

Softverski paket za analizu impulsnih odziva u fizičkim modelima prostorija

Milan Milivojević, Dragana Šumarac Pavlović

Abstract — Merenje i analiza impulsnih odziva u fizičkim modelima prostorija podrazumeva česta ponavljanja merenja uz stalne promene na modelu i analizu postignutih razlika. Takav rad zahteva brze vizuelne preglede izmerenih odziva u različitim razmerama, vizuelno upoređivanje više snimljenih odziva, izračunavanje nekih numeričkih indikatora stanja i generisanje arhive sa rezultatima. Merenje na modelima takođe podrazumeva skaliranost frekvencija, što znači da su svi standardni frekvencijski opsezi filtriranja na nestandardnim frekvencijama. U ovom radu je prikazan softverski paket napravljen sa ciljem da zadovolji specifične potrebe koje su se nametnule u praktičnom radu s modelima.

Keywords — akustika prostorija, fizički modeli, merni softver.

I. UVOD

Među svim danas korišćenim alatima za predikciju zvučnog polja u istraživanju i projektovanju, najveću pouzdanost pružaju merenja u fizičkim modelima napravljenim u nekoj smanjenoj razmeri. Još veoma davno u literaturi su se pojavili podaci o primeni jednostavnih dvodimenzionalnih fizičkih modela (na primer, za analizu neke sale u njenom podužnom preseku) [1]. Simulacija prostiranja zvuka u zadatoj geometriji preseka sale vršena je pomoću talasa na vodi ili ultrazvukom (prvi takav primer zabeležen je u jednom radu Sabina još 1913. godine). Taj početni period korišćenja fizičkih modela u akustici prostorija bio je generalno opterećen nedostatkom adekvatne merne opreme. Tek sa razvojem elektronike i elektronskih mernih uređaja fizički modeli dobijaju svoj pravi smisao [2,3], a primena računara donosi veliko povećanje pouzdanosti i tačnosti merenja [4,5].

I pored sve šire upotrebe softverskih metoda simulacije, fizički modeli imaju svoje mesto u akustici prostorija. U praksi se pokazalo da u prostorijama mogu postojati faktori koji utiču na zvučno polje, a koji zbog raznih teorijskih ograničenja ne mogu biti prikazani u softverskim modelima, zasnovanim na principima geometrijske akustike. To je ozbiljan nedostatak softverskih alata u okolnostima kada se postavljaju najviši zahtevi pouzdanosti predikcije u

akustičkom dizajnu, kao što je to u slučaju koncertnih i operских sala. To je možda još veći neostatak kada se softverski alati koriste u istraživačkom radu.

I pored svih prednosti koje donosi upotreba fizičkih modela i savremene merne tehnike u njima, postoji jedan ozbiljan problem u njihovom korišćenju. On je posledica nemogućnosti da se primena fizičkih modela prostorija uklopi u realne raspoložive vremenske rokove i raspoložive finansijske okvire koji se postavljaju pri projektovanju građevinskih objekata ili pri istraživanju. Naime, standardni pristup izradi fizičkog modela neke analizirane prostorije i postupak ispitivanja u njemu, pogotovo kada su u pitanju složeni oblici kao što se sreću u koncertnim salama, zahteva nezamislivo vreme i značajna finansijska sredstva.

Da bi se u istraživačkom radu ipak iskoristile prednosti fizičkog modelovanja primenjuje se koncept parcijalnih modela. U osnovi toga je ideja da se kao predmet ispitivanja uzimaju samo pojedini detalji enterijera ili delovi unutrašnjih površina i analizira njihov doprinos zvučnom polju. Korišćenje parcijalnih fizičkih modela prvenstveno ima za cilj da se preciznije sagleda priroda difuznih refleksija koje se javljaju na složenim geometrijskim formama enterijera sale i dobijena saznanja koriste u softverskom modelovanju. Sve to zajedno postaje jedan hibridni, fizičko-softverski alat za modelovanje zvučnog polja u prostorijama. Jasno je da je u takvom pristupu vreme potrebno za pripremu parcijalnih modela značajno kraće od vremena koje je potrebno za izradu odgovarajućeg modela čitave sale. Naravno, i investicija u izradu parcijalnih modela značajno je manja.

