paralelopipednoj prostoriji. Na slici 9.6 prikazana su procentualna premašenja površinske gustine energije na svim pojedinačnim unutrašnjim površinama. Najefikasnije korišćenje apsorpcionog materijala u ovakvim prostorijama je na njenim najvećim paralelnim površinama. S obzirom na prethodni rezultat dobijen u paralelopipednoj prostoriji može se zaključiti kao univerzalno pravilo da najveće paralelne površine dobijaju na sebi i najveću gustinu zvučne energije.

Model prikazan na slici 9.3 predstavlja primer jedne sportske hale složenog oblika, sa konkavnim krovom i sa tribinama karakterističnim za geometriju sportskih hala. Ova prostorija ima veliki broj površina, pa bi prikazivanje gustine energije za sve njih bilo teško čitljivo sa dijagrama zadatih dimenzija. Zbog toga je u prezentaciji veliki broj površina koje čine ovaj model grupisano po nekim kategorijama kako bi se pojednostavilo tumačenje rezultata.

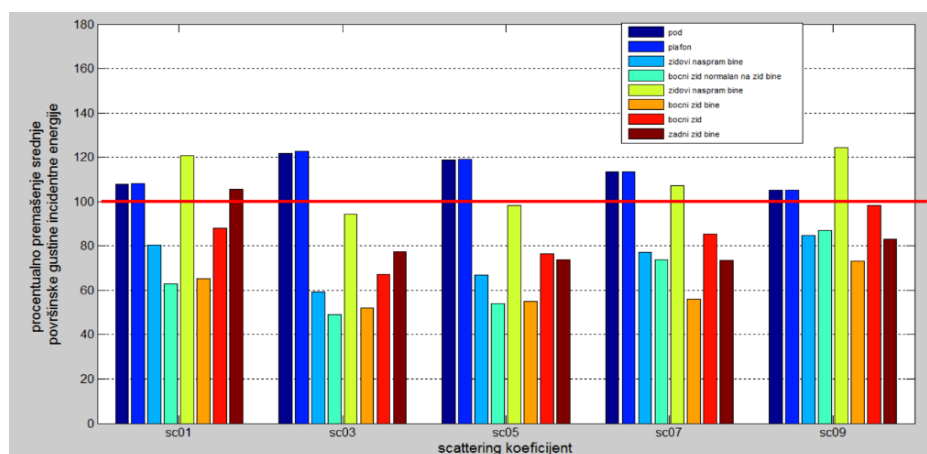
Na slici 9.7 prikazana su procentualna premašenja površinskih gustina energije usrednjena po svim površinama iz neke definisane skupine površina. Izdvojene su površine koje čine parter, kompletne tribine (koje su svrstane u jednu kategoriju iako svi delovi tribina nemaju identičnu ulogu u formiranju zvučnog polja), konkavni delovi krova, centralni deo krovne površine, veliki ravni čeonni zidovi i zid iznad tribina.



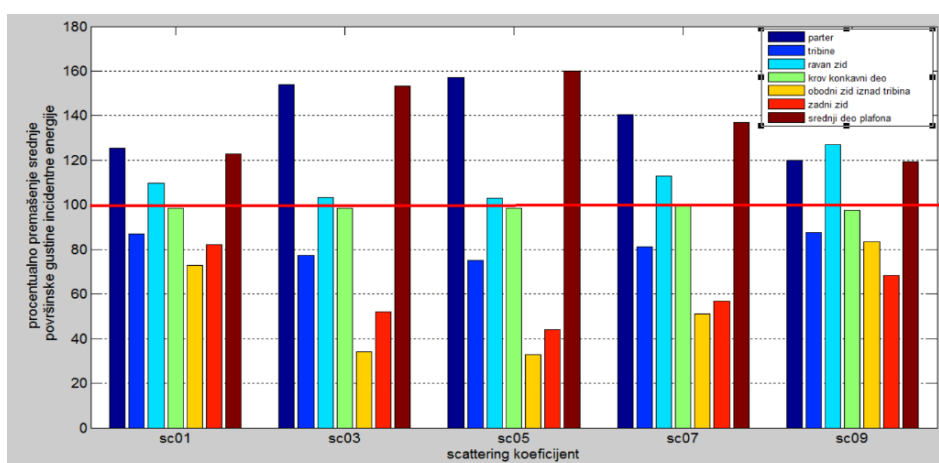
Slika 9.4. Raspodele slobodnih putanja u modelima: gore – model 1, u sredini – model 2, dole – model 3.



Slika 9.5. Procentualan premašenja izračunate vrednosti srednje površinske gustine energije u modelu 1 u odnosu na statistički očekivanu vrednost.



Slika 9.6. Procentualan premašenja izračunate vrednosti srednje površinske gustine energije u modelu 2 u odnosu na statistički očekivanu vrednost.



Slika 9.7. Procentualan premašenja izračunate vrednosti srednje površinske gustine energije u modelu 3 u odnosu na statistički očekivanu vrednost.

9.2 Diskusija rezultata

Sa dijagrama se vidi da tribine predstavljaju površine koje sa manjim udelom učestvuju u apsorpciji zvučne energije jer je gustina energije na njima najmanja. Ovo je opšta karakteristika u prostorijama ovakvog ili sličnog oblika karakterističnog za sportske hale. U posmatranoj prostoriji površina partera i površina srednjeg dela krova predstavljaju zone koje su pogođene procentualno najvećom površinskom gustom energije. Sa dijagrama se takođe vidi da konkavni delovi krova imaju površinsku gustinu energije koja odgovara onoj koja se očekuje u difuznom polju, bez obzira na varijaciju vrednosti sketering koeficijenta na površinama u prostoriji. Prema rezultatima prikazane analize najefikasnija upotreba apsorpcionog materijala u prostoriji sa slike 9.3 je u centralnoj zoni krova.

Analiza zvučnog polja u tri odabrane prostorije različitih oblika pokazala je da postoje razlike u gustini zvučne energije koja pogađa različite delove unutrašnjih površina. Time se može objasniti različita efikasnost istih aporpcionih materijala postavljenih na različitim delovima prostorije.

10 Analiza raspodele uglova incidencije u prostoriji

Način na koji se zvučna energija kreće po prostoriji kada se pobudi zvukom (“saobraćaj” zvučne energije) određuju njene geometrijske karakteristike. Te karakteristike se prepoznaju na dva nivoa: nivo makro i mikro geometrije. Pojam makro geometrije prostorije obuhvata njenu veličinu i proporcije. U mikro geometrijske karakteristike spada reljef na unutrašnjim površinama, i on određuje stepen difuznosti zvučnog polja koji se postiže i koji tako utiče na prirodu polja [Šumarac-Pavlović, Petrović, 2009]. U literaturi je pokazano da makro i mikro geometrijske karakteristike određuju karakteristike raspodele dužina slobodnih putanja zvučnih talasa po prostoriji (dužina putanje talasa između dve sukcesivne refleksije) [Šumarac-Pavlović, Mijić, 2005], a time i na razne merljive manifestacije koje se mogu konstatovati u zvučnom polju.

Kao posledica realnih promena koje nastaju u raspodelama dužina slobodnih putanja u prostoriji menja se i srednja vrednost te dužine. To ima kao posledicu da srednja dužina slobodnih putanja odstupa od vrednosti očekivanih prema statističkom modelu zvučnog polja u prostorijama. U literaturi je pokazano vreme reverberacije odstupa od vrednosti koja se dobija Sabinovom ili Ayringovom formulom na sličan način na koji odstupa srednja dužina slobodnog puta od statistički očekivanih vrednosti [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008]. Prema tome, raspodela dužina slobodnih putanja je važna informacija o stanju zvučnog polja u prostoriji. Problem u tome stvara činjenica da se raspodela slobodnih putanja u nekoj realnoj prostoriji ne može dobiti egzaktnim postupkom, već samo računarskom simulacijom pomoću rej-trejsing metode.

Kao posledica različitih raspodela putanja, može se očekivati da se na odgovarajući način menja i raspodela veličine uglova incidencije na svakoj od površina u prostoriji, kao i sama verovatnoća pogađanja tih površina [Šumarac Pavlović et al., 2014]. Otuda makro i mikro geometrija prostorije određuju i te važne karakteristike zvučnog polja.

Kao posledica varijacije raspodela uglova incidencije, odnosno različitih verovatnoća pojave određenih uglova incidencije, javljaju se sekundarne promene kao

što su razlike u ispoljenim apsorpcionim svojstvima istog materijala u različitim prostorijama i na različitim mestima u istoj prostoriji [Šumarac-Pavlović, Mijić, 2007 b]. Takođe se menjaju i izolaciona svojstva pregrada kao posledica promena oblika raspodele uglova incidencije na njihovoj površini. Prema tome, izolaciona svojstva jedne pregrade menjaće se kada se nađe u prostorijama različitih geometrijskih konfiguracija.

U ovoj analizi su prikazani rezultati analize uticaja koji geometrijske osobine prostorije imaju na izolacionu moć jednostrukog homogenog pregradnog zida koji predstavlja jednu od graničnih površina u prostoriji. Analizirane su promene u raspodeli uglova incidencije koje nastaju u različitim geometrijskim uslovima. Te raspodele uglova su određene računarskom simulacijom uz pomoć softvera koji je prikazan u ovom radu. Analiziran je uticaj proporcija prostorije i stepena difuznosti njegovih površina na izolacionu moć posmatrane pregrade koji se ostvaruje promenama u raspodeli uglova incidencije.

10.1 Frekvencija koincidencije i izolaciona svojstva pregrada

Izolaciona moć jednostruke pregrade za talas koji nailazi pod uglom θ u odnosu na normalu njene površine opisana je u literaturi [Cremer, 1975]. Ona je definisana izrazom:

$$R = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m'' \cos \theta}{2 \rho c} \right)^2 \right] dB \quad (10.1)$$

Na osnovu definicije izolacione moći može se definisati izraz za koeficijent transmisije za za isti ugao θ :

$$\tau(\omega, \theta) = \left[1 + \left(\frac{\omega m'' \cos \theta}{2 \rho c} \right)^2 \right]^{-1} \quad (10.2)$$

U literaturi je takođe pokazano da se usled stvaranja fleksionih talasa u materijalu pregrade njena zvučna izolacija menja u zavisnosti od ugla incidencije zvučnog talasa iz vazduha. Ovde se može uvesti pojam efektivne specifične mase kao veličine koja je zavisna od frekvencije i ugla upadnog talasa kojom se može modelovati ova pojava [Kuttruff, 2006]:

$$m''_{eff} = m'' \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \sin^4 \theta \right) \quad (10.3)$$

pri čemu je $\omega_c = c^2 \sqrt{m''/B}$. Uvodeći efektivnu specifičnu masu u izraz (10.3) koeficijent transmisije postaje:

$$\tau(\omega, \theta) = \left[1 + \left(\frac{\omega m''_{eff} \cos \theta}{2\rho c} \right)^2 \right]^{-1} \quad (10.4)$$

Odnosno

$$\tau(\omega, \theta) = \left\{ 1 + \left[\frac{\omega \cos \theta}{2\rho c} m'' \left(1 - \frac{\omega^2 \sin^4 \theta}{\omega_c^2} \right) \right]^2 \right\}^{-1} \quad (10.5)$$

Formula koju daje Beranek za koeficijent transmisije homogene pregrade [Kuttruff, 2006] sadrži i dodatni član u jednačini koja se odnosi na faktora gubitaka u materijalu η :

$$\tau(\omega, \theta) = \left\{ \left[1 + \eta \frac{\omega \cos \theta}{2\rho c} m'' \frac{\omega^2 \sin^4 \theta}{\omega_c^2} \right]^2 + \left[\frac{\omega \cos \theta}{2\rho c} m'' \left(1 - \frac{\omega^2 \sin^4 \theta}{\omega_c^2} \right) \right]^2 \right\}^{-1} \quad (10.6)$$

Pod faktorom gubitaka η podrazumeva se faktor koji uključuje sve gubitke energije koji se javljaju. To su:

- gubici u samom materijalu (η_{int}),
- gubici zbog zračenja energije sa obe strane pregrade (η_z) i
- gubici energije koja odlazi u druge pregrade koje su u spajalištu u čvrstom dodiru sa direktnom pregradom (η_s).

Zbog toga je faktor gubitaka za pregradu:

$$\eta = \eta_{int} + \eta_z + \eta_s = \eta_{int} + \frac{\rho c \sigma}{\pi f_c m_s} + \frac{c}{\pi^2 S \sqrt{f f_c}} \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k \quad (10.7)$$

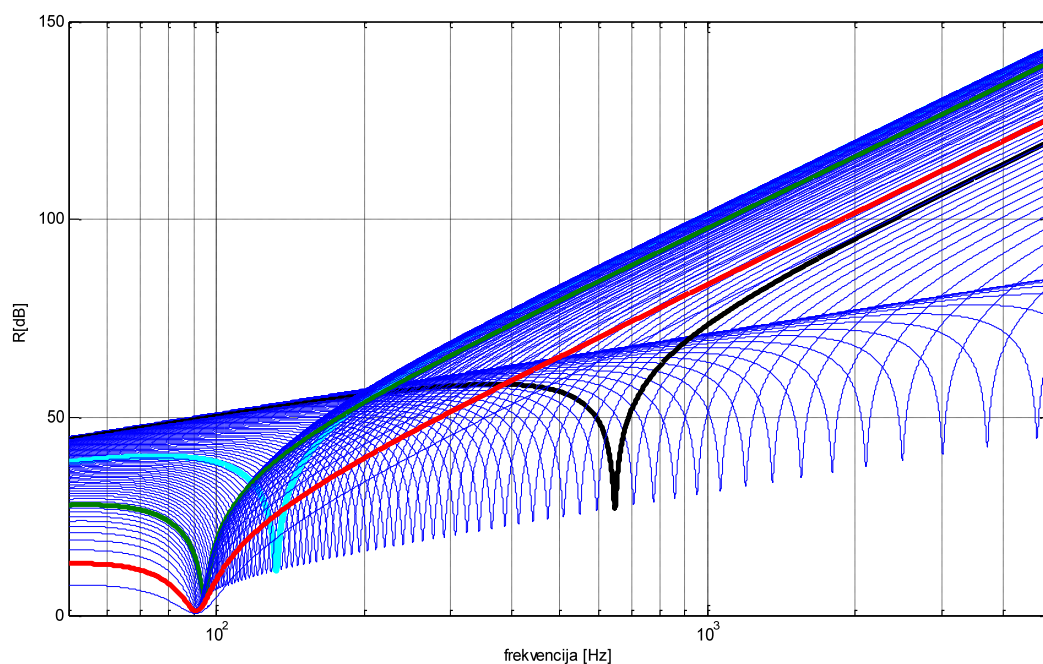
Ukupan koeficijent transmisije za jednu pregradu dat je kao suma koeficijenata transmisije za sve uglove:

$$\tau(\omega) = \sum_0^{\pi/2} p(\theta) \tau(\omega, \theta) \quad (10.8)$$

gde je $p(\theta)$ verovatnoća pogađanja pregrade pod uglom θ .

Na slici 10.1 prikazane su izolacione moći jednog pregradnog zida izračunate za različite upadne uglove. Sa grafika se vidi da za svaki upadni ugao postoji jedan

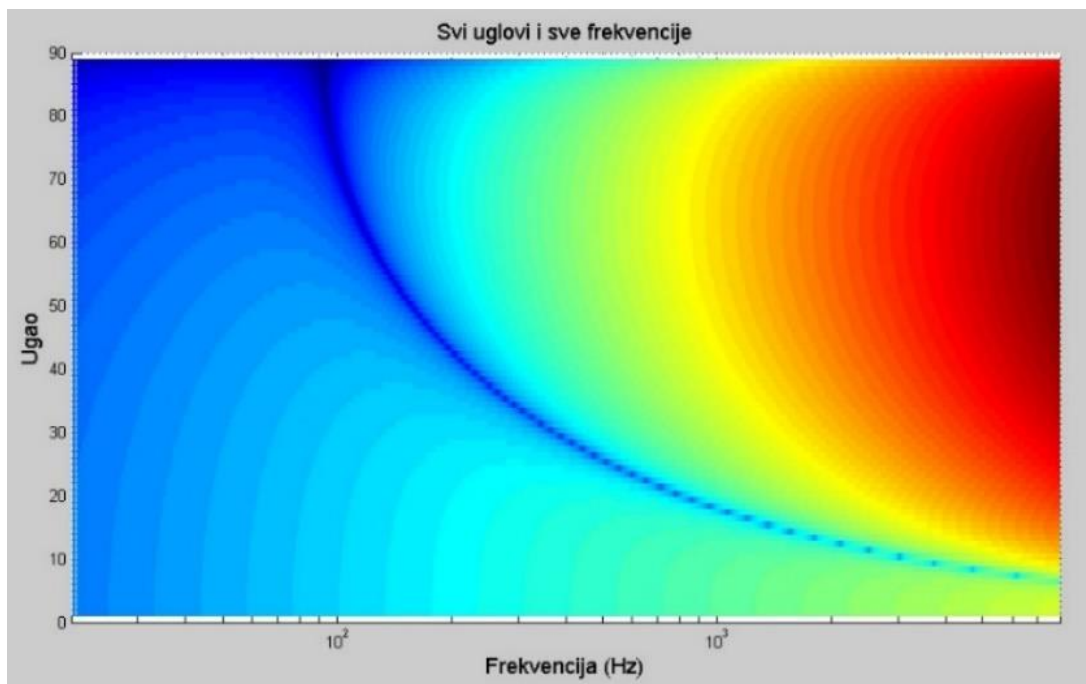
minimum koji odgovara frekvenciji koincidencije za taj ugao. Takođe, može se uočiti da postoji jedna zona u kojoj dolazi do nagomilavanja minimuma izolacione moći za veći broj uglova koji odgovara globalnom minimumu, odnosno frekvenciji koincidencije za pregradu.



