

Uticaj prisustva ljudi na apsorpciju zvuka u zatvorenoj prostoriji

Ispitivan je uticaj prisustva ljudi u prostoriji na apsorpciju zvuka. Sniman je i analiziran beli šum, odnosno odziv prostorije nakon emitovanja kratkog zvučnog signala. Snimljeni signal je razlagan po oktavnim frekvencijama, a za svaku frekvenciju računato vreme reverberacije, na osnovu kojeg je određivana apsorpcija. Za 'doprinos ljudi' uzeta je razlika između apsorpcije zvuka u prostoriji sa ljudima i apsorpcije prazne prostorije. Dobijene vrednosti se najbolje poklapaju sa teorijskim na srednjim frekvencijama, tj. u oblasti oko 500 Hz koja se uzima za standard kod proučavanja vremena reverberacije, odnosno apsorpcije.

Uvod

Jedna od najvažnijih karakteristika zvuka predstavlja njegov intenzitet (I [W/m^2]) koji se definiše srednjom snagom po jedinici površine koja je normalna na pravac prostiranja. Ovo je tzv. objektivna jačina zvuka. Usled velikog opsega u kome se vrše akustička merenja, koristi se logaritamska skala. Prema ovoj skali, nivo jačine zvučnog talasa J je definisan jednačinom

$$J = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

gde je I_0 prag čujnosti koji predstavlja najmanju vrednost intenziteta zvuka koji se može čuti. Nivo jačine zvuka se izražava u decibelima (dB) i predstavlja subjektivnu jačinu zvuka, pri čemu po konvenciji $I_0 = 10^{-12} \text{W}/\text{m}^2$.

Apsorpcija zvuka je proces njegovog slabljenja prilikom prolaska kroz neku sredinu ili pri odbijanju od neke površine. Pri tom se zvučna energija najvećim delom pretvara u toplotu. Apsorpcija nekog materijala A se može odrediti na osnovu Sabinovog obrasca

$$A = \frac{0.161 V}{T}$$

*Dejan Grabovičkić
(1981), Beograd,
Proleterskih brigada
5a, učenik 3. razreda
Matematičke
gimnazije u Beogradu*

*Ranko Radovanov
(1981), Srbobran,
Bardova 2/1, učenik
3. razreda
Politehničke
akademije u Beogradu*

MENTOR:

*Dr Miomir Mijić,
redovni profesor na
Elektrotehničkom
fakultetu u Beogradu*

gde je T vreme reverberacije, a V zapremina prostorije (Jelaković 1962). Obično se uzima da je vreme reverberacije ono vreme potrebno da intezitet zvuka opadne na njegov milioniti deo, tj. za 60 dB. Takođe, za vreme reverberacije se uzima i vreme pada za 30 dB, ukoliko u prostoriji vlada izvesna buka koja bi nadvladala mereni signal (Gambiroža 1997).

Cilj ovog rada je da se, merenjem vremena reverberacije, proceni apsorpcija zvuka koja je uslovljena prisustvom ljudi u prostoriji. Osnovna ideja eksperimenta je da dodatna apsorpcija zvuka, nastala usled prisustva ljudi, treba da dovede do smanjenja vremena reverberacije, kako to proizilazi iz Sabinovog obrasca. U eksperimentu je za 'doprinos ljudi' uzeta razlika između apsorpcije zvuka u prostoriji sa ljudima i apsorpcije prazne prostorije.

Metod

Ispitivanje se vršilo u zatvorenoj prostoriji. U jednom slučaju prostorija je bila prazna, a u drugom se u njoj nalazilo četrnaest ljudi. Vreme reverberacije određivano je u jednom i u drugom slučaju. Za ispitivanje vremena reverberacije, u prostoriji se preko pojačala i zvučnika emituje zvučni impuls. Kada nastane stacionarno stanje (nastaje veoma brzo, u trenutku kada se energija koju emituje generator izjednači sa energijom koja se gubi na apsorberima), isključuje se generator i u daljem vremenskom periodu beleži se pad emitovane energije, tj. apsorpcija preovlađuje. Vreme potrebno da intezitet jačine zvuka opadne za 30dB, uzimali smo za vreme trajanja reverberacije.

Kao generator šuma iskorišćena je random funkcija programskog paketa Matlab. Random funkcijom generisani su slučajni brojevi koji su upotrebljeni za generisanje amplitude. Na ovaj način dobijen je beli šum uniformne raspodele frekvencija od 1 do 44100 Hz čije karakteristike direktno zavise od karakteristika random funkcije. Na ovaj način generisani signali su pomoću mikrofona priključenog na računar snimani u Wav fajlove programskog paketa Sound forge.