Rad sa parcijalnim fizičkim modelima podrazumeva pravljenje brojnih izmena, odnosno varijacija u geometriji i merenja impulsnog odziva refleksionih površina. Da bi taj postupak bio dovoljno efikasan i da bi se iz njega izvlačili validni zaključci, pokazala se potreba za specijalizovanim softverskim alatom kojim bi se na jednostavan način vrednovala promene napravljene na modelu i njihove posledice po zvučno polje u prostoriji. U ovom radu je prikazan jedan takav softverski alat namenski napravljen za potrebe laboratorijskih istraživanja na parcijalnim fizičkim modelima.

II. KONCEPT SOFTVERSKOG PAKETA

Koncept softverskog paketa koji je realizovan trebao je da objedini sve operacije nad impulsnim odzivima prostorija koje su se kroz dugogodišnju projektantsku i istraživačku praksu nametnule kao potrebne. U konceptu softvera posebna pažnja posvećena je analizi impulsnih odziva snimljenih na fizičkim modelima prostorija. U tom smislu, bilo je značajno da se u njega uključe i potrebe koje se javljaju u istraživačkom radu. Zbog toga su osnovne operacije nad signalima impulsnih odziva i način prikazivanja rezultata realizovani, pre svega, u skladu sa

Ovaj rad je napisan na osnovu aktivnosti realizovanih u okviru projekta 23046 Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj republike Srbije.

Milan Milivojević, student master studija na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer Audio i video tehnologije, Srbija (e-mail: milansmilivojevic@gmail.com).

Dragana Šumarac Pavlović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.bg.ac.yu).

iskustvenim potrebama, što predstavlja izvestan otklon u odnosu na standardne procedure merenja u prostorijama.

Sa aspekta korisnika, softver je u funkcionalnom smislu podeljen na dve celine: jedna je namenjena analizi impulsnih odziva snimljenih u realnim prostorijama, a druga je prilagođena merenjima u fizičkim modelima. Zbog prirode parcijalnih fizičkih modela ova druga opcija prvenstveno je namenjena detaljnijoj analizi prvih refleksija.

U softverskom paketu su objedinjene opcije za editovanje snimljenog signala impulsnog odziva, njegovu vizuelnu i numeričku analizu, eksportovanje relevantnih grafičkih predstava signala i tekstualnih datoteka, kao i eksportovanje filtriranog signala koji su pogodni za dalje analize van ovog softverskog paketa. Rad sa fizičkim modelima zahteva nestandardna filtriranja signala, a analiza parcijalnih modela uvodi i izračunavanje specifičnih numeričkih podataka korisnih u prepoznavanju doprinosa pojedinih geometrijskih detalja na modelu u akustičkom odzivu koji je snimljen. Jedan od zadataka realizovanog softvera je da, pored jednostavne analize pojedinačnih impulsnih odziva, omogući i komparativnu analizu više snimljenih impulsnih odziva da bi se mogle pratiti promene koje se dobijaju modifikacijama fizičkog modela.

Sa aspekta organizacije softverskog paketa i njegove upotrebe mogu se definisati četiri celine:

- učitavanje, editovanje i pozicioniranje
- filtriranje signala
- prikazivanje signala i
- proračun numeričkih parametara

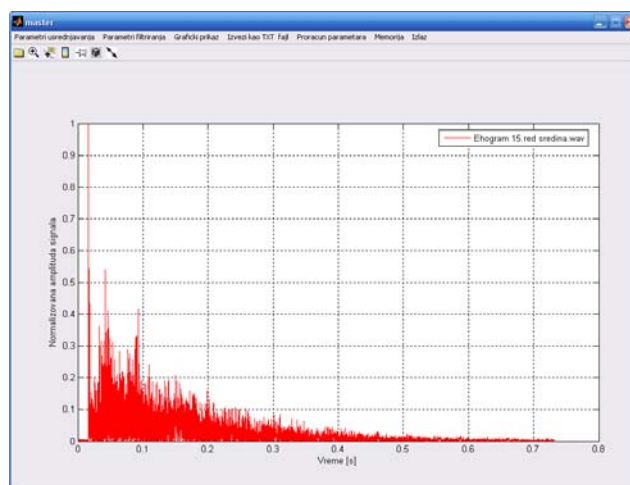
Učitavanje, editovanje i pozicioniranje signala -

