

PSIHOAKUSTIKA

ivan supek



I PROSTOR GLAZBE

Evolucija nije razvijala psihoakustička obilježja našeg slušnog aparata sa svrhom slušanja Bacha ili Beethovena, već da nam omogući preživljavanje gdje je točna i brza lokacija iznenadnog šuma o životnog značaja. Kao i kod vida, rješenje je bilo jednostavno i učinkovito - dva nezavisna osjetila međusobno prostorno razmaknuta. Svrha nije kvantitativno povećanje slušnog aparata nego stvaranje fiziološke osnove za sasvim novi i važan psihoakustički mehanizam - binauralnu lokaciju zvuka. No upravo to nam je omogućilo uživanje u glazbi u koncertnoj dvorani ili našoj slušaonici.

Binauralna razlika glasnoća (ILD)

Iz fizike znamo da dolazi do ogiba vala i stvaranja „zavjetrine“ ukoliko val nailazi na prepreku čije su dimenzije veće od valne duljine. Ilustracije radi, prisjetimo se ljetnih iskustava iz kojih znamo da omanji brod pruža zavjetrinu od maestrala, ali ne i od juga. Dakle, dulje valne duljine, tj. niže frekvencije zahtijevaju velike prepreke da bi se stvorila zavjetrina, i stoga su potrebni dugački lukobrani da bi brodice našle utočište od juga.

Naša glava je relativno mala „prepreka“ i ogibat će tek zvučne valove kraće od svoga vlastitog promjera koji iznosi 30-ak centimetara, tj. frekvencija većih od približno 1 kHz. Međutim, interauralna razlika glasnoća ili ILD (od engl. *interaural level difference*) postaje efikasna tek u

području iznad 3 kHz kad se razlika glasnoća znatnije izdigne iznad dinamičke rezolucije uha za koju znamo da se kreće između 0,5 i 1 dB. Na našu sreću, evolucija nije koristila samo psihoakustički ILD mehanizam, već se psihoakustičko prostorno lociranje proteže kroz cijelo čujno frekventno područje zahvaljujući i drugim psihoakustičkim mehanizmima.

Razlika vremena (ITD)

Još početkom XX. Stoljeća u svojim eksperimentima lord Rayleigh ustanovio je da subjekti-slušatelji vrlo uspješno lociraju čiste tonove i u području između 100 i 500 Hz gdje sasvim sigurno zbog fizikalnih razloga ILD mehanizam više ne može funkcionirati. Ispravno je zaključio da naš slušni aparat određuje lokaciju i na osnovi razlike u vremenu pristizanja prominentnih karakteristika zvučnog vala između dva uha ili, kraće, pomoću ITD mehanizma (prema engl. *interaural time difference*). Kasniji eksperimenti pokazali su da se uspješnost lociranja u tom frekvencijskom području kreće između 1° i 2° ! No, ono što je znanstvenike zapanjilo je da to odgovara vremenskoj razlici od samo 10-ak μ s ili stotom djeliću jedne tisućinke sekunde. Cijeli ITD mehanizam postao je još zagonetniji kad je ustanovljeno da je za promjenu vodljivosti neuronskih sinapsi potrebno vrijeme od oko jedne tisućinke sekunde (1 ms) i da je stoga prijenos informacija 100 puta „prespor“ za tako brz mehanizam kao što je ITD. Istraživanja i razvoj teorije neuronskih mreža odgovorili su i na to pitanje. Naime, signal se istovremeno šalje kroz nekoliko desetaka neurona, a specijalizirani centar za binauralno procesiranje u srednjem mozgu obavlja

kompleksno paralelno procesiranje signala i uspostavlja korelacije između signala iz dva uha, podižući tako brzinu (i rezoluciju) binauralnog mehanizma za nekoliko redova veličine, pa je inherentna brzina procesiranja binauralnih zvučnih signala približno 100 kHz.

Takva brzina i rezolucija binauralnog centra za procesiranje u mozgu otvara čitav niz pitanja glede stvarnog (čitajte: potrebnog) visokofrekvencijskog limita za vjernu reprodukciju glazbe. Naime, pokusi su pokazali, kao što i predviđa Fourierova analiza glazbenih tonova, da mi, iako ne čujemo čiste tonove iznad 20 kHz, čujemo njihov utjecaj, tj. njihovo moduliranje čujnog spektra glazbenog tona ili timbra ispod 20 kHz. Nadalje, kako znamo da mozak vrlo uspješno „rekreira“ nedostajuće informacije iz audio-vizualnih signala, a isto tako uspješno potiskuje one koje „smatra“ nepotrebnim ili „krivim“, smatram da u ovom trenutku psihoakustika još nije u stanju na to pitanje jednoznačno odgovoriti, ali 20 kHz sasvim sigurno nije dovoljno.

