
Ana Anastasijević

Merenje horizontalnog profila snage zvučnika u nelaboratorijskim uslovima

Eksperimentalno je utvrđen profil snage jednog zvučnika za sve frekvencije iz čujnog opsega zvuka i određen matematički model tog profila. Ova frekvencijska karakteristika zvučnika je određena snimanjem zvuka puštenog sa tog zvučnika, odnosno njegovom digitalnom obradom. U očekivanoj raspodeli odstupanja snage od sferne, uniformne raspodele bi trebalo da raste sa porastom frekvencije. Međutim, dobijeni rezultati se ne uklapaju u očekivani model. Rad predstavlja analizu mogućih maza u primeni ove metode merenja i stoga može biti od značaja za dalje slične eksperimente.

Uvod

Frekvencijski profil snage realnog nesfernog zvučnog izvora predstavlja disperziju energije zvučnog talasa generisanog tim zvučnim izvorom. Idealan sferni zvučnik ima uniformnu raspodelu energije, tj. uniformnu disperziju snage zvuka za ista rastojanja (Chamness 1994). Međutim, običan zvučnik nema uniformnu disperziju što je posledica njegovog oblika i veličine – manje zvučnike karakteriše uniformnija disperzija. Pretpostavka od koje se polazi u ovom eksperimentu je da je neuniformnost disperzije prisutna pri svim frekvencijama čujnog opsega, s tim što se njena izraženost jasnije uočava pri višim frekvencijama.

Zvučnici se, na osnovu opsega frekvencija koje najbolje reprodukuju, dele u tri kategorije: za reprodukciju niskofrekventnih tonova (tzv. niskotonci), za reprodukciju frekvencija iz srednjeg opsega (tzv. srednjetonci) i za reprodukciju zvuka visokih frekvencija (tzv. visokotonci). Niskotonac i srednjetonac imaju niži prag postojanja uniformne dis-

perzije od visokotonaca, jer reprodukcija dubljih tonova, odnosno nižih frekvencija zahteva veća odstupanja od sferne konstrukcije zvučnika. U ovom radu korišćen je srednjetonac da bi se dobio što usrednjjeniji rezultat koji bi mogao biti referantan i za zvučnike niskotonce i visokotonce. Mikrofon, poput zvučnika, ima svoju frekvenčnu karakteristiku, tj. profil snage osetljivosti.

Cilj ovog rada je testiranje pouzdanosti metode digitalne obrade snimka u eksperimentalnom utvrđivanju profila snage jednog zvučnika za ceo čujni opseg zvuka i provera teoretskog modela koji predviđa da se izraženost odstupanja bolje uočava na višim frekvencijama, ali da je prisutna na svim.

Poznavanje frekvencijskog profila snage zvučnika ima veliku primenu u akustici i ravnometernom ozvučavanju prostorija za događaje poput koncerata, gde je ravnometerna raspodela snage zvuka svih frekvencija od elementarnog značaja za pravi doživljaj slušaoca muzike. Matematički model disperzije je karakterističan za svaki zvučnik ponaosob, pa ga je veoma teško pronaći za potrebe kompjuterskih simulacija i teorijska predviđanja različitih postavki za ozvučavanje, što je i bila početna motivacija za izvođenje ovog eksperimenta. Problemi nastali u obradi rezultata su doveli u pitanje validnost ovakvog pristupa za eksperimentalno utvrđivanje profila snage, pomerajući težište projekta sa provere teorijске hipoteze na ocenu samog metoda izvođenja eksperimenta i obrade na taj način prikupljenih podataka.

Metod

Metoda merenja podrazumeva snimanje zvuka generisanog sa jednog zvučnika za konstantno rastojanje, pri varijaciji ugla u odnosu na osu upravnu na zvučnik. Snimak se potom softverski obrađuje radi računanja jačine zvuka. Pritom je korišćena sledeća aparatura: zvučnik srednjetonac, mikrofon, uglomer,

Ana Anastasijević (1989), Beograd, Braće Jerković 185, učenica 3. razreda Matematičke gimnazije u Beogradu

MENTOR: Darko Todorović, ISP

i od softverskih alata: Matlab, Sony Sound Forge, Adobe Audition, Origin i Winamp. Eksperiment je automatizovan pisanjem odgovarajućeg programa u Matlabu. Funkcije iz programa regulišu puštanje zvuka sa zvučnika, kao i digitalnu obradu signala snimljenih u ovom eksperimentu.

