

Smerna ločljivost navideznih izvorov zvoka pri človeku

Jaka Sodnik, Rudolf Sušnik, Goran Bobojević, Sašo Tomažič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: jaka.sodnik@fe.uni-lj.si

Povzetek. V tem delu obravnavamo način sinteze navideznih izvorov zvoka oziroma prostorskih zvokov, predvajanih prek slušalk. Najpogostejša metoda je uporaba posebnih impulznih odzivov (HRIR - Head Related Impulse Response), ki opisujejo dejansko pot od nekega izvora zvoka do bobniča v človeških ušesih. Pri tem upoštevajo obliko ramen, glave, uhljev, sluhovoda itd. Uporabimo jih kot filtre s končnim odzivom. V našem delu se ukvarjamo predvsem z ugotavljanjem natančnosti takšne sinteze zvokov s pomočjo knjižnice impulznih odzivov, merjenih z lutko človeške oblike. Osnovni nabor filtrov razširimo s pomočjo linearne interpolacije in ugotavljamo smerno ločljivost pri poslušanju prostorskih zvokov v slušalkah ter rezultate preverimo z uporabo dejanskih prostorskih zvočnikov. Smerna ločljivost je sposobnost poslušalcev za ločevanje dveh bližnjih izvorov zvoka, ki oddajata isti signal. Izkaže se, da premajhna medsebojna oddaljenost dveh izvorov zvoka povzroči, da jih poslušalec zazna kot en sam izvor. Smerna ločljivost za majhne spremembe azimuta je visoka tako pri uporabi navideznih kot tudi realnih izvorov zvoka, saj večina testnih oseb brez težav ločuje dva izvora zvoka le 5° narazen. Ločljivost za spremembe elevacije je slabša, a le pri navideznih izvorih zvoka. To lahko povečamo z uporabo impulznih odzivov, izmerjenih za vsakega poslušalca posebej.

Ključne besede: prostorski zvoki, HRTF, HRIR, linearna interpolacija, smerna ločljivost, akustična slika prostora

Human Resolution of Virtual Sound Source Direction

Extended abstract. Human perception of spatial sound is one of the most important factors for orientation in space (i.e. driving a car, listening to an orchestra, etc.). The reproduction of spatial sound is very difficult, especially when it is played through headphones. For such generation we need special functions called Head Related Transfer Functions (HRTF) (Fig. 3). HRTFs can be represented in time domain as Head Related Impulse Responses, shown in Figure 4. Impulse responses can be used as FIR (Finite Impulse Response) filters (Eq. 1 and Eq. 2). HRTFs describe changes of the sound wave caused by the shape of the human head, shoulders, pinnas, etc., as it propagates from spatial source to human eardrum. Two very important cues which are already contained in HRTFs are Interaural Time Difference (ITD) (Fig. 1) and Interaural Level Difference (ILD) (Fig. 2).

HRTFs are measured in anechoic chambers with a speaker and two small microphones which are inserted in human ears. Measurements with a specific human test subject produce individualized HRTFs, while measurements with a plastic doll of a human shape produce general HRTFs. The latter are less accurate but better for applications with numerous users.

In our experiment we tested human resolution for small changes in virtual sound source positions. We used a general HRTF database expanded with linear interpolation. The first step of interpolation is elimination of ITD (Fig. 5) using the cross-correlation function (Eq. 3). The second step is calculation of impulse responses and ITD values for non-measured positions (Eq. 4 and Fig. 6).

Our experiment on 38 test subjects consisted of two parts. In the first part, sound sequences from virtual sources were played systematically from several spatial positions for the test subjects to adjust to spatial sound in headphones. In the second part,

human directional resolution was measured for two central positions (Fig. 7) by playing a sound sequence from two separate sources in a near proximity. The distance between the sources was reduced until they were heard as only one single source. Such minimum distance is called human directional resolution. We tested resolution for azimuth and for elevation changes. All measurements were repeated with real sound sources using external speakers.

