

Detekcija koherentnih refleksija u akustičkom impulsnom odzivu autokorelacionom metodom

Milan Pavlović, Dragan Ristić

Sadržaj — U radu je opisana analiza akustičkog impulsnog odziva autokorelacionom metodom. Analiza obuhvata dva koraka. U prvom koraku vršeno je izračunavanje autokorelacije idealnog impulsnog odziva, gde su direktni zvuk i prva refleksija predstavljeni Dirakovim impulsima. U drugom koraku analiziran je realni impulsni odziv. Cilj rada je da se na osnovu autokorelacije pokuša detektovanje koherentnih refleksija u akustičkom impulsnom odzivu.

Ključne reči — Akustika prostorija, impulsni odziv, autokorelacija

I. UVOD

ANALIZA akustičkog impulsnog odziva prostorija ima važnu ulogu u samoj akustičkoj obradi prostorija, zato što svaki prostor ima svoj karakterističan odraz u strukturi impulsnog odziva. Postojanje reflektovane zvučne energije je osnovna odlika prostorije kao akustičnog prenosnog sistema. Od posebnog značaja je vremenska struktura reflektovane energije koja stiže u prijemnu tačku, što predstavlja impulsni odziv prostorije. Impulsni odziv predstavlja na neki način integrisanu informaciju o ambijentu, dok čulo sluha dekoduje takve informacije i formira sliku o prostoru. Zbog gustine signala na vremenskoj osi, ni jedna od komponenti iz impulsnog odziva ne može predstavljati nezavisnu zvučnu informaciju. Jedino u slučaju kada je jedna od refleksija dovoljno jaka i usamljena na vremenskoj osi, slušalac može odrediti pravac nailaska posmatrane refleksije [1].

Impulsni odziv prostorija je važan pokazatelj da li je prostorija u zavisnosti od svoje namene akustički dobro obrađena. Koncertne sale, konferencijske sale, crkve, audio režije imaju karakteristični i međusobno različit impulsni odziv. Mnogi radovi se bave analizom akustičkog impulsnog odziva prostorija. Posebna pažnja je posvećena izračunavanju korelisanosti energije direktnog zvuka i prvih refleksija sa jedne strane i energije reverberacionog dela, odnosno kasnijih refleksija sa druge strane. Utvrđeno je da minimalna vrednost funkcije korelisanosti od 0.367 za koncertne sale, određuje u vremenskom domenu granicu između prvih refleksija i reverberacionog dela [1].

Rad je rezultat istraživačkog rada u okviru predmeta Akustika prostorija na doktorskim studijama na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu pod mentorstvom prof. Miomira Mijića.

M. Pavlović, Visoka ICT škola, Zdravka Čelara 16, 11000 Beograd, Srbija. (e-mail: m.pavlovic78@gmail.com).

D. Ristić, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija. (e-mail: rustic.dragan@gmail.com).

U audio režiji gde se vrši monitoring zvučne slike, veliki problem predstavljaju prve, koherentne refleksije. Ako one nisu dovoljno oslabljene, usled superponiranja direktnog zvuka i koherentnih refleksija, dolazi do pojave komb filtra koji u izvesnoj meri menjaju spektralni sadržaj zvuka koji prima slušalac.

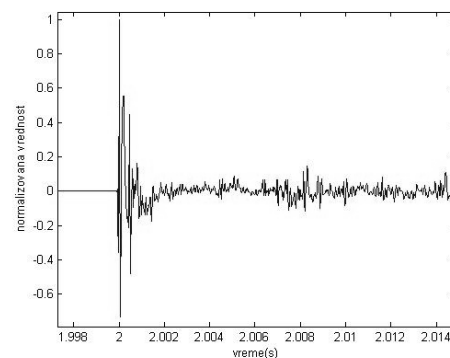
U ovom radu je vršena analiza akustičkog impulsnog odziva audio režije autokorelacionom metodom. Cilj je bio detektovati koherentne refleksije u prvih 20 ms. Pokušano je utvrditi koliko treba oslabiti posmatrane refleksije, kako bi njihova koherentnost sa direktnim zvukom prestala.