Program je realizovan tako da omogućava učitavanje signala iz datoteke u .wav formatu i njegovo početno editovanje, što podrazumeva izdvajanje korisnog dela impulsnog odziva iz ukupnog trajanja snimljenog signala i vezivanje vremenske ose za stizanje direktnog zvuka. Ovaj postupak je neophodan radi preciznijeg izračunavanja numeričkih parametara iz odziva, ali i za detaljniju komparativnu analizu više snimljenih impulsnih odziva. Predviđena je mogućnost učitavanja većeg broja snimljenih impulsnih odziva i njihovo istovremeno posmatranje u bilo kom raspoloživom obliku (bipolarno, unipolarno, nivo itd). Početak vremenske ose signala definiše se na širokopojasnom signalu i taj podatak se dalje automatski prenosi na signale filtrirane u užim frekvencijskim opsezima. Svaki pojedinačni filtrirani signal kanije je moguće dodatno editovati i pridružiti mu novu vremensku osu povezanu sa novoizabranom početnom, to jest nultom tačkom u signalu.

Filtriranje signala - Na osnovu ulaznog podatka o frekvenciji odmeravanja signala moguće je filtriranje signala u raspoloživom frekvencijskom opsegu koristeći oktavne, trećinsko oktavne filtre. Filtri se mogu formirati sa standardnim ili proizvoljno izabranim centralnim frekvencijama. Dodatno je moguće izvršiti VF ili NF filtriranje signala sa nezavisno zadatim graničnim frekvencijama. Oktavni i trećinsko oktavni filtri projektovani su da zadovoljavaju preporuke standarda IEC651, ali su realizovani kao FIR filtri. Izbor FIR filtera diktiran je potrebom za lineranom faznom

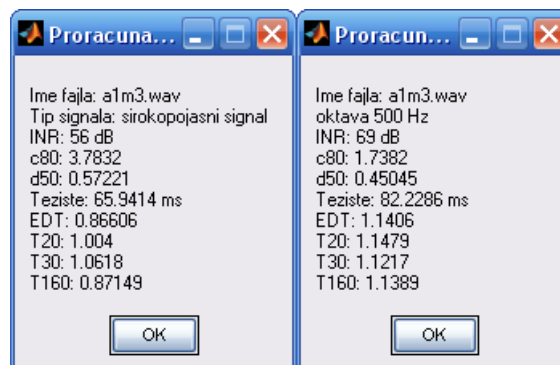
karakteristikom, odnosno konstantnim grupnim kašnjenjem, što je bitno za komparativnu analizu dva ili više impulsnih odziva.

Prikazivanje signala - Sve signale impulsnog odziva koji se učitaju u program, kao širokopojasni ili filtrirani signali, moguće je grafički prikazivati u obliku bipolarnog signala, ehograma, ETC krive sa izabranom konstantnom usrednjavanja i Šrederove krive. Na slici 1 prikazan je prozor iz programa sa ehogramom (unipolarni prikaz) jednog snimljenog impulsnog odziva. U istom meniju moguće je izabrati i prikaz spektra signala, kao i prikaz frekvencijskog odziva izabranog filtra. U svim navedenim formama prikazivanja moguće je istovremeno u istom prozoru prikazati više signala (širokopojasnih ili uskopojasnih). Trenutni prikaz slike u prozoru može se eksportovati u .jpg formatu, a sami podaci se čuvaju kao .txt datoteka.



Slika 1. Izled jednog prozora iz programa na kome je prikazan ehogram (unipolarni prikaz).

Proračun numeričkih parametara - Za širokopojasne i uskopojasne impulsne odzive predviđena je mogućnost izračunavanja standardnih objektivnih parametara prema ISO3382: početno vreme reverberacije, T20 T30 T160, C80 i D50, vremensko težište kao i ostvareni odnos signal šum. Za posmatrani signal izračunati parametri prikazuju se u obliku kao na slici 2, a kompletna analiza po oktavnim i tercnim opsezima opciono se može sačuvati u obliku .dat fajla.



Slika 2. Izgled ekrana sa podacima o izračunatim akustičkim parametrima za jedan širokopojasni i filtrirani signal.