Our experiment results are encouraging, especially in the horizontal plain (Tab. 1 and Fig. 8). The source distance of 3° can be heard using real and virtual sound sources. Directional resolution for virtual sound sources in the vertical plain is very poor, but it improves when using external speakers (Tab. 2 and Fig. 9). The reason for this lies in the use of general HRTFs.

Key words: spatial sound, HRTF, HRIR, linear interpolation, directional resolution, acoustic image of space

1 Uvod

V vsakdanjem življenju nas na vsakem koraku spremljajo različni zvoki, ki vsebujejo neko informacijo o naši okolici. Ljudje smo sposobni zaznavati prostorske zvoke in bolj ali manj natančno določiti mesto izvora zvoka. Prav 3D zvočna zaznava nam pomaga pri orientaciji v prostoru, vožnji z avtom, komunikaciji z večjim številom ljudi, itd. Pozicijo nekega prostorskega izvora zvoka določijo možgani na podlagi električnih impulzov, ki so posledica določenega zvočnega valovanja. Na ob-

liko zvočnega vala, ki potuje od izvora do bobniča v človeških ušesih, vplivajo številni dejavniki na tej poti: ovire v prostoru, oblika telesa, glave, velikost uhljev, oblika sluhovoda itd. Z ustrezno tehniko lahko izmerimo in analiziramo vse omenjene vplive, ki omogočajo zaznavo nekega prostorskega izvora zvoka. Izmerjene prenosne karakteristike od izvora do človeškega bobniča so zajete v zbirkah HRIR (Head Related Impulse Response) oziroma HRTF (Head Related Transfer Functions) [1]. Če govorimo o HRTF, imamo v mislih frekvenčni potek impulznih odzivov (HRIR) [12]. S pomočjo teh prenosnih funkcij oziroma HRIR lahko sami generiramo prostorske zvoke in jih predvajamo prek slušalk.

HRTF med drugim vsebujejo tudi informacijo o določenih lastnostih poslušalca, npr. o obliki glave in uhljev. To pomeni, da za natančno reprodukcijo prostorskega zvoka potrebujemo za vsakega poslušalca posebej izmerjene prenosne karakteristike (personificirane HRTF). Večina aplikacij je namenjena širšemu krogu ljudi, zato se pogosto uporabijo kar splošne HRTF, ki so izmerjene s pomočjo doprskih lutk človeških oblik. To prinese določeno napako pri reprodukciji in zmanjša sposobnost poslušalcev za natančno določanje pozicije nekega navideznega izvora zvoka.

Najpogostejše aplikacije, kjer se uporabljajo na tak način generirani prostorski zvoke, so računalniške igrice, simulacije bitk z vojaškimi letali in različni navigacijski sistemi za slepe. To zadnje pomeni, da slepim ljudem s pomočjo zvoka poskušamo opisati vidno sliko prostora. Pri tem je zelo pomembna natančnost oziroma ločljivost take slike.

Ločljivost akustične slike prostora pomeni sposobnost poslušalca za ločevanje in zaznavanje posameznih navideznih izvorov zvoka. Pomembna je bližina dveh izvorov zvoka, pri kateri poslušalec še zazna, da gre za ločena izvora. Ustvarjanje akustične slike prostora je aplikacija namenjena velikemu številu ljudi, zato je smiselna uporaba splošnih HRTF, izmerjenih na lutkah.

Naše meritve s HRTF knjižnico laboratorija MIT Media Lab [4] so pokazale, da je v horizontalni ravnini pri centralnem azimutu 0° približno 87% testnih oseb doseglo ločljivost 5° [2]. To pomeni, da so lahko razločili zvok, ki je prihajal iz dveh navideznih izvorov, katerih elevacija je bila enaka 0° , azimut pa različen za 5° . Pri odmikih iz centralne lege levo ali desno je ločljivost nekoliko manjša, saj je le še približno 50% testnih oseb doseglo ločljivost 5° . Ločljivost pri spreminjanju elevacije je zelo slaba, kar je posledica uporabe splošnih HRTF.

