

predrag vukadin

OSNOVE PROSTORNE AKUSTIKE ZA AUDIOFILE

Užitak dobrog zvuka u našem domu samo je završni čin jednog dugog i složenog procesa koji počinje zapisom izvorne glazbene izvedbe. Nažalost, velika većina audiofila kvalitetu zvuka gotovo isključivo pripisuje uređajima za reprodukciju. Njihov izbor popraćen je proučavanjem dostupne literature, mnogim usporednim analizama, savjetima, preslušavanjima. Beskrajne su diskusije o kvaliteti pojačala, zvučnika, reproduktora zvuka. Mnogi audiofili mijenjaju uređaje nezadovoljni njihovim performansama, često ne postižući ono što žele. Pri tome se potpuno zanemaruju osnovne stvari, korijeni dobrog zvuka a to je utjecaj prostora u kojem se taj zvuk sluša. Bez obzira na zvučnik i pojačalo, zvuk mora, do izazivanja osjeta u našem mozgu, proći kroz prostor, pri čemu se događaju

mnoge interakcije koje su opisane osnovnim zakonima fizikalne akustike i koje se ni na koji način ne mogu izbjeći. To se gotovo redovito zanemaruje, često s katastrofalnim posljedicama. Činjenica je da se o akustici prostora ne vodi dovoljno računa, a prema tome i vrlo malo zna. Čak i oni upućeniji redovito ne shvaćaju ukupno međudjelovanje prostorno-akustičkih faktora i (pre)često probleme pripisuju posve krivom „krivcu“, tj. nekoj od audiokomponenti.

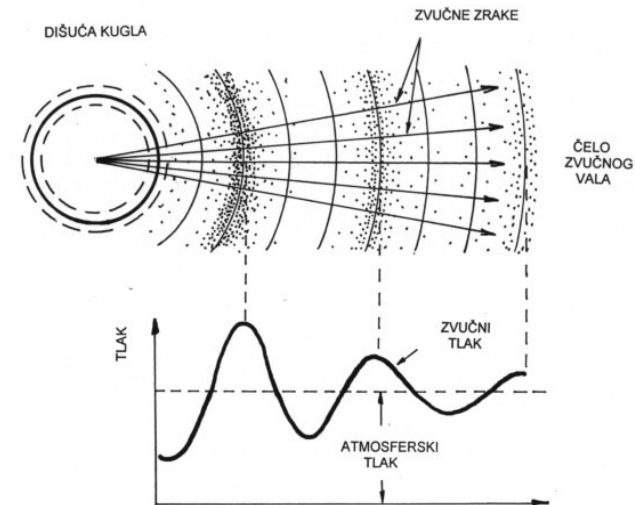
Stoga mi je namjera da se u jednom preglednom i sažetom napisu objasnim osnovne fizikalne zakone i pojave koji se javljaju pri širenju zvuka u zatvorenom prostoru i utjecaj samog prostora na ono što se s zvukom događa. Pokušat će se dati i osnovne spoznaje o ugađanju prostorne akustike i usklađenju glazbe, uređaja za reprodukciju i prostora. Dakle, ako vas zanima zašto vas audio sustav svira „lošije“ nakon što ste preuredili sobu, zašto skupi zvučnici kojima ste se oduševili kod vašeg prijatelja zvuče razočaravajuće kod vas ili gdje su nestali basovi iz tek kupljenih subwoofera, čitajte dalje! Nastojat ćemo pisati što razumljivije uz pretpostavku vrlo osnovnih znanja iz fizike (titranje, val, valna duljina, frekvencija i sl.) jer bi počinjanje od samog početka neprihvatljivo odgodilo prelaženje na „prave stvari“. Sa željom da bude što razumljiviji pazit ću da ne pribjegnem prevelikom pojednostavljenju i da se tako izgubi znanstvena egzaktnost. Mnogi su na takvom pristupu slomili zube, pa unaprijed pozivam na razumijevanje, pogotovo onih dobro upućenih u problematiku.

1. OSNOVNO O ZVUKU

Pojam zvuka najčešće se definira na dva načina: prvi je način preko subjektivno-psihološkog načina, kod kojeg se zvuk definira kao sve ono što se čuje ili zamjećuje sluhom. Drugi je način pomoću objektivno-fizikalnog formalizma, kod kojeg se zvuk definira kao fizikalna pojava titranja (promjena stanja čestica) u nekoj elastičnoj sredini (mediju). Titranje čestica prenosi se od izvora titranja kroz elastičnu sredinu (zrak) konačnom brzinom u obliku zvučnih valova, a prostor u kojem se širi zvučni val naziva se zvučnim poljem. Brzina kojom se zvučni val širi u zvučnom polju naziva se brzinom zvuka u sredini (mediju) zvučnog polja.

Uobičajeni pristup u opisivanju nastanka zvuka u fizikalnom modelu je pulsirajuća sfera, tj. dišuća kugla koja naizmjenično povećava i smanjuje svoj volumen. Dok ona povećava svoj volumen, čestice zraka u neposrednom dodiru s površinom kugle potiskuju se od središta kugle prema van u svim pravcima. Na taj način se povećava gustoća zraka neposredno uz kuglu, pa i slijedeći sloj čestica ne može zadržati svoju prvobitnu gustoću jer u njega prodiru čestice iz prethodnog sloja, potiskujući i njegove čestice prema slijedećem sloju i na taj način se to djelovanje kugle prenosi na daljinu od sloja do sloja zraka. Kad nakon povećanja volumena kugla počne sažimati svoj volumen uz njenu površinu stvara se praznina koju opet popunjavaju čestice iz sloja najbližeg površini kugle. Na njihovo mjesto, radi nastalog razrjeđenja, dolaze čestice slijedećeg sloja i tako analogno razrjeđuju se sve dalji i dalji slojevi. Kako se cijela pojava ponavlja, prostorom se šire, jedan za drugim, valovi zgušnjavanja i razrjeđenja. Pojava zvuka se može promatrati i kao promjena položaja čestica zraka koje titraju oko svog

ravnotežnog položaja. Ili se umjesto pomaka čestica mogu promatrati i promjene gustoće zvuka. Nadalje, čestice koje se pomiču imaju svoju brzinu i ubrzanje, a promjene gustoće su prema fizikalnim promjenama u elastičnim medijima neposredno vezane uz promjene tlaka. Upravo je ta promjena tlaka ono što naše uho percipira kao zvuk.



Slika 1. Dišuća kugla titranjem uzrokuje promjene zvučnog tlaka

Promjena zvučnog tlaka može se dobro aproksimirati sinusoidom, sa značenjem da u jednoj njenoj poluperiodi tlak poraste iznad atmosferskog, a u drugoj poluperiodi se snizi ispod njegove vrijednosti. Slika će nam pomoći da definiramo još dva vrlo važna i korisna pojma, a to su čelo zvučnog vala (ili valna fronta) te zvučne zrake. Čelo zvučnog vala uzrokovano dišućom kuglom ili bilo kojim točkastim izvorom (što je ustvari kugla vrlo malih dimenzija) je kuglastog oblika, a na dovoljno velikoj

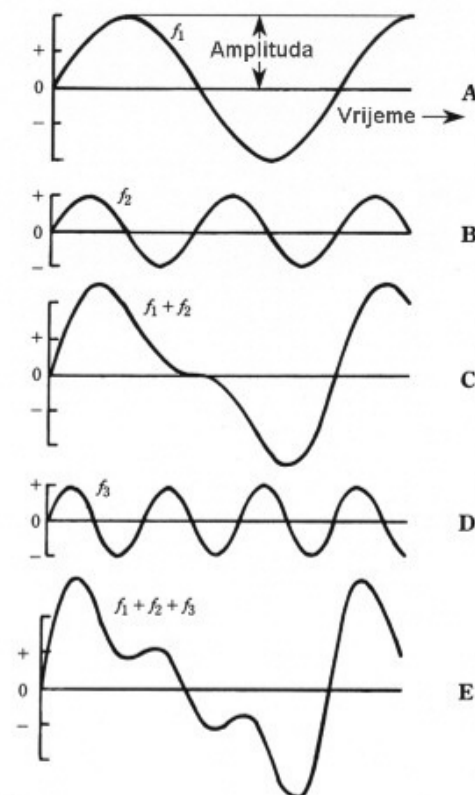
udaljenosti od izvora može se aproksimirati ravninom jer ima veliki polumjer, tj. vrlo malu zakrivljenost. Zvučne zrake su pak zamišljeni trag jedne čestice koja se giba na čelu vala i to uvijek okomito na čelo vala, pa su na dovoljno velikoj udaljenosti od zvučnog izvora međusobno paralelne. Uvođenje pojma zvučnih zraka pomoći će nam kod proučavanja ponašanja zvučnog vala u zatvorenom prostoru, tj. slušaonici.