III. PRINCIPI ANALIZE IMPULSNIH ODZIVA NA PARCIJALNIM FIZIČKIM MODELIMA

Analiza impulsnih odziva na smanjenim kompletnim ili parcijalnim fizičkim modelima prostorija zahteva merenja sa višim frekvencijama odmeravanja. Zbog toga je posebna celina u okviru realizovanog softvera posvećena radu sa modelima. Ono što je specifičnost ovog dela softvera je konvertovanje izmerenih impulsnih odziva u realan vremensko-frekvencijski domen. Ta konverzija se vrši na osnovu zadatog koeficijenta skaliranja nakon koje impulsni odziv dobija realnu vremensku osu, a frekvencijski opseg mu je smanjen u skladu sa frekvencijom odmeravanja i faktorom skaliranja. Signal se u toj proceduri dodatno frekvencijski oblikuje kako bi se smanjile smetne koje narušavaju koristan signal. Nakon vraćanja signala u prirodan vremenski okvir njegov frekvencijski opseg je sužen sa faktorom skaliranja modela, čime je ograničena mogućnost uskopojasne analize.

Rad sa parcijalnim fizičkim modelima prevashodno podrazumeva analizu prvih refleksija i njihove energetske strukture. Zbog toga je u tom delu programa predviđena mogućnost posmatranja i analize kumulativnog priraštaja energije, relativno u odnosu na energiju direktnog zvuka. Takvom analizom može se lako detektovati uticaj pojedinih geometrijskih detalja na refleksionim površinama u preusmeravanju reflektovane energije. Doprinos pojedinih promena u geometriji može se posmatrati komparativno u više raspoloživih frekvencijskih opsega. Ovakva analiza doprinosa pojedinih geometrijskih elemenata na refleksionim površinama može se na isti način vršiti i na refleksionim površinama realnih dimenzija, ako za to postoji potreba.

IV. KARAKTERISTIČNI PRIMERI UPOTREBE SOFTVERA

Kao jedan karakterističan primer primene ovog softvera može poslužiti sprovedena analiza parcijalnih fizičkih modela tokom akustičkog readizajniranja sale Opere u Ljubljani. Ova sala je iz devetnaestog veka i kao takva je pod zaštitom. Zbog toga se poboljšanje akustičkog odziva može postići samo malim akustičkim intervencijama koje ne narušavaju izgled sale, a doprinose povećanju energije koja u početnom delu impulsnog odziva dospeva do auditorijuma. Jedan parcijalni model sale Opere koji je korišćen u projektantskim istraživanjima prikazan je na slici 3. To je deo bočnih loža na prvoj galeriji sale. Model je napravljen u razmeri 1:10.

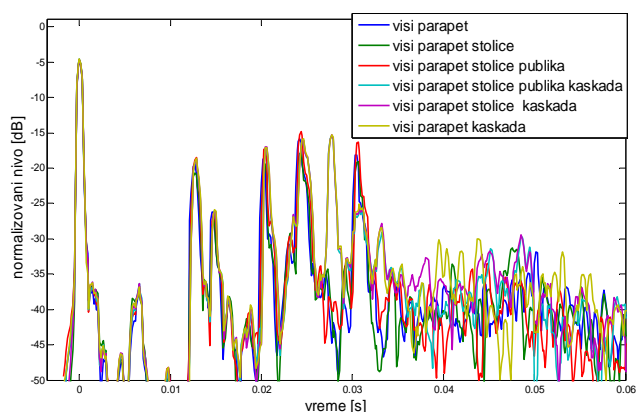
Impulsni odziv loža pri pobudi sa pozicije soliste na bini snimljen je na poziciji slušaoca u parteru. Frekvencija odmeravanja je bila 96 kHz, što je nakon konverzije u prirodan frekvencijski domen i prirodnu vremensku skalu obezbedilo analizu signala do 4.8 kHz. Analiza doprinosa osnovnih geometrijskih promena u ložama izvršena je na osnovu poređenja kumulativnih priraštaja energije u odzivu za te slučajeve i određivanja njihovog doprinosa u energiji koja se vraća u salu.