Sledeći korak bio je izdvajanje pojedinačnih frekvencija iz belog šuma (odnosno odziva prostorije), radi analize slabljenja inteziteta zvuka na oktavnim frekvencijama. Ovo je postignuto takođe u Matlab-u, funkcijom *Spectgram*, koja kao izlaz daje spektralnu raspodelu intenziteta u vremenu, uz mogućnost izdvajanja raspodele intenziteta za pojedinačne frekvencije ulaznog signala. Dobijene podatke smo prebacili u paket Origin i tu izvršili dodatnu obradu. Iskristili smo funkciju *Smoothing* koja je zbrajala određen broj susednih tačaka (konkretno mi smo zbrajali po 20 tačaka).

U Matlab-u je napisan program koji analizira grafike dobijene korišćenjem funkcije *Smoothing*. Kroz stacionarna stanja, kao i deo krive gde

intezitet zvuka pada, program provlači idealne prave i na osnovu njih određuje vreme reverberacije.

Teoretski, vreme reverberacije ne zavisi od položaja mikrofona u prostoriji, međutim, u praksi razlika ipak postoji. Upravo zbog toga, ali i zbog tačnijeg određivanja vremena reverberacije, izvršena su po tri merenja na tri različita mesta, kako u praznoj prostoriji, tako i onda kada su u njoj bili ljudi. Primenom Sabinovog obrasca za oba slučaja, dobijamo da apsorpcija ljudi iznosi

$$A = \frac{0.161 (V_o - V_1)}{T_1} - \frac{0.161 V_o}{T_o}$$

gde su V_o i V_1 zapremine prostorije i ljudi, a T_o i T_1 vremena reverberacije za prostoriju bez i sa ljudima, respektivno. Ova apsorpcija predstavlja ukupnu apsorpciju za sve ljude prisutne u prostoriji. Zapremina ljudi V_1 procenjena je po formuli

$$V_1 = \frac{m}{\rho}$$

gde je m masa, a ρ gustina ljudskog tela.

Formulu za izračunavanje apsorpcije jedne osobe možemo predstaviti i na sledeći način:

$$A = \frac{\alpha}{T_1} - \frac{\beta}{T_o}$$

gde su α i β konstante određene izrazima:

$$\alpha = \frac{0.161 \cdot (V_o - V_1)}{n}, \quad \beta = \frac{0.161 \cdot V_o}{n}$$

gde je n broj ljudi u prostoriji.

Formula za izračunavanje apsorpcije A se može shvatiti i kao funkcija koja ima dva parametra T_o i T_1 , pa je vrednost apsolutne greške apsorpcije:

$$\Delta A = \left| \frac{\partial A}{\partial T_1} \right| \cdot \Delta T_1 + \left| \frac{\partial A}{\partial T_o} \right| \cdot \Delta T_o$$

odnosno, zamenjujući izraze za parcijalne izvode:

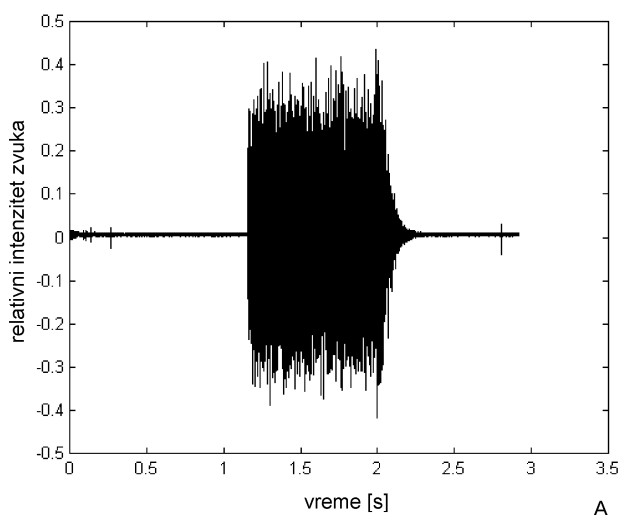
$$\Delta A = \frac{\alpha \cdot \Delta T_1}{T_1^2} + \frac{\beta \cdot \Delta T_o}{T_o^2}$$

gde su T_o i T_1 apsolutne greška pri merenju vremena reverberacije u praznoj prostoriji i u prostoriji sa ljudima.

