

JEDAN PRISTUP U RAČUNARSKOM MODELOVANJU AKUSTIČKOG ODZIVA PROSTORIJE METODOM REJ-TREJSING AN APPROACH IN COMPUTER MODELLING OF ACOUSTIC RESPONSE OF A ROOM USING RAY-TRACING METHOD

Srđan Bojičić, Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

Sadržaj - U radu je prikazana rej-trejsing metoda i njene modifikacije u cilju pronalaženja optimalnog načina modelovanja refleksija u računarskoj simulaciji akustičkog odziva prostorija. U radu je dat jedan originalan pristup u modelovanju energije i refleksije zvuka korišćenjem metode rej-trejsing. Modelovani su sekundarni izvori zračenja pomoću konusa rasejanja, pri čemu je otvorenost konusa u funkciji koeficijenta difuznosti refleksija.

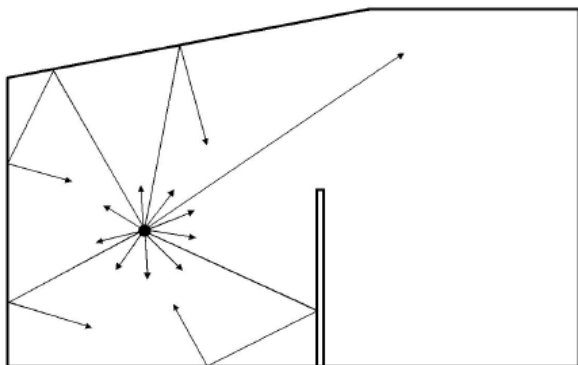
Abstract – In the paper ray-tracing method and its modifications on purpose of finding optimal method for modelling reflections in computer simulations room acoustics are shown. An original approach in modelling energy and sound reflections using method ray-tracing is given. Secondary sources are modelled using diffusion cones, and cone angle is introduced as the function of scattering coefficient.

1. UVOD

Računarsko modelovanje u akustici postoji već pola veka i rej-trejsing metoda je bila prva koja je primenjena. Iako se u osnovi algoritam rej-trejsinga nije menjao, ono što je unapređivano je način modelovanja refleksija i energije reflektovanog talasa. Tako se pojavilo nekoliko pristupa u ovoj oblasti: modelovanje zvučne energije pomoću konusa, pomoću piramida, metoda likova, pomoću Babineovog principa i drugi. Može se reći da je polje pronalaženja optimalnog metoda još uvek otvoreno. Ovde je prikazana jedna originalna modifikacija rej-trejsing metode.

2. REJ-TREJSING METODA U AKUSTICI PROSTORIJA

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 [1]. Ovaj koncept je predstavljen na slici 1, u dve dimenzije radi jasnoće, pri čemu je princip isti i u tri dimenzije.



Slika 1. Dvodimenzionalna predstava rej-trejsing metode.

Zvučni talas koga emituje zvučni izvor modeluje se određenim, konačnim brojem zraka koji predstavljaju nosioce zvučne snage (ili energije, ili intenziteta zvuka). Svaki od

ovih N zraka nosi $1/N$ -ti deo zvučne snage izvora. Ovi zraci putuju kroz prostor brzinom zvuka i reflektuju se pri svakom sudaru sa zidovima prostorije. Za to vreme njihova se energija smanjuje kao posledica apsorpcije zvuka u vazduhu i usled apsorpcije zvučne energije prilikom refleksije od zidova. Kada zrak prođe kroz određenu zapreminu u prostoru, koja predstavlja prijemnik (prijemna sfera), izračunava se energija koju registruje prijemnik i taj podatak se čuva za dalju obradu. Od sačuvanih podataka se izračunava impulsni odziv prostorije, a iz njega svi relevantni akustički parametri.

Ako je zvučni izvor omnidirekcionni, pravci prostiranja virtuelnih zvučnih zraka se određuju na osnovu uniformne slučajne raspodele. Takođe je moguće modelovanje i drugačijih usmerenosti zvučnog izvora. Tada se na osnovu usmerenosti zvučnog izvora određuje 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 u prostoriji određivati jednu presečnu. Poželjno je da algoritam bude što brži kako bi mogle da se obrade i složene prostorije sa velikim brojem unutrašnjih površina. Posle određivanja presečnog zida i određivanja pravca nove refleksije, potrebno je proveriti da li zrak preseca prijemnu zapreminu.