Zvučnici s membranom oblika dijela kugle (npr. kalotni visokotonci) titraju vrlo slično pulsirajućoj kugli i njihovo titranje se vrlo dobro može opisati slikom 1. Zvučničke membrane tipa blagog konusa (većina srednjetonkih i dubokotonkih zvučnika) se zbog svog oblika mogu bolje aproksimirati klipom koji se pomiče naprijed-nazad, a zvučni val s ravnim valom, upravo takvim kakav i kuglasti val postaje na dovoljno velikoj udaljenosti od izvora titranja. Razmak između dvije susjedne točke najvećeg zgušnjavanja ili razrjeđenja čestica zraka (tj. između minimuma ili maksimuma sinusoide koja predstavlja promjenu zvučnog tlaka) naziva se valna duljina. Što zvučni izvor brže titra to će i valna duljina biti manja. Uz valnu duljinu vezana je i definicija frekvencije zvučnog vala f koja se može izraziti kao odnos brzine širenja zvučnog vala u zraku v (zraka) i λ (valna duljine). Iz jednadžbe:

$$f = v(\text{zraka}) / \lambda(\text{valna duljina})$$

slijedi jasan odnos: valna duljina je to manja, što je veća frekvencija titranja izvora zvuka, tj. frekvencija zvučnog vala. Brzina zvuka u zraku je oko 340 m/s. To je približna vrijednost koja ovisi o temperaturi i vlazi, ali dovoljno je točna za naše potrebe. Dobro će nam doći da zapamtimo i

sljedeće podatke: zvuku treba oko 3 tisućita dijela sekunde da prijeđe put od jednog metra, a kako je čujno frekvencijsko područje od 20 do 20.000 Hz to odgovara valnim duljinama od 17 metara do 17 milimetara.



Slika 2. Prikaz složenog titranja

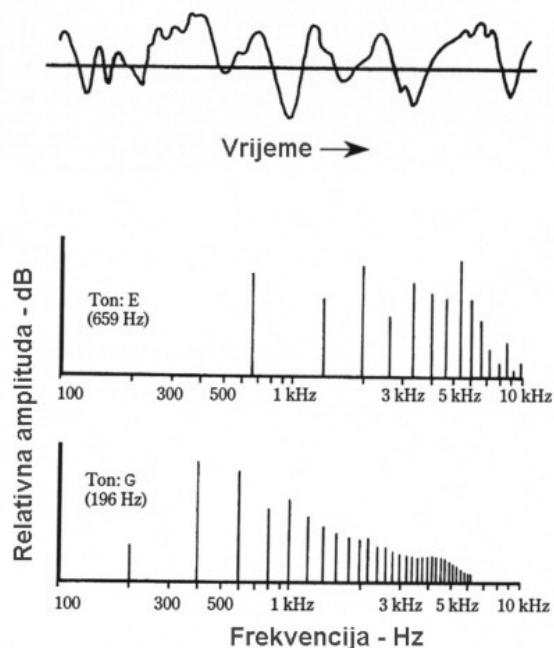
konačnim brojem superponiranih (zbrojenih ili/i oduzetih) sinusoidalnih titranja (tzv. Fourierova analiza). Primjer je prikazan na slici 2., gdje se vidi kako se superponiranjem dva sinusoidalna titranja frekvencija f_1 i f_2 (A i B

Ukoliko zvučni val ne naiđe ni na kakvu prepreku on će se kao kuglasti ili ravni val slobodno širiti kroz prostor. Pri tome će zvučni tlak opadati s udaljenošću od izvora i to približno s kvadratom udaljenosti. To znači da će zvučni tlak na 2 metra udaljenosti od izvora biti 4 puta niži nego na udaljenosti 1 metar, a na udaljenosti od 4 metra biti će čak 16 puta niži.

Prirodni zvukovi, pa i glazba, složeni su i ne mogu se opisati jednostavnim promjenom zvučnog tlaka pomoću sinusoide. Međutim, matematika nas uči da se bilo kakovo složeno harmonično titranje može opisati

na slici) dobiva titranje s oblikom C, a daljnjim superponiranjem još jedne sinusoide dobiva titranje oblika E.

Na slici 3. prikazan je glazbeni ton proizveden povlačenjem gudala preko otvorene violinske E-žice. Glazbeni ton prikaz je na dva načina. Na prvom se vidi promjena zvučnog tlaka s vremenom, a na drugom okomitim crtama prikazani su svi čisti tonovi (sinusoide) koje sadržava taj ton.



Slika 3. Glazbeni ton dobiven povlačenjem gudala preko otvorene violinske E-žice

Ovakav prikaz se naziva spektralnim prikazom jer prikazuje frekvencijski spektar glazbenog tona, gdje osnovni ton određuje subjektivni osjet visine tona, a njegovi harmonici boju tona (timbar) instrumenta.

2. ŠIRENJE ZVUKA U ZATVORENOM PROSTORU

Iz fizike znamo da se zvučni val u zatvorenoj prostoriji ne širi slobodno, nego udara u razne prepreke (zid, prozor, vrata, namještaj) i tada se reflektira ili/i apsorbira. Kod refleksije zvučnog vala mogući su sljedeći slučajevi:

1. potpuno upijanje tj. totalna apsorpcija u prepreci kada medij „upije“ svu energiju zvučnog vala;
2. potpuno odbijanje ili totalna refleksija jer se je sva energija vala vratila (reflektirala) u zrak, tj. prostoriju;
3. energija zvučnog vala djelomično se predaje u medij prepreke, a dio se djelomično odbija natrag u zrak, što je najčešći slučaj.

Ovo vrijedi uz aproksimativno ograničenje da će se zvučni val reflektirati od prepreke samo ako dimenzija prepreke jednaka ili veća od valne duljine zvučnog vala. Dakle, zvučni val valne duljine 50 cm ili približno 700 Hz reflektirat će se od zida sobe, ali neće od čaše čija je najveća dimenzija znatno manja od tih 50 cm. Na ovo svojstvo zvučnog vala često ću se kasnije pozivati.

2.1. APSORPCIJA I REFLEKSIJA

O čemu ovisi kolika će se zvučna energija apsorbirati, a kolika reflektirati od neke prepreke? Daleko najvećim dijelom o valnoj duljini (tj. frekvenciji) zvučnog vala i fizikalnim svojstvima prepreke. Svaki materijal, pa tako i oni koji se koriste u građevinarstvu i izradi predmeta koji se nalaze u našim manje ili više adaptiranim slušaonicama imaju određena apsorpcijska svojstva. Bezdimezionalni koeficijent apsorpcije uobičajeno se označava

simbolom α i može iznositi od 0 (totalna refleksije) do 1 (totalna apsorpcija) te nam kazuje koliko se zvučne energije apsorbiralo u materijalu. Ako je taj koeficijent 0,5 tada se polovina zvučne energije apsorbirala, a preostala polovina reflektirala se u prostor. No koeficijent apsorpcije nekog materijala ovisi i o valnoj duljini zvučnog vala koji na njega dolazi. Dakle, val velike valne duljine (niže frekvencije) apsorbirat će se na istom materijalu drugačije od vala male valne duljine (više frekvencije). U tablici 1. prikazani su približni koeficijenti apsorpcije često korištenih materijala.

Materijal	Koeficijent apsorpcije (α)				
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	4 kHz
Betonski zid ili pod	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Parket ili brodski pod	0,04	0,04	0,07	0,06	0,07
Jednostruki stakleni prozor	0,31	0,23	0,17	0,12	0,04
Vuneni tepih	0,08	0,24	0,57	0,69	0,73
Mineralna vuna debljine 5 cm nalijepljena na zid	0,19	0,65	0,99	0,99	0,99

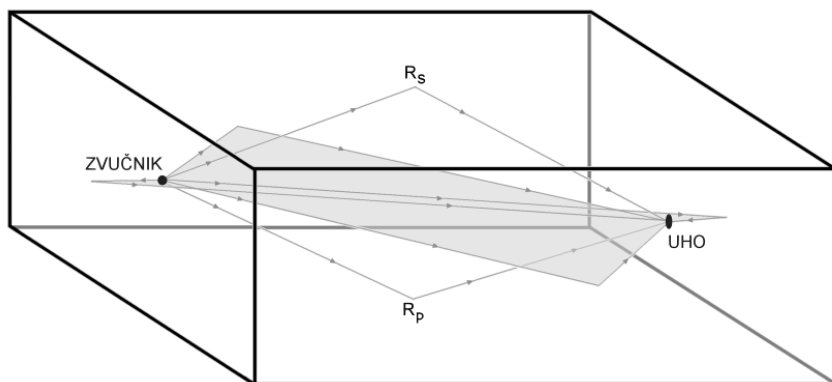
Tablica 1. Koeficijenti apsorpcije nekih materijala po frekvencijskim oktavama

Iz tablice je razvidna važnost shvaćanja koeficijenta apsorpcije kao veličine značajno ovisne o frekvenciji. Kad se to prihvati, jasno je koliku grešku mnogi audiofili, (nažalost, i mnogi „stručnjaci”) čine proglašavajući neki materijal apsorbentom, a neki ne. To može biti točno, ali samo za određeni frekvencijski pojas. Razmotrimo kao primjer mineralnu vunu koja postavljena u debljini od 5 cm na betonski zid predstavlja totalni apsorbent za visoke frekvencije, ali što upadni zvučni val ima nižu frekvenciju, to je apsorbirana energija sve manja i kod 125 Hz apsorbira samo oko 20%

energije. Drugim riječima, mineralna vuna nije uopće apsorbent za dvije najniže oktave. Vrlo slična je situacija s tepihom, koji se često navodi kao važan apsorpcijski element u slušaonici. Da, ali za što – za basove sigurno ne. Prisjetimo se već rečenog, niske frekvencije imaju veliku valnu duljinu i da bi za takav val nešto predstavljalo prepreku mora imati dimenziju jednaku ili veću valnoj duljini. Iz svega postaje jasno da tepih ne može biti dobar apsorbent za bas jer on tepih niti ne „vidi”. Odmah postaje jasno da sa s apsorpcijom visokih tonova neće biti problema nego s basovima, ali o tome više kasnije.