U poglavljima II A i B definisani su akustički impulsni odziv prostorija i njihova autokorelacija, respektivno. U poglavlju III opisan je predložen postupak analize akustičkog impulsnog odziva audio režije autokorelacionom metodom. Poglavlje IV sadrži rezultate. Zaključci su navedeni u poglavlju V.

II. DEFINISANJE IMPULSNOG ODZIVA PROSTORIJA I NJEGOVA AUTOKORELACIJA

A. Impulsni odziv prostorija

Tipičan izgled jednog impulsnog odziva prostorije prikazan je na slici 1. On počinje trenutkom stizanja direktnog zvuka u prijemnu tačku. U odzivu se na tom mestu na vremenskoj osi pojavljuje impuls koji predstavlja direktan zvuk. Sve ostale komponente koje se u odzivu vide nakon njega predstavljaju razne refleksije koje su stigle s manjom ili većom gustinom u vremenu, i s manjim ili većim kašnjenjem u odnosu na direktan zvuk. Nakon direktnog zvuka, stižu prve refleksije koje su lako uočljive. Potom sledi reverberacioni deo kao posledica formiranja sukcesivnih refleksija zvuka u prostoru koje energetski ispunjavaju impulsni odziv duž vremenske ose.



Sl. 1. Prikaz realnog impulsnog odziva audio režije

Reverberacija je osnovna karakteristika zvučnog polja u

prostorijama. Karakteristična osobina impulsnog odziva u prostorijama je obvojnica koja ima monotono opadajući tok koji asimptotski teži nuli. Brzina opadanja obvojnice impulsnog odziva diktirana je veličinom prostorije i sposobnostima površina da apsorbuju zvučnu energiju. Najveće varijacije u formi impulsnog odziva od prostorije do prostorije javljaju se u njegovom vremenskom trajanju odziva, i u početnoj strukturi komponenti odmah nakon stizanja direktnog zvuka, što zavisi od veličine i drugih geometrijskih osobina prostorije [2].

B. Autokorelacija

Koncept autokorelacije vrlo često igra važnu ulogu u analizama impulsnog odziva. Ako posmatramo slučajan, kontinualan u vremenu, aperiodičan impulsni odziv $h(t)$, njegova autokorelaciona funkcija $R_{hh}(\tau)$ glasi:

$$R_{hh}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T h(t)h(t+\tau) dt \quad (1)$$

U jednačini (1) T predstavlja periodu posmatranja impulsnog odziva [3]. Funkcija autokorelacije $R_{hh}(\tau)$ je realna i parna funkcija sa maksimumom u $\tau=0$. Autokorelaciona funkcija može biti predstavljena i na sledeći način:

$$R_{hh}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(j\omega)|^2 e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

$H(j\omega)$ predstavlja spektralnu gustinu energije impulsnog odziva $h(t)$ [4]. Ako se posmatra odmereni impulsni odziv, autokorelacija opisuje zavisnost vrednosti odmeraka u jednom trenutku u odnosu na vrednosti odmeraka u nekom drugom trenutku. U tom slučaju autokorelaciona funkcija glasi:

$$R_{hh}(m) = \frac{1}{N-|m|} \sum_{n=1}^{N-m+1} h(n)h(n+m-1) \quad (3)$$

ukoliko postoji pomeraj, odnosno:

$$R_{hh}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-m+1} h(n)h(n+m-1) \quad (4)$$

ako nema pomeraja i $m=1, \dots, M+1$, gde M predstavlja broj odmeraka [5].