Energija koju registruje prijemna sfera direktno zavisi od dužine pređenog puta unutar prostorije, kao i od dužine puta unutar same prijemne zapremine. Slabljenje energije izračunava se saglasno veličini faktora apsorpcije zvuka u vazduhu i dužini pređenog puta od izvora do prijemnika, i srazmerno veličini apsorpcije zvuka prilikom refleksije od zidova. Novi pravac prostiranja zraka, posle refleksije od zida, može se odrediti na dva načina:

(1) na osnovu pravilne geometrijske refleksije, Snellovog zakona, pri čemu se smatra da je upadni ugao zraka u odnosu

na normalu na zid, jednak odbojnom uglu zraka u odnosu na istu tu normalu.

(2) može se smatrati da su svi pravci refleksije zraka mogući, tj. da se zraci difuzno reflektuju.

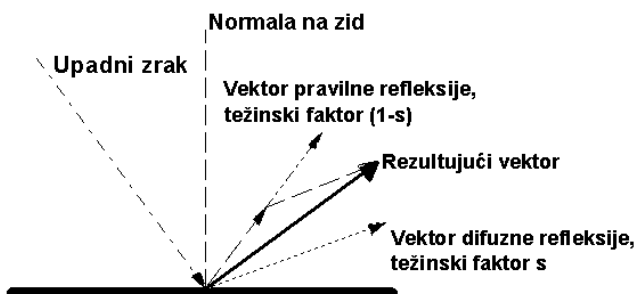
3. VEKTORSKO MODELOVANJE REFLEKSIJA

Rasejanje zvuka prilikom refleksije od površine može se kvantifikovati pomoću koeficijenta difuznost refleksija s , koji je potrebno odrediti za svaku površinu ponaosob. To znači da je svakoj površini u modelu, osim koeficijenta apsorpcije zvuka α , potrebno dodeliti još jedan parametar kojim se definiše reljefnost te površine i naziva se koeficijent difuznosti refleksija s . Koeficijent difuznosti refleksija je odnos između energije koja je prilikom refleksije izračena prema Lamberovom zakonu [2] tj. Difuzno, i ukupne energije koja je izračena prilikom refleksije:

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

gde je reflektovana difuzna zvučna snaga označena sa P_{scat} , ukupna reflektovana zvučna snaga sa P_{refl} , α je koeficijent apsorpcije date površine, a P_{inc} je ukupna upadna zvučna snaga koja pogađa zid. Očigledno je da će ostatak energije koji se ne reflektuje difuzno biti izračen pravilnom geometrijskom refleksijom $P_{prav} = (1-s)(1-\alpha)P_{inc}$.

Efikasan način da se u računarski model refleksije zvuka prilikom nailaska na zid prostorije uključe obe pomenute vrste refleksije je vektorsko modelovanje refleksije. Prema ovom modelu pravac reflektovanog zraka određuje se sabiranjem vektora pravilne refleksije skaliranog faktorom $(1-s)$ sa vektorom difuzne refleksije skaliranog faktorom s , slika 2.

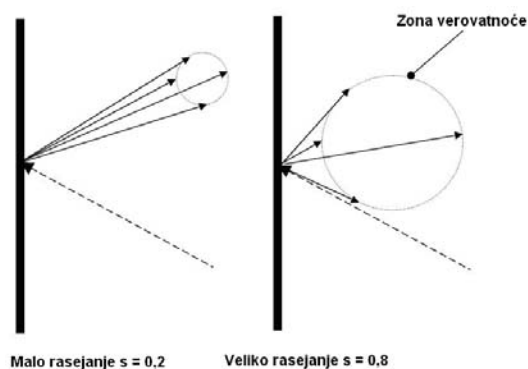


Slika 2. Vektorsko modelovanje refleksije.

U slučaju da je $s = 0$, zrak će se reflektovati isključivo pravilnom geometrijskom refleksijom, dok u slučaju da je $s = 1$ zrak će se u potpunosti reflektovati difuzno. U svim ostalim slučajevima rezultantni vektor se dobija jednačinom:

$$\vec{v}_{rez} = (1 - s) \vec{v}_{prav} + s \vec{v}_{dif} \quad (2)$$

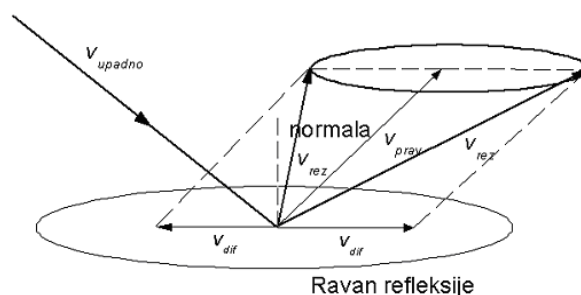
Što je koeficijent difuznosti refleksije s veći, to je zona verovatnoće u kojoj se može naći zrak prilikom refleksije šira. Ovo je ilustrovano na slici 3.