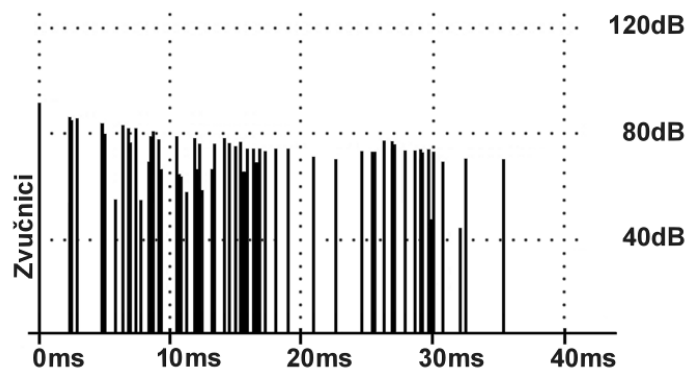
Što se pak događa s energijom zvučnog vala koji se reflektirao od prepreke gubeći nešto od svoje energije. U skladu s fizikalnim zakonima kut odbijanja jednakom kutu upada i on potom nastavlja svoje širenje kroz prostoriju do sljedeće prepreke i opet se reflektira i ovisno o apsorpcijskim svojstvima materijala opet gubi dio svoje energije, a ostatak putuje do sljedeće prepreke, itd. Zvučni val značajno gubi energiju i samim širenjem kroz zrak. Dakle, sa svakom refleksijom i putovanjem kroz zrak zvuk će postajati sve tiši dok konačno ne postane posve nečujan.

Sad je trenutak da se poslužimo otprije definiranim pojmom zvučne zrake. Iz točkastog izvora zvuka izlaze zvučne zrake koje se šire do prve prepreke, reflektiraju se pod istim kutom pod kojim su upale (1. refleksija), šire se potom do sljedeće prepreke, ponovno se reflektiraju (2. refleksija), itd., kao što je prikazano na slici 4. Slika je vrlo pojednostavljeni prikaz tek nekolicine zvučnih zraka, i to samo za prvu refleksiju, pod čime podrazumijevamo refleksije koje su do mjesta slušanja, tj. našeg uha, došle odbivši se samo jednom od neke prepreke, u ovom slučaju zida.



Slika 4. Prikaz direktnog i reflektiranih zvučnih valova zvučnim zrakama

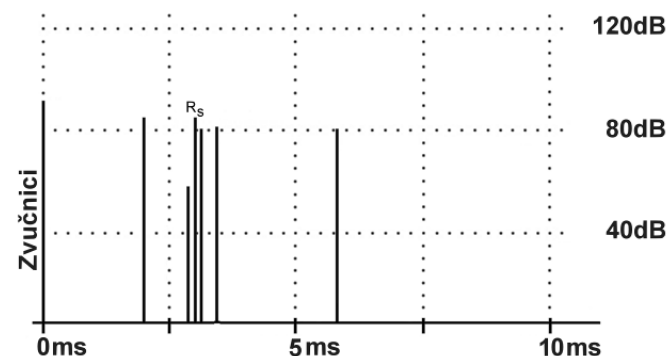
Zamislite sada „realnu“ situaciju, npr. širokopojasan i omnidirekcionalan zvučnik, kad se mnoštvo zvučnih zraka uzastopno reflektira od različitih prepreka u prostoriji, a svaka ta zvučna zraka je složeni zvučni signal koji se sastoji od mnoštva superponiranih čistih tonova različitih frekvencija, od kojih se svaki ton reflektira različitom energijom.



Slika 5. Reflektogram zvučnih zraka

Slika tada postaje vrlo složena kao što je razvidno iz slike 5. gdje je na horizontalnoj osi dano vrijeme kašnjenja refleksija u odnosu na direktni zvuk do mjesta slušatelja, a na vertikalnoj osi je zvučni tlak pojedinih refleksija izražen u decibelima. Ovakav prikaz nazivamo reflektogramom jer prikazuje razdiobu reflektiranih zvučnih zraka. Opet valja napomenuti da i ovaj pojednostavljeni prikaz vrijedi samo za jedno mjesto u prostoriji i jednu frekvenciju (ili uže frekvencijsko područje).

Znajući sve te parametre možemo odrediti energiju (zvučni tlak) svih refleksija složenog glazbenog zvuka bilo „ručnim“ računom ili računalnim programom namijenjenim za akustičke proračune.



Slika 6. Tipični reflektogram slušaonice

Prikaz na slici 6. dobiven je računalnom simulacijom za razdiobu refleksija u prostoriji veličine 4,5x3,8x2,6 metra. Uzeta je jedna tipična prostorija uobičajene visine kakvu mnogi audiofili koriste kao slušaonicu i u daljnjem tekstu zvat ćemo je jednostavno slušaonica. Na podu je vuneni tepih, tri zida su ožbukani beton, a četvrti je simuliran apsorbirajućom površinom $\alpha=0,5$. Izvor zvuka je jedan zvučnik tipične usmjerenosti. Broj refleksija je

ograničen na prve 3, tj. prikazane su samo refleksije koje su se reflektirale tri puta ili manje (ima ih ukupno 46). Ovakvo ograničenje je uobičajeno jer su refleksije višeg reda jako prigušene i toliko kasne da je njihov utjecaj na glazbu uglavnom zanemariv.

Situacija je još uvijek jako pojednostavljena, jer nema ni namještaja ni ljudi. No, što stvarno znači ta razdioba refleksija za naš doživljaj glazbe? Ona uvelike određuje zvučnu sliku na mjestu slušanja jer utječe na vrijeme odjeka (reverberacije), prostornu lokalizaciju zvučne slike, te izobličenja frekvencijske karakteristike stvaranjem takozvanih češljastih filtara. Stoga krenimo redom raspletati sve te utjecaje na zvuk.

2.3. VRIJEME ODJEKA

Vrijeme odjeka povijesno je prva definirana akustička značajka prostorije i vrlo dugo gotovo je jedina korištena u procjeni akustike prostorija. Da bi smo shvatili pojam odjeka, pokušajmo shvatiti kako u prostoriji iz potpune tišine nastaje zvučno polje. Vratimo se opet na naš primjer. Pretpostavimo da izvor zvuka proizvodi zvuk konstantne energije. Do slušatelja prvo dolazi izravni zvuk, nakon nekog vremena stiže prva refleksija čija se energija superponira (dodaje) na energiju izravnog zvuka, a potom slijedi superpozicija i sa sljedećim refleksijama. Tijekom tog vremena uspostavljat će se zvučno polje koje će trajati sve dok god izvor zvuka proizvodi zvuk, a zvučni tlak na mjestu slušatelja postepeno će dosegnuti neki konstantni iznos (za one kojima to nešto znači, to se događa eksponencijalno). Kad zvučni izvor prestane proizvoditi zvuk, imamo „inverznu“ situaciju - prvo će nestati izravni zvuk, potom prva refleksija, pa se slijedom toga postepeno iz

zvučnog polja uklanjaju jedna po jedna refleksija smanjujući time njegovu energiju da bi na kraju nakon nestanka i posljednje refleksije zvučni tlak nestao. Proces nastajanja zvučnog polja u zatvorenom prostoru naziva se dozvuk, a nestajanja odjek. Zbog psihoakustičkih značajki slušnog mehanizma, opadanje zvučnog polja (odjek) percipiramo kao znatno dulje nego njegovo nastajanje (dozvuk), stoga je odjek važnija prostorno-akustička značajka. Vrijeme odjeka definira se kao vrijeme koje je potrebno da zvučni tlak na mjestu slušatelja padne tisuću puta ili 60 dB nakon što je utrnuo primarni zvuk iz izvora.

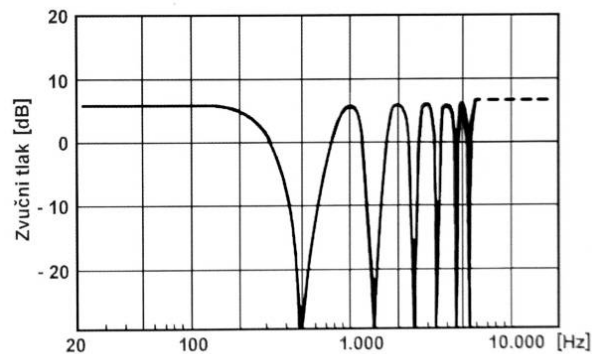
Što vrijeme odjeka znači za kvalitetu slušanja? Mnogo više u velikim prostorijama (koncertne dvorane), nego u našim manjim slušaonicama. Utjecaj vremena odjeka prostorije na kvalitetu reprodukcije glazbe predmet je velikog zanimanja, ali i kontroverzi. Uobičajeno se smatra da prekratko vrijeme odjeka čini glazbu „suhom“ i „šupljom“, dok predugo vrijeme odjeka čini govor i vokal nerazumljivim, a reprodukciju „mutnom“ i „nejasnom“. Prikladno vrijeme odjeka daje „punoću“, „živost“ i „toplinu“, a o određivanju prikladnog vremena odjeka prostorije nešto više kasnije.

2.4. ČEŠLJASTI FILTAR

Promotrimo sada još jednu pojavu koja se javlja kad reflektirani zvučni val s nekim vremenskim kašnjenjem stigne na mjesto slušanja. Radi jednostavnosti pretpostavimo da je zvuk čisti ton, sinusoida. Ako reflektirani zvuk zakasni za izravnim za vrijeme koje odgovara jednoj periodi sinusoide, oba zvučna tlaka zbrajaju se i daju veći zvučni tlak nego samo onaj od izravnog zvuka. Ako je pak kašnjenje jednako poluperiodi sinusoide, zvučni

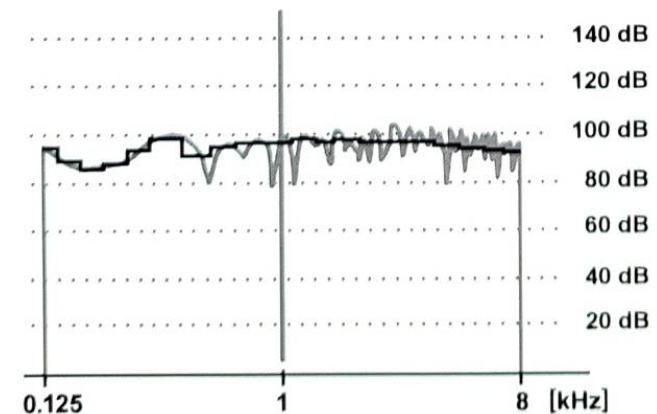
tlak reflektiranog zvučnog vala oduzima se od izravnog, pa će rezultat biti zvučni tlak manji od izravnog. Dakle zvučni tlak na mjestu slušatelja ovisit će o tome kakav je međusobni prostorni odnos direktnog i reflektiranog vala što se naziva faznim odnosom.