Osnovne osobine autokorelacione funkcije impulsnog odziva $h(t)$ [5] su sledeće:

a) Maksimalna vrednost autokorelacione funkcije

$R_{hh}(m)$ je u $m=0$. Ukoliko je autokorelaciona funkcija normalizovana, onda je ta vrednost jednaka jedinici. Za ostale vrednosti m koje su različite od nule, autokorelaciona funkcija je manja od jedinice:

$$R_{hh}(0) \geq |R_{hh}(m)|, \text{ za } m \neq 0 \quad (5)$$

b) Ukoliko za autokorelacionu funkciju slučajnog stacionarnog procesa važi jednakost:

$$R_{hh}(m_0) = R_{hh}(0) \quad (6)$$

za neke vrednosti m_0 , onda je $R_{hh}(m)$ periodična funkcija sa periodom m_0 .

c) Autokorelaciona funkcija periodičnog impulsnog odziva je takođe periodična;

d) Važi zakon simetrije. Autokorelaciona funkcija slučajnog stacionarnog impulsnog odziva je

konjugovana simetrična funkcija od m . U tom smislu važi:

$$R_{hh}(m) = R_{hh}^*(-m) \quad (7)$$

e) Za realne procese važi:

$$R_{hh}(m) = R_{hh}(-m) \quad (8)$$

f) Autokorelaciona funkcija slučajnog stacionarnog impulsnog odziva je u $m=0$ jednaka srednjoj kvadratnoj vrednosti procesa;

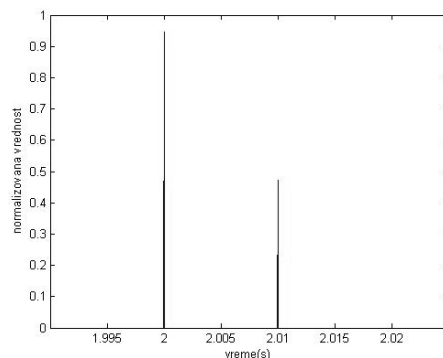
g) Ako dva slučajna procesa $h_1(t)$ i $h_2(t)$ nisu korelisana, onda je autokorelacija zbira ta dva slučajna procesa jednaka zbiru autokorelacija pojedinačnih signala.

$$h(t) = h_1(t) + h_2(t)$$

$$R_{hh}(m) = R_{h_1 h_1}(m) + R_{h_2 h_2}(m) \quad (10)$$

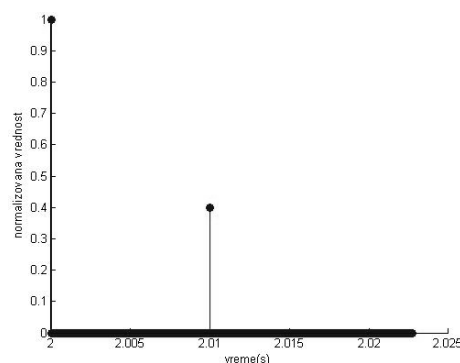
III. PREDLOŽENA METODA DETEKCIJE KOHERENTNIH REFLEKSIJA

Analizu detektovanja koherentnih refleksija u impulsnom odzivu audio režija autokorelacionom metodom čine dve faze. U prvoj fazi je analiza vršena sa idealnim impulsnim odzivom, gde su direktni zvuk i prva refleksija predstavljeni Dirakovim impulsima. Idealni impulsni odziv je generisan u softverskom paketu *Sound Forge 8.0*, sl. 2.



Sl. 2. Prikaz idealnog impulsnog odziva

U idealnom impulsnom odzivu, definisan je vremenski interval između direktnog zvuka i prve refleksije. Prva vrednost vremenskog intervala je $\Delta t=0.25$ ms. Nivo signala prve refleksije je isti kao i nivo signala direktnog zvuka. U Matlab-u je izračunata autokorelacija formiranog idealnog impulsnog odziva, sl. 3.



Sl. 3. Prikaz autokorelacije idealnog impulsnog odziva

Zatim je prva refleksija oslabljena u odnosu na direktni zvuk za 3 dB, pri čemu je vremenski interval između prve refleksije i direktnog zvuka ostao isti, $\Delta t=0.25$ ms. Za novoformiran idealni impulsni odziv je izračunata nova vrednost autokorelacije. Prva refleksija je potom ponovo oslabljena za 3 dB u odnosu na direktni zvuk, ali za isti vremenski interval, i izračunata je autokorelacija novog impulsnog odziva. Postupak je ponavljan, tako što je u svakom koraku prva refleksija bila oslabljena za dodatnih 3 dB. Ukupan broj koraka je bio 15.