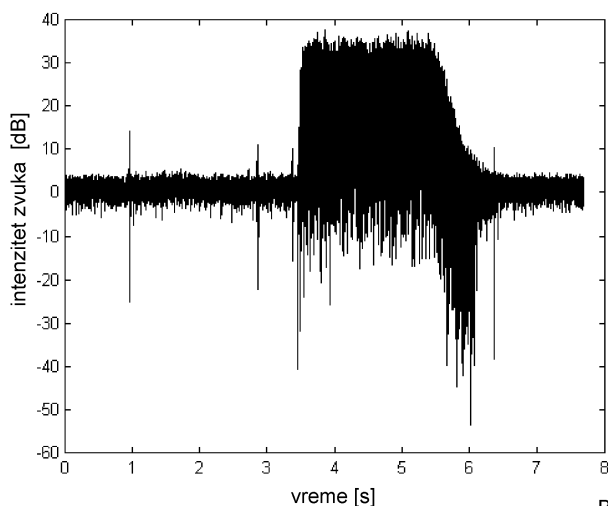
Aparatura: PC računar sa zvučnom karticom, zvučnici, mikروفon (Grabovički i Radovanov 1999).

Rezultati i analiza

Dimenzije prostorije su bile $9\text{ m} \times 5\text{ m} \times 2.70\text{ m}$ što daje zapreminu od 122m^3 . U eksperimentu je učestvovalo četrnaest ljudi. Zapremina svih ljudi u prostoriji procenjena je na vrednost koja je za dva reda veličine manja od zapremine same prostorije. Šum je sniman po tri puta u tri tačke u prostoriji – prvo u praznoj prostoriji, a potom u prostoriji kada su ljudi bili prisutni u njoj. Grafikon na slici 1A predstavlja tipičan primer zavisnosti snimljenog zvučnog signala od vremena (na grafikonu je dat slučaj za frekvenciju 250 Hz). Nakon obrade signala na osnovu ovakvog signala dobijena je zavisnost data na slici 1B. Ovaj dijagram predstavlja vremen-



A



B

Slika 1.

A. Zavisnost inteziteta zvuka od vremena na 250 Hz u prostoriji sa ljudima, na trećem mernom mestu, pri prvom merenju

B. Zavisnosti jačine zvuka od vremena na frekvenciji od 250Hz u prostoriji sa ljudima, na trećem mernom mestu, pri prvom merenju (prilikom korišćenja funkcije Specgram)

Figure 1.

A. Relative intensity of sound vs. time at frequency of 250 Hz (third measuring place, first measurement)

B. Intensity of the same signal in decibels

sku zavisnost intenziteta registrovanog zvuka u decibelima (subjektivna jačina), na osnovu koje je računato vreme reverberacije za izabranu frekvenciju. Isti postupak je urađen za osam različitih frekvencija u intervalu od 62.5-8000 Hz.

Rezultati vremena reverberacije dobijeni na osnovu izvršenih merenja predstavljani su u tabeli 1. Kolone u tabeli predstavljaju frekvencije na kojima je vršeno ispitivanje, a vrste vremena reverberacije. U oznaci za merenja, prva cifra označava prisustvo ljudi (0 – prazna prostorija, 1 – prisutni ljudi), druga – mesto snimanja, a treća broj snimka.