Pretpostavimo da zvuk ima frekvenciju od 500 Hz. To znači da se minimum i maksimum zvučnog tlaka izmjenjuju svaki tisućiti dio sekunde ili 1 ms (poluperioda sinusoide). Ako refleksija kasni za izravnim zvukom baš 1 ms, doći će do bitnog smanjenja zvučnog tlaka zvuka te frekvencije. Ako kasni 2 ms, doći će do značajnog povećanja zvučnog tlaka na toj frekvenciji. Za jednako kašnjenje isto će se događati i sa zvukom koji ima frekvenciju 2x500 Hz, 3x500 Hz, 4x500 Hz, itd. Ako sada pretpostavimo da je zvuk širokopojasni signal, dakle onaj koji sadrži sve frekvencije u čujnom spektru (npr. to je ružičasti šum), određene spektralne komponente (frekvencije) bit će pojačane, a određene oslabljene. Drugim riječima, frekventijska karakteristika na mjestu slušanja bit će značajno izobličena kao što je prikazano na slici 7.



Slika 7. Izobličenje frekventijske karakteristike kao posljedica češljastog filtriranja

Iz slike je razvidno da je zvuk na frekvencijama $n \times 500$ Hz ($n = 1, 2, 3, \dots$) oslabljen, a na $2n \times 500$ Hz pojačan. Iznos pojačanja i slabljenja ovisi o jačini zvučnog tlaka refleksije. Što je on veći, veće su i promjene, tj. „uzvisine” i „rupe“ u frekventijskoj karakteristici koja oblikom podsjeća na češalj, pa se ova pojava naziva češljasti filter (engl. *comb filter*). Važno je shvatiti da je do tog drastičnog izobličenja frekventijske karakteristike došlo samo zbog toga što na mjestu slušanja uz izravni zvuk dolazi i refleksija koja za njim kasni $n \times 1$ ms. No situacija nije tako strašna kao što ta užasno izgledajuća frekventijska karakteristika sugerira. Naime, u stvarnom svijetu uvijek će biti više refleksija, a slika 8 je stvarna situacija u našoj slušaonici nakon 5 refleksija (situacija sa slika 4 i 5).



Slika 8. a) siva krivulja - frekventijska karakteristika na mjestu slušatelja
b) crna krivulja - frekventijska karakteristika kako je zapaža uho

Nažalost, ni to ne izgleda sjajno. To je frekventijska karakteristika koju dobivamo na mjestu slušanja kad sviramo ružičasti šum pojačalu besprijekorno linearne frekventijske karakteristike i kroz vrlo kvalitetne

zvučničke kutije. Treba li bolja ilustracija o tome koliko je prostorna akustika važna karika u audio lancu? Bi li ikada i pomislili da kupite pojačalo s frekvencijskom karakteristikom poput one na gornjoj slici?

Na svu sreću, kako što znamo iz psihoakustike, uho nije „dobar“ analizator frekvencijskog spektra i ono je ograničeno takozvanim kritičnim frekvencijskim pojasom unutar kojeg uho ne razlučuje promjene u frekvencijskom spektru. Npr. kritični pojas na 100 Hz je oko 40 Hz, na 1.000 Hz oko 130 Hz, a na 5.000 Hz oko 680 Hz. To pojednostavljeno znači da će uho donekle „ispeglati“ češljastu frekvencijsku karakteristiku na visokim frekvencijama, zato jer su tamo „rupe“ i „uzvisine“ uske, a kritični pojas širok, dok to neće moći napraviti s prvom i drugom „rupom“ koje su na oko 200 i 500 Hz jer su njene širine veće od širine kritičnog pojasa uha na toj frekvenciji (oko 45 i 75 Hz). Na slici 8b prikazana je takva „ispeglana“ frekvencijska karakteristika kakvu će „čuti“ naš mozak. Simulacija je približna, jer spomenuti psihoakustički fenomen ne može se dovoljno dobro opisati matematičkim računalnom simulacijom. No vidljivo je najvažnije, da će frekvencijska karakteristika na visokim frekvencijama biti dosta dobro „ispeglana“ (uz tek lagano izdizanje u srednjim visokima), ali spomenute „rupe“ na oko 200 i 500 Hz i „uzvisinu“ na oko 370 Hz mi ćemo itekako dobro moći čuti.

Dakle, vidimo da su uzroci neravnina u frekvencijskoj karakteristici na nižim frekvencijama refleksije koje se odlikuju malim kašnjenjem, a to su upravo one refleksije koje stižu prve, tj. one koje su se reflektirale od prepreka bliskih ili zvučniku ili mjestu slušanja. Primjerice, „rupu“ na 500 Hz izazvat će refleksija koja kasni 1 ms. Sjetimo se da je to oko 0,3 m preračunato u put. Treba dakle zapamtiti da će izobličenje frekvencijske

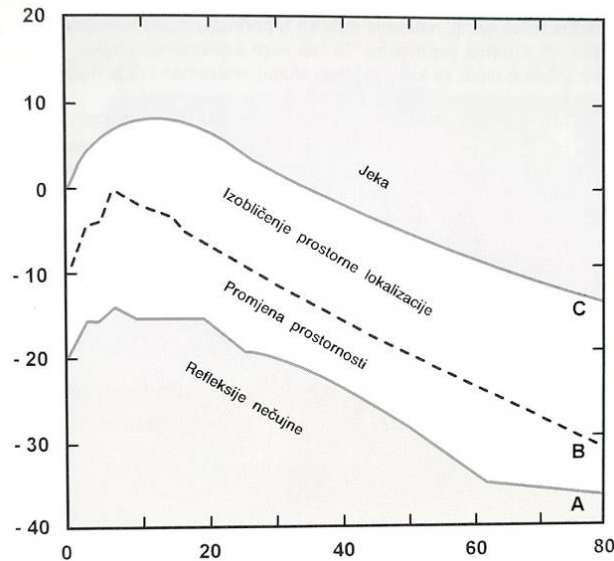
karakteristike izazvati vrlo rane, bliske i neprigušene refleksije. I zaista, ukoliko se dopusti da do mjesta slušanja dođu takve refleksije, frekvencijska karakteristika će na važnim srednjim niskim frekvencijama (200-600 Hz) biti „brdovita“, što će uvježbano uho, pogotovo na poznatom glazbenom materijalu, dosta lako prepoznati kao promjenu u spektru, tj. promjenu boje ili koloraciju.

Kad smo već skrenuli u psihoakustičke vode, zanimljivo je postaviti pitanje, a što je sa stereozvukom? Tada zvuk dolazi iz dva izvora zvuka, a budući da u realnom svijetu put do mjesta slušanja iz lijevog i desnog zvučnika nikada nije identičan, zar to također neće prouzrokovati pojavu češljastog filtra? Situacija je posve usporediva s prijašnjom: prvo dolazi zvuk iz jednog zvučnika, a zatim, s vrlo malim kašnjenjem, zvuk iz drugog zvučnika, i to s tlakom koji može biti gotovo isti kao iz prvog. Međutim, ovakvu koloraciju uho vrlo slabo ili gotovo nikako ne zamjećuje. Postoji više objašnjenja ove pojave koja se naziva binauralno potiskivanje koloracije, ali bitno je to da naš slušni sustav poništava pojavu češljastog filtra ako dva međusobno zakašnjela zvuka dolaze na oba uha kao kod stereosnimki. To je dokazano i eksperimentima koji su pokazali da se u gluhoj komori boja stereozvuka gotovo ne mijenja kada slušatelj pomiče glavu.

2.5. PROSTORNOST I PROSTORNA LOKALIZACIJA

Prateći dosada napisano pažljivi čitatelj je shvatio dvije stvari: prvo, refleksije su replika izvornog zvuka, dakle i njegovog gotovo ukupnog glazbenog sadržaja, i drugo, refleksije na mjesto slušanja dolaze odsvuda iz prostora slušaonice. Slušajući našu omiljenu ploču, stereozapis na njoj

sadrži informacije o položaju i volumenu svakog instrumenta, te o akustici prostora u kojoj je snimka napravljena i to nam omogućava da prostorno lokaliziramo pojedine izvore zvuka i njihov doprinos ukupnoj prostornosti orkestra, slično kao što bi to radili i u koncertnoj dvorani. Ta informacija dolazi iz naših stereozvučnika, no zbog refleksija u našoj slušaonici zvuk dolazi i iz raznih drugih smjerova. Naš slušni aparat lokalizaciju izvora zvuka zasniva prvenstveno na izravnom zvuku (Kramerov zakon ili zakon prvog zvučnog vala). Međutim, intuitivno je već sada većini čitatelja jasno da refleksije ipak utječu na percepciju prostorne lokalizacije.