Opisani postupak je potom ponovljen sa drugom vrednošću vremenskog intervala između prve refleksije i direktnog zvuka, $\Delta t=0.5$ ms. Posmatrani vremenski interval je menjan sa korakom 0.5 ms do vrednosti 2.5 ms, a zatim sa korakom 2.5 ms do vrednosti 20 ms. Dobijeni su grafici zavisnosti koeficijenta autokorelacije idealnog impulsnog odziva u odnosu na slabljenje prve refleksije za različite vremenske intervale.

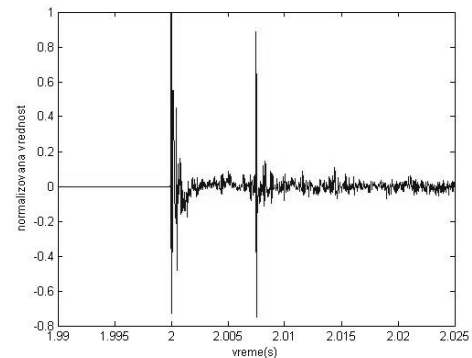
U drugom delu rada, vršena je analiza realnog akustičkog impulsnog odziva autokorelacionom metodom. Prvo je izračunata autokorelacija posmatranog realnog impulsnog odziva. Vremenski intervali u kojima su tom prilikom izračunati koeficijenti autokorelacije, odgovaraju vremenskim intervalima, korišćenim u analizi idealnog impulsnog odziva.

Zatim je umetnut signal u realnom impulsnom odzivu, replika direktnog zvuka, koji je zakašnjen za vreme $\Delta t=0.25$ ms u odnosu na direktni zvuk. Izračunat je koeficijent autokorelacije izmenjenog realnog impulsnog odziva u vremenskom trenutku u kome je signal umetnut. Replika direktnog zvuka je potom oslabljena u odnosu na direktni zvuk za 3 dB, pri čemu je vremenski interval između posmatranog signala i direktnog zvuka ostao nepromenjen. Izračunata je nova vrednost koeficijenta autokorelacije izmenjenog realnog impulsnog odziva u datom vremenskom trenutku, $\Delta t=0.25$ ms.

Pri svakom sledećem koraku replika direktnog zvuka je dodatno oslabljena za 3 dB u odnosu na direktni zvuk, pri čemu je vremenski interval između posmatranog signala i direktnog zvuka nepromenjen, $\Delta t=0.25$ ms. Postupak je ponavljan, dok umetnut signal nije oslabljen u odnosu na direktni zvuk za 45 dB. Dobijen je grafik promene koeficijenta autokorelacije u odnosu na slabljenje umetnutog signala za vremenski trenutak $\Delta t=0.25$ ms. Izračunato je za koliko umetnut signal mora biti oslabljen da bi se koeficijent autokorelacije u posmatranom trenutku izjednačio sa koeficijentom autokorelacije originalnog realnog impulsnog odziva audio režije.

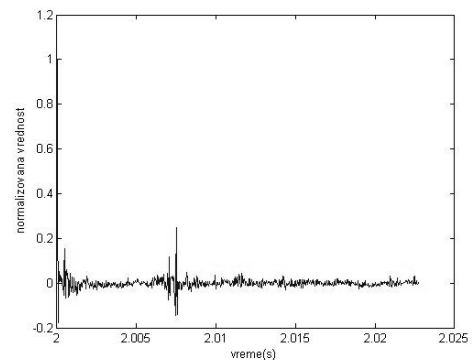
Opisani postupak je ponovljen za različite vremenske intervale između posmatranog umetnutog signala i direktnog zvuka u realnom impulsnom odzivu. Vrednosti posmatranih vremenskih intervala su isti kao u analizi idealnog impulsnog odziva: $\Delta t=0.25$ ms, $\Delta t=0.5$ ms, zatim je vremenski interval menjan sa korakom 0.5 ms do vrednosti 2.5 ms, a potom sa korakom 2.5 ms do vrednosti 20 ms. Za svaki vremenski interval, izračunata je granična vrednost slabljenja posmatranog umetnutog signala u odnosu na direktni zvuk, pri kojoj se gubi koherentnost između umetnutog signala i direktnog zvuka.

