

# Poređenje metoda za povećanje dinamičkog opsega integraljenog impulsnog odziva prostorije

Dorđe Stevanović, Dejan Ćirić i Miloš Marković

**Sadržaj** — Prilikom merenja i obrade impulsnog odziva (IO) prostorije, javlja se potreba za što je moguće većim dinamičkim opsegom odziva, odnosno integraljenog impulsnog odziva. Zbog toga je predloženo više različitih alternativnih rešenja za povećanje dinamičkog opsega.

U radu se analiziraju i poredi različite metode za povećanje dinamičkog opsega integraljenog impulsnog odziva: usrednjavanje impulsnog odziva, oduzimanje srednje kvadratne vrednosti šuma i množenje impulsnih odziva. Metode su modifikovane kako bi se smanjio efekat kumulativnog sabiranja šuma i dobili konzistentni rezultati. Za analizu su korišćeni simulirani i mereni impulsi odzivi. Rezultati su pokazali da su predložene metode i modifikacije dovele do značajnog povećanja dinamičkog opsega.

**Ključne reči** — dinamički opseg, impulsi odzivi, množenje odziva, usrednjavanje odziva, šum

## I. UVOD

VREME reverberacije je veoma značajna objektivna veličina za procenu kvaliteta prostorije sa stanovišta akustike. Nedavno su se pojavile i druge veličine za procenu kvaliteta zvuka u prostoriji od kojih je većina izvedena iz impulsnog odziva (IO) prostorije, što ukazuje na njegovu važnost. Značajna osobina IO prostorije je da sadrži pozadinski šum (zbir ambijentalne buke i elektroenskog šuma merne opreme), koja negativno utiče na odziv i smanjuje njegov dinamički opseg.

Nakon pojave Šrederove metode za određivanje vremena reverberacije integracijom IO, ona je postala dominantna metoda [1]. Prednost integracije IO se ogleda u smanjenju fluktuacije krive opadanja. Ipak, integracija unazad koja se ovde koristi unosi negativne efekte kumulativnog sabiranja pozadinskog šuma, smanjujući dinamički opseg krive opadanja [2], [3].

Da bi se prevazišli problemi izazvani pozadinskim šumom predložene su različite alternativne metode [4]-[8]. One se uglavnom zasnivaju na različitim postupcima merenja i obrade IO prostorije.

---

Rezultati rada su dobijeni u okviru projekta „Analiza uticaja parametara građevinske konstrukcije za potrebe zaštite životne sredine i praktično rešenje lakog zida“, broj 21013, finansiranog od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Dorđe Stevanović, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-64-256 40 00; e-mail: gujche@gmail.com).

Dejan Ćirić, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529 301; e-mail: dejan.ciric@elfak.ni.ac.rs).

Miloš Marković, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-63-523 999; e-mail: milos.markovic@elfak.rs).

Ovaj rad analizira i poredi različite metode za povećanje dinamičkog opsega integraljenog IO, sa posebnim osvrtom na metode: usrednjavanje odziva, oduzimanje srednje kvadratne vrednosti šuma i množenje odziva. Ispituju se parametri krive opadanja, njen dinamički opseg i odstupanje od „prave“ krive opadanja. Da bi se prevazišli nedostaci klasičnih metoda povećanja dinamičkog opsega, predložene su modifikacije ovih metoda. Prilikom analize su korišćeni simulirani i mereni IO.

## II. INTEGRALJENI IMPULSNI ODZIVI

Integraljenjem unazad kvadriranog IO prostorije  $h(\tau)$  dobija se opadajuća funkcija ekvivalentna usrednjenom ansamblu kvadriranog opadajućeg zvučnog pritiska  $\langle p^2(t) \rangle$  u prijemnoj tački u prostoriji pobuđenoj filtriranim belim šumom

$$\langle p^2(t) \rangle = D^2 \int_0^\infty h^2(\tau) d\tau \quad (1)$$

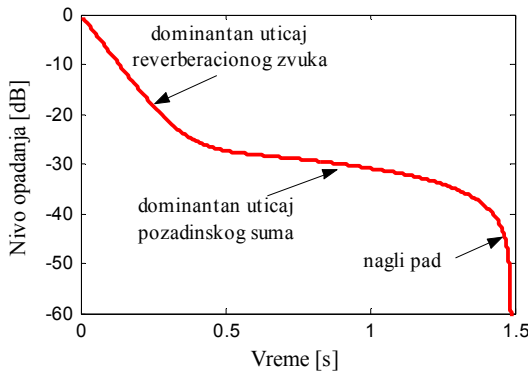
gde je  $D$  proporcionalno spektralnoj gustini snage signala u merenom frekvencijskom opsegu. Nedostatak metode integraljenog IO je da kada postoji deo odziva gde je dominantan pozadinski šum (poslednji deo odziva), onda integraljenje unazad generiše kumulativni efekat sabiranja ovog šuma, smanjujući dinamički opseg krive opadanja.