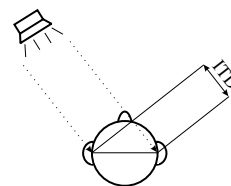
Izkazalo se je tudi, da na ločljivost močno vpliva izbira izvornega zvočnega signala [5,6]. Pomembni sta pasovna širina in trajanje signala.

Opisani rezultati so vodili do ideje, da z natančnejšo knjižnico HRTF poskusimo doseči še večjo ločljivost po azimutu. Z uporabo nove knjižnice CIPIC HRTF [3] in ustrezno interpolacijo smo pripravili funkcije

z natančnostjo do 1.3° azimuta. Izmerili smo tudi občutljivost na spremembe elevacije. Za primerjavo smo izmerili tudi ločljivost, ki jo dobimo z dejanskimi izvori zvoka v prostoru.

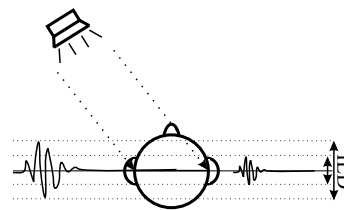
2 HRTF

HRTF opisujejo prenosne poti med izvorom zvoka in bobničem posameznega ušesa, ki so izmerjene za različne prostorske kote. Funkcije vsebujejo vse ključne dejavnike za reprodukcijo nekega prostorskega izvora zvoka. Za opis smeri izvora zvoka moramo podati njegov azimut (pozicija levo-desno) in elevacijo (pozicija gor-dol). Ključna dejavnika pri določanju azimuta nekega izvora zvoka sta časovna razlika ITD (Interaural Time Difference) in razlika v amplitudi ILD (Interaural Level Difference), kot je to prikazano na slikah 1 in 2. ITD pomeni zakasnitev vpada zvočnega valovanja na en ušesni bobnič glede na drugega [7]. ILD pomeni razliko v amplitudi teh dveh zvočnih valov. Vpadni zvočni val v zasenčeno uho (tisto ki je na nasprotni strani glave glede na izvor zvoka) je ustrezno oslavljen glede na direktni val.



Slika 1. Časovna razlika vpada zvočnega valovanja v direktno in zasenčeno uho (ITD)

Figure 1. Difference in arrival times of the sound wavefront at direct and shadowed ears

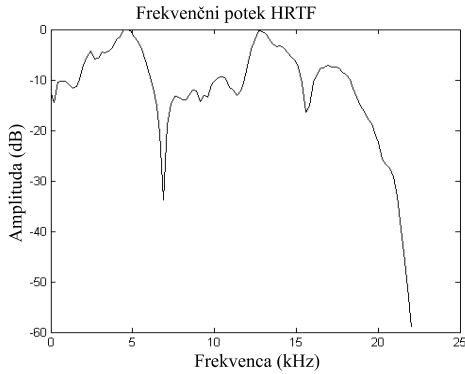


Slika 2. Amplitudna razlika med vpadom valovanja v direktno in zasenčeno uho (ILD)

Figure 2. Amplitude difference between sounds at direct and shadowed ears

Pri določanju elevacije izvora zvoka je bistvenega pomena spektralna vsebina zvočnega signala oziroma amplitudna karakteristika HRTF, ki jo prikazuje slika 3. Na spreminjanje spektralne vsebine vplivajo oblike ramen, glave in uhljev [8].

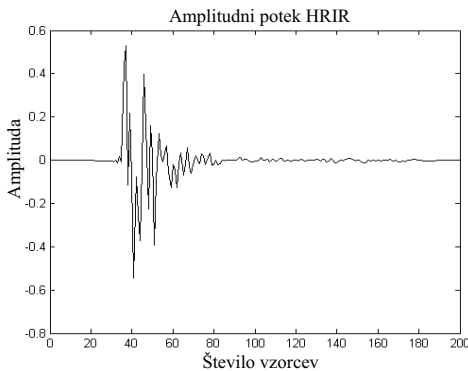
Splošne HRTF se ponavadi merijo v gluhi sobi s pomočjo doprsne lutke, ki ima obliko človeka [3,4]. V ušesih sta vstavljena drobcena mikrofona, ki predstavljata bobniča. Na določeni razdalji je nameščen izvor zvoka, ki