ITD dobro radi u području većih valnih duljina, međutim kad valna duljina glazbenog tona postane kraća od veličine glave, tj. razmaka između ušiju, dolazi do fazne neodređenosti i izvor zvuka bi mogao biti lociran na suprotnoj strani nego što stvarno jest. To bi bila „evolucijska“ katastrofa, jer umjesto da pobjegnemo od lava, mi bismo mu uskočili ravno u usta! Evolucija opet iznalazi jednostavno rješenje i polako trne osjetljivost na ITD mehanizam u području između 1.000 i 1.500 Hz. Dakle, zahvaljujući tome što imamo dva uha, moguće je vrlo točno binauralno lociranje izvora zvuka. U području iznad 2 kHz za to je „zadužen“ ILD mehanizam koji to čini na osnovi binauralne razlike glasnoća, a u području

ispod 1 kHz to čini ITD mehanizam pomoću binauralne razlike vremena. Ove činjenice bilo su dobro poznate već gotovo pola stoljeća, no to nije ometalo „znance“ da propagiraju upotrebu subwoofera pod parolom nemogućnosti lokalizacije dubokih tonova ili da proizvode telefone i *beepere* koji upravo zvone u području između 1 i 2 kHz i za kojima se mi nemoćno ogledamo po sobi nesposobni odrediti gdje se nalaze.

Lateralizacija vs. lokalizacija zvuka

Jednostavan i dosada opisivan binauralni diferencijalni model ipak nije dovoljan za opis složenosti potpunog psihoakustičkog mehanizma lokalizacije zvuka. Svi mi znamo da ukoliko slušamo glazbu kroz slušalice a one u potpunosti čuvaju do sada opisane ILD i ITD informacije, zvučna slika će imati odličnu stereoseparaciju ili tzv. lateralizaciju zvučne slike, no ona će se uvijek nalaziti unutar glave i mi nikada ne doživljavamo pravu prostornu lokalizaciju zvuka. Da bismo „istjerali“ zvučnu sliku iz glave i doživjeli realnu prostornost, očito su potrebne još neke informacije i/ili mehanizmi. Na to ukazuje i nemogućnost točne lokacije izvora zvuka točno ispred, iznad ili iza nas u tom jednostavnom binauralnom modelu, što znamo da nije točno i što bi opet uzrokovalo već spominjanu „evolucijsku“ katastrofu uskakanja lavu u usta.

Anatomska odzivna funkcija (ATF)

Odgovor na ta pitanja daju suvremena psihoakustička i neurološka istraživanja u kojima se, osim slušalice, upotrebljava čitav arsenal uređaja

i eksperimentalnih tehnika na raspolaganju modernoj znanosti: spektralni analizatori zvuka, najmoderniji uređaji za registraciju moždane aktivnosti (MEG, fMRI, PET), moćna računala i pripadni software za simulaciju slušnih fenomena, itd. Odgovori koja nam daju ta istraživanja najčešće nas zapanjuju razotkrivanjem nevjerojatne složenosti našeg cjelokupnog slušnog aparata u kojemu mozak i njegove „računalne“ aktivnosti zapravo igraju dominantnu ulogu. Jedna od dešifriranih tajni odnosi se na tzv. anatomsku odzivnu funkciju ili ATF (prema eng. *anatomical transfer function*).

Prethodno opisana „zavjetrina“ ili sjena koju stvara naša glava pri ogibu zvučnih valova nije opisana jednostavnim i jednolikim prigušenjem zvučne energije, već se radi o vrlo kompleksnoj odzivnoj funkciji (ATF), koja značajno modificira i filtrira formu zvučnih valova što dolaze iz različitih smjerova u prostoru i u čemu, osim glave, nosa i usnih školjki, značajno sudjeluje i čitav gornji dio torza. ATF znatno izdiže područje oko 3 kHz za zvučne valove pridošle iz prednje hemisfere, dok to isto čini u području oko 1 kHz za one iz stražnje hemisfere, pa je to razlog što mi ipak možemo sa sigurnošću odrediti smjer naprijed-nazad. Štoviše, u području iznad 6 kHz valne duljine su već vrlo male ($\lambda/2 \approx 3$ cm) i „opisuju“ fizičke značajke svakog pojedinca, to jest točan oblik glave, veličinu i oblik nosa i usnih školjki, itd., a ATF predstavlja jedinstveni psihoakustički „otisak prsta“ svakog pojedinca.