U jednačini (1)  $h(\tau)$  predstavlja IO bez pozadinskog šuma. Međutim, izmereni IO  $u(\tau)$  pored  $h(\tau)$  sadrži i šum  $n(\tau)$ . Dakle, opadanje dobijeno integraljenjem unazad ovog izmerenog odziva je:

$$\langle p^2(t) \rangle = D \int_0^\infty u^2(\tau) d\tau = D \int_0^\infty [h^2(\tau) + 2h(\tau)n(\tau) + n^2(\tau)] d\tau \quad (2)$$

Pošto šum može imati i pozitivne i negativne vrednosti, integral drugog sabirka je jednak nuli i nema nikakvog uticaja na opadanje krive. Suprotno ovome, treći sabirak uvek ima pozitivne vrednosti i utiče na krivu opadanja. U početnom delu krive opadanja dominantan je uticaj  $h^2(\tau)$ . Međutim, suprotna situacija se pojavljuje u zadnjem delu krive, gde je značajniji uticaj pozadinskog šuma.

Kao posledica postojanja pozadinskog šuma, integraljeni IO obuhvata tri dela, Sl. 1: glavna strmina opadanja, gde je dominantan reverberacijski zvuk, drugi deo znatno smanjenog nagiba, gde je dominantan šum i na kraju nagli pad krive zbog konačnog opsega integracije.



Sl. 1. Tri dela integraljenog IO.

### III. METODE ZA POVEĆANJE DINAMIČKOG OPSEGA

U literaturi je prezentovano više metoda kojima se prevazilaze ili ublažavaju problemi usled postojanja šuma u IO prostorije. Neke od metoda povećavaju dinamički opseg IO, poput metode usrednjavanja odziva [5], [7], dok druge povećavaju dinamički opseg integraljenog IO, kao što su metoda oduzimanja srednje kvadratne vrednosti šuma [4] i metoda množenja odziva [2].

Tokom merenja, ako je pobuda deterministički signal koji se može precizno ponavljati, razlike odziva u uzastopnim merenjima su rezultat jedino pozadinskog šuma. Usrednjavanje ovakvih odziva vodi smanjenju nivoa šuma. Pretpostavljajući da je korelacija pozadinskog šuma u uzastopnim merenjima zanemariva, svako udvostručavanje broja usrednjenih odziva vodi smanjenju nivoa pozadinskog šuma i povećanju dinamičkog opsega odziva za 3 dB. U praksi, u slučajevima gde šum nije potpuno slučajaj, odnosno gde su šumovi u uzastopnim merenjima delimično korelisani, pomenuto poboljšanje je redukovano.

Jedna od metoda korišćena za povećanje dinamičkog opsega integraljenog odziva je metoda oduzimanja srednje kvadratne vrednosti šuma od kvadriranog odziva pre integraljenja. Efekat ove metode se može matematički predstaviti sledećom jednačinom

$$\langle p_n^2(t) \rangle = D \int_0^\infty \left[ h^2(\tau) + 2h(\tau)n(\tau) + \left( n^2(\tau) - \bar{n}^2 \right) \right] d\tau \quad (3)$$

gde  $\bar{n}^2$  predstavlja srednje kvadratnu vrednost šuma određenu u poslednjem delu odziva gde je šum dominantan. Na ovaj način ostatak šuma  $(n^2(\tau) - \bar{n}^2)$  je značajno smanjen.