Tabela 1. Zavisnosti vremena reverberacije [s] od pojedinih frekvenci

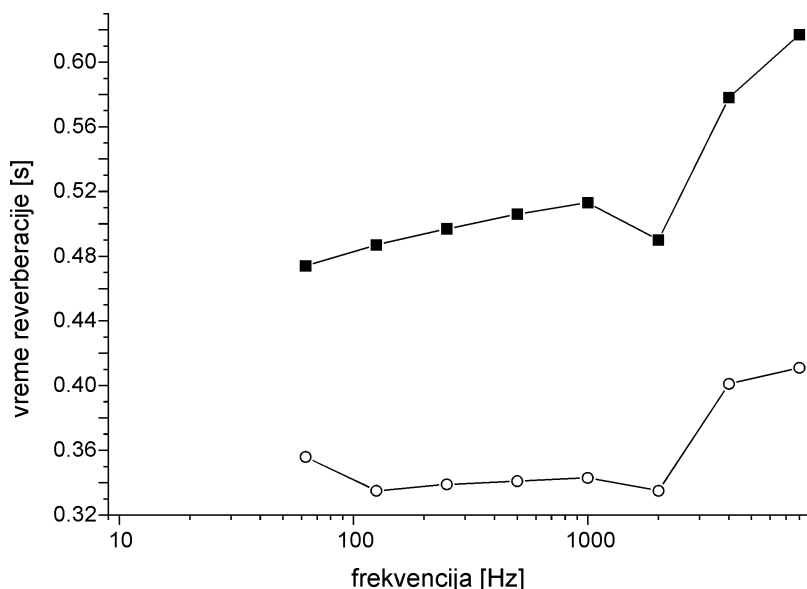
Merenje	Frekvencija [Hz]							
	62.5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
m011	0.56	0.438	0.452	0.541	0.549	0.509	0.662	0.612
m012	0.446	0.512	0.509	0.493	0.53	0.453	0.55	0.619
m013	0.49	0.504	0.51	0.504	0.509	0.494	0.597	0.607
m021	0.454	0.48	0.511	0.516	0.512	0.506	0.593	0.597
m022	0.463	0.502	0.495	0.492	0.490	0.467	0.559	0.63
m023	0.446	0.475	0.485	0.505	0.495	0.512	0.56	0.614
m031	0.493	0.502	0.51	0.512	0.51	0.49	0.61	0.616
m032	0.459	0.492	0.50	0.501	0.486	0.483	0.527	0.625
m033	0.458	0.479	0.504	0.495	0.532	0.496	0.56	0.63
m111	0.40	0.333	0.349	0.349	0.33	0.352	0.412	0.403
m112	0.37	0.34	0.353	0.336	0.355	0.318	0.403	0.418
m113	0.36	0.324	0.357	0.331	0.357	0.303	0.392	0.436
m121	0.34	0.341	0.332	0.332	0.322	0.327	0.401	0.395
m122	0.33	0.32	0.332	0.357	0.322	0.335	0.394	0.401
m123	0.353	0.335	0.336	0.321	0.335	0.312	0.393	0.41
m131	0.34	0.317	0.316	0.337	0.334	0.343	0.412	0.399
m132	0.365	0.37	0.34	0.367	0.37	0.396	0.405	0.425

U tabeli 2 dato je vreme reverberacije za oba slučaja (T_0 – prazna prostorija, T_1 – prostorija sa ljudima), kao i usrednjena apsorpcija zvuka po jednoj osobi. Za apsolutne greške vremena reverberacije ΔT_0 i ΔT_1 uzeto je najveće odstupanje od srednje vrednosti vremena na određenoj frekvenci. Ova greška je uglavnom metodološke prirode, odnosno, ona je posledica načina računanja vremena reverberacije iz grafika koji je dobijen u Matlab-u. Greška pri merenju zapremine prostorije se može zanemariti, jer je manja od 0.2%, i za red do dva veličine manja od greške za vreme reverberacije.

Tabela 2. Vremena reverberacije pune i prazne prostorije i usrednjena apsorpcija po jednoj osobi

Frekvencija [Hz]	T_0 [s]	ΔT_0 [s]	T_1 [s]	ΔT_1 [s]	A [m ²]	δA [%]
62.5	0.47	0.02	0.36	0.01	0.95	24
125	0.49	0.01	0.34	0.01	1.36	14
250	0.50	0.01	0.34	0.01	1.28	13
500	0.51	0.01	0.34	0.01	1.31	12
1000	0.51	0.01	0.34	0.01	1.32	13
2000	0.49	0.01	0.34	0.01	1.28	14
4000	0.58	0.02	0.40	0.01	1.03	14
8000	0.62	0.01	0.41	0.01	1.11	11

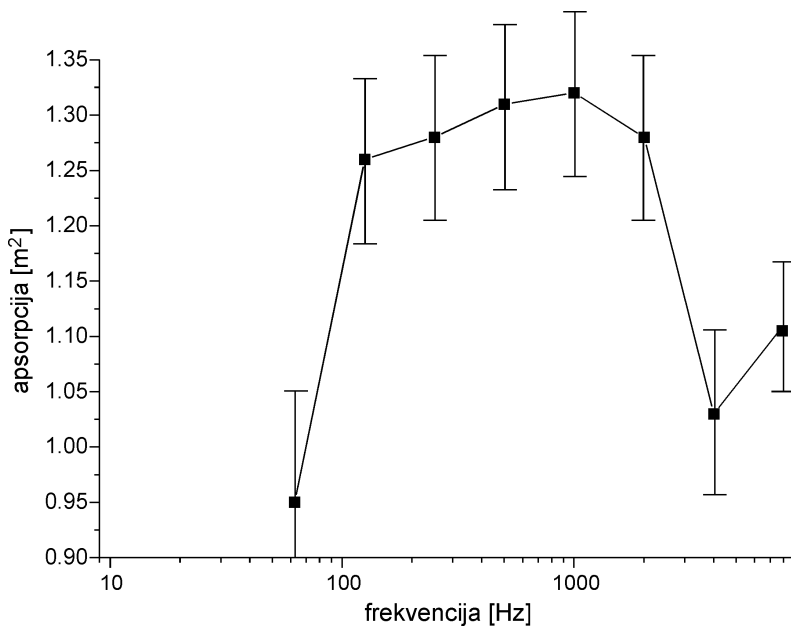
Na slici 2 prikazan je grafik vrednosti srednjeg vremena reverberacije za praznu prostoriju kao i slučaju kada su u njoj bili ljudi. Grafik na slici 3 predstavlja usrednjenu apsorpciju po jednoj osobi pri različitim frekvencijama.