Na slici 4. prikazan je realni akustički impulsni odziv audio režije kome je dodat signal, replika direktnog zvuka. Pri tome je umetnut signal zakašnjen za 7.5 ms u odnosu na direktni zvuk.



Sl. 4. Prikaz realnog impulsnog odziva audio režije kome je dodat signal zakašnjen 7.5 ms u odnosu na direktni zvuk

Autokorelacija realnog impulsnog odziva kome je dodat signal sa zakašnjenjem 7.5 ms u odnosu na direktni zvuk, je prikazana na slici 5.

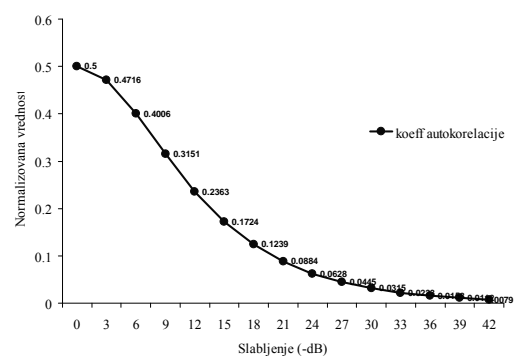


Sl. 5. Prikaz autokorelacije realnog impulsnog odziva kome je dodat signal zakašnjen 7.5 ms u odnosu na direktni zvuk

Koeficijenti autokorelacije u zavisnosti od vremenskog trenutka i slabljenja umetnutog signala u realnom impulsnom odzivu, smeštani su u excel fajl na osnovu kojih su dobijeni željeni grafici.

IV. REZULTATI

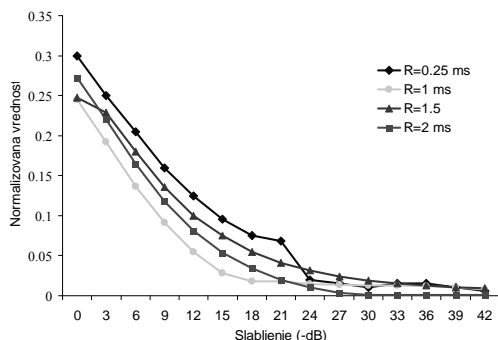
Promena vrednosti koeficijenta autokorelacije u odnosu na slabljenje prve refleksije u idealnom impulsnom odzivu je prikazana na slici 6.



Sl. 6. Zavisnost koeficijenta autokorelacije od slabljenja prve refleksije u idealnom impulsnom odzivu

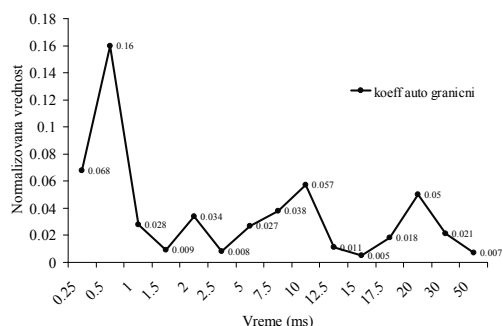
Promena koeficijenta autokorelacije je nezavisna od vrednosti vremenskog intervala između prve refleksije i direktnog zvuka.

Sl. 7 prikazuje promene koeficijenta autokorelacije realnog impulsnog odziva, kome je umetnut signal, replika direktnog zvuka, za vremenska kašnjenja: 0.25 ms, 1 ms, 1.5 ms i 2 ms. Može se zaključiti da su normalizovane vrednosti koeficijenta autokorelacije u prvih 20 ms uvek ispod 0.3.