Slika 9. Prikaz ukupnosti percepcije refleksija

Na slici 9 prikazani su rezultati vrlo iscrpnih psihoakustičkih istraživanja vezanih uz ukupnost percepcije refleksija našim slušnim aparatom (uho/mozak). Slika zahtijeva našu najveću pozornost jer sadrži mnoštvo

dragocjenih informacija. Na horizontalnoj osi je kašnjenje refleksije za izravnim zvukom, a na vertikalnoj osi njezina relativna amplituda zvučnog tlaka u odnosu na izravni zvuk (0 dB znači da je zvučni tlak refleksije jednak izravnom, a -20 dB da je 10 puta slabiji). Na slici su prikazane tri krivulje A, B i C. Ako se refleksija nalazi u području ispod krivulje A, ona će biti gotovo nečujna, što znači da uho neće osjetiti njihov utjecaj na zvučni tlak. To znači da npr. refleksija koja kasni za izravnim zvukom 30 ms i slabija je od izravnog zvuka 26 dB neće gotovo ničim doprinijeti ukupnoj zvučnoj slici. Također je to istina i za „jaču“ refleksiju koja kasni 5 ms i slabija je od izravnog zvuka samo 20 dB. Vratimo se sada načas na reflektograme sa slika 5 i 6 koji kada bi „upadali“ ispod krivulje A (što nikada nije slučajan slučaj), naša slušaonica ne bi ničim doprinosila zvučnoj slici. Pretpostavimo sada da razina refleksija raste i da se, kao što i jest slučaj za našu slušaonicu, one nalaze u području između krivulja A i B. Slušni aparat sada „čuje“ i slušaonicu i ona dodaje svoju prostornost onoj koja je snimljena na zvučnom zapisu. Slušatelj doduše ne može identificirati pojedinu refleksiju, ali osjeća promjenu prostornosti. Što se razina refleksija više približava krivulji B, to sve više „svira“ slušaonica, a manje koncertna dvorana. Kad razina refleksija pređe krivulju B, dolazi do ozbiljnijih izobličenja u prostornoj lokalizaciji, instrumenti počinju „lelujati“, a čitav orkestar počne „disati“. Kod porasta blizu krivulji C zvučna slika se može dodatno izobličiti i jekom, no za naše male slušaonice taj slučaj nije potrebno razmatrati.

Dakle, ukoliko su sve refleksije ispod krivulje A, slušaonica će biti neutralna što je poželjno kod režija glazbenog studija zbog mogućnosti analitičkog slušanja snimljenog materijala. No u našim slušaonicama mi bismo ovakvu situaciju ocijeniti previše „sterilnom“ i „mrtvom“ i dali

prednost situaciji kad su refleksije između A i B. Nažalost, prema mom iskustvu najčešći kućni slučajevi su između B i C. Osobno bih dao prednost neutralnoj slušaonici bliže krivulji A, ali s realističnom stereosnimkom. Loša i „suha“ stereosnimka može u takvom akustičkom prostoru djelovati još skućenije i siromašnije.

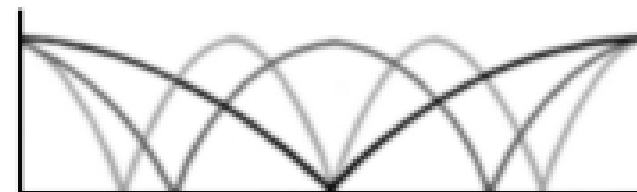
Obratimo još i pozornost na gotovo ravni dio krivulje A u području malih kašnjenja (od oko 5 do 20 ms). To znači da je prag zamjetljivost refleksija nepromijenjen za prve refleksije, tj. da ostaje nizak i ne raste sa smanjenjem kašnjenja. Pogledajmo opet sliku 5. i uočimo da su refleksije veće od 15 ms kašnjenja sve ispod razina za krivulju A i oko njih se ne moramo brinuti. No zato prve refleksije koje vidimo na reflektogramu u području između 3 i 6 ms su čak i preko krivulje B što će uzrokovati izobličenje izvorne prostornosti snimke. I uistinu, upravo su te prve refleksije one protiv kojih se moramo boriti i nastojati im smanjiti intenzitet što više na mjestu slušanja kad ih već nije ni poželjno ni moguće posve ukloniti.

3. VLASTITE (MODALNE) REZONANCIJE PROSTORIJE

U dosadašnjem razmatranju koristili smo pojam zvučnih zraka koji nam je omogućio zoran i jednostavan prikaz koji je posve primjeren za više frekvencije. No ako razmatramo širenje zvučnog vala od 80 Hz i valne duljine od gotovo 4 metra tada u slušaonicu jedva stane jedna perioda i više nije moguće definirati čelo zvučnog vala i zvučnu zraku. Sad moramo preskočiti mnoge fizikalne postavke valne teorije i akustike i samo zapamtiti da se zvučnim zrakama u zatvorenoj prostoriji može opisivati širenje zvuka valne duljine manje od približno četvrtine najveće dimenzije prostorije što

bi za našu slušaonicu iznosilo malo više od 1 metra ili oko 300 Hz, a širenje zvuka ispod te frekvencije ispravno je opisivati isključivo pomoću vala.

Što se u tom slučaju događa na niskim frekvencijama u našoj slušaonici koja je kvadratičnog oblika? Naglašavamo oblik jer je za daljnju diskusiju važno što takva slušaonica ima tri para nasuprotnih i paralelnih zidova. Njena akustička svojstva u tom frekvencijskom području karakterizirat će pojava stojnih valova i vlastitih (modalnih) frekvencija. Zamislimo da je tik uz zid sobe smješten zvučni izvor. Proizvedeni zvučni val putuje do nasuprotnog zida, reflektira se i vraća do zida od kojeg je krenuo. Ako je valna duljina vala jednaka dvostrukoj udaljenosti između zidova, doći će do međudjelovanja izvornog i reflektiranog vala tako da će se u prostoriji stvoriti stojni val. To znači da će minimalni i maksimalni tlak, tj. minimum i maksimum vala uvijek biti na istom mjestu u prostoru. Ta pojava će se pojavljivati i na frekvencijama čija je valna duljina višekratnik dvostruke udaljenosti između zidova. Ako znamo da je duljina naše slušaonice 4,5 m, onda će se stojni val između dva najudaljenija zida stvarati kad je valna duljina izvornog vala 9 m ($\lambda=2L$), 4,5 m ($2\lambda=2L$), 3m ($3\lambda=2L$), itd.

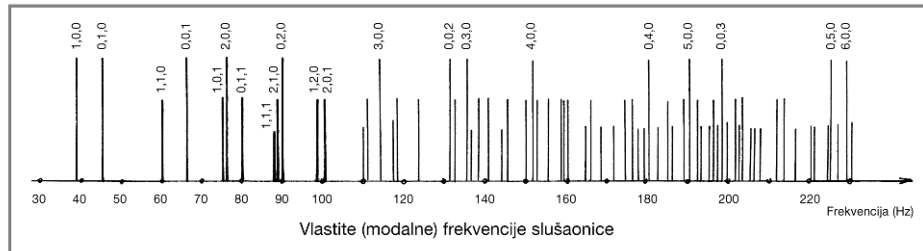


Slika 10. Stojni valovi između međusobno paralelnih zidova

Stvaranjem stojnih valova u prostoriji ustvari dolazi do pojave rezonancije, a te frekvencije nazivaju se vlastite frekvencije prostorije. Posljedica tih

vlastitih frekvencija prostorije je da će zvučni tlak u prostoriji biti nejednoliko prostorno raspodijeljen, pa će zvučni tlak nekih frekvencija jako ovisiti o položaju slušatelja u prostoriji. Ista situacija se događa i između bočnih zidova i između poda i stropa, pa postoje tri aksijalna titrajna sustava koji stvaraju stojne valove. Nadalje, stojni val može nastati i kosom refleksijom između dva zida ili tangencijalnom između svih zidova, pa postoji mnoštvo titrajnih sustava i mnoštvo načina titranja tj. stvaranja vlastitih frekvencija prostorije.

Moguće je i korisno, znajući dimenzije slušaonice, uzeti u obzir sve modove titranja i izračunati pripadne modalne frekvencije i nacrtati ih na frekvencijskoj osi, kao što je to učinjeno na slici 11. Svaki mod titranja prikazan je vertikalnom crtom na frekvenciji koja odgovara njegovoj vlastitoj frekvenciji.



Slika 11. Vlastite (modalne) frekvencije slušaonice

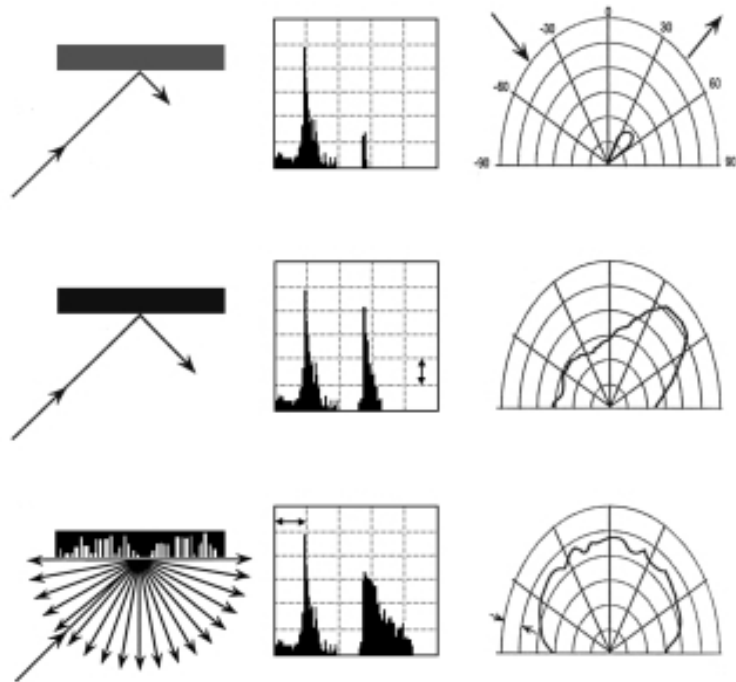
Modalne frekvencije koje će se čuti i stvarati nam probleme u slušaonici su one najniže, koje su ujedno „usamljene” i razmaknute jedna od druge za više od dva kritična frekvencijska pojasa. Posebno kritične će biti aksijalne vlastite frekvencije, jer, kako smo vidjeli, one imaju najveću energiju. Dakle, ako se naša slušaonica pobudi složenim glazbenim signalom koji ima

značajan sadržaj basova, frekvencije 38, 47 i 67 Hz bit će, ovisno o tome gdje je mjesto slušanja u prostoriji, pojačane ili oslabljene i doći će do izobličenja frekvencijske karakteristike u donje dvije oktave, tj. koloracije, promjenom mjesta slušanja mijenjat će se i boja tona izvornog glazbenog signala. Slušaonica je dakle sve prije nego akustički neutralna, ona „svira“, a koloracija izvornog glazbenog signala je sveprisutna.