Slika 3. Zona verovatnoće u kojoj se može naći reflektovani zrak u zavisnosti od veličine koeficijenta difuznosti refleksije.

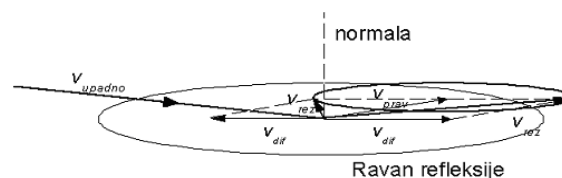
4. JEDAN PRISTUP REJ-TREJSING METODI

Posmatrajući vektorsko modelovanje refleksije i sliku 2, primećuje se da se rezultujući vektor nalazi u oblasti konusa definisanog zbirom graničnih vektora difuzne refleksije, kada se oni nalaze baš u ravni zida, i vektora pravilne refleksije. Otvorenost tog konusa (u ovom radu će se za opisani konus koristiti naziv "konus rasejanja"), tj. veličina prostornog ugla zahvaćenog ovim konusom, je određena veličinom koeficijenta difuznosti refleksija s . Što je koeficijent s veći, konus je više otvoren, slika 4.



Slika 4. Konus rasejanja.

Ako se posmatra konus rasejanja, prednost se ogleda u tome što nije potreban nikakav korekcionni faktor za energiju kao kod modelovanja pomoću kosog Lamberovog zakona [4], zato što se difuzna energija zrači unutar konusa koji se čak i u graničnom slučaju nagnutosti ose sekundarnog izvora od 90° nalazi ceo unutar prostorije, slika 5.



Slika 5. Granični slučaj nagnutosti ose kosog Lamberovog izvora u interpretaciji modela "konusa rasejanja". Čak i tada, cela energija difuzije zvučnih zraka ostaje unutar prostorije.

Postavlja se pitanje: Koju usmerenost zvučnog izvora dodeliti sekundarnom izvoru koji zrači samo unutar konusa rasejanja? Najjednostavnije je dodeliti uniformni zakon raspodele zračenja unutar konusa, dok je van konusa rasejanja zračenje jednako nuli, tj. ne postoji.

5. PRORAČUN ENERGIJE SEKUNDARNIH ZRAKA

U ovom radu se smatra da su koeficijenti rasejanja svih površina u modelu unapred poznati. Prilikom svake refleksije, korišćen je princip konusa rasejanja, slika 4. To znači da se pravac refleksije određuje kao vektorski zbir vektora pravilne refleksije zraka i vektora difuznosti refleksija, generisanog kao slučajna veličina prema Lamberovom zakonu difuzne refleksije. Tako generisan pravac predstavlja pravac refleksije primarnog zraka. Prilikom svake refleksije konstruiše se i konus rasejanja koji predstavlja granicu unutar koje je moguće generisati sekundarni zrak. Ovaj konus rasejanja ima dvojaku namenu:

(1) Određuje oblast prostora u kome postoji zvučna energija koja potiče od refleksije zraka od površine. Ako se prijemna sfera nalazi unutar prostora definisanog konusom rasejanja i postoji optička vidljivost onda će prijemna sfera primiti manji ili veći deo zvučne energije sadržane u konusu. Razumljivo, celokupna reflektovana energija je data izrazom:

$$P_{refl} = (1 - \alpha)P_{inc} \quad (3)$$

gde je P_{refl} ukupna reflektovana zvučna snaga koja je sadržana unutar konusa rasejanja, α koeficijent apsorpcije zvučne energije date površine, i P_{inc} ukupna upadna zvučna snaga.