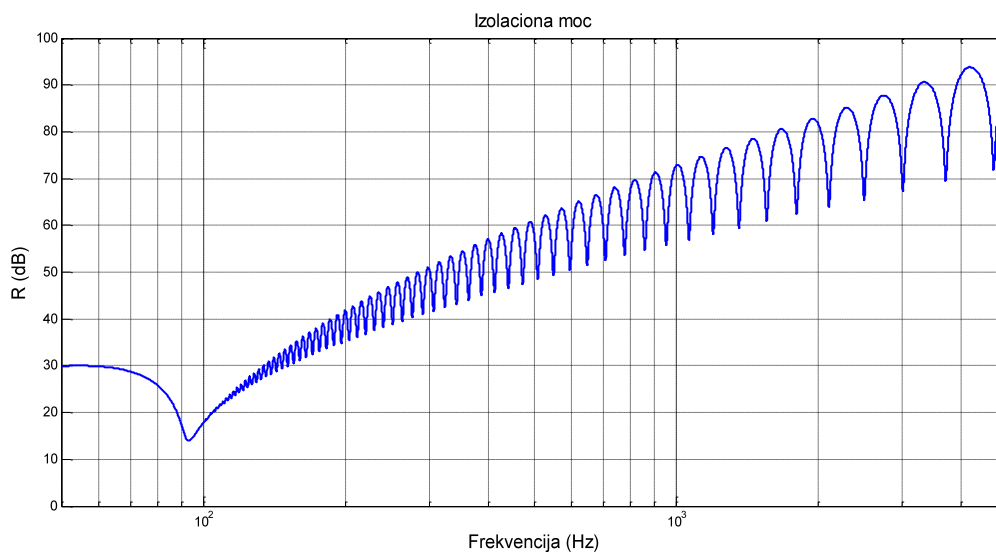
Sl. 10.1. Krive izračunatih izolacionih moći homogene jednostruke pregrade za različite uglove incidencije.

Da bi se jasnije prikazala složena zavisnost izolacione moći od dva parametra – upadnog ugla i frekvencije - na slici 10.2 prikazana je izračunata izolaciona moć homogene jednostruke pregrade za sve uglove incidencije i sve frekvencije. Vrednost izolacione moći je kodovana bojom.

Kao rezultat sabiranja izolacionih moći za sve uglove incidencije i neku prepostavljenu verovatnoću različitih uglova incidencije dobija se frekvencijska karakteristika izolacione moći koja je prikazana na slici 10.3.



Sl. 10.2. Zavisnost izolacione moći jednostruke homogene pregrade u funkciji frekvencije i ugla incidencije talasa.



Sl. 10.3. Rezultantna frekvencijska zavisnost izoalcione moći jednostruke homogene pregrade za jednu usvojenu verovatnoću uglova incidencije i faktor gubitaka.

10.2 Raspodela uglova incidencije

Da bi se utvrdila zavisnost izolacione moći jednostrukih pregrada u funkciji promene verovatnoće uglova incidencije izvršena je analiza zvučnog polja za dve

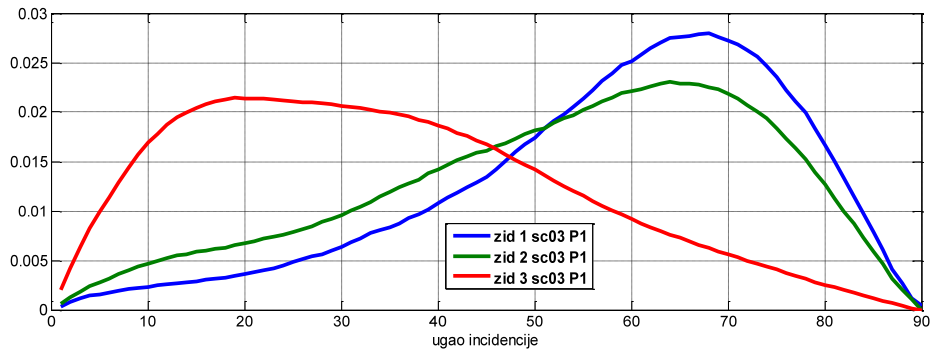
prostorije koje u osnovi imaju oblik pravougaonika. Prostorija označena kao P1 je dimenzija 5 x 4 x 2,6 m, a druga, veća prostorija označena kao P2 ima dimenzije 25 x 20 x 2,6 m. Jedna prostorija odgovara jednoj prosečnoj stambenoj ili poslovnoj prostoriji, dok je prostorija P2 izabrana sa ciljem da pokaže u kojoj meri nesrazmernost dimenzija (mala visina u odnosu na dimenzije osnove) može da promeni statističke parametre zvučnog polja u njoj.

Simulacija zvučnog polja izvršena je za svaku prostoriju za tri vrednosti sketering koeficijenta koji je uniformno dodeljen svim površinama. Osnovna ideja ovakve eksperimentalne postavke je da pokaže u kojim rasponima mogu da se očekuju odstupanja od difuznog karaktera zvučnog polja.

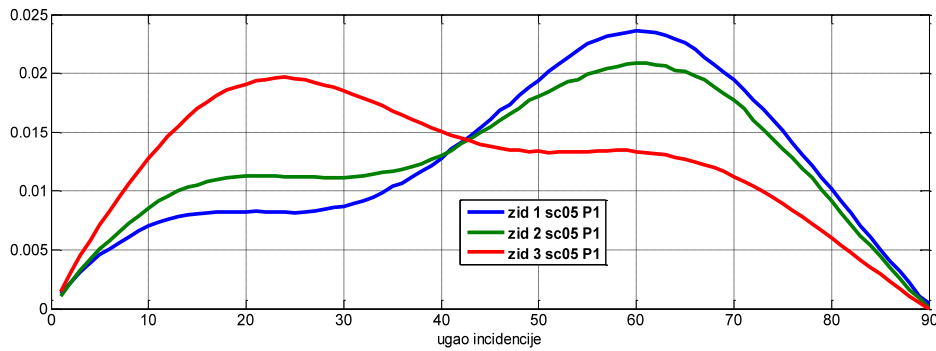
Kao izlazni parametri simulacije posmatrani su uglovi incidencije za svaku površinu kao i verovatnoće pogodaka svake površine.

Na slikama 10.4, 10.5 i 10.6 prikazane su raspodele uglova incidencije za manju prostoriju P1. Zid 1 označava manji bočni zid u prostoriji, zid 2 veći bočni zid, a zid 3 predstavlja pod i tavanicu. Slike 10.4, 10.5 i 10.6 prikazuju rezultat simulacije kada površine imaju sketering koeficijent 0,3, 0.5 i 0.8 respektivno. Na slikama 10.7, 10.8 i 10.9 po istom principu prikazane su raspodele uglova incidencije u većoj prostoriji dimenzija 20x25x2,6m.

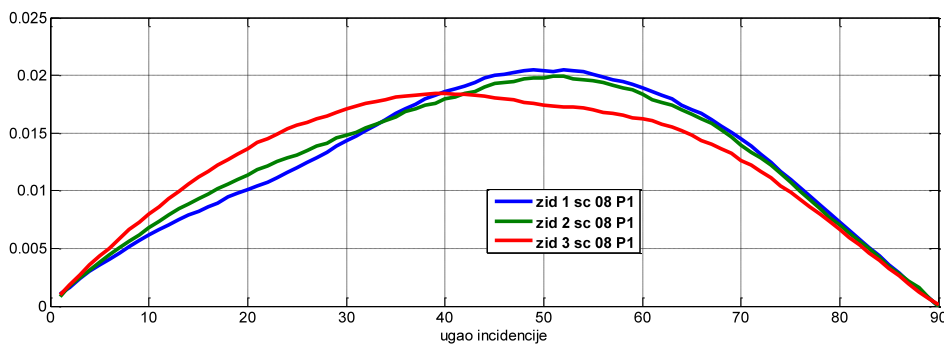
Pri malim sketering koeficijentima površina postoji značajna razlika u raspodelama uglova incidencije za površine različitih dimenzija. Uglovi incidencije za tavanicu/pod kao najveće površine u prostoriji imaju srednju vrednost u oblasti uglova od 20° kod manje prostorije dok kod veće te vrednosti se pomeraju čak ka 15°. Istovremeno tačke nagomilavanja u raspodeli uglova incidencija kod bočnih površina su u zoni 60-70°. Povećavanjem sketering koeficijenta ove dijametralno različite raspodele se približavaju pomerajući maksimume raspodela ka zoni od 40-50°.



Sl. 10.4. Raspodela uglova incidencije na tri zida u prostoriji 1 dimenzija 4 x 5 x 2,6 m, za scattering koeficijent od 0.3.



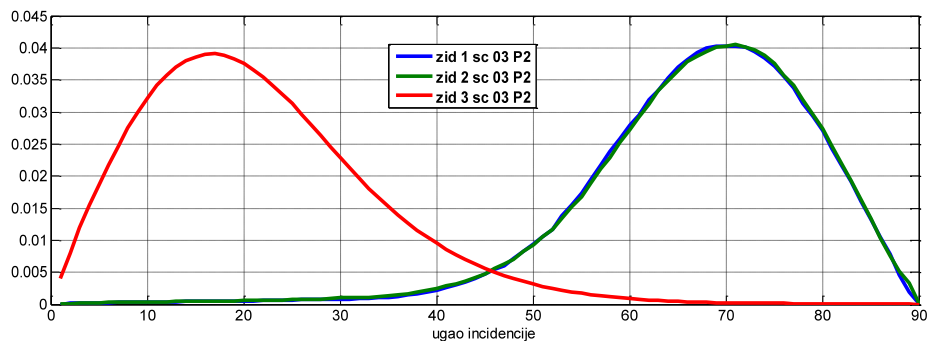
Sl. 10.5. Raspodela uglova incidencije na tri zida u prostoriji 1 dimenzija 4 x 5 x 2,6 m, za scattering koeficijent od 0.5.



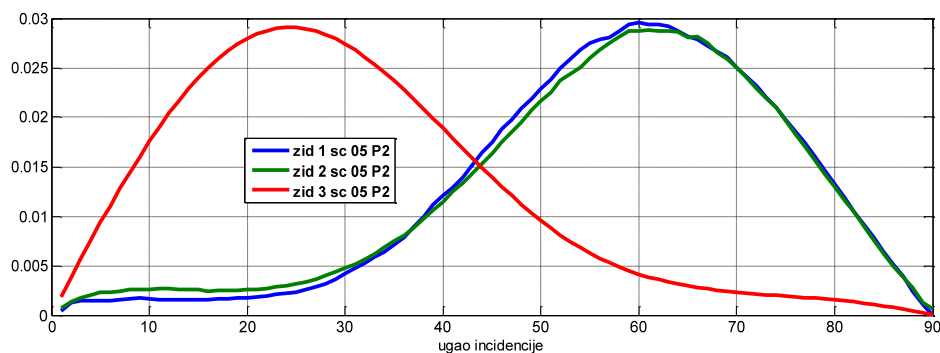
Sl. 10.6. Raspodela uglova incidencije na tri zida u prostoriji 1 dimenzija 4 x 5 x 2,6 m, za scattering koeficijent od 0.8.

Samo u uslovima relativno velike difuznosti u prostoriji moguće je pretpostaviti raspodelu koja odgovara približno sinusnoj raspodeli koja proističe iz

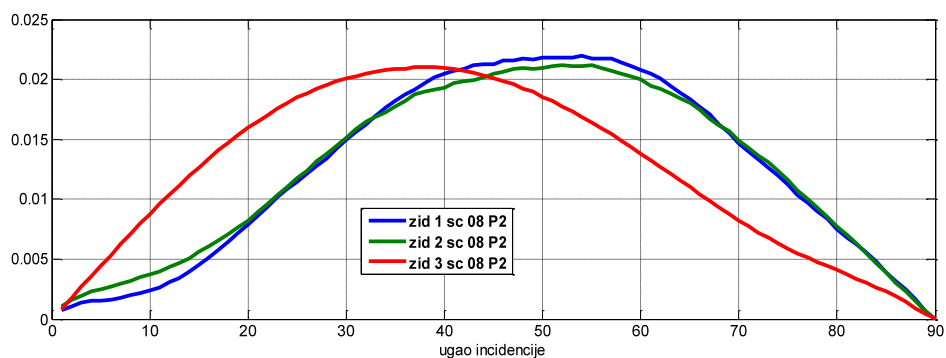
pretpostavke o jednakoj verovatnoći svih uglova incidencije. U svim realnim okolnostima raspodela odstupa od tog idealnog slučaja.



Sl. 10.7. Raspodela uglova incidencije na tri zida u prostoriji 2 dimenzija 20 x 25 x 2,6 m, za scattering koeficijent od 0.3.



Sl. 10.8. Raspodela uglova incidencije na tri zida u prostoriji 2 dimenzija 20 x 25 x 2,6 m, za scattering koeficijent od 0.5.



Sl. 10.9. Raspodela uglova incidencije na tri zida u prostoriji 2 dimenzija 20 x 25 x 2,6 m, za scattering koeficijent od 0.8.

10.3 Raspodela pogodaka po stranicama

Mala difuznost u prostoriji nema kao svoju jedinu posledicu promenu raspodele uglova incidencije koja je prikazana u prethodnom poglavlju rada. Odsustvo difuznosti dovodi do različite verovatnoće sa kojom su pojedini zidovi pogođeni zvučnim zracima.

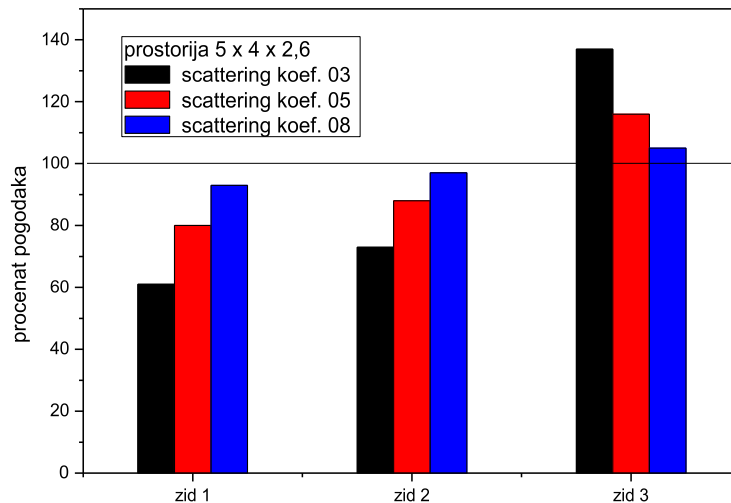
Na slikama 10.10 i 10.11 prikazan je procenat ostvarenih pogodaka na svaki od posmatranih zidova. Procenat 100% značio bi da je svaka površina pogođena srazmerno udelu koji ima svojom površinom u ukupnoj unutrašnjoj površini u prostoriji. U uslovima male difuznosti bočne stranice su sa mnogo manjim brojem zraka pogođene u odnosu na procenat površine koju zauzimaju. Sa porastom difuznosti ovaj procenat se približava 100% ali ga ne dostiže.

Ista situacija je i kod prostorije 1 i kod prostorije 2 samo je u slučaju veće prostorije ta razlika očekivanih i ostvarenih pogodaka mnogo jače izražena. Čak i u uslovima prosečne difuznosti od 0.8 bočne stranice sa značajno manjom verovatnoćom bivaju pogođene zvučnim talasima, zracima.

Osnovni izraz za proračun izolacione moći između dve prostorije na osnovu poznate izolovanosti:

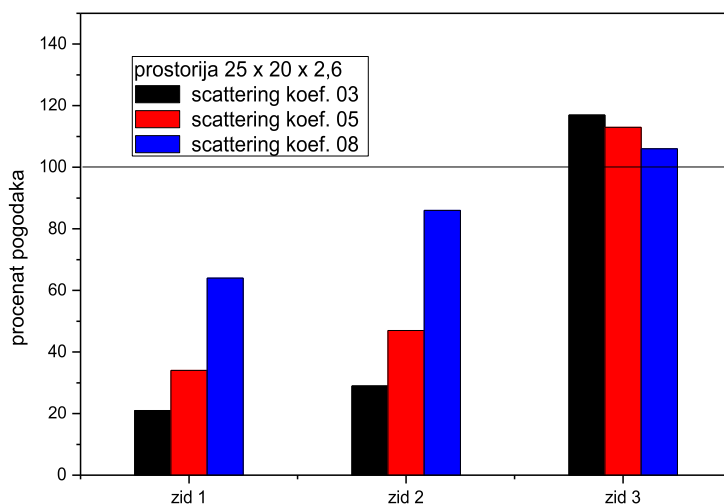
$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S_{12}}{A} \quad (7.9)$$

izveden je pod pretpostavkom da je svaka pregrada pogođena iz prostorije istom gustinom energije, što je zadovoljeno u okolnostima homogenog i difuznog zvučnog polja. Međutim, kada se uzme u obzir različita raspodela uglova incidencije i različita verovatnoća pogađanja onda proračun raspoložive snage koja pogađa svaku pregradu postaje znatno složeniji.