Slika 3. Amplitudni potek HRTF
Figure 3. Magnitude spectrum of HRTF

ga zaznavata mikrofona v ušesih. Doprna lutka je pritrjena na vrtljivo mizo, tako da z vrtenjem nastavljam različne azimute izvora zvoka. Zvočnik je pritrjen na podstavek, ki omogoča dviganje in spuščanje in s tem nastavitvev ustrezne elevacije izvora zvoka.

HRIR lahko izmerimo neposredno kot odziv sistema na enotin impulz ali pa opravimo meritve v frekvenčnem prostoru in določimo odziv s pomočjo inverznega Fourierovega transformata. Z ustreznim filtrom lahko kompenziramo vpliv karakteristik merilne opreme (zvočnika, mikrofona, predvajalnika itd.). Impulzne odzive pri različnih azimutih in elevacijah za vsako uho posebej predstavimo kot filtre s končnim odzivom s 128 oziroma 200 odcepi. Tipičen primer takšnega impulznega odziva prikazuje slika 4.



Slika 4. Amplitudni potek HRIR
Figure 4. Head related impulse response

Impulzne odzive uporabimo pri generaciji navideznega prostorskega zvoka v slušalkah. Prostorski zvok generiramo tako, da izvorni signal $s[n]$ preoblikujemo za vsako uho posebej. Signala za levo in desno uho dobimo kot konvolucijo izvornega signala z

impulznim odzivom [11]:

$$s_{d,\phi,\theta}[n] = \sum_{m=1}^{N-1} s[n-m] \text{hrir}_{d,\phi,\theta}[m] \quad (1)$$

$$s_{l,\phi,\theta}[n] = \sum_{m=1}^{N-1} s[n-m] \text{hrir}_{l,\phi,\theta}[m] \quad (2)$$

kjer sta $s_{d,\phi,\theta}[n]$ in $s_{l,\phi,\theta}[n]$ označena signala na levem in desnem ušesu pri azimutu ϕ in elevaciji θ , s $\text{hrir}_{d,\phi,\theta}[m]$ in $\text{hrir}_{l,\phi,\theta}[m]$ ustrezna odziva pri tem azimutu in elevaciji in N število vzorcev posameznega odziva.

Pri uporabi splošnih funkcij se moramo zavedati napake, ki jo le-te povzročijo. Najpogosteje poslušalci ne morejo razbrati, ali se navidezni izvor zvoka nahaja pred ali za njimi. V določenih primerih je problem tudi v določanju elevacije izvora, kar se odraža v zamenjavi med zgoraj in spodaj.

3 Opis problema

Namen našega poskusa je bilo iskanje največje ločljivosti, ki nam je na voljo pri ustvarjanju akustične slike prostora. To je najmanjši kot med navideznima izvoroma zvoka, pri katerem človek še zazna, da gre za ločena izvora. Zvočni signal, ki smo ga predvajali iz dveh smeri, je bil enak, kar je še otežilo ločevanje izvorov. Ločljivost po azimutu in elevaciji smo obravnavali ločeno. V dveh ločenih poskusih smo enkrat prostorske zvoke predvajali prek slušalk z uporabo splošnih HRTF, drugič pa smo uporabili dejanske izvora zvoka v prostoru. Osnovni zvočni signal je bil v obeh primerih enak.