(2) Definiše količinu energije koju apsorbuje prijemna sfera. Ona je srazmerna veličini prostornog ugla pod kojim se vidi prijemna sfera iz tačke refleksije, dok je obrnuto proporcionalna veličini prostornog ugla zahvaćenog konusom rasejanja. Ovo se može opisati sledećom relacijom:

$$P_{rec} = \frac{\omega}{\Omega} P_{refl} \quad (4)$$

gde je P_{rec} snaga koju apsorbuje prijemna sfera, ω prostorni ugao pod kojim se vidi prijemna sfera iz tačke refleksije, Ω prostorni ugao otvorenosti konusa rasejanja, a P_{refl} ukupna snaga refleksije. Na ovaj način je implicitno uvedena pretpostavka da se zvučna energija uniformno zrači unutar konusa rasejanja. Takođe, ovo je dobar način da se uključi rastojanje prijemne sfere od tačke refleksije u proračun energije. Što je prijemna sfera udaljenija ona se vidi pod manjim prostornim uglom iz tačke refleksije, i time dobija i manji deo zvučne energije.

6. ODREĐIVANJE BIPOLARNOG IMPULSNOG ODZIVA

Iako se u literaturi mogu pronaći generalni opisi same metode rej-trejsing, kao i principi modelovanja rasejanja zraka prilikom refleksije od neravne površine, konkretni načini proračuna energije i način dobijanja bipolarnog impulsnog odziva se ne prikazuju. Najdalje u otkrivanju načina proračuna intenziteta energije zraka odlazi rad [3], koji otkriva način modelovanja intenziteta zvučne energije zraka koji pogađa prijemnu sferu, jednačina (5).

$$I_{i,rec} = \frac{P_{i,rec} \cdot d_{ri}}{V_{rec}} \quad (5)$$

gde je $P_{i,rec}$ snaga i -tog zraka pri nailasku na prijemnu sferu, V_{rec} zapremina prijemne sfere i d_{ri} rastojanje koje zrak pređe

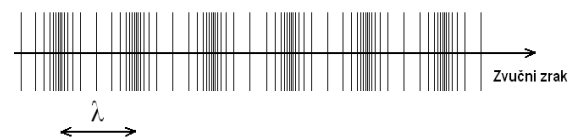
unutar prijemne sfere.

Osim ovoga rada, veoma korisnim se pokazao Help u demo verziji programskog paketa ODEON, koji se može besplatno učitati sa interneta i instalirati. U njemu je objašnjeno pod opcijom "Auralisation/Setup/Phase approximation" da ako se odabere opcija "Random" dobija se bipolarni impulsnog odziv kao izlaz programa, dok ako se izaberu druge opcije dobija se unipolarni odziv. Kod opcije "Random" ideja je bila da se eliminiše jednosmerna komponenta odziva. To se postiže time što svaka izlazna veličina impulsnog odziva dobija na slučajan način pozitivan ili negativan predznak. Na taj način je obezbeđeno da odziv nema jednosmernu komponentu.

Drugi iskorak ka bipolarnom odzivu je bio prelazak sa intenziteta energije zraka na pritisak zvučne energije zraka. Do ovog rezultata se došlo samostalnim istraživanjem, jer je tu vezu jednostavno bilo nemoguće pronaći u literaturi. Potvrda tačnosti izvedene veze i razmišljanja se dobijena je tek na kraju, upoređivanjem dobijenih rezultata. Sama priroda zvučnih zraka koji se koriste u metodi rej-trejsing može se opisati ravanskim talasima. Ovakav način modelovanja se može pronaći u nekolicini radova koji se bave računarskom simulacijom akustičkog odziva, slika 6. Sa druge strane, za ravanske talase je poznat odnos između intenziteta ravanskih talasa i zvučnog pritiska:

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (6)$$

pri čemu je ρ_0 gustina vazduha, a c brzina zvuka.



Slika 6. Prostiranje ravanskog talasa i zvučni zrak koji se može smatrati ravanskim talasom.

Dalje se iz jednačine (6) može izračunati pritisak zvuka, koji predstavlja impulsnog odziv prostorije:

$$p = \sqrt{I \rho_0 c} \quad (7)$$

Takođe, sada se može odrediti i nivo zvučnog pritiska u odnosu na referentnu vrednost $2 \cdot 10^{-5}$ Pa:

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{2 \cdot 10^{-5}} \quad (8)$$

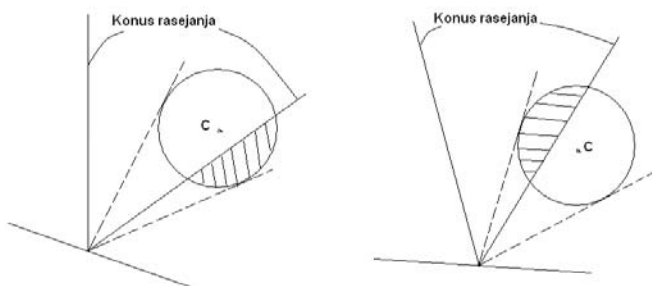
Kada se na ovaj način odredi nivo pritiska i primeni u realizovanom softveru dobija se savršena saglasnost sa već poznatim rezultatima, koji su izmereni, a zatim i simulirani pomoću programskog paketa ODEON [4].