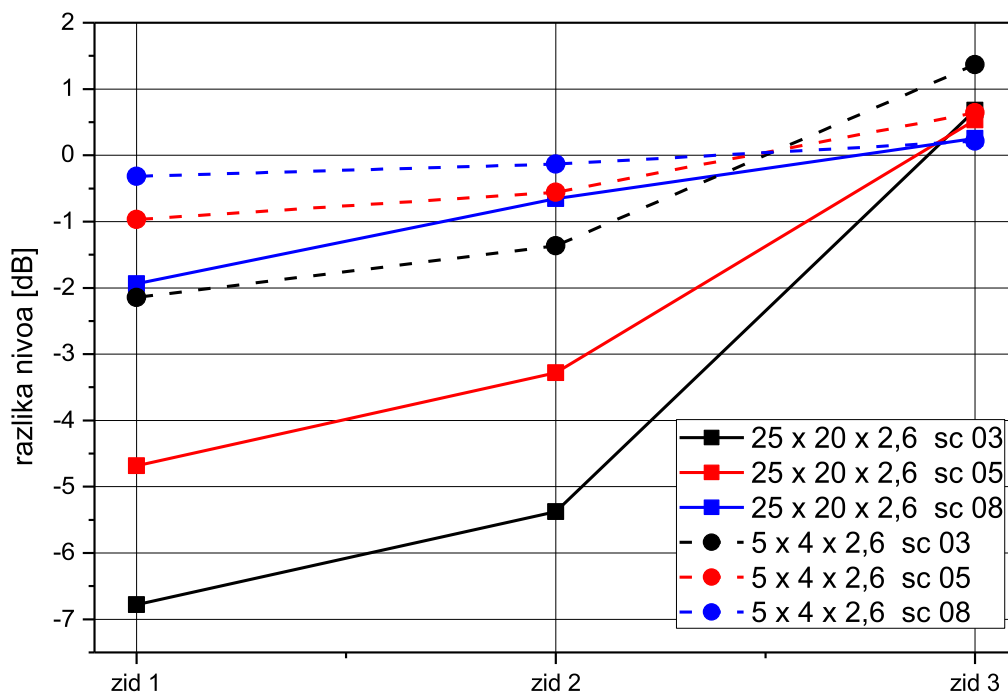


Sl. 10.10. Procenat ostvarenih pogodaka po različitim unutrašnjim površinama za slučaj prostorije dimenzija 4x5x2,6 i tri vrednosti sketering koeficijenata.

Uzimajući u obzir razliku broja pogodaka svake površine i očekivanog broja (srazmerno površini prostorije i njenom udelu u ukupnoj površini) može se doći do aproksimativne razlike u nivou zvuka koji u nekim zadatim okolnostima pogađa svaku površinu. Ova razlika je prikazana na slici 10.12.



Sl. 10.11. Procenat ostvarenih pogodaka po različitim unutrašnjim površinama za slučaj prostorije dimenzija 20x25x2,6 i tri vrednosti sketering koeficijenata.

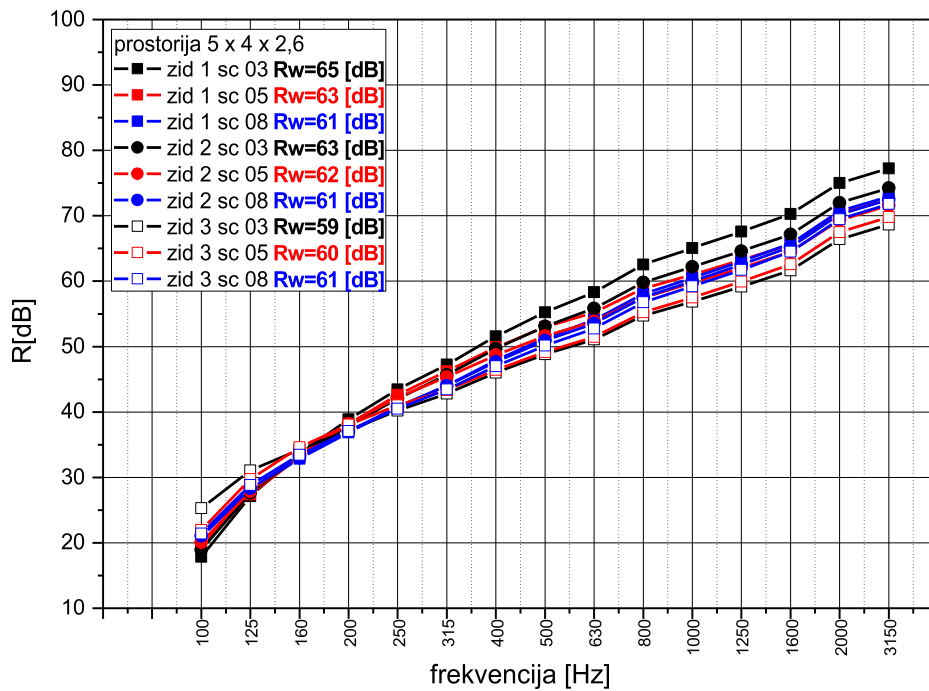


Sl. 10.12. Procena razlike u nivou zvuka koji pogađa pregradu kao funkcija verovatnoće pogađanja. Izolaciona moć jednostruke homogene pregrade.

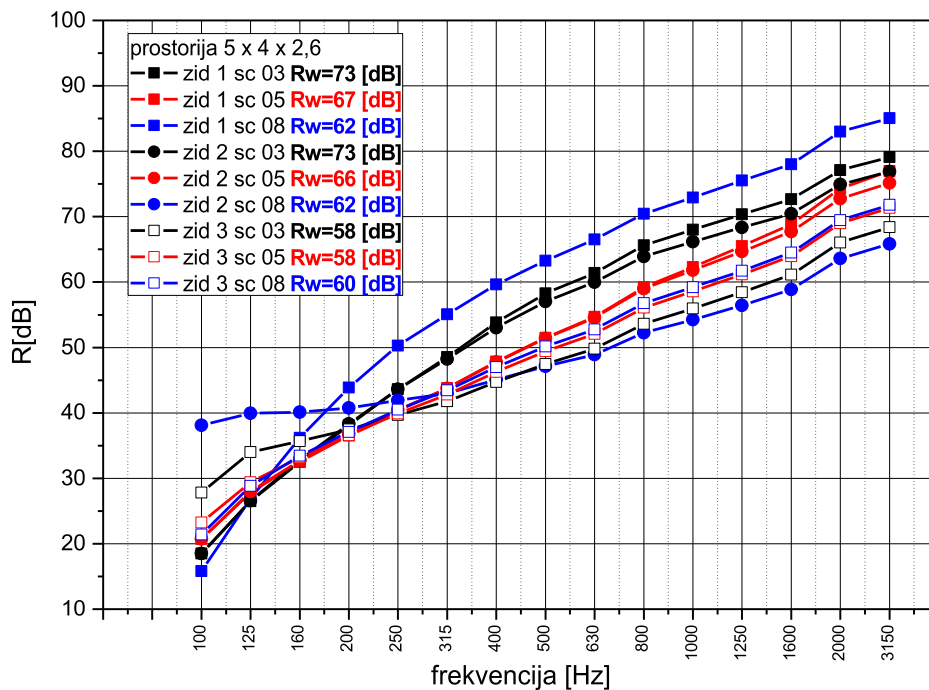
Izolaciona moć jednostruke homogene pregrade: Koristeći rezultat proračuna uglova incidencije svake površine za dve posmatrane prostorije i tri vrednosti sketering koeficijenata izračunate su izolacione moći homogene pregrade debljine 20 cm, od betona gustine 2350kg/m³ i faktora gubitaka od 0,006.

Rezultat proračuna izolacione moći za prostoriju 1 i njena sva tri zida prikazan je na slici 10.13. Na grafiku je prikazano 9 krivih koje odgovaraju različitim zidovima i različitim koeficijentima difuznosti. Izračunate merodavne izolacione moći zida istih građevinskih karakteristika variraju od 59 do 61 dB. Razlike u merodavnim izolacionim moćima zidova pri istom stepenu difuznosti su veće u okolnostima manje difuznosti i tek pri visokom stepenu difuznosti poprimaju iste vrednosti.

Isti proračun sproveden je i za prostoriju 2 i odgovarajući rezultati su prikazani na slici 10.14. U slučaju prostorije kod koje je izražena veća disproporcionalnost dužina ivica postoji znatno veće rasturanje merodavnih izolacionih moći zidova. Ono se u ovom slučaju kreće u rasponu od 58 do 73. Najmanja razlika u izolacionim svojstvima javlja se u slučaju velike difuznosti, ali ni tada ne dolazi do izjednačavanja izolacionih svojstava različitih zidova, mada su odstupanja značajno manja.



Sl. 10.13. Izolaciona moć pregradnog zida od betona debljine 20 cm za različite verovatnoće uglova incidencije u prostoriji dimenzija 5 x 4 x 2,6 m pri različitim difuznostima površina.



Sl. 10.14. Izolaciona moć pregradnog zida od betona debljine 20 cm za različite verovatnoće uglova incidencije u prostoriji dimenzija 25 x 20 x 2,6 m pri različitim difuznostima površina.

10.4 Diskusija rezultata

Razlike u terenskim izolacionim svojstvima istih pregradnih konstrukcija posledice su brojnih faktora. Neki od faktora uzimaju se u obzir pri proračunu građevinskih izolacionih moći konstrukcija. Najznačajni faktor koji utiče na terensku izolacionu moć pregrada i njeno odstupanje od laboratorijski izmerenih vrednosti je svakako razlika u faktoru gubitaka, odnosno u strukturnom vremenu reverberacije pregrade koji nastaje kao posledica načina ugrađivanja pregradnog zida i njegovog odnosa sa bočnim zidovima. U ovom primeru pokazano je da se, nezavisno od prethodno navedenih razlika, mogu očekivati razlike u terenskim vrednostima izolacione moći isključivo kao posledica različitih uslova u zvučnom polju u pobudnoj prostoriji. Različiti uslovi prostiranja zvuka u prostorijama različitih geometrijskih karakteristika mogu se kvantifikovati različitom raspodelom uglova incidencije. Posledica razlika u raspodelama manifestuju se kao razlike u izolacionim svojstvima istih pregradnih konstrukcija u rasponu od par do preko 10 dB. Dobijene razlike ne mogu se tretirati kao apsolutne vrednosti razlika u terenskim izolacionim moćima pošto one ne uzimaju u obzir još jedan fenomen prikazan u ovom primeru koji se odnosi na različitu verovatnoću pogađanja različitih površina, ali mogu poslužiti kao objašnjenje velikih razlika u izmerenim izolacionim svojstvima koja se sreću u praksi.

11 Provera tačnosti algoritma pri izračunavanju vremena reverberacije

Da bi se proverili rezultati koji se dobijaju novouvedenom metodom, opisanom u poglavlju 5, analizirani su simulirani impulsni odzivi u tri modela prostorija, korišćena u literaturi [Bojičić et al., 2017], i prikazana u poglavlju 9 na slikama 9.1, 9.2 i 9.3. Prva prostorija je jednostavnog paralelopipednog oblika. Druga prostorija je kompleksnijeg oblika. To je scenski prostor u kome su pod i plafon ravni i paralelni, a oblik u osnovi je mnogougao. Najzad, treća prostorija je geometrijski najkompleksnija. To je hala „Morača“ u Podgorici koja ima vrlo kompleksan oblik sa mnogo pojedinačnih unutrašnjih površina.

Svi prikazani modeli realizovani su tako da imaju uniformu raspodelu koeficijenta apsorpcije na površinama, i usvojeno je da to bude vrednost 0.1. Cilj toga je da se umanjuje efekat apsorpcije i tako učini prepoznatljivim uticaj geometrijskih karakteristika na tokove saobraćaja zvučne energije po prostoriji i po pojedinim površinama. Zvučno polje u modelima je simulirano za slučaj uniformne raspodele sketering koeficijenta i njegova vrednost je 0.5.

Kako bi se proverila validnost simulacije predloženom metodom, urađena je i simulacija akustičkog odziva prostorija klasičnom rej-trejsing metodom, i upoređena su dobijena vremena reverberacije [Bojičić, Mijić, 2019]. Da bi rezultati bili uporedivi, po svim oktavama površina u prostoriji dodeljen je sketering koeficijent 0.5, dok je kod simulacije klasičnom rej-trejsing metodom takođe dodeljena širokopojasna vrednost sketering koeficijenta od 0.5.

Kao referentna informacija, treba reći da su vremena reverberacija za prikazana tri modela prema Sabinovom obrascu, data u tabeli 11.1. Iako ove rezultate treba prihvatiti sa rezervom zato što Sabinov obrazac važi za uslove totalne difuznosti površina u prostoriji, a u simulaciji je usvojeno da je vrednost sketering koeficijenta 0,5, ipak ova informacija je korisna jer pruža uvid u to koliko su rezultati simulacije blizu predviđanja.

Tabela 11.1. Vremena reverberacija prema Sabinovom obrascu

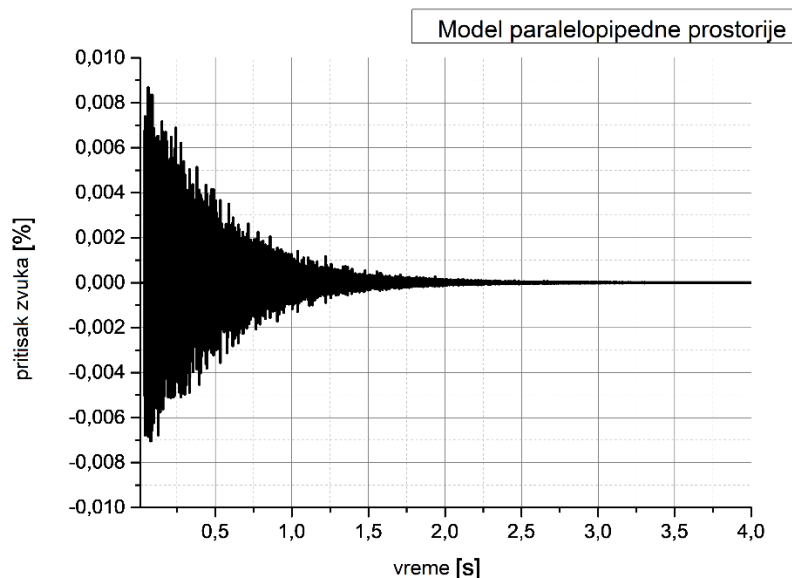
	Paraleloiped	Scenski prostor	Morača
RT₆₀ [s]	3,34	1,85	7,54

Rezultati simulacije impulsnog odziva prikazani su na slikama 11.1, 11.2 i 11.3, respektivno. Izgled rezultata predloženog metoda za proračun impulsnog odziva najbolje se može videti na prikazanim slikama. Vidi se da je u pitanju oblik pritiska zvuka, kakav se sreće u praksi pri eksperimentalnim merenjima. Upravo ovakav oblik impulsnog odziva omogućava auralizaciju.

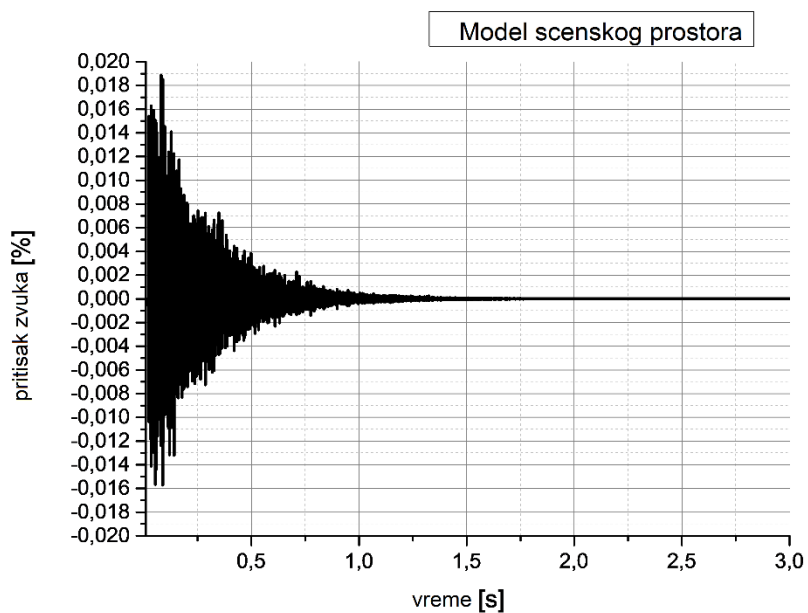
Nivo pritiska zvuka prikazan je na slikama 11.4, 11.5 i 11.6, respektivno. Kako bi se utvrdilo vreme reverberacije, izračunata je Šrederova kriva. Na ovaj način su određena vremena reverberacije prikazana u tabeli 11.2.

11.2. Vremena reverberacije prema predloženoj metodi

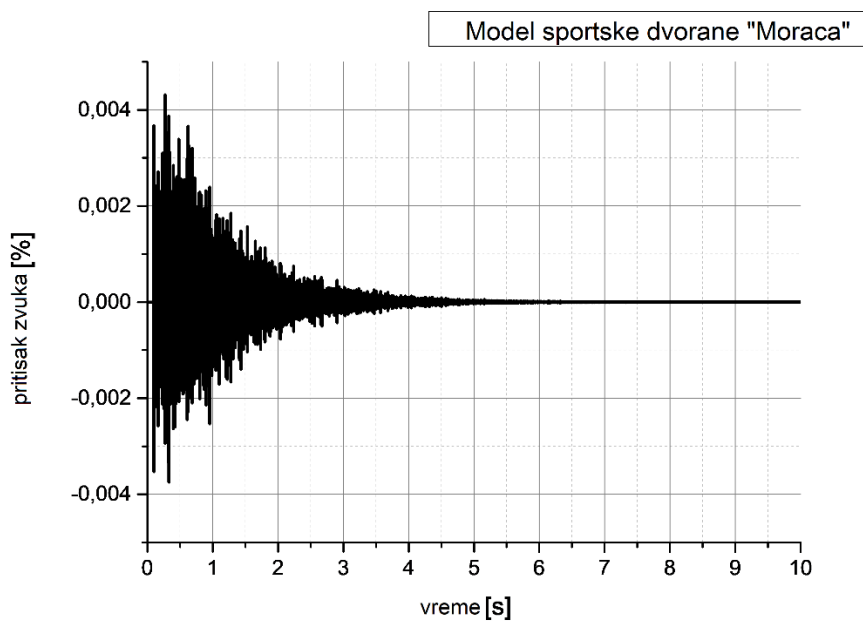
	Paraleloiped	Scenski prostor	Morača
RT₆₀ [s]	3,22	1,76	7,34



Sl. 11.1. Model paraleloipedne prostorije, impulsni odziv.