Iako usrednjavanje povećava dinamički opseg odziva ono ne utiče na negativni efekat kumulativnog sabiranja šuma. Dalje povećanje dinamičkog opsega bi bilo moguće eliminisanjem ove kumulativne sume ili smanjivanjem njenog efekta, što je moguće postići množenjem IO. Da bi se ono primenilo, potrebno je modifikovati podintegralnu funkciju u Šrederovom integralu

$$\langle p^2(t) \rangle = D \int_0^\infty \left[ \text{sgn} \left( \prod_{i=1}^N h_i(\tau) \right) \prod_{i=1}^N h_i(\tau) \right]^{\frac{2}{N}} d\tau \quad (4)$$

gde je  $N$  broj pomnoženih odziva. Član u podintegralnoj funkciji koji predstavlja proizvod odziva je podignut na odgovarajući stepen da bi se dobila veličina ekvivalentna

kvadriranom odzivu. Ovaj član je pomnožen dodatnom funkcijom (sgn), koji ima uticaja samo na znak izraza, koji ima ključnu ulogu u smanjivanju efekta kumulativnog sabiranja šuma.

Na bazi ovog principa, generisanje integraljenog IO korišćenjem usrednjenog odziva se može modifikovati tako da se smanji kumulativno sabiranje šuma

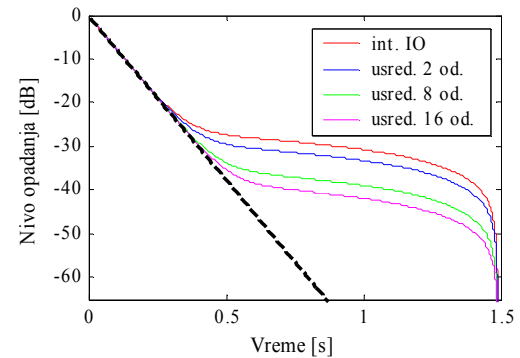
$$\langle p^2(t) \rangle = D \int_0^\infty \left[ \text{sgn} \left( \prod_{i=1}^N h_i(\tau) \right) \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(\tau) \right)^2 \right] d\tau \quad (5)$$

Osnovni princip metode množenja i metode modifikovanog usrednjavanja je da elementarni integrali, (odnosno kvadrirana vrednost šuma) nisu prosto sabrani, već se njihov znak menja, u zavisnosti od vrednosti šuma u određenom momentu. Na ovaj način bi trebalo da dođe do potpunog ili delimičnog poništavanja šuma.

### IV. REZULTATI ANALIZE SIMULIRANIH ODZIVA

#### A. Rezultati usrednjavanja IO

Različiti broj odziva je usrednjen od 2 do 16. Dobijeni integraljeni IO su dati na Sl. 2. Pošto je u simuliranim odzivima korelacija pozadinskog šuma između različitih odziva zanemarljiva, svako udvostručavanje broja usrednjenih IO vodi smanjenju nivoa pozadinskog šuma i povećanju dinamičkog opsega za 3 dB. Dinamički opseg za integraljeni IO bez usrednjavanja iznosi oko 27 dB, dok je dinamički opseg za integraljeni IO dobijen posle usrednjavanja 16 odziva oko 39 dB.



Sl. 2. Integraljeni (simulirani) IO dobijeni sa i bez usrednjavanja različitog broja odziva zajedno sa idealnom krivom opadanja bez šuma (---), koja je predstavljena i na drugim slikama sa istom oznakom.

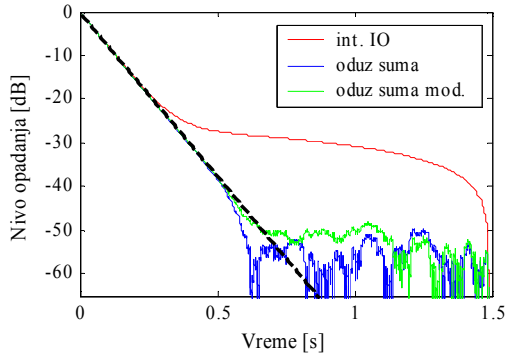
#### B. Rezultati oduzimanja šuma

Tipične krive opadanja dobijene primenom metode oduzimanja srednje kvadratne vrednosti pozadinskog šuma su predstavljene na Sl. 3. One obično pokazuju velike fluktuacije u delu gde je šum dominantan. Ove fluktuacije mogu da počnu relativno rano, čak i u zadnjem delu reverberacionog opadanja, kao što je prikazano na Sl. 3, ili nešto kasnije. U prvom slučaju fluktuacije utiču na opadanje same krive i smanjuju dinamički opseg.