4 Metode

4.1 Osnovna HRTF zbirka

Naša osnovna zbirka je bila knjižnica CIPIC, ki je vsebovala filtre za 1250 točk v prostoru:

- azimuti
 - $\pm 80^\circ$
 - $\pm 65^\circ$
 - $\pm 55^\circ$
 - $\pm 45^\circ : 5^\circ : 0^\circ$
- elevacije $-45^\circ : 5.625^\circ : 230.625^\circ$

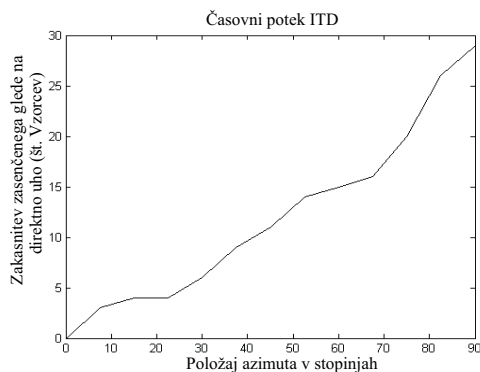
Osnovna knjižnica omogoča v sprednjem delu ločljivost po azimutu 5° , kar našim potrebam ni zadoščalo.

4.2 Razširjena zbirka HRTF

Zaradi potrebe po filterih za več prostorskih točk smo knjižnico CIPIC razširili s pomočjo linearne interpolacije. V prvem koraku smo za nabor impulznih odzivov pri neki določeni elevaciji izračunali ITD s pomočjo križne korelacije [11]. S korelacijsko funkcijo lahko ugotovimo podobnost dveh signalov, ki sta časovno zamaknjena.

$$R_{xy}[m] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]y[n+m] \quad (3)$$

Ker so si impulzni odzivi med seboj zelo podobni, nam pozicija maksimuma križno-korelacijske funkcije pove, koliko so med seboj časovno zamaknjeni. Po tem postopku izračunamo zakasnitve odzivov zasenčenega ušesa glede na direktnega in dobimo potek ITD v odvisnosti od azimuta, ki ga prikazuje slika 5.



Slika 5. Potek zakasnitve vpada valovanja na zasenčeno uho glede na direktno uho
Figure 5. Interaural time difference function

Če dobljeno časovno razliko izločimo iz impulznih odzivov, le-te poravnamo na časovni osi. Sedaj lahko s pomočjo linearne interpolacije izračunamo nov odziv za azimut med izmerjenima odzivoma.

$$\text{hrir}_{c,(\phi_1+\phi_2)/2,\theta}[n] = \frac{\text{hrir}_{c,\phi_1,\theta} + \text{hrir}_{c,\phi_2,\theta}}{2} \quad (4)$$

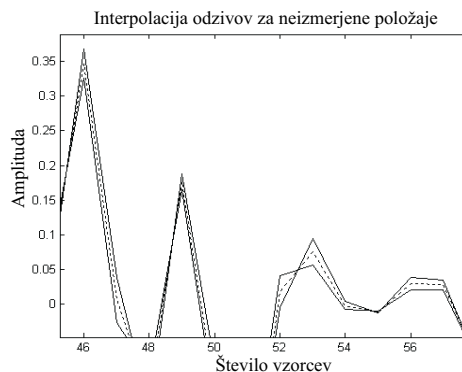
kjer je s $\text{hrir}_{c,\phi,\theta}$ označen impulzni odziv iz katerega smo izločili ITD. Postopek ilustrira slika 6.

Poleg interpolacije amplitudnih potekov novih odzivov moramo izračunati tudi ustrezne zakasnitve. Tudi tokrat uporabimo kar linearno interpolacijo dveh sosednjih točk na ITD funkciji, katere potek prikazuje slika 5.

Tako dobimo impulzne odzive za vmesne, neizmerjene kote. Postopek ponovimo še enkrat in dobimo HRTF knjižnico z natančnostjo azimuta v srednjem delu 1.3° .

4.3 Testne osebe

Pri meritvah je sodelovalo 38 prostovoljcev, starih od 15 do 50 let, z normalno razvitim vidom in sluhom.



Slika 6. Linearna interpolacija impulznih odzivov za vmesne vrednosti azimuta
Figure 6. Linear interpolation of impulse responses for nonmeasured azimuth positions

Testne osebe niso imele predhodnih izkušenj s prostorskimi zvoki, predvajanimi prek slušalk. Posledica tega sta bili njihova zmedenost na začetku meritev in zelo majhna natančnost pri lokalizaciji navideznih izvorov zvoka. Zaradi zanimivosti poizkusa je bila v povprečju koncentracija testnih oseb dokaj visoka.