Odnosom dimenzija prostorije može se mijenjati razdioba vlastitih frekvencija pa će prostorije određenih omjera imati vrlo izražene vlastite frekvencije, dok će neke imati dosta jednoliku razdiobu kao npr. naša slušaonica. Prilikom projektiranja novih prostora koji će se rabiti za slušanje ili provjere podobnosti postojećih prostora, odnos duljine, širine i visine prostorije je vrlo važan.

4. DIFUZIJA

Dosada smo u opisivanju ponašanja zvučnog vala u zatvorenom prostoru koristili koncept idealne refleksije i djelomične apsorpcije na prepreci, no važno je ukratko spomenuti i utjecaj difuzije na zvučni val. Na pretežito reflektivnoj prepreci većina zvučne energije se vraća u prostor, i to u smjer koji je isključivo ovisan o smjeru upada na prepreku. Kod pretežito apsorpcijske prepreke zvučna energija se opet vraća u prostor u istom smjeru, ali umanjena jer je veći dio apsorbiran na prepreci. Za razliku od toga, difuzijska prepreka vraća zvučnu energiju u prostor „razasutu“ u svim smjerovima, neovisno o smjeru upada direktnog zvučnog vala. Na slici 12. zorno je prikazano ponašanje zvučnog vala na prepreci s reflektivnim, apsorpcijskim ili difuznim svojstvima.



Slika 12. Ponašanje zvučnog vala pri upadu na reflektivnu, apsorptivnu i difuznu prepreku

Intuitivno možemo pretpostaviti da će prepreka biti difuzna ako je neravna, tj. razbijena na više manjih nepravilno postavljenih površina. I uistinu je tako, a pri tom vrijedi ono što smo u prvom nastavku spomenuli za apsorpciju – neravnine na prepreci pridonosit će difuziji samo ako im je dimenzija sumjerljiva s valnom duljinom zvučnog vala. Na primjer, polica s knjigama bit će dobar difuzor za zvučne valove valne duljine kraće od 30 centimetara ili frekvencije više od oko 150 Hz, dok basovi te neravnine neće ni „primjećivati”. Namještaj i ostali predmeti u slušaonici doprinosit će

dodatno difuznosti zvučnog polja, svaki u svom frekvencijskom prostoru i ovisno o svojoj veličini.

Pažljivi čitatelj je već mogao zaključiti da mi u slušaonici ustvari tražimo prostorno jednoliko raspodijeljeno i ujednačeno zvučno polje (difuziju). Refleksije (npr. češljasti filter) i vlastite frekvencije prostorije značajno narušavaju jednoliko raspodijeljeno polje i ujednačeno zvučno polje, jer i jačina zvuka i frekvencijska karakteristika ovise o mjestu slušanja u prostoriji. Stoga ćemo vidjeti da će i difuznost prostorije biti važan činitelj njene prostorno-akustičke kvalitete.

5. UGAĐANJE AKUSTIKE SLUŠAONICE

Pažljivom čitatelju dosadašnjih nastavaka prvi dio odgovora je već jasan i jednostavan. On bi otprilike bio sljedeći:

- eliminirati ili smanjiti razinu vlastitih frekvencija u slušaonici
- eliminirati ili smanjiti razinu refleksija u slušaonici
- pritom postići željeni iznos i frekvencijski raspored vremena odjeka, te postići određenu difuznost zvučnog polja.

Odgovor na pitanje kako to napraviti zato nije nimalo jednostavan. Smanjenje razine refleksija i modalnih rezonancija moguće je putem smanjenja njihove zvučne energije apsorpcijom na zidovima ili predmetima u sobi. Račun pokazuje da bi za dovoljno smanjenje razine zvučnog tlaka u sobi trebalo biti mnogo apsorptivnih sredstava, što bi pak smanjilo vrijeme odjeka i od sobe gotovo napravilo gluhu komoru. Nadalje, budući da u sobi refleksije dolaze iz svih smjerova, a titrajne sustave koji uzrokuju modalne rezonancije čine svi zidovi u sobi, pa ukoliko želimo kontrolirati sve

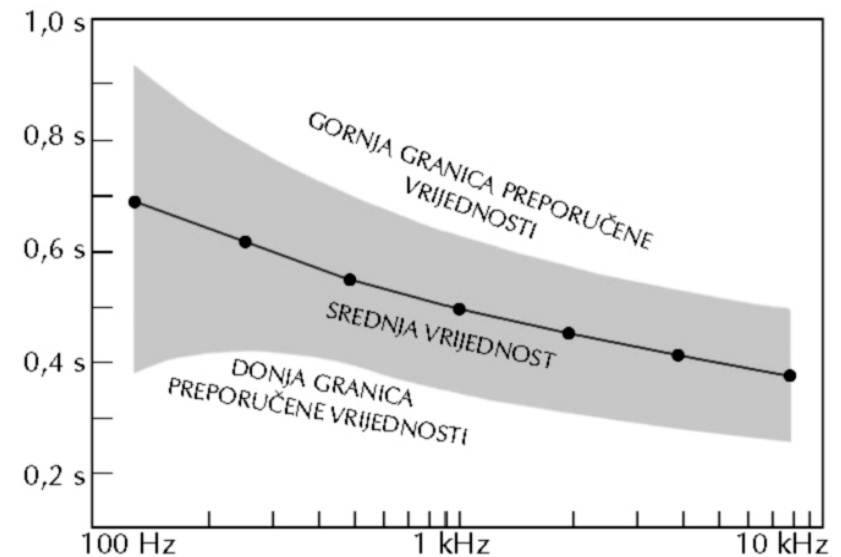
refleksije i modalne rezonancije, apsorptivna sredstva bi morala biti svugdje i po svim zidovima, stropu i podu. Dakle, opet „klizimo“ ka nepoželjnoj gluhoj komori, a time i dolazimo do važne činjenice koju treba dobro zapamtiti i koju velika većina audiofila često previđa. U praktičnim uvjetima slušaonicu nije moguće prostorno-akustički optimizirati u cijelom njenom volumenu, a to znači da ne možemo očekivati jednaku kvalitetu reprodukcije za bilo koji međusobni položaj zvučnika i slušatelja. Prostorno-akustička optimizacija moći će se provesti samo u manjem dijelu slušaonice, što podrazumijeva uvijek približno ista mjesta postava za zvučnike i sjedenja za slušatelja. Prostorno-akustički može se ugoditi samo ograničeni prostor oko mjesta slušanja tako da bi se omogućili približno optimalni uvjeti ako se slušatelj ne pomakne više od približno pola metra lijevo-desno ili naprijed-nazad. Prihvativši ovo, odgovor na pitanje gdje i koliko apsorptivnih sredstava postaje mnogo lakši. No vratimo se sada vremenu odjeka i izračunu njegove optimalne vrijednosti.

5.1 Optimalno vrijeme odjeka slušaonice

Kako je već rečeno vrijeme odjeka u sobi ovisit će o njenom volumenu i ukupnoj apsorpciji koja se nalazi u sobi. Kad ne bi bilo nikakve apsorpcije (goli betonski zidovi) u našoj slušaonici, vrijeme odjeka u oktavi centriranoj na 1 kHz bilo bi oko 3 sekunde, značajno predugo. No, postavlja se pitanje koliko bi to vrijeme zapravo trebalo iznositi? Izravnog odgovora nema, ali prihvaćeno je mišljenje da za glazbu izraženijeg ritma treba nešto kraće vrijeme odjeka, dok slušaonica u kojoj se sluša sporija, melodioznija vrsta glazbe traži dulje vrijeme odjeka. Najčešća preporuka je da vrijeme odjeka

u oktavi centriranoj na 1 kHz bude nešto više od 0,4 sekunde, što je povoljnije za *rockere*, i nešto kraće od 0,7 sekundi, što je povoljnije za ljubitelje klasične glazbe i *jazza*.

Postavlja se pitanje kako to izgleda u praksi. Kako volumen realnih slušaonica neće uvelike odstupati od volumena naše slušaonice (44 m³) pa će vrijeme odjeka ustvari biti mjera unesene apsorpcije. Poučna su istraživanja koja su nastojala utvrditi koja su realna vremena odjeka u prosječnim dnevnim sobama i sličnim prostorijama koje služe kao slušaonice. Utvrđeno je da uobičajena namještena dnevna soba ima vrijeme odjeka koje se može smatrati povoljnim za kvalitetnu reprodukciju glazbe, a prosječno vrijeme odjeka 50 tipičnih dnevnih soba prikazano je na slici 13.