Kao ilustracija analize primenom napravljenog softvera mogu se uzeti odzivi loža snimljeni za tri različite konfiguracije: prazne lože, lože sa dodatim stolicama i najzad lože sa publikom. Iste konfiguracije testirane su i u slučaju kada je na sredini plafona loža dodata jedna kaskada

kao dodatna refleksiona površina. Snimljeni odzivi prvo su posmatrani u vremenskom domenu, što omogućava da se odredi poreklo pojedinih refleksija na osnovu relativnog vremenskog kašnjenja. Na slici 4 prikazan je način prezentacije promene nivoa snimljenih impulsnih odziva za posmatrane konfiguracije loža. Početak vremenske ose svih snimaka podešen je da se poklapa sa maksimumom direktnog zvuka. Na slici se vidi pojava refleksije koja potiče od unete kaskade (na 27-28 ms odziva).



Slika 3. Izgled parcijalnog modela dela prve galerije iz sale Opere u Ljubljani.



Slika 4. Vremenska promena nivoa signala za različite konfiguracije u ložama.

Kao primer korišćenja kumulativne analize, na slici 5 prikazane su izračunate kumulativne funkcije priraštaja energije u odzivu za različite konfiguracije loža. Slike 6 i 7 ilustruju opciju u programu za analizu odziva po frekvencijama. S obzirom na sužen frekvencijski opseg koji je diktiran frekvencijom odmeravanja i faktorom skliranja modela, impulsni odziv posmatran je u oktavi sa centralnom frekvencijom od 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, kao i u opsegu iznad gornje granične frekvencije oktave na 2kHz, sve do raspoložive granice na 4.8kHz. Na slikama 6 i 7 prikazane su kumulativne funkcije za signale filtrirane u navedenim frekvencijskim opsezima za slučaj kada na plafonu loža ima i nema dodatne kaskade. Vidi se da je dodavanje kaskade postignuta veća difuznost plafona iznad loža koja je najviše izražena na višim frekvencijama (značajno za distribuciju energije na pevačkom formantu).

V. ZAKLJUČAK

Realizovani softver, prikazan u ovom radu, proizašao je iz istraživačke prakse. Kao takav, objedinio je u sebi procedure koje su se vremenom pokazale kao pogodne za pojedinačnu i komparativnu analizu impulsnih odziva kako u realnim prostorijama, tako i na parcijalnim fizičkim modelima. Grafičke mogućnosti prikazivanja pojedinačnih širokopojasnih i filtriranih signala i njihovo međusobno poređenje pružaju određene pogodnost u projektovanju i istraživanju. Posebno su koncipirane i realizovane procedure, zasnovane na kumulativnoj funkciji, za analizu energetske doprinosa različitih geometrijskih detalja u enterijeru koji bi se uvodili u fizičkim modelima.

REFERENCE

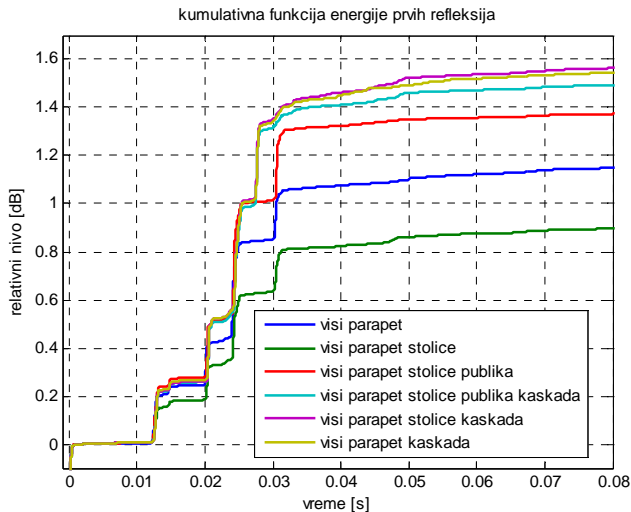
- [1] J.H.Rindel, "Modeling in auditorium acoustics – from ripple tank and scale models to computer simulations", Forum Acusticum, Seville 2002, Proceedings CD-ROM, paper KL-04
- [2] L.Beranek, "Acoustical modeling as a tool in problem solving", JAES, Vol. 17, No 2 (1969) 151-155
- [3] A.Burd, "Acoustic modeling – design tool or research project?", poglavlje u knjizi "Auditorium acoustics", editor R.Mackenzie, Applied Science Publishers (1975)
- [4] M.Mijić, D.Šumarac Pavlović, "Tehnologija akustičkog dizajna prostorija za muzička izvođenja – iskustva Laboratorije za akustiku ETF", L Konferencija za ETRAN, Beograd, 2006, Zbornik radova
- [5] M.Mijić, D.Šumarac Pavlović, "20 godina tradicije u upotrebi fizičkih modela u akustičkom projektovanju i istraživanju u Laboratoriji za akustiku ETF", TELFOR, Beograd, 2007, Zbornik radova
- [6] F.Fahy, "Foundations of engineering acoustics", Academic press, London, 2001.
- [7] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Reconstruction of the opera hall in Maribor – case study", International Symposium on Room Acoustics, Satellite Symposium of the 19th International Congress on Acoustics, Seville, 2007, Proceedings on CD
- [8] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Acoustic redesign of the Opera hall in SNG Maribor" 3rd Congres of the Alps Adria Acoustic Association, Grad, 2007. Proceedings on CD
- [9] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Rekonstrukcija opere u Mariboru – Case study", LI Konferencija za ETRAN, Igalo, 2007, Zbornik radova na CD