Mesto na krivoj gde počinju fluktuacije zavisi od IO i od preciznosti određivanja srednje kvadratne vrednosti šuma. Sam metod može biti modifikovan tako da srednja kvadratna vrednost šuma bude skalirana

$$\langle p_n^2(t) \rangle = D \int_0^\infty \left[ h^2(\tau) + 2h(\tau)n(\tau) + (n^2(\tau) - An^2) \right] d\tau \quad (6)$$

Na ovaj način jake fluktuacije mogu biti uklonjene iz zadnjeg dela reverberacionog opadanja, tako da kriva opadanja prati pravo opadanje u širem opsegu opadanja, Sl. 3. Ovim se povećava dinamički opseg krive opadanja.



Sl. 3. Integraljeni (simulirani) IO dobijeni primenom oduzimanja šuma za karakterističan slučaj sa jakim fluktuacijama u poslednjem delu opadanja.

Odstupanje integraljenog IO od pravog opadanja može biti dato preko jednobrojne veličine - koeficijenta razlike koji predstavlja srednju vrednost razlike određenog IO i idealnog opadanja (opadanja bez šuma za simulirane odzive ili pravog opadanja dobijenog aproksimacijom prvog dela krive opadanja za merene odzive) u definisanom opsegu opadanja.

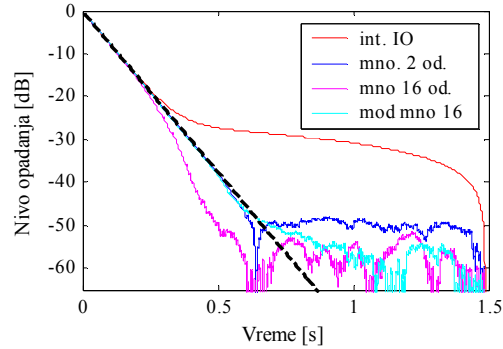
Pomenuta modifikacija može biti primenjena i iterativnim algoritmom gde je potrebno naći optimalni faktor skaliranja. Optimizaciona procedura se zasniva na minimizaciji pomenutog koeficijenta razlike u definisanom opsegu opadanja.

### C. Rezultati množenja IO

Umesto kvadriranog IO, proizvod dva IO može biti iskorišćen kao podintegralna funkcija Šrederovog integrala [6], [8]. Na ovaj način se kumulativno sabiranje šuma smanjuje ili eliminiše, Sl. 4. Da bi se unapredio ovaj pristup, autori su predložili množenje više odziva, u podintegralnoj funkciji, jednačina (4). Integraljeni IO dobijeni ovim množenjem su dati na Sl. 4. Nažalost, zajedno sa smanjenjem uticaja kumulativnog sabiranja šuma, javljaju se i određena odstupanja krive opadanja u delu reverberacionog opadanja. Usled toga, prednost množenja više odziva se može značajno smanjiti. Razlog za devijaciju su relativno jake fluktuacije IO, naročito u delu gde je šum dominantan, što je posledica samog simulacionog modela. Ove fluktuacije vode do nekorektnih promena vrednosti prvog člana (funkcije znaka) u podintegralnoj funkciji jednačine (4).

Devijacija krive opadanja je značajno smanjena korišćenjem simuliranih IO generisanih modelom šuma sa manje fluktuacija. Alternativno, može se primeniti modifikovana procedura množenja. Modifikacija podrazumeva da je znak člana iz jednačine (4) isti (vrednost +1) od početka odziva do tačke kolena (mesta preseka reverberacionog opadanja i nivoa šuma). Od tačke kolena do kraja odziva znak člana je određen prema jednačini (4). Integra-

ljeni IO dobijeni modifikovanom metodom množenja je prikazan na Sl. 4.



Sl. 4. Integraljeni (simulirani) IO dobijeni množenjem 2 i 16 odziva, kao i modifikovanim množenjem 16 odziva.