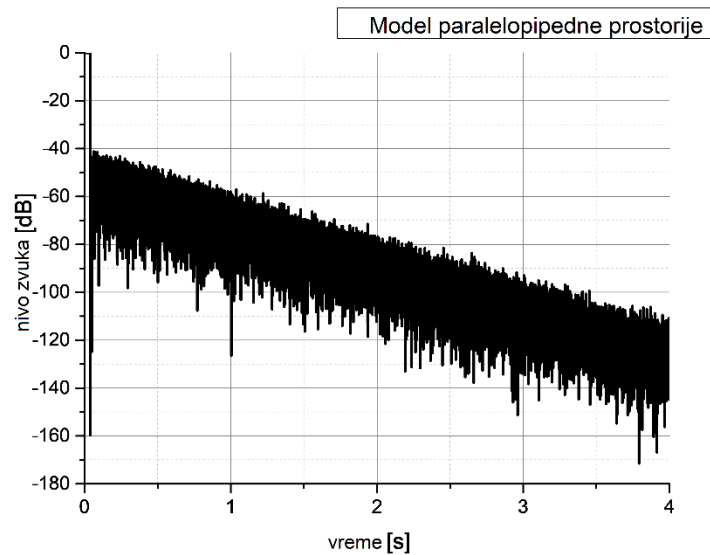
Sl. 11.2. Model scenskog prostora, impulsni odziv.



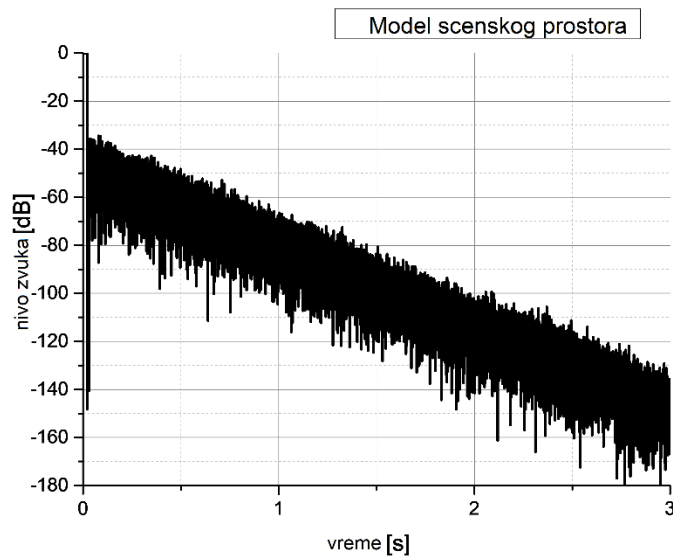
Sl. 11.3. Model sportske dvorane “Morača”, impulsni odziv.

Kako bi se utvrdilo odstupanje od simulacije klasičnom rej-trejsing metodom, urađene su simulacije i klasičnom metodom i impulsni odzivi su prikazani na slikama 11.7, 11.8 i 11.9, respektivno. Kao što se sa dijagrama na slikama vidi, odziv klasičnom rej-trejsing metodom ne liči na impulsne odzive kakvi se snimaju u

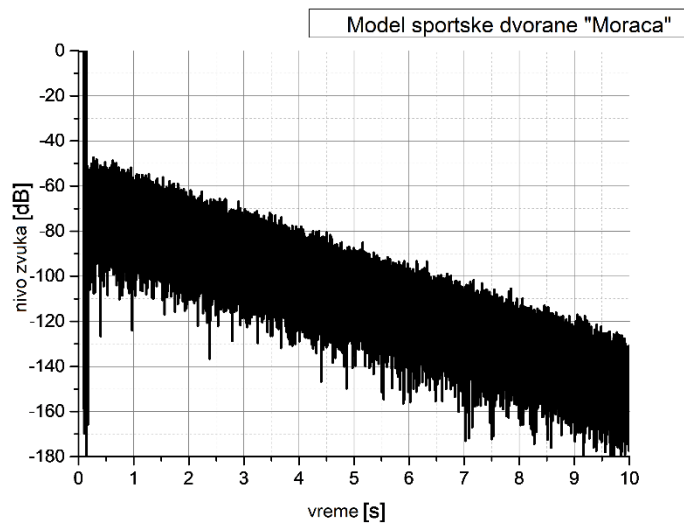
eksperimentu. Istovremeno to onemogućava auralizaciju na kvalitetan način. U tabeli 11.3 su prikazana dobijena vremena reverberacije izračunata pomoću Šrederove krive za klasičnu rej-trejsing simulaciju.



Sl. 11.4. Model paralelopipedne prostorije, nivo zvuka.



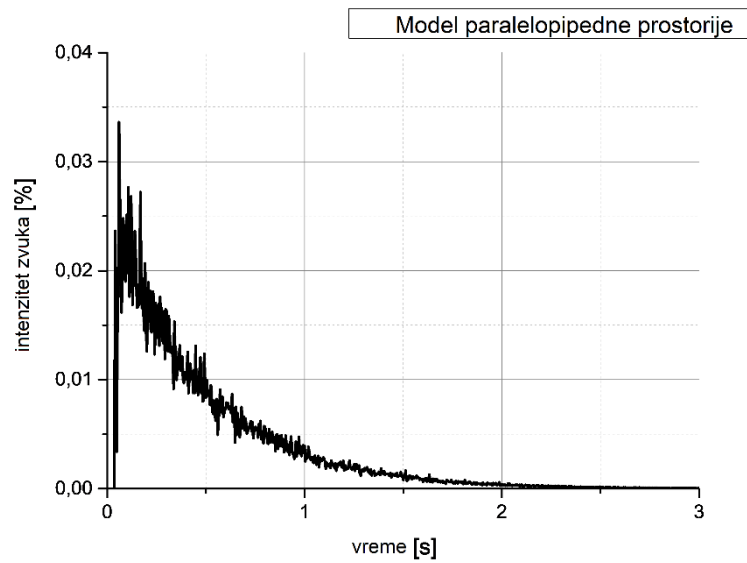
Sl. 11.5. Model scenskog prostora, nivo zvuka.



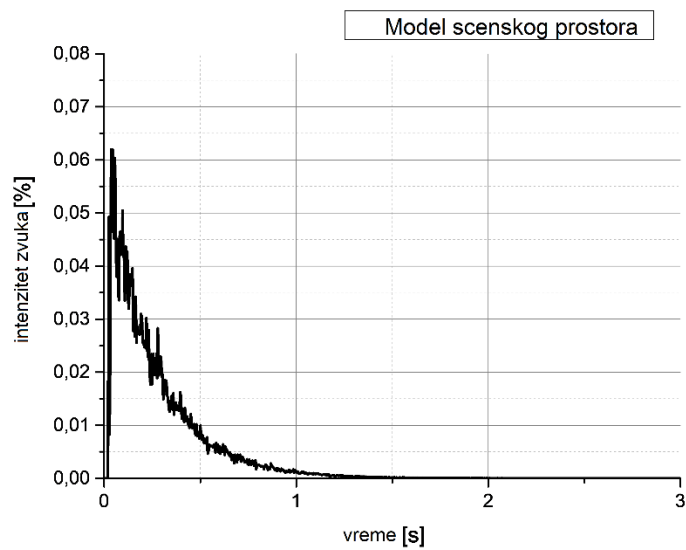
Sl. 11.6. Model sportske dvorane „Morača“, nivo zvuka.

11.3. Vremena reverberacije dobijena klasičnom rej-trejsing metodom.

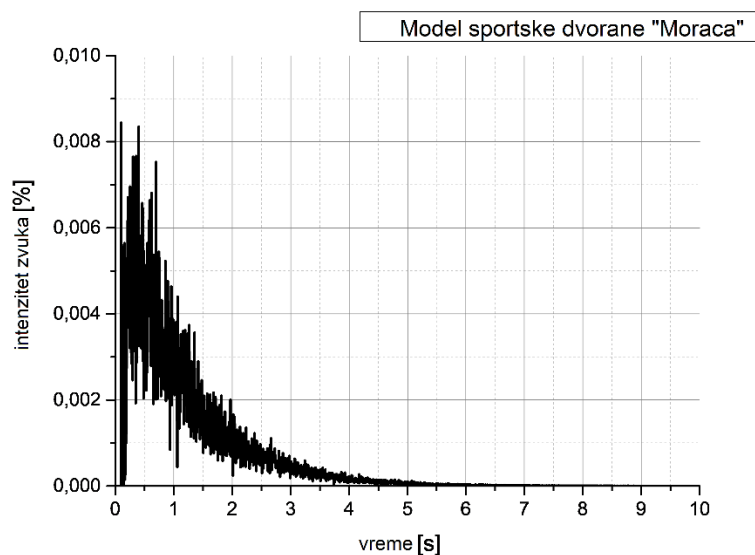
	Paraleloiped	Scenski prostor	Morača
RT60 [s]	3,26	1,77	7,33



Sl. 11.7. Model paraleloipedne prostorije, energetski odziv.



Sl. 11.8. Model scenskog prostora, energetski odziv.



Sl. 11.9. Model sportske dvorane „Morača“, energetski odziv.

Kako bi jasnije uočili razlike između vremena reverberacije proračunatih pomoću Sabinovog obrasca i računarskih simulacija, ova vremena su prikazana u tabeli 11.4.

11.4. Uporedni pregled vremena reverberacije.

RT60 [s]	Paraleloiped	Scenski prostor	Morača
Sabin	3,34	1,85	7,54
Predložena metoda	3,22	1,76	7,34
rej-trejsing	3,26	1,77	7,33

11.1 Diskusija rezultata

Na osnovu prikazanog poređenja, iako su vremena dobijena Sabinovim obrascem neznatno veća od druge dve simulacije (što se može objasniti totalnom difuznošću površina), može se konstatovati da predložena metodologija pokazuje veliko slaganje pri izračunavanju vremena reverberacije sa Sabinovim obrascem i klasičnom rej-trejsing metodom. Slušanjem generisanih impulsnih odziva na osnovu predložene metode, kao i njihovom konvolucijom sa zvučnim signalima, može se stvoriti utisak koliko dobro zvučno odražavaju prostoriju za koju su generisani.

12 Zaključak

Tema ovog rada je poboljšanje metodologije numeričkog modelovanja zvučnog polja u prostorijama pomoću rej-trejsing metode i na osnovu toga uvođenje novih mogućnosti koje dosadašnji numerički postupci za analizu polja ne omogućavaju. Cilj toga je razvoj poboljšanih softverskih alata za simulaciju zvučnog polja i predlog nekih novih numeričkih pokazatelja za kvantitativnu i kvalitativnu analizu zvučnog polja koji se ne nude u komercijalnim softverskim alatima. Pokazano je da poboljšani softverski alati razvijenu ovom radu omogućava tačniju simulaciju impulsnog odziva u slučaju parcijalnih modela, u analizi promena u impulsnom odzivu koje nastaju kao posledica geometrijskih promena na makro i mikro nivou, kao i precizniju simulaciju prvih refleksija koje su najznačajnije za subjektivni doživljaj zvučnog polja u prostorijama. Poboljšanja rej-trejsing metode detaljno su opisana u poglavlju 5, u poglavlju 6 je prikazan način realizacije softverskog alata koji koristi ta poboljšanja, a u poglavljima 7-11 pokazani su primeri primene nove metodologije modelovanja kojom je omogućen razvoj novih numeričkih pokazatelja stanja u zvučnom polju.

U akustičkom dizajnu prostora namenjenih za živa izvođenja bez upotrebe elektroakustičkih uređaja neophodno je raspolagati metodologijom za preciznu simulaciju doprinosa pojedinih površina koje imaju značaja u formiranju početnog dela impulsnog odziva, jer je to deo koji najviše utiče na subjektivni doživljaj zvučnog polja. Postojeće metode za analizu i numeričku simulaciju zvučnog polja ne pružaju dovoljno precizne podatke o pojedinačnom doprinosu svake od površina ukupnim karakteristikama zvučnog polja.

Modelovanje procesa refleksije na graničnim površinama sa reljefom najkritičniji je segment rej-trejsing simulacije u akustici. On posebno dolazi do izražaja kada se proučava impulsni odziv refleksije od samo jedne površine kompleksnih karakteristika. Taj proces se u modelovanju zvučnog polja ovom metodom definiše pomoću dva numerička parametra: koeficijentom apsorpcije i skatering koeficijentom. Prvim se kvantifikuje energetska gubitak a drugim proces raspršavanja reflektovane energije. U literaturi su opisani različiti načini za

modelovanje procesa difuznih refleksija, a energija koja odlazi u diskretnom pravcu kao rezultanta spekularne i difuzne refleksije određuje se eksperimentalno na osnovu ekstrapolacije. Koristeći poznate metode iz literature, postojeći komercijalni softveri za simulaciju zvučnog polja u prostorijama ne daju realističnu sliku celokupne energije koja sa neke difuzne površine pogađa prijemnu tačku, a u akustičkom dizajnu prostorija takav podatak je od velike važnosti u postupku dizajniranja detalja refleksionih površina koje treba da obezbede ranu energiju u impulsnom odzivu. Rezultat istraživanja u ovom radu je modifikacija načina na koji se u rej-trejsing simulaciji modeluju difuzne refleksije. Time se koriguje i postupak kojim se proračunava energija reflektovanog zvuka koja od površine odlazi u posmatranom pravcu. Predloženi postupak omogućava simulaciju zvučne energije koja u posmatranu tačku prostora stiže sa celine svake difuzne površine. Pokazano je da ta modifikacija poboljšava korelaciju između rezultata proračuna numeričkom simulacijom i rezultata realnih merenja.

U literaturi je pokazano da makro i mikro geometrijska struktura prostorija utiču na njene akustičke osobine, pa zbog toga statistički pokazatelji koji se koriste u opisivanju akustičkih osobina prostorija mogu varirati u relativno širokim granicama. Jedan od osnovnih pokazatelja koji se izračunava numeričkom simulacijom zvučnog polja je dugovremena raspodela slobodnih putanja, odakle se određuju njeni jednobrojni kvantifikatori za ocenu stanja u zvučnom polju, kao na primer srednja dužina slobodnih putanja. Poboljšani algoritam za simulaciju zvučnog polja koji je prikazan u ovom radu donosi dodatnu mogućnost praćenja u vremenu promena kratkovremene raspodele slobodnih putanja, što je označeno kao „kratkovremena srednja dužina slobodnih putanja“ i predstavlja originalni doprinos. Ova veličina se koristi u analizi zvučnog polja tako što ukazuje na neregularnosti u početnom delu impulsnog odziva koje se dešavaju u prelaznom režimu prilikom uspostavljanja stacionarne vrednosti srednje dužine slobodnih putanja. Ova opcija koja je predložena u radu omogućuje preciznije kvantifikovanje razlika koje postoje u prostorijama jednakih zapremina, ali različitih geometrijskih oblika, kao i pri variranju vrednosti koeficijenta apsorpcije i difuznosti unutrašnjih površina.

Osobine zvučnog polja u prostoriji i zvučna izolacija pregradnih zidova zavise od raspodele energije koja pogađa svaku od površina i od ugaone raspodele incidentne

energije na njima. Različiti stepeni difuznosti zvučnog polja u realnim prostorijama i geometrijska konfiguracija čine da svaka unutrašnja površina neće biti pogođena jednakom gustinom zvučne energije, a takođe će varirati i ugaona raspodela incidentne energije. To dalje znači da će isti apsorpcioni materijal na različitim pozicijama u prostoriji ispoljavati različita efektivna apsorpciona svojstva, drugačija od laboratorijski izmerenih. Simulacija zvučnog polja pomoću predloženog algoritma omogućava izračunavanje gustine energije po svakoj pojedinačnoj površini u prostoriji i raspodelu uglova incidencije na njoj. Na osnovu toga je moguće preciznije odrediti apsorpcioni i izolacioni doprinos svake površine kao i izračunavanje numeričkih parametara za ocenu difuznosti zvučnog polja. Tako se u praksi akustičkog dizajna prostorija dobija mogućnost preciznije predikcije efikasnosti mera akustičke obrade i ispoljenih izolacionih svojstava pregrada.

Krajnji rezultat simulacije akustičkog odziva rej-trejsing metodom je raspodela energije u vremenu registrovana u postavljenim prijemnim tačkama. Za potrebe auralizacije zvučnog polja neophodno je formirati audio signale impulsnog odziva koji se mogu reprodukovati slušaocima. U radu je predložena originalna metoda za modelovanje impulsnog odziva na osnovu izračunate vremenske raspodele energije u posmatranoj prijemnoj tački kao doprinos tehnologiji auralizacije zvučnog polja u prostorijama.

U nastavku su predstavljeni osnovni doprinosi ove disertacije sa kratkim analizama i buduće smernice u cilju daljeg razvoja i unapređenja predloženog algoritma. Oni se mogu izdvojiti u skup konstatacija koje prikazuju razvojni put predloženog algoritma. Glavni doprinosi ove disertacije su:

Doprinos 1: Uvedena metodologija pomoću sketering konusa objedinjuje metode likova i rej-trejsinga pomoću kosog Lamberovog zračenja, na takav način da zadovoljava slučajeve i male i velike vrednosti sketering koeficijenta.

Dok metoda likova daje kvalitetne rezultate za $s \approx 0$, rej-trejsing metoda pomoću kosog Lamberovog zračenja u tom slučaju ne daje rezultate bliske izmerenim. Obrnut slučaj je kada je $s \approx 1$ jer tada metoda likova ne daje rezultate bliske realnosti, dok metoda kosog Lamberovog zračenja ima tendenciju praćenja rezultata u koji se dobijaju u realnosti.