Slika 13. Prosječno vrijeme odjeka za 50 tipičnih dnevnih soba

Osim same vrijednosti trajanja, važno je i da vrijeme odjeka bude što ujednačenije za frekvencije iznad 500 Hz, dok se na nižim frekvencijama dozvoljava izvjestan porast, pa tako vrijeme odjeka u oktavi centriranoj na 125 Hz može biti i do 25% dulje. Optimalno bi bilo da se pad iznad 500 Hz zaustavi i da iznos vremena odjeka bude između 0,5 i 0,6 sekundi barem do 8 kHz. Ovo je uvijek prisutan problem budući da će apsorpcije na visokim frekvencijama gotovo uvijek biti previše. Dakle, svaki put kad projektiramo kontrolu modalne rezonancije i refleksije apsorpcijom, potrebno je provjeriti koliko će biti vrijeme odjeka u cijelom frekvencijskom području, a posebice ono na višim frekvencijama.

5.2. ApSORPCija niskih frekvencija

Već smo vidjeli da modalne frekvencije koje degradiraju prostorno-akustičku kvalitetu slušaonice nastaju na niskim frekvencijama, pa ako ih želimo kontrolirati, trebamo apsorbirati zvučne valove niskih frekvencija. Kako se ovdje radi o frekvencijama od 40 Hz i valnim duljinama od 4,5 metra pa je očito je da u sobi nećemo moći imati predmete/apsorbere duljine 4,5 metara, a to znači da apsorpcije kod 40 Hz gotovo i nema i da će slušaonica pobuđena basom nesmetano „tutnjati“ u toj oktavi.

U nedostatku „prirodnih“ apsorbera potrebno je za niske frekvencije upotrijebiti posebne apsorptivne konstrukcije. Najjednostavnije konstrukcije rade na principu rezonancije ravne ploče koja zatvara neki zračni prostor ili komoru. Ovisno o debljini i gustoći materijala ploče te volumenu komore, ona će pobuđena zvučnim valom rezonirati na nekoj frekvenciji i time

apsorbirati dio energije zvučnog vala koji se „troši“ za pobuđivanje titranja ploče na toj frekvenciji. Takvi apsorberi se zovu membranski. U slušaonici će možda postojati membranski apsorberi, npr. vrata ormara su ravna ploča iza kojih je volumen zraka. Međutim, račun pokazuje da tipična drvena vrata ormara i volumen iza njih neće rezonirati u traženom frekvencijskom području. Slično je i sa sobnim vratima, dok će najbliže korisnom membranskom apsorberu biti veliki dvostruki ostakljeni prozori koji u tipičnoj izvedbi debljine stakla i međuprostora daju ipak nešto apsorpcije u srednjem basu.

Drugi tip rezonantnih apsorbera su tzv. Helmholtzovi kod kojih se ploča membranskog apsorbera izbuši rupicama ili prorezima, a rezonancija je određena brojem rupica, njihovom dimenzijom te volumenom zraka u komori. Ovi apsorberi su efikasniji (imaju veći koeficijent apsorpcije za dani volumen), daju se točnije projektirati, a njihova krivulja apsorpcije može se ugoditi u širem frekvencijskom području.

Treći tip apsorbera su gradijentni apsorberi koji koriste šupljine definiranih dimenzija, a kad je dimenzija šupljine jednaka četvrtini valne duljine zvučnog vala, zvučni tlak je za val te frekvencije na ulazu u šupljinu gotovo nula i šupljina „usisava“ zvučnu energiju. Na taj način gradijentni apsorber ima veću efektivnu površinu od njegove stvarne fizičke površine a njegovo djelovanje je primjetno i u njegovoj okolini, a ne samo na njegovoj površini. Dodatno, ulaz i unutrašnjost šupljine pokrivaju se apsorpcijskim materijalom, kao što je mineralna vuna, koja svojim otporom prolazu čestica zraka smanjuje njihovu titrajnu brzinu i time još dodatno utječe na smanjenje zvučnog tlaka.

Gradijentni apsorberi često se izrađuju u obliku samostojeće kutije čija je jedna strana (i unutrašnjost) pokrivena apsorpcijskim materijalom, ali interesantnija je konstrukcija u obliku cilindra izrađena u potpunosti iz apsorpcijskog materijala. Time se efektivna površina konstrukcije još više povećava a mogu se iskoristiti i još neka dodatna poboljšanja. Oni su vrlo učinkoviti na niskim frekvencijama, pa se često nazivaju i *Bass Traps* (klopke za bas) ili *Bass Killers* (ubojice basova). Ovakve konstrukcije su po jedinici površine učinkovitije od membranskih i Helmholtzovih niskofrekvencijskih apsorbera, pa je njihova primjena u prostorno-akustičkom ugađanju slušaonica u stalnom porastu. Štoviše, kod cilindričnih gradijentnih apsorbera jedna polovica se može tretirati reflektirajućim materijalom (npr. plastična ili aluminijska folija ispod vanjskog dekorativnog sloja tkanine) pa zakretanjem te strane prema sobi može se znatno smanjiti apsorpcija visokih frekvencija što je često vrlo korisno.

Svi modovi titranja stvaraju maksimum vala u kutovima slušaonice pa ako apsorber postavimo u kut sobe, on će apsorbirati energiju svih tih modova titranja. Ukoliko ga postavimo na neko drugo mjesto na zidu, apsorbirati će najviše energije od moda koji ima najbliže maksimum tom mjestu, a najmanje od onog koji ima minimum najbliže tom mjestu. Stoga optimalno mjesto niskofrekvencijskog apsorbera, tj. ono mjesto gdje će biti najučinkovitiji, bit će zasigurno kut sobe i to je vrlo važan zaključak.

Postoji čitav niz izvedbi niskofrekvencijskih apsorbera u različitim dimenzijama i oblicima, a većina ih se može nabaviti u više boja tako da se, osim što se pomoću njih mogu riješiti mnogi zahtjevni prostorno-akustički problemi, mogu uklopiti i u zahtjevne interijere.

5.3. Apsorpcija refleksija

Apsorber kojim bi se kontrolirala razina refleksija trebao bi biti efikasan u području iznad 200 Hz, a iz tablice 1. vidljivo je da je mineralna vuna vrlo pogodna za takvu primjenu. I uistinu, većina komercijalnih apsorbera koristi sloj mineralne vune obučen u prikladnu tkaninu kako bi se spriječilo neugodno prosipanje sitnih čestica mineralne vune. Često se umjesto mineralne vune koristi posebna spužva koja ima apsorpcijska svojstva vrlo slična mineralnoj vuni. Korištenje ovih uobičajenih komercijalnih proizvoda ima prednost što su njihova apsorpcijska svojstva dobro poznata, a njihov koeficijent apsorpcije je u području iznad 500 Hz vrlo visok i ujednačen, pa se i sa njihovim relativno malim površinama mogu apsorbirati velike količine zvučne energije.

Za apsorpciju mogu poslužiti i zavjese, tepisi, tapecirani namještaj i slično, no nažalost, njihov koeficijent apsorpcije nije ni toliko visok ni jednolik unutar šireg frekvencijskog područja. Također, koeficijent apsorpcije za te predmete značajno ovisi o samom materijalu, gustoći i načinu postavljanja, pa oni mogu biti tek pomoćno sredstvo pri ugađanju prostorne akustike slušaonice. Ukoliko ipak koristimo isključivo ta sredstva, njihova efikasnost neće se moći pouzdano predvidjeti, pa će biti potrebno dosta provjeravanja i slušanja na „uho”, a krajnji rezultat neće biti izvjestan i učinkovit.

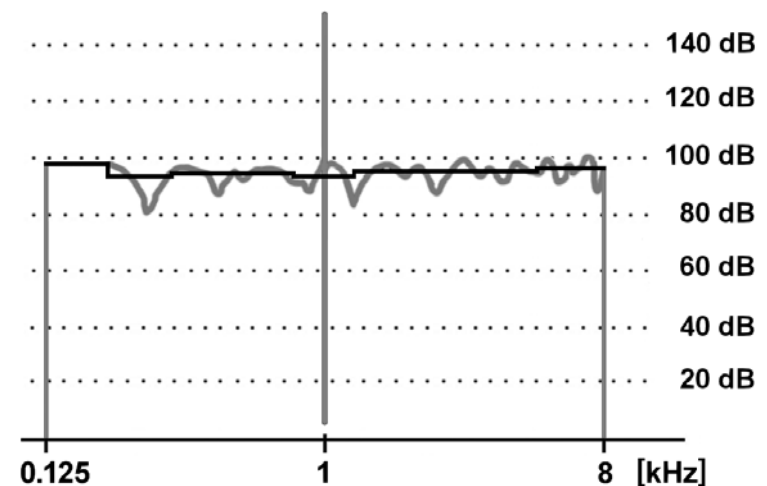
Sljedeće vrlo važno pitanje je: gdje postaviti apsorbere? Računalnim programom za akustičku simulaciju vrlo lako ćemo slijediti rane refleksije (kao na slici 4.) i otkriti mjesta gdje treba postaviti apsorbere kako bi snizili

zvučnu energiju prvog reflektiranog vala. Takav pristup je najsigurniji jer unaprijed možemo znati koliko apsorbera treba upotrijebiti i gdje se oni moraju postaviti, prije nego počnemo „raskapati” dnevnu sobu ili blagovaonicu. U praksi možemo, s prihvatljivim rezultatima, postupiti i na sljedeći način: postaviti zvučnike barem na 0,5 metara udaljenosti od bočnih zidova i razmaknuti ih da razmak bude nešto manji od udaljenosti do mjesta slušanja, tako da tvore istokračni trokut. Mjesto slušanja također treba odmaknuti najmanje 0,5 metara od zida. U našoj slušaonici veličine 4,5x3,8x2,6 metra svaki će zvučnik biti oko 3,5 metara udaljen od mjesta slušanja, razmak između zvučnika oko 3 metra, a udaljenost zvučnika od stražnjeg zida ne smije biti manja od 0,5 metara. Nađite sada ogledalo i pomagača. Sjednite na mjesto slušanja, a neka vaš pomagač pomiče ogledalo duž zida dok u ogledalu ne ugledate zvučnik. Zvučne zrake iz zvučnika odbijaju se od tog mjesta i dolaze do vas, pa ukoliko postavite apsorber na to mjesto, razina refleksije bit će znatno smanjena. Isto treba ponoviti i s drugim zidovima, potom i sa podom i stropom što je znatno teže izvesti.