7. SISTEMATSKE GREŠKE U PRVOJ VERZIJI MODELA

Postoji sistematska greška koja se čini ovakvim načinom proračuna. Pri samoj proveru da li se prijemna sfera nalazi unutar konusa rasejanja, proverava se u stvari, da li se centar prijemne

sfere nalazi unutar opisanog konusa. Pri dosadašnjim načinima modelovanja ako je centar prijemne sfere bio vidljiv iz tačke refleksije, pod uslovima zadatog koeficijenta difuznosti refleksija, onda je celokupna energija refleksije dodeljivana prijemnoj sferi. Sada, s obzirom da se posmatra veličina prostornog ugla pod kojim se vidi prijemna sfera ne dodeljuje se celokupna energija refleksije prijemnoj sferi, već samo onaj deo energije srazmeran veličini prostornog ugla pod kojim se ona vidi u odnosu na ugao otvorenosti konusa rasejanja. Greške koje pri ovome mogu da nastanu dvojake su prirode i prikazane su na slici 7. Moguće sistematske greške koje nastaju pri modelovanju zvučne energije koja dopire u prijemnu sferu su sledeće prirode: na slici levo je uključen i deo prijemne sfere koji ne pripada konusu rasejanja, dok na slici desno nije uključen deo sfere koji pripada konusu rasejanja.

I pored sistematskih grešaka koje se čine, ovakav način modelovanja daje dobre rezultate za konveksne prostorije. U prilog ovome ide i činjenica da su dve vrste grešaka koje se čine suprotne po znaku, tako da se u statistički velikom skupu podataka kakav je slučaj pri rej-trejsingu one međusobno u izvesnoj meri potiru. Ono što je bitno naglasiti je da se na ovaj način sigurno pravi manja greška nego što je to slučaj kada se celokupna energija dodeljuje prijemnoj sferi, pod uslovom da je centar sfere u okviru konusa rasejanja. Greška prikazana na slici 7 desno pravi se i kod ranijeg načina modelovanja prikazanog u literaturi zato što centar prijemne sfere ne ulazi u konus rasejanja i time nije ništa pogoršano. Greška na slici 7 levo sigurno nije veća nego pri ranijem načinu modelovanja, jer se u najgorem slučaju celokupna energija refleksije dodeljuje prijemnoj sferi. Ovde treba napomenuti da je odnos ω/Ω u programu ograničen na 1, da bi se u slučaju kada se prijemna sfera vidi pod većim prostornim uglom od prostornog ugla konusa rasejanja izbegao paradoks da prijemna sfera apsorbira više energije nego što je reflektovano od površi. Dakle, iako i ova metoda ima mane, ona je sigurno tačnija od do sada korišćene metode. I u tome se ogleda njen napredak.

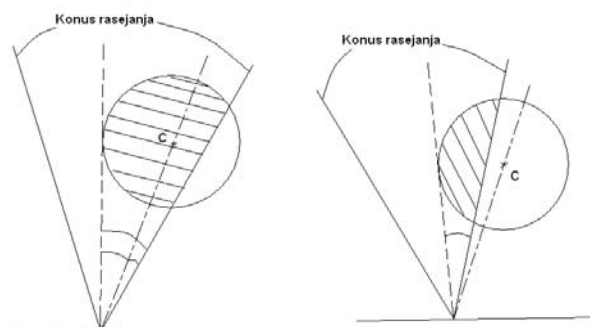


Slika 7. Moguće sistematske greške u prvoj verziji modela su šrafirane.