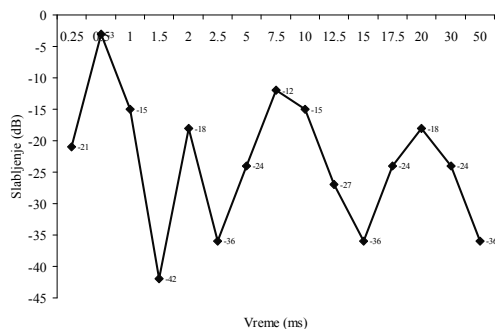
Sl. 7. Zavisnost koeficijenta autokorelacije u odnosu na slabljenje umetnutog signala u realnom impulsnom odzivu za različita vremenska kašnjenja

Grafik zavisnosti graničnih normalizovanih vrednosti koeficijenta autokorelacije realnog impulsnog odziva u odnosu na vremensko kašnjenje umetnutog signala, je prikazan na slici 8.



Sl. 8. Prikaz koeficijenta autokorelacije kada prestaje korelisanost umetnutog signala u realnom impulsnom odzivu

Može se zaključiti da je granična normalizovana vrednost autokorelacije realnog impulsnog odziva ispod 0.06 u prvih 20 ms.



Sl. 9. Prikaz vrednosti slabljenja umetnutog signala pri kojima prestaje korelisanost sa direktnim zvukom u realnom impulsnom odzivu

Vrednosti slabljenja umetnutog signala u različitim vremenskim trenucima, pri kojima se koeficijenti autokorelacije novoformiranog realnog impulsnog odziva izjednačavaju sa koeficijentima autokorelacije originalnog realnog impulsnog odziva, prikazane su na slici 9. U vremenskom opsegu do 20 ms, u najvećem delu, umetnuti signal je oslabljen za više od -20 dB.

V. ZAKLJUČAK

Primenom opisane metode, dobijeni su rezultati koji ukazuju da je moguće autokorelacionom metodom detektovati prve refleksije. U prvih 20 ms je potrebno oslabiti refleksije i do -40 dB kako bi prestala njihova korelisanost sa direktnim zvukom u realnom impulsnom odzivu. Drugim rečima, moguće je detektovati refleksiju sve dok se ona ne oslabi do -40 dB. U dobrom delu posmatranog vremenskog intervala, koherentne refleksije mogu biti detektovane pre nego što budu oslabljene za više od -20 dB, sve do -40 dB. Ovaj rezultat je zadovoljavajući, s obzirom na preporuke, na osnovu kojih je u akustici režije u prvih 20 ms potrebno oslabiti refleksije do -20 dB u odnosu na direktni zvuk. Uočeno je da maksimalna vrednost slabljenja refleksije u odnosu na direktni zvuk kada prestaje mogućnost njenog detektovanja, zavisi od susednih komponenti u realnom impulsnom odzivu.

Dalji rad bice usmeren ka analizi akustičkog impulsnog odziva autokorelacionom metodom drugih tipova prostorija, poput koncertnih sala.

LITERATURA

- [1] T. Hidaka, Y. Yamada, T. Nakagawa, "A new definition of boundary point between early reflections and late reverberation in room impulse responses," Takenada R&D Institute, 1-5-1, Otsuka, Inzai, Chiba 270-1395, Japan, 2007.
- [2] H. Kuttruff, "Room Acoustics," *Spon Press - Taylor & Francis Group*, 4th ed. London, 2000.
- [3] T.D. Rossing, "Springer Handbook of Acoustics," *Springer*. New York, 2007.
- [4] M.L. Dukić, "Principi telekomunikacija," *Akademski misao*, Beograd, 2008.
- [5] S.R. Taghizadeh, "Digital Signal Processing, Part 3, Discrete-Time Signals & Systems Case Studies" School of Communications Technology and Mathematical Sciences, University of North London, 2000.

ABSTRACT

In this paper the analysis of detection of cohered reflections in acoustic impulse responses by usage of autocorrelation method is considered. First, the procedure corresponds to presenting direct sound and its first reflection as dirac pulses and autocorrelation between them is calculated. Then, the analysis is done with real acoustical impulse responses. Based on research results and autocorrelation, the cohered reflections are detected.

DETECTION OF COHERED REFLECTIONS IN ACOUSTIC IMPULSE RESPONSES BY USAGE OF AUTOCORRELATION METHOD

Milan Pavlović, Dragan Ristić