4.4 Zvočni signal in merilna oprema

Na podlagi izkušenj smo za najprimernejši signal za ugotavljanje ločljivosti izbrali 100 ms dolgo sekvenco belega šuma, ki ima tako rekoč raven spekter [6]. Pasovna širina signala je bila od 0 do 22 kHz. Za primerjavo smo signal filtrirali še s pasovnim sitom različnih širin in ponovili poskuse.

Pri meritvah smo uporabili prenosni računalnik IBM ThinkPad T30 z vgrajeno zvočno kartico in slušalke Sennheiser Control HD270. Za merjenje ločljivosti v prostoru smo uporabili zvočnike Labtec LCS-1050.

4.5 Potek merjenja

V programskem jeziku Matlab smo razvili testno okolje, ki je omogočalo predvajanje zvočnih sekvenc iz različnih prostorskih izvorov. S pomočjo koordinatne mreže, izrisane na zaslonu smo lahko s klikom miške na poljubno koordinatno točko predvajali zvok iz poljubne lokacije.

Prvi del meritev, inicializacijski del, je služil za nekakšno uvajanje testnih oseb v poslušanje prostorskih zvokov prek slušalk. V tem delu so poslušalci prosto preskušali testno okolje in poslušali različne prostorske zvoke. Potem smo testnim osebam predvajali zvočna zaporedja s sistematičnim spreminjanjem pozicije izvora po tirnica:

- elevacija 0°
azimut: $-90^\circ : 5^\circ : 90^\circ$

- elevacija 33.750°
azimut: $-90^\circ : 5^\circ : 90^\circ$
- azimut 0°
elevacija $-45^\circ : 5.6250^\circ : 45^\circ$

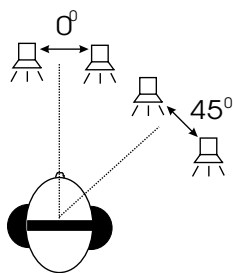
Tako so testne osebe dobile občutek za posamezne smeri ter povečale občutljivost na spremembe azimuta in elevacije navideznih izvorov zvoka.

V drugem delu smo najprej v navideznem prostoru izbrali dve centralni poziciji v horizontalni ravnini in v njih iskali ločljivost (slika 7). Neenakomerno smo zmanjševali razliko azimuta izvorov glede na poslušalca:

- elevacija 0° , centralni azimut 0°
kotna razlika med izvoroma:
 $20^\circ, 10^\circ, 7.5^\circ, 5^\circ, 2.5^\circ, 1.3^\circ$
- elevacija 0° , centralni azimut 45°
kotna razlika med izvoroma:
 $20^\circ, 10^\circ, 7.5^\circ, 5^\circ, 2.5^\circ, 1.3^\circ$

Zatem smo izbrali centralno pozicijo še v vertikalni ravnini in iskali ločljivost pri spreminjanju elevacije.

- azimut 45° , centralna elevacija 0°
kotna razlika med izvoroma:
 $56^\circ, 45^\circ, 28^\circ, 23^\circ, 11^\circ, 6^\circ$



Slika 7. Centralni poziciji, pri katerih smo merili smerno ločljivost
Figure 7. Two central positions where directional resolution was measured

Naloga poslušalcev je bila, da ocenijo, ali slišijo zvok iz dveh različnih izvorov ali gre za en sam izvor.