ABSTRACT

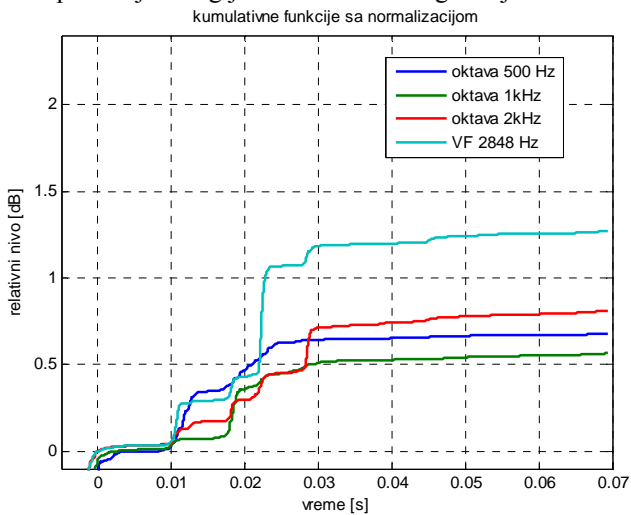
The analysis of impulse responses in physical models of the rooms includes multiple repetitions of measurements with permanent modifications in model, and comparison of obtained results. That demands quick visual inspection of impulse responses presented in different scales, mutual comparison of responses, calculation of some numerical indicators and simple archiving of obtained results. Measurements in physical models also imply frequency scaling and all frequency bands of standard filters are at nonstandard frequencies. This paper presents software made to satisfy all specific demands in physical model measurements.

SOFTWARE FOR ANALYSIS OF IMPULSE RESPONSES RECORDED IN PHYSICAL MODELS OF ROOMS

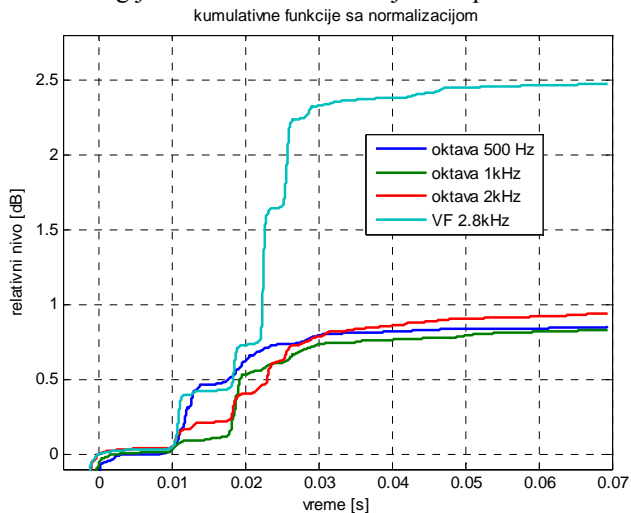
Milan Milivojević, Dragana Šumarac Pavlović



Slika 5. Komparativna analiza relativnog kumulativnog priraštaja energije za različite konfiguracije loža.



Slika 6. Primer poređenja kumulativnog priraštaja energije u različitim frekvencijskim opsezima.



Slika 7. Realativni doprinos prvih refleksija u slučaju modela loža sa stolicama i postavljenom kaskadom na plafonu u različitim frekvencijskim opsezima