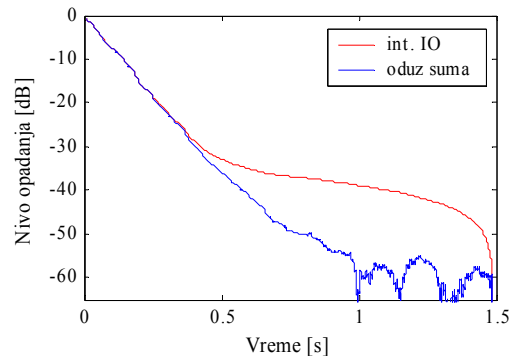
## V. REZULTATI ANALIZE MERENIH ODZIVA

### A. Rezultati usrednjavanja IO

Kada su izmereni IO usrednjeni pre integraljenja, rezultati koji se tiču dinamičkog opsega su nešto drugačiji nego u simuliranim IO. Povećanje dinamičkog opsega udvostručavanjem broja usrednjenih odziva nije više 3 dB, već je manje. Krive opadanja imaju sličan oblik kao na Sl. 2, ali je povećanje dinamičkog opsega sa povećanjem broja usrednjenih odziva manje (ono je neregularno i kreće se od 1 do 2 dB, ili neznatno van tog opsega). Razlog je u činjenici da pozadinski šum pri uzastopnim merenjima nije u potpunosti nekorelisan.

### B. Rezultati oduzimanja šuma

Metoda oduzimanja šuma daje slične rezultate kod merenih odziva kao i kod simuliranih, pošto se ona primenjuje pojedinačno na svaki odziv. Treba istaći da se dinamički opseg značajno povećava ovom metodom, Sl. 5, ali se u određenim slučajevima mogu javiti izvesne fluktuacije koje mogu negativno uticati čak i na deo reverberacionog opadanja. Zbog toga se i ovde kao i kod - simuliranih odziva može primeniti predložena modifikacija ove metode bazirana na skaliranju srednje kvadratne vrednosti šuma.



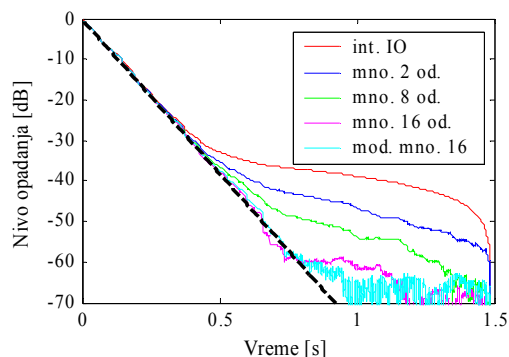
Sl. 5. Integraljeni (izmereni) IO dobijeni primenom metode oduzimanja šuma.

### C. Rezultati množenja IO

Množenje IO daje nešto drugačije rezultate kod izmerenih odziva nego kod simuliranih. Tako, množenje IO prema jednačini (4) ne uzrokuje odstupanje dela reverbe-

racionog opadanja ili je ovo odstupanje relativno malo, Sl. 6. Oblik krive opadanja je pravilan i prati pravo opadanje do kolena krive. Dinamički opseg integraljenog IO se značajno povećava sa povećanjem broja pomnoženih odziva. Dinamički opseg integraljenog IO dobijenog na osnovu jednog odziva (bez množenja) je oko 36 dB. Kada se primeni množenje, dinamički opseg se povećava na 41, 48 i 58 dB za 2, 4 i 16 pomnoženih IO, respektivno.

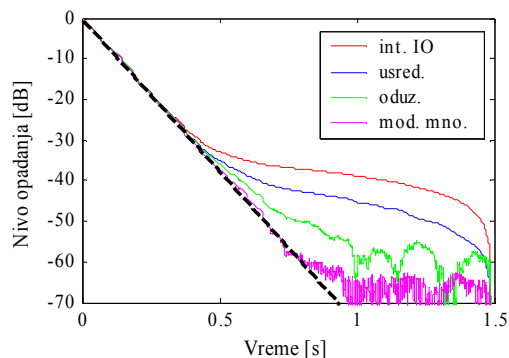
Kod izmerenih odziva, u izvesnim slučajevima samo poslednji deo reverberacionog opadanja integraljenog IO dobijen množenjem 16 IO odstupa od pravog opadanja. Zbog toga se kao i kod simuliranih IO ovo odstupanje može umanjiti ili eliminisati pomenutom modifikacijom metode množenja, Sl.6.



Sl. 6. Integraljeni (izmereni) IO dobijeni množenjem različitog broja IO zajedno sa integraljenim IO dobijenim modifikovanim množenjem.