Doprinos 2: Razvoj originalnog analitičkog modela za simulaciju difuznih refleksija pomoću sketering konusa.

Ovaj rezultat omogućava precizniju simulaciju prvih refleksija koje sa neke površine stižu u prijemnu tačku. Zbog toga novi analitički model povećava tačnost predikcije akustičkog odziva prostorije u celini.

Doprinos 3: Uveden je način proračuna dijagrama zračenja unutar sketering konusa na osnovu brojanja generisanih zraka.

Način prikazan u ovom radu predstavlja originalni metod za određivanje dijagrama zračenja unutar sketering konusa brojanjem generisanih zraka, i koji se može primeniti na drugačije modele dijagrama zračenja. Svoju tačnost je potvrdio u slučaju potpuno difuzne refleksije, kada se kao rezultat dobija Lamberov zakon zračenja.

Doprinos 4: Uvedeno je poboljšanje u način modelovanja audio signala impulsnog odziva na osnovu izračunatog energetskeg odziva.

Postojeći modeli određivanja impulsnog odziva na osnovu vremenske raspodele energije metodom rej-trejsing u komercijalnim softverima pokazuju izvesne manjkavosti kada je u pitanju simulacija odziva od samo jedne površine, a ovde je ostvaren cilj iznalaženja numeričkog modela koji bi ujedno predstavljao i analitički dokaz tačnosti predloženog načina modelovanja.

Doprinos 5: Uvodi se novi fizički pokazatelj stanja poljna označen kao kratkovremena srednja dužina slobodnih putanja kojim se opisuje uticaj makro i mikro geometrijskih karakteristika prostorije na njen impulsni odziv

Analiza na osnovu ovog novouvedenog parametra zasnovana je na algoritmu za softversku simulaciju zvučnog polja razvijenom u ovomradu. Analiza slobodnih putanja obuhvata statističku analizu raspodele putanja kao i vremensku promenu statističkih parametara i nudi objektivne pokazatelje za kvantitativnu analizu uslova za uspostavljanje difuznog polja. Ovi parametri nude i mogućnost utvrđivanja granice oblasti ranih refleksija u impulsnom odzivu prostorije.

Doprinos 6: Uvedena je numerička analiza energije pogodaka pojedinih površina u prostoriji

Analiza raspodele gustine zvučnih talasa na različitim površinama u prostoriji omogućuje određivanje raspodele zvučne energije na pojedinim površinama u prostoriji, čime se može utvrditi akustički značaj svake od njih. Poznavanje gustine zvučne energije koja pogađa neki pregradni element koji razdvaja dva prostora omogućava precizniju predikciju izolacionih svojstava pregradnih konstrukcija u svakoj konkretnoj prostoriji.

Doprinos 7: Uvedena je numerička analiza uglova pod kojim zraci pogađaju pojedine površina u prostoriji.

Analiza uglova incidencije je značajna za procenu apsorpcionih svojstava materijala koji će oni ispoljiti u uslovima različitih makro i mikro geometrijskih karakteristika prostorija. Poznavanje uglova incidencije koja pogađa neki pregradni element između dve prostorije omogućava i precizniju predikciju ispoljenih izolacionih svojstava pregradnih konstrukcija na svakoj konkretnoj poziciji.

Ova disertacija predstavlja rezime višegodišnjeg istraživanja u oblasti modelovanja akustičkog odziva prostorije. Analiza novouvedenom metodologijom akustičkog odziva prostorije proširila je uvid u dešavanja unutar zvučnog polja u prostorijama. Na ovaj način otvorena je specifična mogućnost analize impulsnog odziva u slučaju parcijalnih modela prostorija. Predloženi algoritam uvodi određene novine u oblast akustike prostorija i dodatni alat za akustički dizajn prostorija i za analizu njihovih impulsnih odziva. Takođe su otvorene nove mogućnosti za unapređenje analize i proučavanje prelaznih pojava tokom nastajanja impulsnog zvučnog polja u prostoriji. Posebno uvođenjem novih statističkih veličina u vremenskom domenu.

Rezultati prikazani u ovoj tezi mogu biti platforma za dalja istraživanja u oblasti akustičkog dizajna prostorija. Ona mogu ići u pravcu novih metoda za optimizaciju primene apsorpcionih materijala u enterijeru, metoda za poboljšanje strukture impulsnog

odziva u slučaju kada su konstatovani izvesni akustički defekti u postojećim prostorijama, kao i u oblasti različitih primena auralizacije u akustici prostorija.

13 Literatura

- [Antani et al., 2012] L. Antani, A. Chandak, M. Taylor, D. Manocha, “Direct-to-indirect acoustic radiance transfer”, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 18(2), 261–269 (2012).
- [Antonacci et al., 2008] F. Antonacci, M. Foco, A. Sarti, S. Tubaro, “Fast tracing of acoustic beams and paths through visibility lookup”, *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.* 16(4), 812–824 (2008).
- [Alarcao, 2005] D. Alarcao, “Acoustic modelling for virtual spaces,” Ph.D. thesis, Instituto Superior Tecnico, TULisbon, Portugal, 2005.
- [Alarcao et al., 2002] Alarcao, D, Bento Coelho, J. L. Camilo, T. S., Tenenbaum, R. A., "ON THE USE OF HYBRID METHODS FOR FAST ACOUSTICAL SIMULATIONS IN ENCLOSURES", *Forum acousticum* 2002.
- [Allen, 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).
- [Allred, Newhouse, 1958] J. C. Allred and A. Newhouse, "Applications of the Monte Carlo method to architectural acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.* 30(1), 1-3 (1958).
- [Alpkocak, Sis, 2010] Adil ALPKOCAK, Malik Kemal SIS, „Computing Impulse Response of Room Acoustics Using the Ray-Tracing Method in Time Domain“, *ARCHIVES OF ACOUSTICS*, 35, 4, 505–519 (2010).
- [Antonacci et al., 2004] Fabio Antonacci, Marco Foco, Augusto Sarti, Stefano Tubaro, "Real Time Modeling of Acoustic Propagation in complex environments", *Proc. of the 7th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx'04)*, Naples, Italy, October 5-8, 2004.
- [Atal, Schroeder, 1967] B. S. Atal and M. R. Schroeder, "Study of sound decay using ray-tracing techniques on a digital computer," *J. Acoust. Soc. Am.* 41(6), 1958 (1967).

- [Baines, 1983] N. C. Baines, “An investigation of the factors which control non-diffuse sound fields in rooms”, Ph.D. thesis, University of Southampton, UK, March 1983.
- [Barron, 2009] Michael Barron, „Auditorium Acoustics and Architectural Design“, Taylor & Francis Group, 2009, ISBN 0-203-87422-6.
- [Benedetto, Spagnolo, 1984] G. Benedetto, R. Spagnolo, “A study of barriers in enclosures by a ray-tracing computer model”, *Appl. Acoust.* 17(3), 183–199 (1984).
- [Beranek, 1996] Leo Beranek „Concert and opera houses – Music, acoustics, and architecture“, Springer, New York, 1996.
- [Bertram et al., 2005] M. Bertram, E. Deines, J. Mohring, J. Jegorovs, H. Hagen, “Phonon tracing for auralization and visualization of sound”, in *Proceedings of the IEEE Visualization*, Minneapolis, MN (2005), pp. 151–158.
- [Biot, 1968] M. A. Biot, “Generalized boundary condition for multiple scatter in acoustic reflection”, *J. Acoust. Soc. Am.* 44(6), 1616–1622 (1968).
- [Biot, Tolstoy, 1957] M. A. Biot, I. Tolstoy, “Formulation of wave propagation in infinite media by normal coordinates with an application to diffraction”, *J. Acoust. Soc. Am.* 29(3), 381–391 (1957).
- [Bojičić, 2007] Srđan Bojičić, „Određivanje srednjih dužina slobodnih puteva u prostorijski korišćenjem ray tracing algoritma“, 51. ETRAN, jun 2007, Igalo, Zbornik radova, AK1.3.
- [Bojičić, 2008] Srđan Bojičić, „Savremeni algoritmi u modelovanju akustičkog odziva prostorijske pomoću rej-trejsing metode“, TELFOR 2008, novembar 25-27, Beograd.
- [Bojičić, Mijić, 2010] Srđan Bojičić, Miomir Mijić, „Jedan pristup u računarskom modelovanju akustičkog odziva prostorijske metodom rej-trejsing“, *Infoteh-Jahorina*, Vol. 9, Ref. E-I-10, p. 459-463, Mart 2010.
- [Bojičić, 2010] Srđan Bojičić, „Analiza akustičkog odziva spregnutih prostorijski dobijenog metodom rej-trejsing“, TELFOR 2010, novembar 23-25, Beograd.

- [Bojičić et al., 2017] Srđan Bojičić, Dragana Šumarac Pavlović, Ivana Ristanović, Miomir Mijić, "Analiza raspodele incidentne energije na unutrašnjim površinama prostorija pomoću softverske simulacije", ETRAN 2017, Kladovo.
- [Bojičić, Šumarac-Pavlović, Mijić, 2018] Srđan Bojičić, Dragana Šumarac-Pavlović, Miomir Mijić, „Formation of scattering characteristics for acoustical ray tracing simulation“, Archives of Acoustics, Vol 43, No 3 (2018).
- [Bojičić, Mijić, 2019] Srđan Bojičić, Miomir Mijić, „Jedan pristup u modelovanju akustičkog impulsnog odziva prostorije na osnovu ehograma“, Infoteh-Jahorina, mart 2019.
- [Borish, 1984] J. Borish, “Extension of the image model to arbitrary polyhedral”, J. Acoust. Soc. Am. 75(6), 1827–1836 (1984).
- [Briggs et al., 1999] Kevin B. Briggs, Kevin L. Williams, Michael D. Richardson, Darell R. Jackson, "Effects of changing roughness on Acoustic Scattering: Natural Changes", Naval Research Laboratory, Seafloor Sciences Branch, Stennis Space Center and Applied Physics Laboratory, University of Washington, Seattle, (SAX99) 1999.
- [Campo et al., 2000] N. Campo, P. Rissone, M. Toderi, “Adaptive pyramid tracing: A new technique for room acoustics”, Appl. Acoust. 61(2), 199–221 (2000).
- [Carslaw, 1899] H. Carslaw, “Some multiform solutions of the partial differential equations of physical mathematics and their applications,” Proc. London Math. Soc. 30(1), 121–161 (1899).
- [Christensen, 2008] Claus Lynge Christensen, "Odeon Room Acoustics Program, Version 9.1, User Manual", Industrial, Auditorium and Combined Editions, Odeon A/S, Lyngby, Denmark, January 2008. (106 pages).
- [Christensen, Rindel, 2005 a] C.L.Christensen, J.H.Rindel, "A new scattering method that combines roughness and diffraction effects", Forum Acousticum 2005, Budapest.
- [Christensen, Rindel, 2005 b] Claus Lynge Christensen, Jens Holger Rindel, "Predicting Acoustics in Class Rooms", 07-10 August 2005, Rio de Janeiro, Internoise 2005.

- [Christensen, Rindel, 2011] C.L.Christensen, J.H.Rindel, "DIFFUSION IN CONCERT HALLS ANALYSED AS A FUNCTION OF TIME DURING THE DECAY PROCESS", Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 33. Pt.2 2011.
- [Collins, 2017] Collins A. R., Mich. Tech. Articles, from <https://www.arc.id.au/FilterDesign.html>.
- [Commins et al., 2002] D. Commins, R. Pompoli, A. Farina, P. Fausti, N. Prodi, "Acoustics of teatro Degli Arcimboldi in Milano - Design, Computer and Scale Models, details, results", Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 24. Pt 2. 2002.
- [Cox, D'Antonio, 2005] Trevor J. Cox, Peter D'Antonio, „Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, design and application“, Spon Press, 2005, ISBN 0-203-57215-7.
- [Cox et al., 2006] T. J. Cox, B.-I. L. Dalenback, P. D'Antonio, J. J. Embrechts, J. Y. Jeon, E. Mommertz, M. Vorlander, „A Tutorial on Scattering and Diffusion Coefficients for Room Acoustic Surfaces“, ACTA ACUSTICA Vol. 92 (2006) 1 – 15.
- [Cremer, 1948] L. Cremer, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik: Geometrische Raumakustik (The Scientific Basis of Room Acoustics: Geometrical Room Acoustics) (S. Hirzel Verlag, Stuttgart, Germany, 1948), pp. 15–29.
- [Cremer, 1975] L. Cremer, „Vorlesungen über Technische Akustik“, Springer Verlag, New York, 1975.
- [D'Antonio, Cox, 2000] Peter D'Antonio, Trevor J. Cox, „Difusor application in rooms“, Applied Acoustics, vol 60, 2000, 113-142.
- [Davis, Fleming, 1926] A. Davis and N. Fleming, "Sound pulse photography as applied to the study of architectural acoustics," J. Sci. Instrum. 3(12), 393-398 (1926).

- [Dalenback, 1996] Bengt-Inge L. Dalenback, „Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection“, J. Acoust. Soc. Am. 100 (2), Pt. 1, August 1996.
- [Drumm, Lam, 2000] I. Drumm, Y. W. Lam, “The adaptive beam-tracing algorithm“, J. Acoust. Soc. Am. 107(3), 1405–1412 (2000).
- [Elorza, 2005] David Oliva Elorza, University of Turku, Department of Physics, "Room acoustics modeling using the ray-tracing method: implementation and evaluation", Licentiate Thesis, 2005.
- [Everest, Pohlmann, 2009] F. Alton Everest, Ken C. Pohlmann, „Master Handbook of Acoustics“, 5th Revised edition, 2009, TAB Books Inc (Verlag), ISBN: 978-0-07-160332-4.
- [Farina, 1995 a] A. Farina, "Pyramid Tracing vs. Ray Tracing for the simulation of sound propagation in large rooms", Department of Industrial Engineering, University of Parma.
- [Farina, 1995 b] Angelo Farina, "A new pyramid tracer for medium and large scale acoustic problems", Department of Industrial Engineering, University of Parma.
- [Farina, 2000] A. Farina, "Validation of the Numerical Simulation of the scattered sound field with a geometrical pyramid tracing approach", Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma.
- [Fujiwara, Nakai, Torihara, 2000] K. Fujiwara, K. Nakai, H. Torihara, „Visualization of the sound field around a Schroeder diffuser“, Applied Acoustics, vol 60, 2000, 225-235.
- [Funkhouser et al., 1998] T. Funkhouser, I. Carlbom, G. Elko, G. Pingali, M. Sondhi, J. West, “A beam tracing approach to acoustic modeling for interactive virtual environments,” in SIGGRAPH’98 Proceedings of the 25th Conference of Computer Graphics and Interactive Techniques, New York (1998), pp. 21–32.
- [Gibbs, Jones, 1972] B. M. Gibbs, D. K. Jones, “A simple image method for calculating the distribution of sound pressure levels within an enclosure”, Acustica 26(1), 24–32 (1972).

- [Gilbert, 1981] E. N. Gilbert, "An iterative calculation of auditorium reverberation," J. Acoust. Soc. Am. 69(1), 178-184 (1981).
- [Gomes, Vorlander, Gerges, 2004] M.H.A. Gomes, M.Vorländer and S.N.Y. Gerges, „Measurement and use of scattering coefficients in room acoustic computer simulations“, Acustica 2004, Guimaraes, Portugal, paper ID 61.
- [Hanyu, 2010] Toshiki Hanyu, „A framework for characterizing sound field diffusion based on scattering coefficient and absorption coefficient of walls“, ISRA 29-31 August 2010, Melbourne, Australia.
- [Hargreaves, 2000] Tristan John Hargreaves, „Acoustic Diffusion and Scattering Coefficients for Room surfaces“, Degree of Doctor of Philosophy, University of Salford, UK, 2000.
- [Haviland, Thanedar, 1973] J. K. Haviland, B. D. Thanedar, “Monte Carlo applications to acoustical field solutions”, J. Acoust. Soc. Am. 54(6), 1442–1448 (1973).
- [Heinisch, Chou, 1971] R. Heinisch, T. Chou, “Numerical experiments in modeling diffraction phenomena”, Appl. Opt. 10(10), 2248–2251 (1971).
- [Heinz, 1993] Renate Heinz, „Binaural room simulation based on an Image Source model with addition of statistical methods to include the diffuse sound scattering of walls and to predict the reverberant tail“, Applied Acoustics, vol. 38, 1993, 145-159.
- [Hidaka, Yamada, Nakagawa, 2007] T.Hidaka, Y.Yamada, T.Nakagawa, „A new definition of boundary point between early reflections and late reverberation in room impulse responses“, JASA, Vol 122, No 1 (2007) 326 332.
- [Hodgson, Nosal, 2006] Murray Hodgson, Eva-Marie Nosal, „Experimental evaluation of radiosity for room sound-field prediction“, J. Acoust. Soc. Am. 120 (2), August 2006.
- [Hunt, 1964] F. V. Hunt, Acoustics Research Laboratory, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, "Remarks on the Mean Free Path problem", The Journal of Acoustical Society of America, Volume 36, Number 3, March 1964 (JASA, Vol 36, No 3 (1964) 556-564).