Pri opisanih meritvah smo izvedli še primerjavo z dejanskimi izvori zvoka, brez uporabe slušalk. Tudi tokrat smo zmanjševali kotno razliko zvočnikov glede na poslušalce, ki so sedeli na razdalji 4m od zvočnikov:

- elevacija 0°
kotna razlika med izvoroma: $20^\circ, 10^\circ, 7.5^\circ, 5^\circ, 2.5^\circ, 1.3^\circ$

Naloga poslušalcev je bila v tem primeru enaka. Zopet so morali oceniti, do katere razdalje slišijo dva ločena izvora. Tu velja poudariti, da smo meritve z dejanskimi izvori zvoka izvajali v šumnem okolju, kjer so bili prisotni razni odboji in motnje iz okolja.

5 Rezultati

Natančnost testnih oseb oziroma sposobnost ločevanja posameznih izvorov zvoka je močno odvisna od trajanja meritev. Čim daljši je bil prvi inicializacijski oziroma uvodni del meritev, tem bolje so se testne osebe znašle pri dejanskem merjenju ločljivosti. Pri lokalizaciji prostorskih izvorov, predvajanih prek slušalk, je večina testnih oseb pogosto menjavala sprednjo in zadnjo stran. Večini se je zdelo, da se vsi navidezni izvori zvoka nahajajo za njimi. Ta problem smo pojasnili že v uvodu in je posledica uporabe splošnih HRTF [9].

Rezultati meritev z navideznimi in dejanskimi izvori zvoka so združeni v spodnjih tabelah in ponazorjeni z ustreznimi grafi.

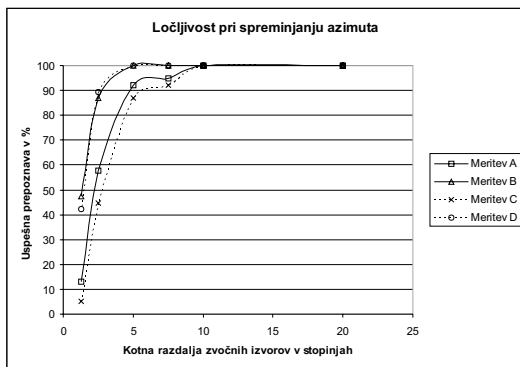
Tabela 1 in slika 8 prikazujeta rezultate prvega dela meritev, ko smo ugotavljali ločljivost pri fiksni elevaciji in zmanjševanju razlike kota azimuta izvorov. Testne osebe so morale določiti, ali slišijo zvok iz dveh ločenih izvorov. Posamezna številka v tabeli označuje število uspešnih prepoznav dveh izvorov za določeno kotno razliko med njima.

Kotna razlika v $^\circ$	Elevacija 0°			
	Cent. azimut 0°		Cent. azimut 45°	
	Navidezni izvori (HRTF) merit. A	Dejanski zvočniki merit. B	Navidezni izvori (HRTF) merit. C	Dejanski zvočniki merit. D
20	38	38	38	38
10	38	38	38	38
7.5	36	38	35	38
5	35	38	33	38
2.5	22	33	17	34
1.3	5	18	2	16

Tabela 1. Rezultati meritev ločljivosti v horizontalni ravnini
Table 1. Measurement results for the horizontal plain

Tabela 2 in slika 9 prikazujeta drugi del meritev, kjer smo ugotavljali ločljivost za elevacijo. Tu je bil fiksiran azimut izvorov, zmanjševali pa smo razliko kota elevacije. Tudi tu posamezna številka v tabeli pomeni število uspešnih prepoznav dveh ločenih izvorov.

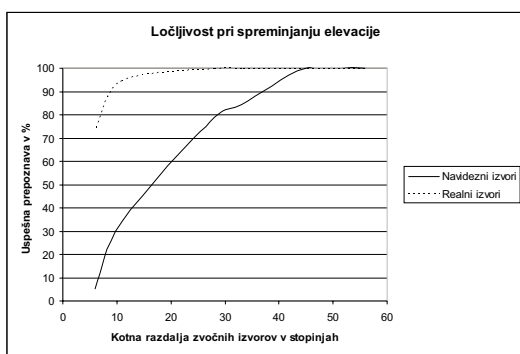
Že groba ocena rezultatov pove, da je sposobnost ločevanja posameznih izvorov zvoka, ki so zelo blizu skupaj, precej boljša, če imamo opravka z realnimi izvori.