#### VI. POREĐENJE METODA

Usrednjavanje daje pravilan oblik integraljenog IO koji je gotovo identičan obliku krive dobijene bez usrednjavanja razlikujući se samo u dinamičkom opsegu. Integraljeni IO dobijen drugim dvema metodama sadrži izvesne fluktuacije u delu gde je šum dominantan. Pored toga, postoji mogućnost da zadnji deo reverberacionih opadanja ovih krivih odstupa od pravog opadanja. Međutim, povećanje dinamičkog opsega je značajno veće za poslednja dva metoda, nego za usrednjavanje. Kod simuliranih odziva gde je korelacija između IO beznačajna, dinamički opseg za metodu oduzimanja i modifikovanu metodu množenja je sličan. Ali ovo nije slučaj kod merenih odziva gde postoji određena korelacija i gde množenje 16 IO vodi značajnom povećanju dinamičkog opsega, Sl. 7.



Sl. 7. Integraljeni IO dobijeni bez dodatne obrade (int. IO) i primenom sva tri opisana metoda za povećanje dinamičkog opsega kod izmerenih IO.

#### VII. ZAKLJUČAK

Analize izvedene na simuliranim i merenim odzivima pokazuju da ovi metodi vode značajnom povećanju dinamičkog opsega. Najmanji dobitak je postignut metodom usrednjavanja, jer ona ne eliminiše kumulativno sabiranje šuma. Ipak, ona rezultira pravilnim oblikom integraljenog IO. Sa druge strane, metoda oduzimanja srednje kvadratne vrednosti šuma i metoda množenja IO vode većem porastu dinamičkog opsega. Nažalost, kod ovih metoda se mogu javiti određena odstupanja zadnjeg dela reverberacionog opadanja integraljenog IO. Predloženim modifikacijama metoda se ova odstupanja mogu eliminisati ili smanjiti, i takođe može se povećati efektivni dinamički opseg.

#### LITERATURA

- [1] M.R. Schroder, New Method of Measuring Reverberation Time, *Journal of the Acoustical Society of America*, 37, pp. 409-412, (1965).
- [2] D. Ćirić and M. Milošević, "Comparison of decay range improvement obtained by averaging and multiplication of impulse responses," in *Pro. of Int. Cong. on Sound and Vibration*, Garmisch-Partenkirchen, pp. 1695-1702, 2000.
- [3] M. Milošević i D. Ćirić, "Povećanje dinamičkog opsega opadanja zvučne energije u prostoriji," u *Zbornika konf. Buka i vibracije 98*, Niš, Srbija, 1998.
- [4] W. T. Chu, "Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 63, pp. 1444-1450, 1978.
- [5] J. L. Nielsen, "Improvement of signal-to-noise ratio in long-term MLS measurements with high-level nonstationary disturbances," *J. Aud. Eng. Soc.*, vol. 45, pp. 1063-1066, 1997.
- [6] F. Satoh, Y. Hidaka, and H. Tachibana, "Reverberation time directly obtained from squared impulse response envelope," in *Proc. Int. Cong. on Acoustics*, Seattle, pp. 2755-2756, 1998.
- [7] M. Karjalainen, P. Antsalo, A. Makivirta, T. Peltonen, and V. Valimaki, "Estimation of modal decay parameters from noisy response measurements," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 50, pp. 867-878, 2002.
- [8] R. Dragonetti, C. Laniello, and R. A. Romano, "Reverberation time measurement by the product of two room impulse responses," *Applied Acoustics*, vol. 70, pp. 231-243, 2009.

#### ABSTRACT

In measurement and processing of a room impulse response, there is a need for as large as possible dynamic range of the response, that is, dynamic range of the integrated impulse response in the case of reverberation time determination. Because of that, different alternatives have been proposed for dynamic range increasing.

This paper analyses and compares different methods for increasing of dynamic range of integrated impulse response: averaging of impulse responses, subtraction of mean square value of background noise and multiplication of impulse responses. The methods are modified in order to reduce the effect of cumulative summing of noise and obtain consistent results. Simulated and measured responses are used for the analysis. The results have shown that the proposed methods and modifications lead to a considerable improvement of the dynamic range.

#### COMPARISON OF METHODS FOR INCREASING OF DYNAMIC RANGE OF INTEGRATED ROOM IMPULSE RESPONSE

Đorđe Stevanović, Dejan Ćirić, Miloš Marković