- [DKImages, 2010] <http://www.dkimages.com/discover/DKIMAGES/Discover/Home/Science/Physics-and-Chemistry/Experiments/General/General-105.html>
- [Embrechts, 2016] J. J. Embrechts, "Review on the Applications of Directional Impulse Responses in Room Acoustics", The 13th French Acoustics Congress, April 11 to 15, 2016 Le Mans.
- [ISO 17497, 2004] ISO/TC 43/SC 2/WG 25: "Measurement of the random-incidence scattering coefficient of surfaces".
- [ISO 3382, 1997] ISO 3382, Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland.
- [ISO 3382, 2008] ISO 3382-2:2008, Measurement of room acoustic parameters, Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.
- [ISO 3382, 2009] ISO 3382-1:2009, Measurement of room acoustic parameters, Part 1: Performance spaces.
- [Jeon, Lee, Vorlander, 2004] Jin Yong Jeon, Sung Chan Lee, Michael Vorlander, „Development of scattering surfaces for concert halls“, Applied Acoustics 65 (2004) 341–355.
- [Jeong et al., 2008] C. H. Jeong, J. G. Ih, and J. H. Rindel, “An approximate treatment of reflection coefficient in the phased beam tracing method for the simulation of enclosed sound fields at medium frequencies,” Appl. Acoust. 69(7), 601–613 (2008).
- [Jeong, 2012] C. H. Jeong, „Absorption and impedance boundary conditions for phased geometrical-acoustics methods“, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 132(4), 2347–2358 (2012).
- [Joyce, 1978] W. B. Joyce, “Exact effect of surface roughness on the reverberation time of a uniformly absorbing spherical enclosure,” J. Acoust. Soc. Am. 64(5), 1429–1436 (1978).

- [Kamisinski, 2010] T. Kamisinski, J. Rubacha and A. Pilch, „The Study of Sound Scattering Structures for the Purposes of Room Acoustic Enhancement“, ACTA PHYSICA POLONICA, Vol. 118 (2010).
- [Kapralos et al., 2004] B. Kapralos, M. Jenkin, and E. Milios, “Sonel mapping: Acoustic modeling utilizing an acoustic version of photon mapping”, in Proceedings of the 3rd IEEE International Workshop on Haptic, Audio Vision Environment. Their Application (2004), pp. 1–6.
- [Kim, Jang, Jeon, 2011] Yong Hee Kim, Hyung Suk Jang, Jin Yong Jeon, „Characterizing diffusive surfaces using scattering and diffusion coefficients“, Applied Acoustics 72 (2011) 899–905.
- [Kleiner, Dalenback, Svensson, 1993] M. Kleiner, B.-I. Dalenback, and P. Svensson, "Auralization-An overview," J. Audio Eng. Soc. 41(11), 861-875 (1993).
- [Knudsen, 1934] V. Knudsen, "Recent developments in architectural acoustics," Rev. Mod. Phys. 6(1), 1-22 (1934).
- [Korany et al., 2001] N. Korany, J. Blauert, O. Abdel Alim, “Acoustic simulation of rooms with boundaries of partially specular reflectivity”, Appl. Acoust. 62(7), 875–887 (2001).
- [Koutsouris et al., 2013] G. Koutsouris, J. Brunskog, C.-H. Jeong, and F. Jacobsen, “Combination of acoustical radiosity and the image source method,” J. Acoust. Soc. Am. 133(6), 3963–3974 (2013).
- [Krokstad, Strom, Sorsdal, 1968] A. Krokstad, S. Strom, and S. Sorsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique," J. Sound Vib. 8(1), 118-125 (1968).
- [Krokstad, Strom, Sorsdal, 1983] A. Krokstad, S. Strom, and S. Sorsdal, "Fifteen years' experience with computerized ray tracing," Appl. Acoust. 16(4), 291-312 (1983).
- [Kudoh, Y. Aoki, N. Aoki, 1998] Yohji Kudoh, Yoshinao Aoki, Naofumi Aoki, "Investigation of Acoustical Ray-Tracing method for measurement reflective structure in Acoustical Archaeology", Proceedings of ICSP '98, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo.

- [Kurtović, 1978] H.Kurtović, „Osnovi tehničke kaustike“, Tehnička knjiga, Beograd,1978.
- [Kuttruff, 1971] H. Kuttruff, “Simulierte nachhallkurven in rechteckraumen mit diffusem schallfeld” (“Simulated reverberation curves in rectangular rooms with diffuse sound fields”), *Acustica* 25(6), 333–342 (1971).
- [Kuttruff, 1991] H. Kuttruff, "Digital simulation of concert hall acoustics and its applications," *Acoust. Bull.* 16(5), 5-8 (1991).
- [Kuttruff, 1993] H. Kuttruff, „Auralisation of Impulse responses modeled on the basis of ray-tracing results“, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 41, No. 11, 1993 November.
- [Kuttruff, 1995] H. Kuttruff, "A simple iteration scheme for the computation of decay constants in enclosures with diffusely reflecting boundaries," *J. Acoust. Soc. Am.* 98(1), 288-293 (1995).
- [Kuttruff, 2000] Heinrich Kuttruff, "Room Acoustics", Fourth edition, Taylor & Francis Group, 2000.
- [Kuttruff, 2006] H.Kuttruff, „Acoustics - An Introduction“, Taylor & Francis, NewYork, 2006.
- [Le Bot, Bocquillet, 2000] A. Le Bot, A. Bocquillet, “Comparison of an integral equation on energy and the ray-tracing technique in room acoustics”, *J. Acoust. Soc. Am.* 108(4), 1732–1740 (2000).
- [Lee et al., 1988] H. Lee, B. H. Lee, “An efficient algorithm for the image model technique”, *Appl. Acoust.* 24(2), 87–115 (1988).
- [Lehmann, Johansson, 2010] E. A. Lehmann, A. M. Johansson, “Diffuse reverberation model for efficient image-source simulation of room impulse responses”, *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.* 18(6), 1429–1439 (2010).
- [Lewers, 1993] T. Lewers, “A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics,” *Appl. Acoust.* 38(2–4), 161–178 (1993).
- [Long, 2006] Marshal Long, „Architectural Acoustics“, Elsevier Academic Press, 2006, ISBN 13: 978-0-12-455551-8.

- [Lukić, 2010] Dušica Lukić, „MERENJE KOEFICIJENTA DIFUZNOSTI REFLEKSIJA“, INFOTEH-JAHORINA Vol. 9, Ref. F-13, p. 1051-1055, March 2010.
- [Maa, 1941] D. Y. Maa, "The flutter echoes," J. Acoust. Soc. Am. 13(2), 170-178 (1941).
- [Marbjerg et al., 2015] Gerd Marbjerg, Jonas Brunskog, Cheol-Ho Jeong, Erling Nilsson, „Development and validation of a combined phased acoustical radiosity and image source model for predicting sound fields in rooms“, J. Acoust. Soc. Am. 138 (3), September 2015.
- [Maus, 1976] Robert John Maus, "Application of a ripple tank to architectural acoustics", A Thesis for the Degree Master of Architecture, The Ohio State University, 1976.
- [McGovern, 2009] S. G. McGovern, "Fast image method for impulse response calculations of box-shaped rooms," Appl. Acoust. 70(1), 182–189 (2009).
- [Mechel, 2002] F. Mechel, "Improved mirror source method in room acoustics", J. Sound Vib. 256(5), 873–940 (2002).
- [Meesawat, Hamershoi, 2002] Kittiphong Meesawat, Dorte Hamershoi, "An Investigation on the Transition from Early Reflections to a Reverberation Tail in a Binaural Room Impulse Response", Proceedings of the 2002 International Conference on Auditory Display, Kyoto, Japan, July 2-5, 2002.
- [Mehta, Mulholland, 1976] M. L. Mehta, K. A. Mulholland, "Effect of non-uniform distribution of absorption on reverberation time", J. Sound Vib. 46(2), 209–224 (1976).
- [Merkle, Mijić, 1986] M. Merkle, M. Mijić, "Some ray tracing algorithms and their comparisons", XII ICA, Toronto 1986, Proceedings, Vol II, E12-4.
- [Moore, 1984] G. Moore, "An approach to the analysis of sound in auditoria. Model design and computer implementation", Ph.D. thesis, University of Cambridge, UK, 1984.
- [Mijić, 2000 a] Miomir Mijić, "Akustika u Arhitekturi", Nauka, Beograd 2000.

- [Mijić, 2000 b] Miomir Mijić, Elektrotehnički Fakultet u Beogradu, "Akustika Pravoslavnih Crkava - Sinteza objektivnog i subjektivnog u akustičkim komunikacijama", Telfor 2000.
- [Mijić, Merkle, 1987] M.Mijić, M.Merkle, „Simulacija zvučnog polja pomoću dvodimenzionalne Ray Tracing metode“, XI simpozijum iz informatike, Jahorina '87, saopštenje 295-1.
- [Mijić, Šumarac, Bojičić, 2008] Mijić, Šumarac, Bojičić, "Variation of mean free path length over time and its effect on room impulse response", Acoustics '08, June 30 - July 4, Paris.
- [Mijić, Šumarac-Pavlović, 2003] M. Mijić, D. Šumarac-Pavlović, "Lokalni efekti u akustičkom odzivu veoma velikog zatvorenog prostora", XLVII konferencija ETRAN-a, Herceg Novi 2003, Zbornik radova 430-433.
- [Mijić, Šumarac-Pavlović, 2005] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, „Acoustic design of the Belgrade Arena hall“, FORUM ACUSTICUM, Budapest, 2005. Proceedings on CD.
- [Mijić, Šumarac-Pavlović, 2007] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, "20 godina tradicije u upotrebi fizičkih modela u akustičkom projektovanju i istraživanju u Laboratoriji za akustiku ETF", Telfor 2007.
- [Mijić, Šumarac-Pavlović, Bojičić, 2008] Miomir Mijić, Dragana Šumarac-Pavlović, Srđan Bojičić, „Vremenska promena srednje dužine slobodnih putanja u prostoriji i njeni efekti na impulsni odziv“, LII Konferencija za ETRAN, Palić, 2008, Zbornik radova AK2.3.
- [Mijić, Šumarac-Pavlović, Kurtović, 2005] Miomir Mijić, Dragana Šumarac-Pavlović, Husnija Kurtović, "Akustički dizajn hale 'Beogradske arene' ", zbornik radova 49. konferencije za ETRAN, Budva, 5-10. juna 2005, tom II.
- [Mintzer, 1950] D. Mintzer, "Transient sounds in rooms", J. Acoust. Soc. Am. 22(3), 341–352 (1950).
- [Mommertz, 2000] Eckard Mommertz, „Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces“, technical note, Applied Acoustics, vol 60, 2000, 201-203.

- [Naylor, 1992] Graham Naylor, „Treatment of early and late reflections in a Hybrid computer model for Room acoustics“, 124th ASA meeting, New Orleans, 1992.
- [Naylor, 1993] G. Naylor, "Computer modeling and auralisation of sound fields in rooms," *Appl. Acoust.* 38(2-4), 89-92 (1993).
- [Nosal et al., 2004] E. M. Nosal, M. Hodgson, I. Ashdown, “Improved algorithms and methods for room sound-field prediction by acoustical radiosity in arbitrary polyhedral rooms”, *J. Acoust. Soc. Am.* 116(2), 970–980 (2004).
- [Nironen, 2004] Heli Nironen, „Diffuse Reflections in Room Acoustics Modelling“, Master’s Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology, Espoo 2004.
- [Odeon, 2017] <http://www.odeon.dk/publications>.
- [Ondet, Barbry, 1989] A. M. Ondet and J. L. Barbry, "Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing," *J. Acoust. Soc. Am.* 85(2), 787-796 (1989).
- [Ozgur, 2003] Enis ÖZGÜR, "DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN ARCHITECTURAL ACOUSTIC DESIGN SOFTWARE", Master of Science Thesis, Dokuz Eylül University, July 2003, Izmir.
- [Pohl, Stephenson, 2014] Alexander Pohl, Uwe M. Stephenson, „COMBINING HIGHER ORDER REFLECTIONS WITH DIFFRACTIONS WITHOUT EXPLOSION OF COMPUTATION TIME: THE SOUND PARTICLE RADIOSITY METHOD“, *Proc. of the EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics*, Berlin, Germany, 3-5 April 2014.
- [Puchades, 2005] Higini Arau Puchades, „Are the scattering and the absorption coefficients two faces of the same coin?“, *Internoise 2005*, Rio de Janeiro, Brasil.
- [Rayleigh, 1945] J. W. S. Rayleigh, „The Theory of Sound“, 2nd ed. (Dover Publications, New York, 1945) (republication of the original 2nd edition in 1896 by Macmillan Company), pp. 89–96.

- [Rindel, 1993] J.H.Rindel, "Modelling the angle-dependent pressure reflection factor", Applied Acoustics 1993, Vol. 38, Issues 2-4, p. 223-234.
- [Rindel, 1995] J.H.Rindel, "Computer Simulation Techniques for Acoustical Design of Rooms", Acoustics Australia 1995, Vol. 23 p. 81-86.
- [Rindel, 1997] J.H.Rindel, „Computer Simulation Techniques for Acoustical Design of Rooms – How to treat reflections in sound field simulation“, ASVA 97, Tokyo, 2-4 April 1997. Proceedings p. 201-208.
- [Rindel, 2002] Rindel Jens Holger, "Modelling in Auditorium Acoustics - From Ripple Tank and Scale Models to Computer Simulations", Forum Acousticum, Sevilla 2002, 16-20 September.
- [Rindel, 2004 a] Jens Holger Rindel, "MODELLING THE DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF SOUND REFLECTIONS", Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2004, 8-10 June 2004, Mariehamn, Åland.
- [Rindel, 2004 b] Jens Holger Rindel, "ODEON and the scattering coefficient" ODEON Workshop, Mariehamn, Åland, Finland, 2nd June 2004.
- [Rindel, Christensen, 2003] Jens Holger Rindel, Claus Lynge Christensen, "Room Acoustic Simulation and Auralization - How close can we get to the real room?", WESPAC 8, The Eight Western Pacific Acoustics Conference, Melbourne, 7-9 April 2003.
- [Ristanović, Šumarac-Pavlović, Mijić, 2012] Ivana Ristanović, Dragana Šumarac-Pavlović, Miomir Mijić, „Priraštaj energije pri difuznim refleksijama“, ETRAN, 2012.
- [Rossing, 2007] Thomas D. Rossing, „Springer Handbook of Acoustics“, Springer-Verlag New York, 2007, ISBN: 978-0-387-30446-5.
- [Sabine, 1922] W. C. Sabine, "Theater acoustic," in Collected Papers on Acoustics (Harvard University Press, Cambridge, 1922), Chap. 7, pp. 163-198.
- [Saff, Kuijlaars, 1997] E.B.Saff, A.B.J. Kuijlaars, „Distributing many points on a sphere“, The Mathematical Intelligencer, Volume 19, Number 1, 1997, Springer-Verlag New York.

- [Savioja, Svensson, 2015] Lauri Savioja, U. Peter Svensson, „Overview of geometrical room acoustic modeling techniques“, *J. Acoust. Soc. Am.* 138 (2), 708-730, August 2015.
- [Schissler et al., 2014] C. Schissler, R. Mehra, D. Manocha, “High-order diffraction and diffuse reflections for interactive sound propagation in large environments”, *ACM Trans. Graph.* 33(4), 1–12 (2014).
- [Schroeder, Pohl, 2009] D. Schroeder, A. Pohl, “Real-time hybrid simulation method including edge diffraction,” in *Proceedings of the EAA Auralization Symposium, Espoo, Finland (2009)*.
- [Schroeder, Pohl, 2013] Dirk Schroeder, Alexander Pohl, „Modeling (Non-)uniform scattering distributions in geometrical acoustics“, *ICA 2013 Montreal, Vol. 19*.
- [Schroeder, 1959] M.Schroeder, Measurement of sound diffusion in reverberation chamber, *JASA, Vol 31 (1959) 1407-1414*.
- [Schroeder, 1970] M. R. Schroeder, "Digital simulation of sound transmission in reverberant spaces," *J. Acoust. Soc. Am.* 47[2(Part 1)], 424-431 (1970).
- [Siltanen et al., 2007] Samuel Siltanen, Tapio Lokki, Sami Kiminki, and Lauri Savioja, „The room acoustic rendering equation“, *J. Acoust. Soc. Am.* 122 (3), September 2007.
- [Sparrow et al., 1962] E. M. Sparrow, E. R. G. Eckert, V. K. Jonsson, “An enclosure theory for radiative exchange between specularly and diffusely reflecting surfaces,” *J. Heat Trans.* 84(4), 294–299 (1962).
- [Stavrakis et al., 2008] E. Stavrakis, N. Tsingos, and P. T. Calamia, “Topological sound propagation with reverberation graphs,” *Acta Acust. Acust.* 94(6), 921–932 (2008).
- [Stephenson, 1985] U. Stephenson, „Eine Schallteilchen-Computersimulation zur Berechnung der für die Hørsamkeit in Konzertsalen maßgebenden Parameter“, *Acustica*, vol.59, November 1985, No. 1.

- [Stephenson, 1996] U. Stephenson, "Quantized pyramidal beam tracing—a new algorithm for room acoustics and noise immission prognosis", *Acta Acust. Acust.* 82(3), 517–525 (1996).
- [Stephenson, 2007] Uwe M. Stephenson, „ON THE INFLUENCE OF THE CEILING PROFILE ON THE DISTRIBUTION OF THE ROOM ACOUSTICAL PARAMETERS AND THE REVERBERATION TIME“, ISRA 2007, Seville.
- [Stephenson, 2010] U. Stephenson, "An energetic approach for the simulation of diffraction within ray tracing based on the uncertainty relation," *Acta Acust.* 96(3), 516–535 (2010).
- [Stephenson, 2013] Uwe M. Stephenson, „The Effects of Scattering Surfaces and Room Geometry on the Reverberation Time and Flutter Echoes in Rectangular and Circular Rooms“, ISRA 2013, Toronto, Canada.
- [Svensson, 2002] U. Peter Svensson, „MODELLING ACOUSTIC SPACES FOR AUDIO VIRTUAL REALITY“, Proc. 1st IEEE Benelux Workshop on Model based Processing and Coding of Audio (MPCA-2002), Leuven, Belgium, November 15, 2002.
- [Svensson, Kristiansen, 2002] U. Peter Svensson, Ulf R. Kristiansen, „Computational modelling and simulation of acoustics spaces“, AES 22nd International Conference on Virtual, Synthetic and Entertainment Audio, 15-17 June 2002, Espoo, Finland.
- [Šumarac-Pavlović, 2004] Dragana Šumarac-Pavlović, Elektrotehnički Fakultet u Beogradu, "Uticaj geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv", Telfor 2004.
- [Šumarac-Pavlović, 2007] D.Šumarac Pavlović, „Uticaj geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv“, Doktorska disertacija, Beograd, 2007.
- [Šumarac-Pavlović, Mijić, 2005] Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Faculty of Electrical Engineering, Belgrade, "Distribution of free path length as an indicator of the room shape and diffusion of reflections", Forum Acousticum, Budapest 2005.