Područje ATF-a oko 7 kHz igra pak ključnu ulogu u određivanju visinske lokacije izvora zvuka, a to određivanje je tim lakše što je zvuk, tj. timbar bogatiji. No ambivalentnost naprijed-nazad može se javiti usprkos

opisanom ATF mehanizmu za glazbene tonove vrlo uske spektralne distribucije ili za čiste glazbene (gotovo sinusoidalne) tonove, jer njihova lokacija u prostoru će tada ovisiti isključivo o njihovoj frekvenciji, a gotovo nimalo o njihovom pravom položaju u prostoru.

Te odlike (ili možda ipak „mane“) našeg slušnog aparata ukazuju na opasnost primjene zvučnih skretnica u području iznad 5 kHz, jer bi u tom slučaju viši harmonik nekog glazbenog tona mogao biti pogrešno interpretiran kao visinska informacija u ATF mehanizmu. To je tim više moguće jer visokotonac i srednjetonac najčešće nije moguće „sabiti“ na međusobnu udaljenost manju od nekoliko centimetara kolike su valne duljine zvučnog vala u tom području, pa takav zvučni sistem neće predstavljati točkasti izvor i posjedovat će i znatno užu vertikalnu disperziju zvuka.

Iz naučenog slijedi i mogućnost jednog korisnog akustičkog „trika“. Ukoliko se ATF pojedinca „snimi“ i potom se ta odzivna funkcija doda izvornom binauralnom (ili stereo) glazbenom zapisu, zvučna slika dobivena preko slušalica dobit će ispravnu prostornu dubinu i realističnu „odmaknutost“ od glave. Štoviše, moguće je uzeti u obzir i pomicanje same glave i potom dinamički modulirati ATF signal svakog uha posebno tako da prostorna slika ostane stabilna i „nepomična“ u prostoru bez obzira na pomicanje i okretanje glave, što, naravno, nije slučaj s uobičajenim stereozapisom. Ta istraživanja su danas postala posebno aktualna u velikim tvrtkama za proizvodnju računalnih igra koje žele tržištu što prije ponuditi novu generaciju igara, tzv. *virtual reality games*. Upravo je ekonomski interes velikih tvrtki, telekomunikacijske i vojne industrije danas glavni

pokretač istraživanja u psihoakustici, pa otuda i sva ta sofisticirana, i skupa, tehnologija.

Psihoakustika i akustika prostora

Dosada smo binauralnu lokaciju razmatrali za zvučne valove koji se šire u otvorenom prostoru ili, što je gotovo identično, gluhoj komori. Međutim, glazba se uglavnom izvodi ili reproducira u zatvorenim prostorima čija akustika znatno mijenja timbar glazbenog tona, a višestruke refleksije i stojni valovi „prekrivaju“ neke od ključnih psihoakustičkih informacija sadržanih u direktnom zvuku. Predrag Vukadin je u članku [Sobna akustika za audiofile](#) sjajno opisao sve najvažnije značajke sobne akustike, pa ćemo mi ovdje samo razmotriti kako prisustvo zidova, podova, stropova i ostalih velikih ploha u našim slušaonicama utječe na binauralnu lokaciju.

Reveberantno zvučno polje prostorije ne sadrži vremenski koherentne akustičke informacije, naime, nije moguće utvrditi redosljed pristiglih refleksija, i stoga ITD mehanizam, koji kritično ovisi o točnom redosljedu stizanja zvučnih informacija između dva uha, postaje prilično nepouzdan. To je izraženije za velike i relativno prazne prostorije kod kojih reflektirani zvučni valovi počinju dominirati nad direktnim zvučnim valovima, pa u prostorima vrlo visoke reveberacije naš mozak potiskuje ITD informacije i za lokaciju se koristi gotovo isključivo ILD mehanizmom. Nadalje, u našim svakodnevnim slušaonicama i dvoranama velika većina reflektivnih površina ima izraženiju apsorpciju za visoke frekvencije, pa će to dodatno pogodovati ILD mehanizmu koji je upravo najefikasniji u tom

visokofrekventnom području. To su dokazali i eksperimenti, a u takvim akustičkim uvjetima mozak se za binauralnu lokalizaciju služi gotovo isključivo ILD binauralnim informacijama u području dvije gornje oktave.