Postavka eksperimenta se sastoji iz sledećeg: naredbama iz Matlaba generisani su sinusoidni signali frekvencija iz čujnog opsega (od 20Hz do 20 kHz) zadatih amplituda, dužina trajanja i pauza između njih, koji su potom prevođeni u .wav fajl i puštani iz Winampa. Testirane su 183 različite frekvencije. Korak promene frekvencija je modulisan u skladu sa trenutnom vrednošću frekvencije koja se pušta. Pauze se generišu da bi se kasnije, pri digitalnoj obradi snimka, lakše uočile različite frekvencije, efikasnije odvojio šum od signala i da bi se jednostavnije i preciznije iz njih mogla odrediti snaga signala. Dužina snimka koji je puštan je 3 minuta i 39 sekundi. Funkcija u Matlabu kojom se to rešava je sledeća:

```
function iz = gen_frek (dg, korak, gg, frek, len)
t = 0:(1/frek):len;
d_t = length(t);
iz = zeros(1, (d_t+length(pauza)) * ((gg-dg)/
korak));
for i= dg:korak:gg
    signal=A*sin(2*pi*i*t);
    iz(1:length(t));
end
```

Eksperiment je izведен na otvorenom prostoru da bi se smanjila refleksija zvuka od zidova, prepreka ili poda u zatvorenoj prostoriji (zemlja dobro apsorbuje zvučne talase), čime je poboljašan kvalitet snimljenog zvuka. Zvučnik je povezan sa računaram, dok je mikrofon postavljan na rastojanje od 1 m od zvučnika u 19 različitih položaja – na osu zvučnika i pod uglovima od: $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 70^\circ$, $\pm 80^\circ$, i $\pm 90^\circ$ stepeni u odnosu na nju.

Sa zvučnika se pušta zvuk iz Winampa, a mikrofonom se isti snima. Svaki snimak je prvo bitno obrađen u Matlabu, određivan je početak i kraj svakog signala, broj odbiraka, energija i srednja snaga svakog signala. Energija je računata kao kvadrat amplitute, jer joj je direktno srazmerna, a traži se relativan odnos između različitih energija, odnosno snaga. Snaga signala se računa po formuli

$$P = E \cdot \frac{f}{n},$$

gde je P snaga, E izračunata energija, a n broj odbiraka (Popović 1996).

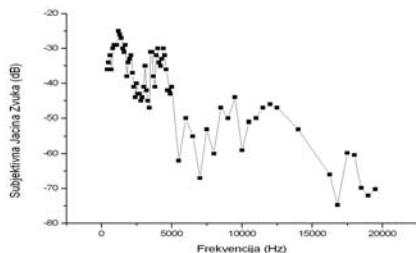
Ovaj pristup se pokazao kao loš, pa se pristupilo obradi snimka direktno iz Sound Forgea, ugrađenim alatima za filtraciju šuma i spektralnu analizu.

Rezulati i diskusija

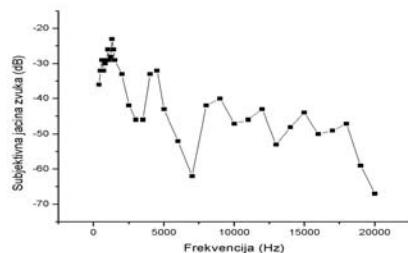
Digitalnom obradom signala svakog snimka dobijena je matrica zavisnosti snage od frekvencije i ugla. Rezultati eksperimenta su predstavljeni grafički, kao funkcija snage od frekvencije za različite uglove. Očekivani rezultat je da je za jednu frekvenciju snaga najveća pod uglom od 0 stepeni, odnosno kada je mikrofon postavljen direktno ka zvučniku, a da se smanjuje sa povećanjem ugla. Simetričnost vrednosti u odnosu na glavnu osu bi isto bila očekivana karakteristika profila snage.