- [Šumarac-Pavlović, Mijić, 2007 a] D.Šumarac-Pavlović, M.Mijić, „An insight into the influence of geometrical features of rooms on their acoustic response based on free path length distribution“, *Acta Acustica*, Vol 92, No 6 (2007) 1012-1026.
- [Šumarac-Pavlović, Mijić, 2007 b] Dragana Šumarac-Pavlović, Miomir Mijić, „Influence of scattering coefficient of walls and ceiling on auditorium absorption in halls“, 3rd Congress of the Alps Adria Acoustics Association, 27–28 September 2007, Graz – Austria.
- [Šumarac-Pavlović, Petrović, 2009] Dragana Šumarac-Pavlović, Milan Petrović, „Uticaj opšte difuznosti na odziv u prostoriji“, *Telfor* 2009.
- [Šumarac-Pavlović, Mladić, Mijić, 2010] Šumarac-Pavlović D., Mladić S., Mijić M., „Analiza uticaja difuznih površina u prostoriji bazirana na softverskom modelovanju“, *Telfor* 2010.
- [Šumarac-Pavlović, Mijić, 2010] Šumarac-Pavlović D., Mijić M. (2010), Partial scale models as a tool in acoustic design, 1st EAA–EuroRegio, Ljubljana.
- [Šumarac Pavlović et al., 2014] Dragana Šumarac Pavlović, Filip Pantelić, Bojičić Srđan, Miloš Bjelić, "Raspodela uglova incidencije zvučnih talasa u prostorijama različitih proporcija", *ETRAN* 2014, Vrnjačka Banja.
- [Šumarac-Pavlović, Mijić, 2017] Dragana Šumarac-Pavlović, Miomir Mijić, „Elektroakustika“, *ETF*, Beograd 2017.
- [Tenenbaum et al., 2007] R. A. Tenenbaum, T. S. Camilo, J. C. B. Torres, S. N. Y. Gerges, “Hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: part 1—theoretical and numerical aspects”, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 29(2), 211–221 (2007).
- [Torres et al., 2001] R. Torres, U. P. Svensson, and M. Kleiner, “Computation of edge diffraction for more accurate room acoustics auralization”, *J. Acoust. Soc. Am.* 109(2), 600–610 (2001).
- [Tsingos, Gascuel, 1997] N. Tsingos, J. Gascuel, “A general model for the simulation of room acoustics based on hierarchical radiosity,” in *Visual Proceedings of Art Interdisciplinary Programs SIGGRAPH’97*, Los Angeles, CA (1997).

- [Tsingos et al., 2001] N. Tsingos, T. Funkhouser, A. Ngan, I. Carlbom, “Modeling acoustics in virtual environments using the uniform theory of diffraction,” in SIGGRAPH’01 Proceedings of the 28th Conference of Computer Graphics and Interactive Techniques, Los Angeles, CA (2001), pp. 545–552.
- [Twersky, 1957] V. Twersky, “On scattering and reflection of sound by rough surfaces”, *J. Acoust. Soc. Am.* 29(2), 209–225 (1957).
- [Van Maercke, Martin, 1993] D. van Maercke, J. Martin, “The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaure software”, *Appl. Acoust.* 38(2–4), 93–114 (1993).
- [Vanderkooy, 1991] J. Vanderkooy, “A simple theory of cabinet edge diffraction,” *J. Audio Eng. Soc.* 39(12), 923–933 (1991).
- [Vorlander, 1989] M. Vorlander, “Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm,” *J. Acoust. Soc. Am.* 86(1), 172–178 (1989).
- [Vorlander, 1995] M. Vorlander, "International round robin on room acoustical computer simulations," in Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway (26-30 June 1995), pp. 689-692.
- [Vorlander, 2008] Michael Vorlander, „Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality“, RWTH edition, 2008, ISBN 978-3-540-48829-3.
- [Vorlander, Mommertz, 2000] Michael Vorlander, Eckard Mommertz, „Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients“, *Applied Acoustics*, vol 60, 2000, 187-199.
- [Walsh, 1980] J. Walsh, “The design of Godot: A system for computer-aided room acoustics modeling and simulation”, in Proceedings of the 10th International Congress on Acoustics, Sydney, Australia (1980), Paper E-15.3.
- [Yamauti, 1926] Z. Yamauti, “The light flux distribution of a system of interreflecting surfaces”, *J. Opt. Soc. Am.* 13(5), 561–571 (1926).

[Yousefzadeh, Hodgson, 2012] B. Yousefzadeh and M. Hodgson, “Energy and wave-based beam-tracing prediction of room-acoustical parameters using different boundary conditions”, *J. Acoust. Soc. Am.* 132(3), 1450–1461 (2012).

Prilog A

A.1 Računarsko modelovanje omnidirekcionog izvora

U ranijim radovima u literaturi spominje se da se za računarsko modelovanje omnidirekcionog izvora koristi generator slučajnih brojeva. To znači da se pravac svakog zraka koji kreće od izvora bira slučajno. Međutim, u toku vremena se testiranjem utvrdilo, a o tome govore i podaci iz novije literature, da je bolje modelovati omnidirekcionu izvor deterministički, pomoću ekvidistantno raspoređenih tačaka na sferi [Saff, Kuijlaars, 1997]. Posebno se nesavršenost modela pomoću generatora slučajnih brojeva uočava kada je broj zraka pri simulaciji relativno mali. Tada se dešava da neki pravci budu forsirani, dok neki drugi pravci ostaju nepokriveni.

Iako se u literaturi navode i podele pomoću pravilnih geometrijskih figura, sa brojem podela koje su stepeni celog broja, kao jedan od najpraktičnijih pristupa navodi se spiralno namotavanje ekvidistantnih tačaka na sferi, koje dopušta da se broj tačaka tj. zraka pri simulaciji zadaje proizvoljno. Deo C++ koda koji ovo softverski realizuje dat je u sledećem pasusu:

```
double alfa, beta, gama;
double dlong = M_PI*(3-sqrt((float)5));
double dz = 2.0/N;
double long_2 = 0;
double z_2 = 1 - dz/2;
for(int i=0; i < N; i++)
{
double r_2 = sqrt(1-z_2*z_2);
alfa = cos(long_2)*r_2;
beta = sin(long_2)*r_2;
gama = z_2;
z_2 = z_2 - dz;
long_2 = long_2 + dlong;
}
```

pri čemu je uređena trojka (alfa, beta, gama) vektor u 3D prostoru kojim je određen pravac svakog od N zraka koji polaze od izvorne tačke.

U programu je primenjena i modifikacija pomenutog načina spiralnog definisanja pravaca zraka koji polaze od izvorne tačke. Naime, svaki put prilikom pokretanja simulacije, osa spirale se rotira pod slučajnim uglom, pomoću generatora

slučajnih brojeva, kako bi se izbeglo da pravci zraka budu stalno isti, za isti broj zraka pri simulaciji. Na ovaj način pravci zraka se pomeraju za neki proizvoljan ugao, ali su i dalje ekvidistantno raspoređeni na sferi. Kao posledica, postoje razlike u uzastopnim simulacijama koje potiču od različitih osa spirale, ali su one veoma male i ne utiču na energetski sadržaj impulsnog odziva. Međutim, kao što i kada se impulсни odziv meri u eksperimentu i postoje razlike u merenjima za iste početne uslove eksperimenta, tako se i ovde omogućava da postoje razlike na nivou statističke greške u različitim simulacijama za iste ulazne parametre programa. To je posebno bitno kod ovakvog diskretnog načina modelovanja, gde broj zraka pri simulaciji utiče na kvalitet impulsnog odziva i treba da bude adekvatno izabran naspram prostorije koja se simulira. U takvim slučajevima, poređenje nekoliko uzastopnih simulacija akustičkog odziva iste prostorije pruža poverenje u rezultate simulacije.

A.2 Računarsko modelovanje Lamberovog zračenja

Kao što je napred već objašnjeno, Lamberov zakon predstavlja zakon kojim se modeluje pojava difuzne refleksije iz tačke refleksije. To znači da je zračenje iz tačke refleksije konstantno kada se tačka refleksije posmatra iz bilo kog pravca. I sam sketering koeficijent je definisan u ovom smislu tj. da je oko posmatrača referenca u odnosu na koju se definiše zračenje. Nasuprot tome, u literaturi postoji definisan i koeficijent difuznosti, koji kao referencu uzima samu tačku refleksije, i smatra da je zračenje difuzno kada iz tačke refleksije polazi podjednaka energije u svim pravcima. Ovde je ta razlika samo napomenuta, s obzirom da se u praksi pri simulacijama uvek koristi sketering koeficijent.

U nastavku je data funkcija u C++, kojom je realizovano određivanje pravca difuzne refleksije iz tačke refleksije prema Lamberovom zakonu:

```
Vektor odredi_vektor_difuzne_refleksije(double alfa_normala, double
beta_normala, double gama_normala, double alfa_pravilno, double beta_pravilno,
double gama_pravilno, double r1, double r2, Zid presecni_zid, double presekX, double
presekY, double presekZ)
{
    Vektor vektor_difuzne_refleksije;
    double alfa_difuzno, beta_difuzno, gama_difuzno;
```

```

//određivanje x-pomoćnog pravca koji pripada zidu refleksije
double alfa_x = beta_normala*gama_pravilno - gama_normala*beta_pravilno;
double beta_x = gama_normala*alfa_pravilno - alfa_normala*gama_pravilno;
double gama_x = alfa_normala*beta_pravilno - beta_normala*alfa_pravilno;

//normalizacija intenziteta na jedinicu
double OSA_X = sqrt(pow(alfa_x, 2) + pow(beta_x, 2) + pow(gama_x, 2));
if (OSA_X == 0)
{
    //u slučaju da je intenzitet vektora x-pomoćnog pravca nula, to znači da su
    vektor normale na zid i vektor pravilne refleksije kolinearni, pa se za pravac x-
    pomoćnog pravca može uzeti bilo koji pravac u ravni zida refleksije, recimo od
    presečne tačke do jednog temena zida
    alfa_x = presecni_zid.x1 - presekX;
    beta_x = presecni_zid.y1 - presekY;
    gama_x = presecni_zid.z1 - presekZ;
    OSA_X = sqrt(pow(alfa_x, 2) + pow(beta_x, 2) + pow(gama_x, 2));
    alfa_x = alfa_x/OSA_X;
    beta_x = beta_x/OSA_X;
    gama_x = gama_x/OSA_X;
}
else
{
    alfa_x = alfa_x/OSA_X;
    beta_x = beta_x/OSA_X;
    gama_x = gama_x/OSA_X;
}

//određivanje y-pomoćnog pravca koji pripada zidu refleksije
double alfa_y = beta_x*gama_normala - gama_x*beta_normala;
double beta_y = gama_x*alfa_normala - alfa_x*gama_normala;
double gama_y = alfa_x*beta_normala - beta_x*alfa_normala;

double OSA_Y = sqrt(pow(alfa_y, 2) + pow(beta_y, 2) + pow(gama_y, 2));
alfa_y = alfa_y/OSA_Y;
beta_y = beta_y/OSA_Y;
gama_y = gama_y/OSA_Y;

//Lamberov zakon je simetričan u horizontalnoj ravni, r1 je random broj između
0 i 1
double fi_ugao = r1;
fi_ugao = fi_ugao*2*M_PI;

//Lamberov zakon ima kosinusni oblik duž vertikalne ose, r2 je random broj
između 0 i 1
double teta_ugao = acos(pow(r2, 0.5));

//pomoćni pravac

```

```

double alfa_difuzno_x = sin(teta_ugao)*cos(fi_ugao)*(-alfa_x);
double beta_difuzno_x = sin(teta_ugao)*cos(fi_ugao)*(-beta_x);
double gama_difuzno_x = sin(teta_ugao)*cos(fi_ugao)*(-gama_x);

double alfa_difuzno_y = sin(teta_ugao)*sin(fi_ugao)*alfa_y;
double beta_difuzno_y = sin(teta_ugao)*sin(fi_ugao)*beta_y;
double gama_difuzno_y = sin(teta_ugao)*sin(fi_ugao)*gama_y;

double alfa_difuzno_z = cos(teta_ugao)*alfa_normala;
double beta_difuzno_z = cos(teta_ugao)*beta_normala;
double gama_difuzno_z = cos(teta_ugao)*gama_normala;

alfa_difuzno = alfa_difuzno_x + alfa_difuzno_y + alfa_difuzno_z;
beta_difuzno = beta_difuzno_x + beta_difuzno_y + beta_difuzno_z;
gama_difuzno = gama_difuzno_x + gama_difuzno_y + gama_difuzno_z;

double norm_difuzno = sqrt(pow(alfa_difuzno, 2) + pow(beta_difuzno, 2) +
pow(gama_difuzno, 2));
alfa_difuzno = alfa_difuzno/norm_difuzno;
beta_difuzno = beta_difuzno/norm_difuzno;
gama_difuzno = gama_difuzno/norm_difuzno;

vektor_difuzne_refleksije.x = alfa_difuzno;
vektor_difuzne_refleksije.y = beta_difuzno;
vektor_difuzne_refleksije.z = gama_difuzno;
return vektor_difuzne_refleksije;
}

```

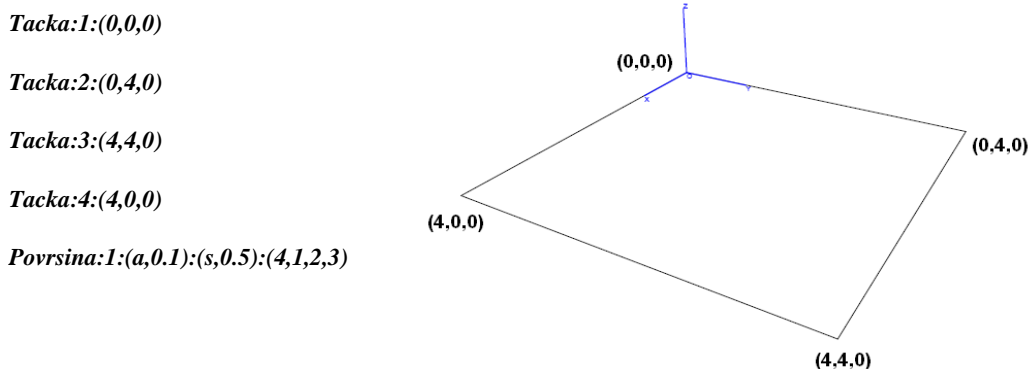
A.3 Korisničko uputstvo za realizovani softver

Da bi se pojednostavilo korišćenje napravljenog programa njegova upotreba je podeljena u nekoliko faza. Prva faza je definisanje temena prostorije i površina koje čine prostoriju. Iako su se na početku pisanja programa temena prostorije unosila direktno u uređenim Dekartovim trojkama (x,y,z) , vremenom je ovaj pristup unapređen. Ispostavilo se kao praktičnije da se temena definišu sama za sebe, a površi se onda definišu korišćenjem rednih brojeva temena. Ovaj način se koristi i u komercijalnim softverima, pa je ovako postalo moguće korišćenje i svih modela koji se nude besplatno na internetu i poređenje rezultata simulacije.

Kao ilustracija ovog postupka na slici A.1 prikazana su četiri temena koja čine jedan zid prostorije u ulaznom parametarskom fajlu *Koordinate.txt*. Kod svakog zida definiše se i njegova apsorpcija i sketering koeficijent. Da bi se uneta prostorija

pretvorila u oblik pogodan za analizu i obradu pomoću programa, potrebno je pre svega podeliti površi na trouglove, a to se postiže pomoćnim programom *Koordinate.exe*. Posle obrade navedenog fajla dobija se fajl *Zidovi.txt*, čiji je izgled prikazan na slici A.3. Kao što se vidi, četvorougao je podeljen na trouglove, koji su zadržali koeficijente apsorpcije i sketeringa kao i početna površina.

Posle podele zidova na trouglove ostalo je još da se unesu pozicije izvora i prijemnika, koeficijent apsorpcije zvuka u vazduhu i broj zraka koji će se koristiti pri simulaciji. Ove podatke potrebno je ručno uneti u fajl i ne menjati format fajla, a zatim taj fajl sačuvati pod imenom *Prostorija.txt* koji je prikazan na slici A.3. Sada je prostorija pripremljena za simulaciju.



Slika A.1. Uprošćen primer zida onako kako se unosi u ulazni fajl *Koordinate.txt*.

zid:1:(a,0.1):(s,0.5):(0,0,0):(0,4,0):(4,4,0)

zid:2:(a,0.1):(s,0.5):(4,4,0):(4,0,0):(0,0,0)

Slika A.2. Uprošćen primer izgleda fajla *Zidovi.txt*.