Sljedeće presudno pitanje glasi: koliku površinu treba pokriti apsorberom? Od toga, naime, kritično ovisi veličina prostora oko mjesta slušanja koja je ugođena u pogledu kontrole ranih refleksija i primjerena za slušanje. Što veći apsorber, to veći prostor slobodan od refleksija. Međutim, treba provjeriti daje li ukupna apsorpcija unesena u slušaonicu još uvijek daje prihvatljivo vrijeme odjeka. I to je najbolje unaprijed odrediti proračunom i simulacijom. Podjednako važan je i raspored apsorbera. Naime, lateralne refleksije (one od bočnih zidova) važnije su kod našeg psihoakustičkog doživljaja prostornosti i voluminoznosti zvuka, isto vrijedi i

za koncertne dvorane, pa općenito vrijedi pravilo da s bočnim apsorberima ne treba pretjerivati, već, ako je to moguće, više apsorpcije postaviti na strop i stražnji zid, a s veličinom bočnih apsorbera pažljivo eksperimentirati.

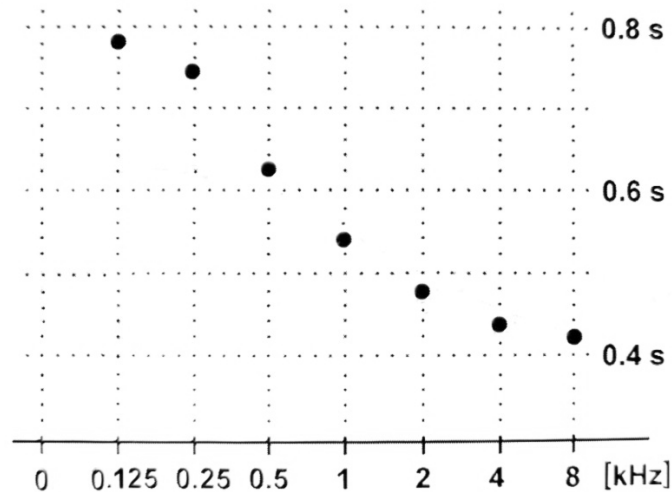
Pogledajmo kakva je situacija s našom slušaonicom nakon što upotrijebimo apsorbere od mineralne vune koje razmjestimo na način kako smo maloprije opisali, a na podu postavimo deblji vuneni tepih. To će smanjiti razinu refleksija i one više neće uzrokovati znatnija izobličenja prostorne lokalizacije, a i koloracije glede češljastog filtra bit će također osjetno smanjene. Rezultat je prikazan na slici 14., a poboljšanje u odnosu na prijašnju frekvencijsku karakteristiku (slika 8.) je očito.



Slika 14. a) siva krivulja - frekvencijska karakteristika nakon dodavanja apsorbera
b) crna krivulja - frekvencijska karakteristika približno kako je zapaža uho

Dodajmo sada u kutove sobe i niskofrekvencijske gradijentne apsorbere, tapecirani trosjed na mjestu slušanja, te policu s uređajima između

zvučnika, a izračunato vrijeme odjeka tako tretirane slušaonice prikazano je na slici 15. Iz slike je vidljivo da je vrijeme odjeka na gornjoj granici preporučenoga. To znači da će se dodavanjem još nekoliko komada namještaja (npr. još dvije fotelje, polica s knjigama) vrijeme odjeka još malo smanjiti i biti vrlo prikladno za ljubitelje klasične glazbe. Ukoliko nam više namještaja u sobi ne treba, možemo malo povećati površine apsorbera. U našem slučaju upotrijebljeno je oko 7,5 m² apsorbera, što se može povećati za 10 do 15%, i to proporcionalno za sve površine, osim za zid iza zvučničkih kutija.



Slika 15. Vrijeme odjeka slušaonice s dodanim apsorberima i osnovnim namještajem.

Primjerom smo pokazali kako je korištenjem prikladnih sredstava, moguće bitno poboljšati kvalitetu reprodukcije u našoj slušaonici. Nisko-frekvencijskim gradijentnim apsorberima u kutovima slušaonice kontroliraju

se vlastite (modalne) frekvencije, prikladno razmješteni apsorberi kontroliraju prve (rane) refleksije, a ukupna apsorpcija daje željeno vrijeme odjeka. Prema prijašnjem stanju, na mjestu slušanja, bas će biti mnogo čišći i definiraniji, spektralni sadržaj (koloracije) reproducirane glazbe ujednačeniji i vjerniji izvorniku, a prostorna informacija stabilnija i mnogo bliža izvornom postavu izvođača pri snimanju zvučnog zapisa. Ovako ugođena slušaonica sada može poslužiti kao referentna za usporedbu raznih audiouređaja i snimaka jer će na i u blizini mjesta slušanja stvoriti ujednačene i postojeane prostorno-akustičke uvjete. Naravno, imat će i nadalje svoju diskretno izraženu „osobnost“, koju svaki vlasnik, u suradnji sa stručnjacima akustičarima i kreativnim samostalnim eksperimentiranjem (ta zar to ne radimo i s uređajima i sa snimkama?) može prilagoditi vlastitom ukusu, a mnogi će ostati ugodno iznenađeni nakon akustičkog tretiranja slušaonice koliki je potencijal ostao „zarobljen“ u neadekvatno ugođenom prostoru za slušanje.

Ukoliko nismo u mogućnosti koristiti posebne apsorbere, moguće vanjskog priručno korištenje dijelova namještaja za apsorpciju ranih refleksija primjenjujući naučeno. Utjecaj vlastitih frekvencija sobe, nažalost, teško ćete riješiti priručnim sredstvima.

5.4. Difuzori

Potrebno je na kraju spomenuti još jednu mogućnosti kontrole ranih refleksija. Umjesto apsorpiranja refleksije, možemo ih „skrenuti“ od mjesta slušanja, tj. difuzno ih raspršiti i spriječiti njihov nastanak. Neki autori daju prednost difuziji pred apsorpcijom glede kontrole ranih refleksija, dok neki

ipak zagovaraju kombinirani pristup. Dobri difuzori moraju biti napravljeni tako da njihov koeficijent difuzije bude jednak u što širem frekvencijskom području, poglavito u području iznad 200 Hz. Također, neophodno je potrebno da difuzija ne ovisi o kutu upada zvučnog vala, pa će se tada isti iznos energije rasipati bez obzira iz kojeg smjera zvučni val upada na difuzor. Jedan tip takvog difuzora je prikazan na slici ispod.



Difuzor izrađen od drveta u slušaonici može biti i ukras vaše sobe.

Uporaba difuzora bila bi dobrodošla i u našoj slušaonici, bilo u obliku kakvog komercijalnog difuzora ili, primjerice, police s knjigama koje trebamo

posložiti tako da hrabiti nisu poravnati već čine što neujednačeniju rasapnu površinu. Kako smo našu slušaonicu već dobro tretirali s apsorberima i postigli povoljno vrijeme odjeka, još nešto netapećiranog namještaja dodalo bi i nešto difuzije, ali ne u svrhu kontrole refleksija (što je već učinjeno), već postizanja što difuznijeg zvučnog polja u cijelom prostoru, a ne samo oko mjesta slušanja. Rezultat takvog akustičkog tretmana je ujednačenija i stabilnija prostorna zvučna slika, bez obzira na glasnoću i dinamiku glazbe. Jedno od mogućih rješenja je i zamjena apsorbera difuzorima na stražnjem zidu (recimo od 4 do 8 difuzora veličine 50x50 cm), te povećanje površina apsorbera na stropu ili/i na bočnim zidovima u odgovarajućem omjeru od otprilike 1 m².

Dolazeći do kraja ove naše prostorno-akustičke priče, iskreno se nadam da sam pomogao rastjerati dio prostorno-akustičkih „magli“ koje se godinama uporno vijū po domovima ljubitelja dobrog zvuka. Također se nadam da sam upozorio na zanemarenu a presudnu važnost vaše sobe u ukupnom lancu dobre reprodukcije i uživanja u dobrom zvuku, i da ću ipak potaknuti audiofile da preispitaju svoj „hardweraški“ pristup uživanja u dobrom zvuku i bar dio svojih, nažalost, uvijek nedostatnih, resursa preusmjere s uređaja na akustičko tretiranje slušaonice. Nadam se da ću potaknuti i profesionalce koji su na bilo koji način uključeni u trgovinu kvalitetnim uređajima, da preispitaju kvalitetu prostora u kojima demonstriraju, testiraju i nude uređaje, te ulože više truda u prilagodbu prostora kvaliteti uređaja koje nude i pomognu savjetima svojim kupcima. Nadam se da će ovaj skromni napor doprinijeti većem užitku još većeg broja audiofila u dobroj reprodukciji glazbe.