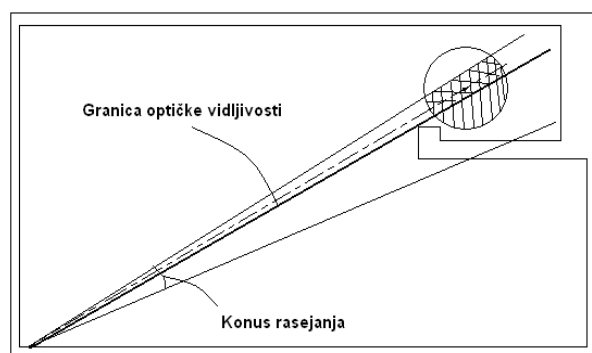
8. POBOLJŠANA METODA PRORAČUNA ENERGIJE KOJA OTKLANJA SISTEMATSKU GREŠKU

Usled opisane sistematske greške pristupilo se korišćenju metode za računanje energije zvučnih zraka koja je ilustrovana na slici 8. Posmatra se prostorni ugao pod kojim se vidi deo prijemne sfere unutar konusa rasejanja. Pri tome se u slučaju da se centar prijemne sfere nalazi unutar konusa rasejanja taj ugao računa kao zbir uglova od centra prijemne sfere do granice konusa ili do granice prijemne sfere. U

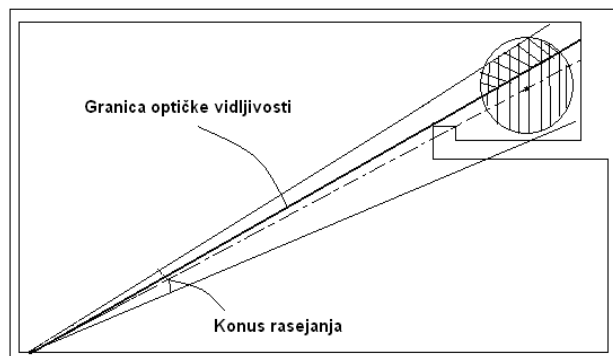
slučaju da je centar prijemne sfere izvan konusa rasejanja određuje se prostorni ugao pod kojim se vidi deo prijemne sfere koji ulazi unutar konusa rasejanja. Na ovaj način se ispravlja sistematska greška prilikom proračuna energije zvučnog zraka.



Slika 8. Poboljšana metoda proračuna energije.



Slika 9. Slučaj konkavnog oblika prostorije, recimo prostorije unutar koje se nalazi balkon.



Slika 10. Slučaj kada se centar prijemne sfere ne vidi iz tačke refleksije, zaklonjen je pregradom (balkonom). Međutim, i dalje se vidi deo prijemne sfere, dvostruko šrafiran.

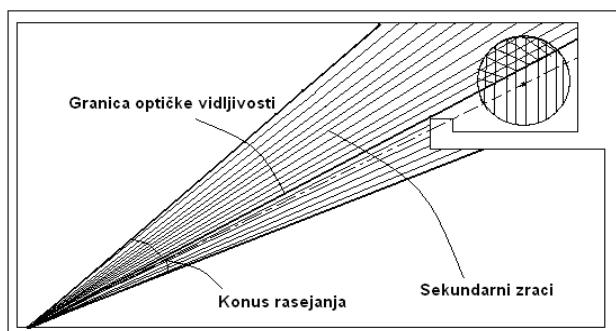
Važno je reći da inovacija modela rej-trejsing, koja je opisana u ovom radu, važi samo u slučaju konveksnih prostorija, tako da se u slučaju konkavnih prostorija mogu javiti problemi prikazan na slikama 9 i 10. U poboljšanoj metodi se proverava koji deo prijemne sfere pripada konusu rasejanja. Međutim, u konkavnim prostorijama može se desiti da se tada uzima u obzir i onaj deo za koji ne postoji optička vidljivost, na slici 9 osenčen jednostrukom šrafurom. Pravilno bi bilo uzeti samo onaj deo prijemne sfere za koji postoji optička vidljivost, osenčen dvostrukom šrafurom.

Takođe, može se desiti i slučaj kada se od pregrade ne vidi centar sfere, ali se vidi deo sfere, slika 10. Korektno rešenje podrazumeva da se uvek utvrdi koji se deo sfere vidi iz tačke refleksije, bez obzira da li je vidljiv centar ili ne. Pri tome treba uključiti sve pregrade koje postoje u prostoriji.