Prvobitni rezultati su bili u suprotnosti sa polaznim pretpostavkama. Ponovnim preslušavanjem snimaka i korišćenjem alata dostupnih u Sound Forgeu, došlo se do zaključka da je intenzitet šuma izuzetno veliki i da njegova amplituda, u određenim segmentima čak i prevaziđa amplitudu signala. U početnom, kontrolnom preslušavanju snimka dogodio se previd u proceni štetnosti ovog šuma za samu obradu signala, usled pogrešne pretpostavke da je jak šum koji se čuo na snimku proizveden od strane zvučnika na prelazu sa pauze na signal, pa samim tim i neizbežan. Na osnovu detaljne analize amplitudno-vremenske karakteristike snimka iz Sound Forgea zaključeno je da je taj nagli porast amplitude zvuka neperiodičan i da mu stoga uzrok nije nagli prelaz sa tišine na korisni signal, što je bila prvobitna misao.

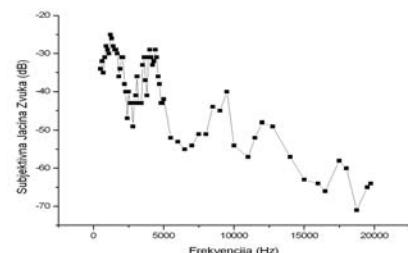
Dalje je pristupljeno filtraciji signala iz Sound Forgea Blackman-Harrisovom prozorskom funkcijom radi efikasnijeg izdvajanja korisnog signala od šuma. Primena Blackman-Harrisove prozorske funkcije nije bila dovoljna da bi se uspešno mogao izdvojiti koristan signal od šuma na snimcima, pa se pristupilo daljoj filtraciji alatima iz samog Sound Forgea. Iz snimka, odnosno signala odstranjen je jednosmerni signal, a amplitude samog signala su pojačane za 12 dB, odnosno približno 400%. Na kraju je primenjena funkcija filtracije podešena u samom programu. Međutim, ovim postupkom, koji je bio neophodan da bi se iz snimka odstranio šum koji onemogućava uspešnu obradu signala, odstran-



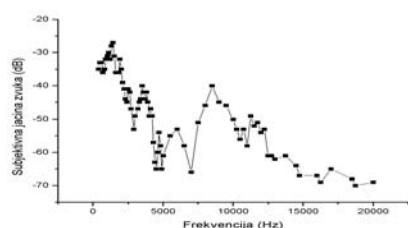
A: 90°



B: 30°



C: 50°



D: 90°

Slika 1. Zavisnost jačine zvuka od frekvencije za različite uglove

Figure 1. Sound intensity-frequency graph for different angles

jene su i sve niske frekvencije ispod vrednosti od 400 Hz.

I pored maksimalne filtracije, jačina nepoznatog šuma je bila veća od korisnog signala, što je onemogućilo automatsku obradu iz Matlaba. Stoga se pristupilo ponovnom preslušavanju svih snimaka i iščitavanju vrednosti jačine zvuka sa amplitudno-vremenske karakteristike za svaki od njih. Na osnovu tih podataka pravljen je frekvencijski spektar subjektivne jačine zvuka za svaki snimak i grafik profila snage za svaku frekvenciju. Grafici za snimke kada mikrofon stoji pod uglovima od 0, 30, 50 i 90 stepeni u odnosu na vertikalnu osu dati su na slici 1.

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 1 dolazi se do zaključka da se u intervalu od 400 Hz – 5 kHz (srednji opseg frekvencija) dobija slična raspodela za sva merenja što spada u očekivan rezultat za ovaj tip zvučnika. Za vrednosti iznad 5 kHz promena jačina zvuka je veoma različita za različite snimke, što je posledica superpozicije karakteristike zvučnika i mikrofona koji je pravljen za snimanje frekvencija nižih od 5 kHz (mikrofon za snimanje govora).