Slika 2. Zavisnost srednjeg vremena reverberacije od frekvence.

Figure 2. Average reverberation time vs. frequency.

Teoretski, sa porastom frekvencije treba da dođe do pada vremena reverberacije. Posmatrajući grafik na slici 2, lako se može primetiti da na pojedinim delovima dolazi do odstupanja (Jelaković 1962). Ovo može da se objasni lošim prijemom zvuka, na frekvencijama višim od 2000Hz, od strane mikrofona. Kod ostalih vrednosti vremena reverberacije prisutna je veoma mala razlika u odnosu na teoretski predviđenu. Ovo se se može



Slika 3.
Zavisnost apsorpcije
prosečnog čoveka od
frekvence.

Figure 3.
Dependence of
average human
absorption on
frequency.

može objasniti malim dimenzijama prostorije kao i greškom metode. U slučaju kada su u prostoriji bili ljudi grafik zavisnosti vremena reverberacije od frekvence ima oblik koji liči već navedenom teoretskom (ibid.). Odsustvo sličnosti sa teorijskom modelom u drugom slučaju (prazna prostorija) može se donekle objasniti činjenicom da je greška pri izračunavanju na frekvenciji od 62.5 Hz veća od ostalih.

Zaključak

Jedna od stvari koja se isto može primetiti posmatrajući grafike je da vrednost vremena reverberacije na 500 Hz predstavlja srednju vrednost za navedeni opseg frekvencija. Ova činjenica je značajna jer se upravo ova frekvencija uzima za standard kod proučavanja vremena reverberacije, odnosno apsorpcije. Na srednjim frekvencijama rezultati merenja se poklapaju sa teoretski predviđenim.

Apsorpcija na određenoj frekvenci pre svega zavisi od površine i vrste materijala. Jedna od veličina koja takođe opisuje apsorpciju je i koeficijent apsorpcije α . Koeficijent apsorpcije i apsorpcija su povezani sledećom formulom:

$$\alpha = \frac{A}{S}$$

gde je S površina. Površinu čoveka je veoma teško odrediti (po našim procenama između 1.5 i 2.5 m²), stoga se nismo upuštali određivanje koeficijenta apsorpcije, nego samo apsorpcije.

Iz kratke analize ovog eksperimenta nameće se nekoliko mogućnosti za njegovo poboljšanje i proširenje. Prvo, bilo bi zanimljivo ispitati uticaj veličine prostorije, sa istim brojem ljudi (ili drugih apsorbujućih tela), ili variranjem broja ljudi u istoj prostoriji. Dalje, pošto je procenu zapremine, a pogotovu površine ljudi teško napraviti, bilo bi korisno izvesti kontrolni eksperiment sa nekim drugim apsorbujućim telima, i naći relaciju između broja tih tela i broja ljudi. Na primer, mogućnost bolje procene površine i zapremine mogla bi se realizovati postavljanjem i variranjem broja balona, te bi se geometrijski parametri u eksperimentu mogli znatno lakše kontrolisati. Ovakav eksperiment bi omogućio da se ispita, ne samo uticaj površine na vreme reverberacije i apsorpciju, nego i da se odredi i koeficijent apsorpcije za površine određenog kvaliteta.

Literatura

Jelaković, T. 1962. *Zvuk, sluh, arhitektonska akustika*. Zagreb: Školska knjiga

Gambiroža, V. 1997. Akustičke osobine crkava. Nepublikovani diplomski rad. Elektrotehnički fakultet Beograd.

Grabovičkić D., Radovanov R. 1999. Akustičke osobine Petničke crkve. *Petničke sveske*, 48: 87-98

Dejan Grabovičkić and Ranko Radovanov

The Influence of Human Presence on the Absorption of Sound in a Room

The aim of this project was to examine the influence of human presence on the absorption of sound in a room. We have recorded the “white noise” – the response of the room to a short strong sound signal. Every signal was frequency analyzed and times of reverberation were calculated. These values were then used to determine the absorption. The “human contribution” was defined as a difference between the absorption in the empty room, and in the room filled with people. The agreement of our results with theoretical expectations is best for frequencies around 500 Hz. other researches.