U eksperimentima sa slušalicama u kojima se svakom uhu vrlo lako mogu davati suprostavljene binauralne informacije otkriven je čitav niz bizarnih slušnih fenomena, no koji ipak značajno pomažu u rasvjetljavanju mehanizma kako naš mozak procesira binauralne informacije. Po volji je mijenjan sadržaj i količina ILD, ITD i ATF informacija, a iz toga obilja akustičkih fenomena izdvojimo jedan za nas vrlo zanimljiv slučaj. U slučaju kad ILD sugerira lijevu lociranost izvora zvuka, a ITD desnu, njihova percipirana lokacija ovisit će o frekvenciji samog zvučnog signala, jer će ITD dominirati u dubokotonskom području, a ILD u visokotonskom. No za širokopojasne tonove suprostavljene ITD i ILD informacije uzrokovat će „razmazivanje“ prostorne lociranosti točkastog izvora ili, još gore, njegovo „preseljenje“ u glavu slušatelja, što je psihoakustički vrlo neugodna senzacija. Napomenimo da je to situacija koja se ponekad može javiti u našim slušaonicama ukoliko postoji vrlo izražena asimetrija lijevo-desno (npr. prozori lijevo od zvučnika, a vrlo apsorptivna ploha desno od njih). Općenito, suprostavljene i konfuzne binauralne informacije dovode do difuzne lokacije izvora, stvaranja zvučnih slika u glavi ili tik ispred glave, te pogrešnog određivanja smjera naprijed-nazad ili/i visinske lokacije.

Nadam se da već niste „izjurili“ na livadu sa svojim glazbenim instrumentima ili stereouređajima u potrazi za „boljim“ zvukom, jer dosada izneseno ipak ne predstavlja cjelokupnu sliku. Naš psihoakustički aparat rabi još neke dodatne trikove kako bi izdvojio binauralne

informacije, a, osim toga, akustika sobe ima i čitav niz pozitivnih utjecaja na (re)produkciju glazbe. Razumna reverberacija daje instrumentima bogatiji timbar i veću voluminoznost, što je vrlo ugodan efekt, i stoga svi mi mnogo radije pjevamo u kupaonicama nego u gluhim komorama.

Mehanizam najranijeg zvučnog signala

Iskusni audiofili dobro poznaju problem „vruće točke“, tj. mjesta u kojem stereoslika ima odličnu prostornost i voluminoznost, ali koja se i kod manjih pomicanja glave počinje značajno urušavati. Ukoliko upotrijebimo monosignal, efekt je još dramatičniji. Naime, ako sjedimo točno u sredini, izvor zvuka bit će lociran u sredini između dva zvučnika. Pomaknemo li se sada samo 50-ak centimetara u jednu stranu, izvor zvuka će u potpunosti „uskočiti“ u bliži zvučnik, a udaljeniji zvučnik uopće nećemo biti u stanju čuti, tj. locirati. Mi, ustvari, vrlo dobro čujemo njegov doprinos ukupnom zvučnom signalu, jer ako ga isključimo, zvuk će postati tiši i izgubiti voluminoznost, dakle, on je potisnut samo iz mehanizma binauralne lokacije zvuka. Naime, kako oba zvučnika proizvode ITD i ILD signale koji daju oprečne lijevo-desne informacije o lokaciji izvora zvuka, mozak rješava problem potiskivanjem ili eliminacijom kasnije pristiglih ITD i ILD informacija iz binauralnog kanala, i to je takozvani binauralni mehanizam najranijeg zvučnog signala (eng. *binaural precedence efekt*).

Možda vam se sada ovaj mehanizam i ne čini jako koristan, no u prirodi je istovremeno događanje dva istovrsna zvuka vrlo rijetko, a

obradom samo najranije pristiglih zvučnih signala, otprilike onih pristiglih u prvoj milisekundi, mi znatno reduciramo utjecaj reverberacije prostora i omogućavamo puno bolje funkcioniranje ILD, i pogotovo ITD mehanizma, budući da te „rane“ komponente uglavnom pripadaju direktnom zvuku, a osim toga, biološki gledano, bliži zvuk je potencijalno i „opasniji“ i treba mu prvenstveno odrediti položaj. Fenomenološki, taj efekt je vrlo dobro poznat iako još uvijek ne i sam psihoakustički mehanizam u našem mozgu.

Umjesto zaključka

Mozak i misaoni procesi koji se odvijaju u njemu danas su sasvim sigurno najzagonetniji fenomeni s kojima se susreće moderna znanost, no ujedno i područje istraživanja u kojem se odvija strelovit napredak. Moderna istraživanja pokazala su svu složenost psihoakustičke obrade zvuka, koja se ne odvija samo u srednjem mozgu nego se mnoge informacije na dodatnu obradu šalju i u više moždane strukture. Nadalje, sama binauralna lokacija zvuka vrlo je individualna i, slično kao i za ostale komponente našeg sluha, postoje velike varijacije od osobe do osobe.

Prav(iln)a primjena svih tih psihoakustičkih spoznaja u audioindustriji je ključna za daljnji napredak vjernije ili bolje rečeno uvjerljivije reprodukcije glazbe u našim slušaonicama i čini se da je audioindustrija konačno to shvatila i uhvatila se u koštac s problemom akustike sobe. U međuvremenu, svima nama ostaje uzdanje u vlastiti sluh i prosudbu, te mnogo dobre glazbe koju još nismo čuli i/ili odsvirali.