Profil snage zvučnika za frekvencije od 400 Hz, 900 Hz, 1500 Hz, 3100 Hz, 4 kHz, 6 kHz, 8 kHz, 10 kHz, 12 kHz i 13.5 kHz dati su na slici 2.

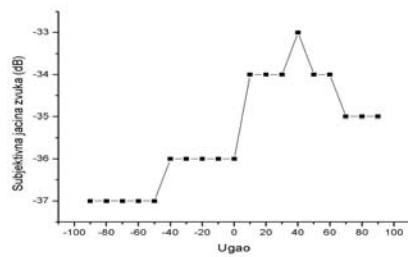
Rezultati dobijeni na ovaj način značajno odstupaju od očekivnih – nije uočena nikakva simetričnost u odnosu na osu $x = 0$ niti se maksimum funkcije dostiže u nuli. Detaljnog analizom postupka kojim se do rezultata došlo, došlo se do nekoliko zaključaka.

Vrednosti su dobijene detaljnom proverom delova snimaka i njihovom obradom gotovim funkcijama spektralne analize i filtracije iz Sound Forgea, pa je mala verovatnoća da je do greške došlo u ovom segmentu postupka.

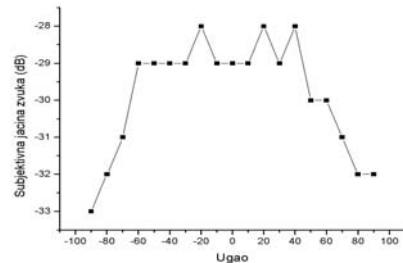
Zvučnik i mikrofon korišćeni u ovom eksperimentu su pored lošeg kvaliteta i prilično stari (pogotovo zvučnik), pa postoji mogućnost da nelogičnosti u rezultatima potiču iz neadekvatne opreme.

Šum nepozantog porekla koji je uočljiv na snimku nije bio u potpunosti odstranjen pošto bi na taj način snimak postao neupotrebljiv za obradu (čišćenje svog šuma nepovratno bi odstranilo i najveći deo korisnog signala), pa postoji mogućnost da je i to omelo uspešnu obradu rezultata.

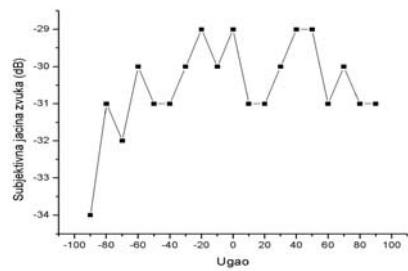
Najverovatniji uzrok dobijanja ovako neočekivanih rezultata je upravo u superpoziciji karakteris-



