

PSIHOAKUSTIKA I PROSTOR GLAZBE

Ivan Supek

Gornji naslov je parafraza naziva poglavlja iz "Malog audio pojmovnika" koji bi trebalo pročitati kako bi se u potpunosti razumjela svrha i važnost "prostornosti" zvuka za doživljaj glazbe, bez obzira radi li se o koncertnoj dvorani ili našoj slušaonici. Naravno, majka Priroda 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 suma od 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.

BINAURALNA RAZLIKA GLASNOĆA

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 čamac pruža dobru zavjetrinu od *maestrata*, 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 sigurno utočište od juga.

Naša glava je relativno mala "prepreka" i ogibat će 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 smo u prethodnom članku vidjeli da se kreće između 0,5 i 1 dB. Na nasu sreću, evolucija nije optimizirala psihoakustički dio ILD mehanizma samo u biološki funkcionalnom području od nekoliko gornjih oktava, već se psihoakustički dio ILD diskriminacije proteže kroz cijelo čujno frekventno područje i zahvaljujući tome možemo doživljavati lateralnu prostornu diferencijaciju slušajući naše *walkmane* i *discmane* preko slušalica.

RAZLIKA VREMENA

Još početkom XX. stoljeća, u svojim daljnjim eksperimentima, lord Rayleigh ustanovio je da subjekti-slušatelji vrlo uspješno lociraju ciste tonove i u području između 100 i 500 Hz gdje sasvim sigurno zbog fizikalnih razloga ILD mehanizam više ne može funkcionirati. Ispravno je pretpostavio da nas 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 frekventnom području kreće između 1^0 i 2^0 . 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. Znanstvenici su dugo bili u nedoumici kako je to ipak moguće. Kasnija istraživanja i razvoj teorije neuronskih mreža konačno su odgovorili 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,

podizujući tako brzinu (i rezoluciju) binauralnog mehanizma za nekoliko redova veličine, pa je inherentna brzina procesiranja binauralnih zvučnih signala približno 100 kHz. Bez ulaženja u teoriju, kažimo da je to analogno paralelnom umrežavanju većeg broja "malih" PC-ijeva koji tada svojom zajedničkom snagom i brzinom mogu nadmašiti i velike superkompjutere iako je svaki za neusporedivo sporiji od spomenutog supekomputera.

Takva brzina i rezolucija binauralnog centra za procesiranje u mozgu otvara čitav niz pitanja glede stvarnog (čitajte: potrebnog) visokofrekventnog 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. 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 jednoznačno odgovoriti, ali jest da 20 kHz nije dovoljno.

ITD dobro radi u području većih valnih duljina, međutim kad valna duljina glazbenog tona postane kraća od veličine glave, tj. razmaka između usiju, 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 skočili ravno u usta! Majka Priroda 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 prije nekoliko desetljeća, 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 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.

Odgovor na ta pitanja pokušavaju dati suvremena psihoakustička i neurološka istraživanja u kojima se, osim slušalica, 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 nevjerovatne 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*).

ANATOMSKA ODZIVNA FUNKCIJA

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 sto mi ipak možemo sa sigurnošću odrediti smjer naprijed-nazad. 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. Upravo područje ATF-a oko 7 kHz igra ključnu ulogu u određivanju visinske lokacije izvora zvuka, a to određivanje je tim lakše što je zvuk, tj. timbar bogatiji. Eksperimenti su, nadalje, pokazali da uho ne može razlikovati je li neka osobina inherentna ATF mehanizmu ili pripada samom zvučnom valu. Naime, ako zvučni val sadrži formu koja ima slična obilježja kao neka "naša" karakteristika ATF-a, mozak to interpretira kao psihoakustičku informaciju, pa će tako izraženi vrh oko 7 kHz interpretirati kao visinsku informaciju iako se ponekad može raditi upravo o izvoru izražene akustičke energije ili separacije u tom području. Ambivalentnost naprijed-nazad može se javiti usprkos opisanom ATF mehanizmu za glazbene tonove vrlo uske spektralne distribucije ili za čiste glazbene (sinusoidalne) tonove, a njihova lokacija u prostoru će ovisiti isključivo o njihovoj frekvenciji, a 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 u tom području, pa takav zvučni sistem neće predstavljati točkasti izvor i posjedovat će i znatno užu vertikalnu disperziju zvuka.

Ukoliko se ATF pojedinca "snimi" i potom se ta odzivna funkcija doda binauralnom 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 sto 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, a prava je šteta sto mala *high end* industrija nedovoljno poznaje i koristi ta istraživanja, a ako se njima koristi, onda je to najčešće površno (Carver, TDS).

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 i 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 seriji članaka 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.

Reverberantno zvučno polje prostorije ne sadrži vremenski koherentne akustičke informacije, naime, nije moguće utvrditi redoslijed pristiglih refleksija, i stoga ITD mehanizam, koji kritično ovisi o točnom redoslijedu 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 direktnim zvučnim valovima, pa u prostorima vrlo visoke reverberacije nas 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 iznad 8 kHz. Mogao bih sada zločesto primijetiti, i hoću, da vrlo često pobornici kućnog kina tvrde kako pravih ambiosoničnih informacija zapravo i nema iznad 5 kHz i onda oko te premise razvijaju različita rješenja.

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 nas 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. 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. Za širokopojasne tonove suprostavljene ITD i ILD informacije uzrokovat će "razmazivanje" prostorne lociranosti točkastog izvora ili čak 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 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 audiofilni 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 tisi i izgubiti voluminoznost, dakle, on je potisnut samo iz mehanizma binauralne lokacije zvuka. Naime, oba zvučnika proizvode ITD i ILD signale koji daju oprečne lijevo-desne informacije o lokaciji izvora zvuka, pa 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 effect*).

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. Nažalost, prav(iln)a primjena svih tih psihoakustičkih spoznaja u audioindustriji je tek u povojima, a mnoge od današnjih, pomalo smiješnih diskusija razriješit će se znanstveno kad budemo znali koji to elektroakustički parametri i u kojoj mjeri utječu na nasu percepciju glazbenog signala, a do tada one će me i nadalje podsjećati na staru raspravu o tome koliko anđela stane na vrh igle. No, već sada je jasno da je dio naše "percepcije" glazbenog tona vrlo subjektivan i da će tako zauvijek i ostati. Povucimo jednu poučnu paralelu. Mi ćemo vjerojatno naučiti savršeno "kopirati" prekrasne Stradivarijeve i Amatijeve instrumente i spoznati razloge zašto pojedini instrumenti upravo tako zvuče, no to nema apsolutno nikakva utjecaja na to koji instrument će odabrati vrhunski violinist i kako će se "stopiti" s njim. U međuvremenu, svima nama ostaje uzdanje u vlastiti sluh i prosudbu, te mnogo dobre glazbe koju još nismo čuli i/ili odsvirali.