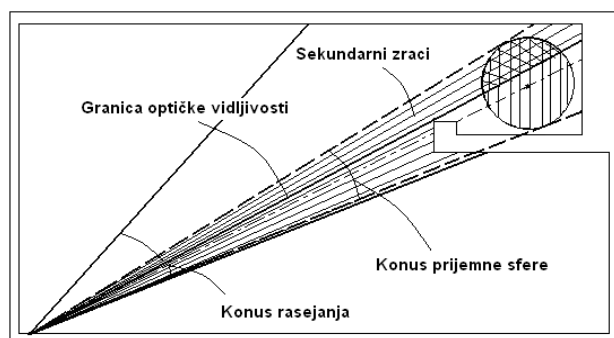
9. FINALNA VERZIJA METODE KOJA REŠAVA PROBLEM KONKAVNIH PROSTORIJA

Osnovni problem koji je trebalo rešiti je kako pronaći preseke jednog kontinualnog konusa sa zidovima prostorije koji se mogu isprečiti na putu ka prijemnoj sferi, s obzirom da se posmatra konus rasejanja u kontinualnom domenu? Rešenje koje se pokazalo kao korisno je prelazak u diskretni domen. Jednostavno, ako već ne mogu da se odrede preseci čitavog konusa sa zidovima, vraća se na ono što se može: određuju se preseki zraka sa zidovima. To istovremeno znači, da se energija konusa preraspodeljuje na određen broj sekundarnih zraka, pa se sada rešenje svodi na prethodni slučaj, tj. na sam početak metode rej-trejsing, samo što je izvor zračenja usmeren unutar konusa, a nije više omnidirekcionni. I tako je nastala prva varijanta finalnog rešenja koja je isprobana i prikazana na slici 11. Energija unutar konusa rasejanja je izdvojena na jednake delove sekundarnim zracima. Onaj deo energije koji pogada prijemnu sferu je proporcionalan delu konusa rasejanja koji se preseca sa prijemnom sferom i mimoilazi preprečene zidove.

Kada se implementira ovakvo rešenje nastaje sledeći problem: odziv dobijen na ovakav način postaje isuviše redak da bi se na osnovu njega dobila prava predstava o akustičkom odzivu prostorije. Drugim rečima, premala je verovatnoća pogotka prijemne sfere u odnosu na neki racionalan broj sekundarnih zraka i vreme računanja, pogotovo kod raširenijeg otvora konusa i udaljenije prijemne sfere. Povećanje broja sekundarnih zraka drastično usporava rad programa (ima se na umu da se ovaj proračun radi prilikom svake refleksije), a nedovoljno povećava gustinu odziva. Zato se pristupilo drugoj varijanti rešenja koja je dala bolje rezultate. Ta varijanta je prikazana na slici 12. Sekundarni zraci se generišu unutar konusa prijemne sfere. Opet se računaju samo oni zraci koji dolaze do prijemne sfere ne sudarajući se sa zidovima. Međutim, ukupna energija koju nose sekundarni zraci srazmerna je odnosu otvorenosti konusa prijemne sfere i konusa rasejanja. Na ovaj način je ispoštovan i odnos ω/Ω , ali su i izbegnuti problemi preprečenih zidova.



Slika 11. Prva varijanta finalnog rešenja modelovanja energije.



Slika 12. Druga varijanta finalnog rešenja modelovanja energije.

10. ZAKLJUČAK

U ovom radu je opisana metoda koja daje zadovoljavajuće rezultate u praktičnim simulacijama akustičkog odziva korišćenjem rej-trejsing metode. Prikazani pristup uključuje i pravilnu geometrijsku refleksiju i difuznu refleksiju koristeći koeficijent difuznosti refleksija i vektorsko modelovanje refleksija. Sekundarni izvori zračenja modelovani su pomoću konusa rasejanja, pri čemu je otvorenost konusa definisana u funkciji koeficijenta difuznosti refleksija.

LITERATURA

- [1] Rindel Jens Holger, "Modelling in Auditorium Acoustics – From Ripple Tank and Scale Models to Computer Simulations", Forum Acousticum, Sevilla 2002, 16-20 September.
- [2] Heinrich Kuttruff, „Room Acoustics“, Fourth edition, Taylor & Francis Group, 2000.
- [3] David Oliva Elorza, University of Turku, Department of Physics, "Room acoustics modeling using the ray-tracing method: implementation and evaluation", Licentiate Thesis, 2005.
- [4] Jens Holger Rindel, "ODEON and the scattering coefficient", ODEON Workshop, Mariehamn, Åland, Finland, 2nd June 2004.