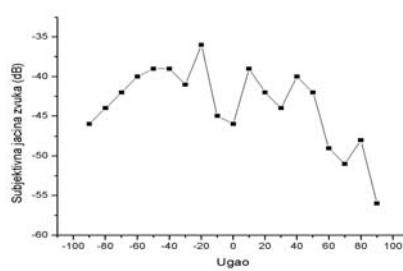
A: 400 Hz



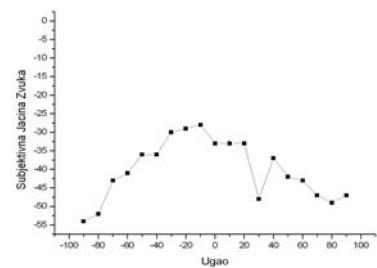
B: 900 Hz



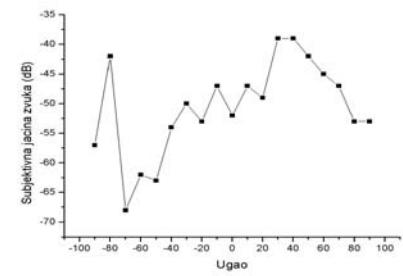
C: 1500 Hz



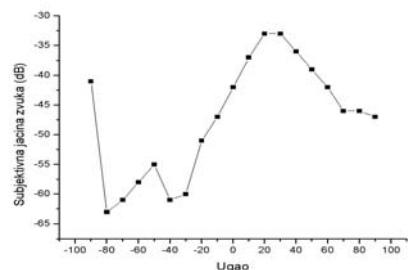
D: 3100 Hz



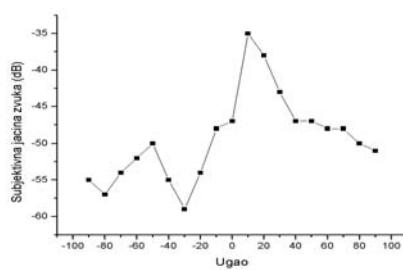
E: 4 kHz



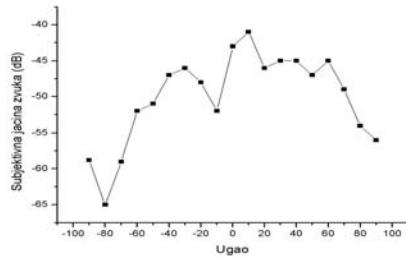
F: 6 kHz



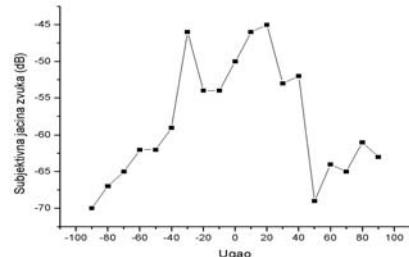
G: 8 kHz



H: 10 kHz



I: 12 kHz



J: 13.5 kHz

Slika 2 (A–J). Profil snage zvučnika za različite frekvencije

Figure 2 (A–J). Speaker's energy dispersion for different frequencies

like mikrofona i zvučnika, kao i prisustvu izuzetno jakog šuma na snimku.

cama Dajani Danilović i Mariji Janković, kao i svim ostalim saradnicima i polaznicima u IS Petnica.

Zaključak

Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da je primena digitalne obrade signala u određivanju profila snage zvučnika za ceo čujni opseg zvuka prilično nepouzdana za upotrebljenu aparaturu. Dalje, kako je prisustvo šuma neizbežno, i sa veoma preciznom i kvalitetnom aparaturom, izvesno je da se ne može utvrditi profil snage zvučnika za niske frekvencije iz čujnog opsega, pošto one mogu biti odstranjene filtracijom.

Drugi deo ovog rada koji se odnosi na proveru teorijskog modela koji predviđa da se izraženost odstupanja bolje uočava na višim frekvencijama, ali da je prisutna na svim, nije ostvaren, pošto se gorenavedeni rezultati ne mogu smatrati validnim.

Kako je aparatura upotrebljena u ovom eksperimentu zastarela, a pritom nije uspelo ni kompletno odstranjivanje šuma nepoznatog porekla sa snimaka, provera metode je efektivno neuspela, pa može služiti kao referenca za dalje eksperimente iz kojih bi se mogla utvrditi validnost primene digitalne obrade snimka za određivanje frekvencijskog profila snage zvučnika.

Zahvalnost. Izuzetnu zahvalnost za ostvarenje ovog projekta dugujem mentoru, Darku Todoroviću, rukovodiocu seminara elektronike Miodragu Đukiću, saradniku Igoru Stamenovu, zatim mlađim saradni-

Literatura

Chamness M. 1994. *Objective analysis of loudspeaker polar response*. Whitinsville (MA USA): Eastern Acoustic Works

Popović M. 1996. *Digitalna Obrada Signala*. Beograd: Nauka

Ana Anastasijević

Measuring a Speaker's Horizontal Energy Dispersion Outside the Laboratory

A speaker's energy dispersion has been determined experimentally for frequencies of the hearing range. The dispersion is determined by digitally processing the recordings of the sound played from the speaker. The expected distribution should deviate from a spherical dispersion with the increase in frequency. However, the results that were obtained were inconsistent with the predicted model. This paper is an analysis of possible pitfalls of this method of measurement and therefore could be useful for some further experiments.