Sledeća faza u korišćenju softvera je pokretanje izvršnog fajla *AkustickiRejTrejsingGUI.exe*, kojim se otvara GUI za korišćenje programa. Na slici A.4 prikazane su sve raspoložive opcije programa *AkustickiRejTrejsing*.

pocetak

izvor (2,0,2)

prijemna tacka (2,4,2)

koeficijent slabljenja u vazduhu (0.003456)

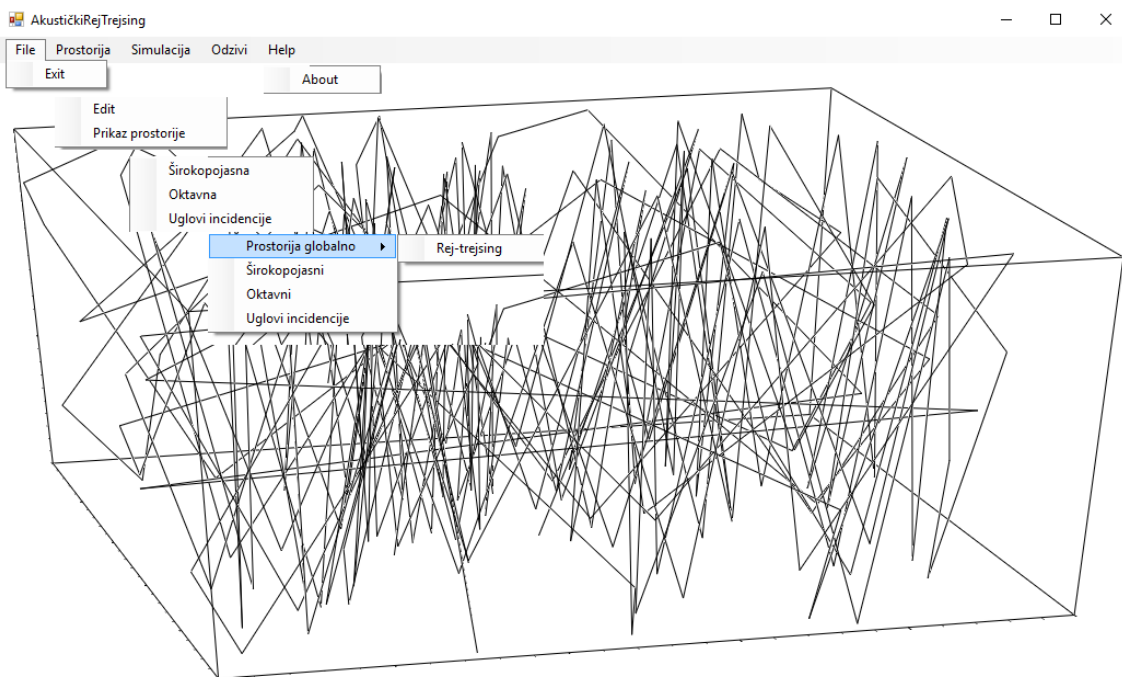
broj zraka (5000)

zid:1:(a,0.1):(s,0.5):(0,0,0):(0,4,0):(4,4,0)

zid:2:(a,0.1):(s,0.5):(4,4,0):(4,0,0):(0,0,0)

kraj

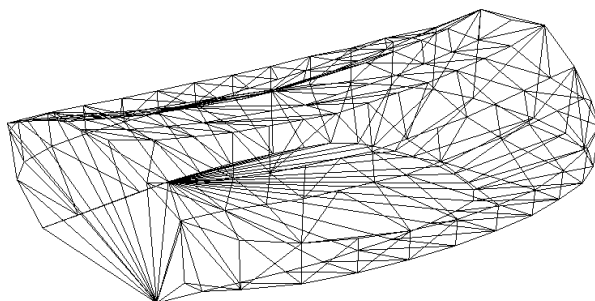
Slika A.3. Primer izgleda fajla Prostorija.txt.



Slika A.4. GUI i raspoložive opcije programa AkustičkiRejTrejsing.

Opcija *Prostorija/Edit* omogućava editovanje prostorije tj. fajla *Prostorija.txt* u tekst editoru.

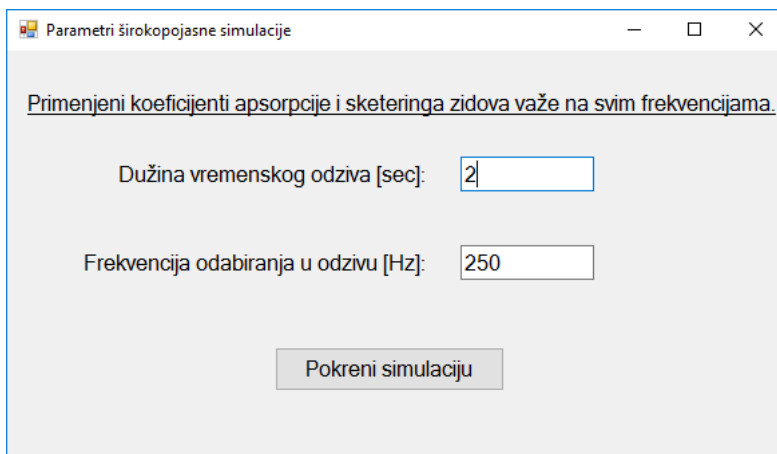
Opcija *Prostorija/Prikaz prostorije* omogućava vizuelni prikaz prostorije tj. vizuelnu kontrolu unešenih koordinata i zidova kroz fajl *Prostorija.txt*. Primer je dat na slici A.5. Opcija je realizovana korišćenjem softverskog paketa OpenGL.



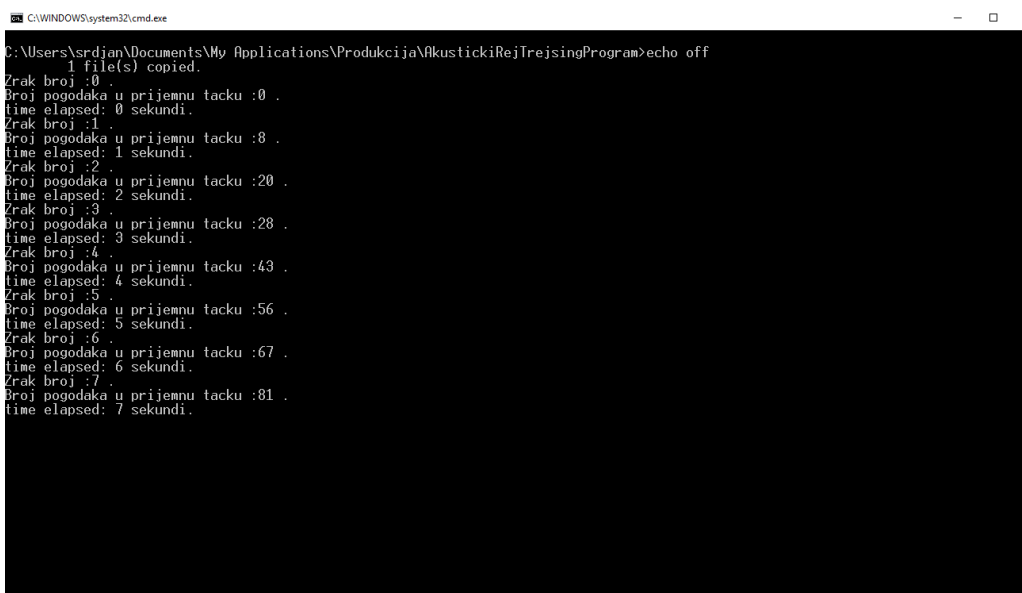
Slika A.5. Opcija Prostorija/Prikaz prostorije daje vizuelni prikaz unete prostorije. Primer na slici je uprošćen model sportskog centra „Morača“ u Podgorici [Šumarac-Pavlović, 2004].

Opcija *Simulacija/Širokopojasna*, prikazana na slici A.6, omogućuje simulaciju akustičkog odziva prostorije onako kako se to radi na klasičan način. Moguće je odabrati dužinu vremenskog odziva koji će se simulirati i frekvenciju odabiranja u odzivu, što znači da je moguće odabrati vremenski period $\Delta t = 1/f_s$ u kome će se energetske sabirati svi pogoci u prijemnu tačku. U literaturi se navodi da je dovoljno uzeti $\Delta t = 4\text{ms}$ tj. $f_s = 250\text{Hz}$. Rezultat simulacije je energija zvuka u vremenu. To znači da su dodeljeni koeficijenti apsorpcije i sketeringa pojedinačnim zidovima važeći na svim frekvencijama, širokopojasno.

Za vreme trajanja simulacije pojavljuje se komandni prozor koji ispisuje trenutak u kome se prelazi na praćenje simulacije zraka, sa prikazom broja pogodaka u prijemnu tačku, tako da je moguće proceniti koliko vremena će još trebati da se završi sa obradom. Na slici A.7 prikazan je komandni prozor koji prikazuje izvršavanje programa *AkustičkiRejTrejsing*. Da bi se pravilno procenilo koliko zraka za simulaciju je potrebno da se dobije koristan izlazni fajl, koji se zove *log.txt*, potrebno je kraće iskustvo pri radu sa programom. Osnovni pokazatelj je da gustina odziva bude dovoljna tako da ne postoje pauze u odzivu, tj. nulti odbirci. To naravno zavisi i od složenosti prostorije, tj. što je broj površina u prostoriji veći potreban je i veći izlazni fajl i više vremena za obradu.



Slika A.6. Opcija Simulacija/Širokopojasna.

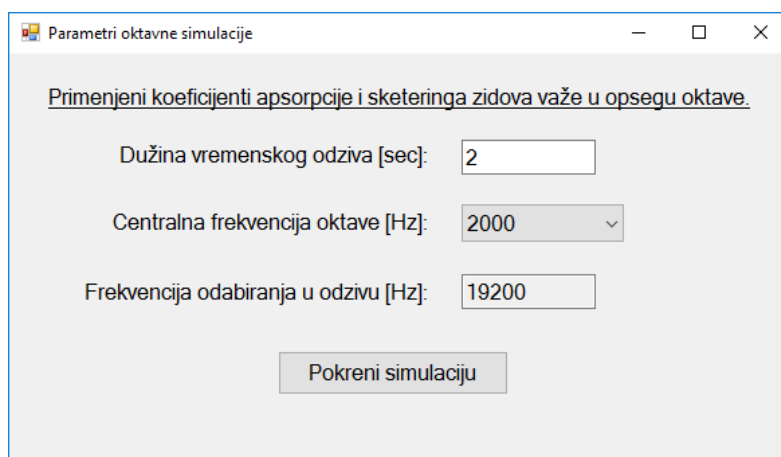


Slika A.7. Ekran koji se pojavljuje za vreme rada programa AkustičkiRejTrejsing.

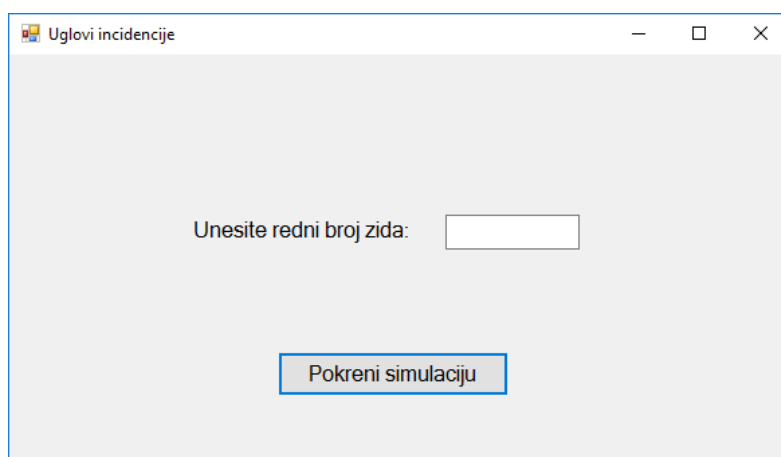
Opcija *Simulacija/Oktavna*, prikazana na slici A.8, omogućuje simulaciju akustičkog odziva prostorije po oktavama. Moguće je odabrati dužinu vremenskog odziva koji će se simulirati i centralnu frekvenciju oktave za koju važe dodeljeni koeficijenti apsorpcije i sketeringa pojedinačnim zidovima prostorije. Prikazan je i podatak o frekvenciji odabiranja u odzivu $f_s = 19200\text{Hz}$, ali njega nije moguće editovati, taj podatak je tu čisto informativno. Logika koja prati ovakav način simulacije je objašnjena u petom poglavlju i kao rezultat daje pritisak zvuka, što je najpribližnije realnom eksperimentu. Takav impulsni odziv je moguće koristiti za

auralizaciju prostorije pomoću konvolucije sa izvornim signalom. Za vreme trajanja simulacije ponovo se pojavljuje komandni prozor poput onog na slici A.7 koji omogućuje praćenje progressa.

Opcija *Simulacija/Uglovi incidencije*, prikazana na slici A.9, omogućuje za pojedinačni zid prikaz raspodele energije po upadnom uglu, od 0 do 90°. Takođe, ovom opcijom se dobija i raspodela broja zraka koji su pogodili zid po upadnom uglu, od 0 do 90°. To je nešto što je novo u odnosu na postojeće komercijalne softvere. Ova opcija se pokazuje posebno korisnom kada se posmatra doprinos pojedinačnog zida celokupnom odzivu, kao i kada treba pružiti odgovore na pitanja vezana za izolaciju.



Slika A.8. Opcija Simulacija/Oktavna.



Slika A.9. Opcija Simulacija/Uglovi incidencije.

Opcija *Odzivi/Prostorija globalno* otvara direktorijum sa rezultatima simulacije koji su opšteg tipa. To su broj pogodaka u zidove, energija pogodaka na zidovima i površina zidova. Ovi podaci se dobijaju i kod širokopojasne i kod oktavne simulacije. Često broj pogodaka zraka u zidove nije onakav kako bi se očekivalo prema površini zidova tj. da su zidovi veće površine više puta pogađani. To najčešće zavisi od položaja zida unutar prostorije. Varijacija može da ide i do nekoliko puta u odnosu na površinu zida. Ta razlika može da bude još i veća kada se posmatra energija zraka koja se predaje zidovima.

Opcija *Odzivi/Prostorija/Rej-trejsing* vodi do otvaranja fajla *Trajektorija.txt* u tekst editoru, gde je zapisana trajektorija zraka prilikom simulacije. Ponekada je korisno grafički prikazati trajektoriju zraka da bi se ispratilo da li je simulacija protekla u redu i nije došlo do pojave izletanja zraka izvan granica prostorije. Ovo je već prikazano na slici A.4.

Opcija *Odzivi/Širokopojasni* otvara direktorijum sa rezultatima širokopojasne simulacije. To su broj refleksija, broj zraka, impulsni odziv, nivo, raspodela slobodne dužine puta, vremenski usrednjena dužina slobodnog puta, energetski ponderisana vremenski usrednjena dužina slobodnog puta, Šrederov integrisani impulsni odziv. Broj refleksija predstavlja broj refleksija od zidova prostorije u vremenskom intervalu Δt koje je zrak doživeo pre nego što je pogodio prijemnu tačku. Broj zraka predstavlja ukupan broj zraka koji je pogodio prijemnu tačku u vremenskom intervalu Δt . Impulsni odziv je energetski odziv u vremenu, kako je već ranije objašnjeno. Nivo se dobija kao logaritam energetskog odziva u vremenu. Raspodela slobodne dužine puta je verovatnoća slobodne dužine puta da upadne u neki od intervala između 0 i najveće zabeležene slobodne dužine puta. Vremenski usrednjena dužina slobodnog puta se uvodi kao novi parametar i detaljnije je objašnjena u prethodnom poglavlju. Isto se odnosi i na energetski ponderisanu usrednjenu dužinu slobodnog puta. Šrederov integrisani impulsni odziv je poznat u literaturi.

Opcija *Odzivi/Oktavni* sadrži sve iste rezultate kao i opcija *Odzivi/Širokopojasni*, ali je impulsni odziv pritisak zvuka, a ne energija zvuka.

Opcija *Odzivi/Uglovi incidencije* otvara direktorijum sa rezultatima raspodele energije po upadnom uglu i raspodele broja pogodaka po upadnom uglu.

Biografija autora

Srđan (Radivoje) Bojičić rođen je 12.11.1974. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu školu i Matematičku gimnaziju sa Vukovom diplomom. Diplomirao je septembra 2001. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Odseku za telekomunikacije (smer Telekomunikacije), mentor prof. dr Milan Savić. Tema diplomskog rada bila je: „ATSC standard digitalne televizije“. Magistarske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu (Smer za telekomunikacije) završio je jula 2010. godine, nakon uspešno odbranjene magistarske teze pod nazivom: „Određivanje raspodele srednjih dužina slobodnih putanja u prostorijski korišćenjem raytracing algoritma“, mentor prof. dr Miomir Mijić.

Od septembra 2003. godine do danas Srđan Bojičić je zaposlen u Telekomu Srbija a.d. U toku svoje uspešne karijere u ovom preduzeću obavljao je niz odgovornih dužnosti. Trenutna pozicija angažovanja je Šef službe za Omnichannel.

Područje istraživačkog rada Srđana Bojičića obuhvata, između ostalog, modelovanje metodom rej-trejsing, 3D modelovanje prostorijski, programski jezici C i C++, akustika prostorijski, obrada signala, telekomunikacije, SLA. Objavljeni radovi sa SCI liste:

Srđan Bojičić, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić: „Formation of Scattering Characteristics for Acoustical Ray Tracing Simulation“, Archives of Acoustics, Vol 43, No 4, pp. 657–667, decembar 2018.

Srđan Bojičić je do sada objavio, pored navedenog rada, 9 radova na međunarodnim konferencijama i 12 radova na domaćim konferencijama.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Срђан Бојичић

број уписа 115/2001

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

„Унапређење методологије за анализу звучног поља у просторији методом реј-трејсинг“

- 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, 16.01.2019.

Прилог 2.

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

Име и презиме аутора Срђан Бојичић

Број уписа 115/2001

Студијски програм телекомуникације

Наслов рада „Унапређење методологије за анализу звучног поља у просторији методом реј-трејсинг“

Ментор др Миомир Мијић

Потписани Срђан Бојичић

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, 16.01.2019.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

„Унапређење методологије за анализу звучног поља у просторији методом реј-трејсинг“

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

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, 16.01.2019.