Slika 8. Primerjave ločljivosti v horizontalni ravnini pri uporabi navideznih in realnih izvorov zvoka
Figure 8. Directional resolution in horizontal plain for real and virtual sound sources

Kotna razlika v °	Azimut 45°	
	Cent. elevacija 0°	
	Navidezni izvori (HRTF)	Dejanski zvočniki
56	38	38
45	38	38
33	32	38
28	30	38
11	13	36
6	2	28

Tabela 2. Rezultati meritev ločljivosti v vertikalni ravnini
Table 2. Measurement results for the vertical plain



Slika 9. Primerjave ločljivosti v vertikalni ravnini pri uporabi navideznih in realnih izvorov zvoka
Figure 9. Directional resolution in vertical plain for real and virtual sound sources

Poskusi v preteklosti so pokazali, da je tudi določanje absolutne pozicije izvorov zvoka v prostoru uspešnejše, kadar uporabimo realne izvore [10]. Z uporabo personificiranih HRTF se lahko tej natančnosti le približamo. Tudi v našem primeru, ko uporabljamo zelo splošene HRTF in ugotavljamo le zmožnost ločevanja difference

izvorov zvoka na nekem prostorskem položaju, so ugotovitve enake.

Če se osredotočimo na rezultate meritev z navideznimi izvori zvoka, lahko iz tabele 1 in slike 8 ugotovimo, da je ločljivost za majhne spremembe azimuta izvora zvoka največja na položaju točno pred poslušalcem, to je pri centralnem azimutu 0°. Tu je dobrih 50% testnih oseb brez večjih težav ločilo izvore le 2.5° narazen. Pri kotni razdalji 5° je uspešnost več kot 90%. Če območje opazovanja premaknemo iz centralne lege na azimut 45°, se ločljivost zmanjša za približno 5%.

Občutljivost za spremembe elevacije smo merili pri centralnem azimutu 45°, ker so rezultati pri azimutu 0° slabši. Nekaj več kot 80% testnih oseb je uspešno ločilo izvora zvoka, ki sta se po elevaciji razlikovala za 30°. Za razlike med 10° in 20° uspešnost hitro pade na dobrih 30%.

6 Sklep

Ločljivost pri spreminjanju elevacije je veliko slabša od ločljivosti pri spreminjanju azimuta, predvsem pri izvorih zvoka predvajanih prek slušalk. Glavni razlog je že omenjena uporaba splošnih HRTF. Pri določanju azimuta navideznih izvorov sta za dobro ločljivost najpomembnejša natančna ITD in ILD, manj pa sama spektralna vsebina funkcij. Ko imamo opravka s spreminjanjem elevacije, si s tema dejavnikoma ne moremo več pomagati in je pomembna le oblika spektra funkcij. Ker se personificirane HRTF in tiste, ki so merjene z umetnimi glavami, razlikujejo predvsem v spektralni vsebini, je napaka pri elevaciji toliko večja.

V uvodu smo nakazali, da je eden od mogočih in zelo perspektivnih primerov uporabe HRTF generacija akustične slike prostora, ki bi služila kot navigacijski pripomoček slepim. Statistično izmerjena ločljivost pri določanju pozicij navideznih izvorov zvoka z uporabo HRTF je presenetljivo visoka in bi omogočala dokaj kakovosten zapis akustične slike prostora. Poudariti moramo, da o visoki ločljivosti lahko govorimo le pri spremembah azimuta izvora zvoka. Občutljivost človeškega slušnega sistema za spremembe elevacije je precej manjša in po vsej verjetnosti ne bo zadoščala za zapis potrebne količine informacij. Rešitev problema leži v nekem drugačnem načinu kodiranja elevacije v akustični sliki. Sam po sebi se kot zelo primerna možnost ponuja zapis različnih elevacij z različno frekvenco zvočnih signalov. Tak način je človeškemu slušnemu sistemu domač, kar smo ugotovili med merjenjem. Pri uporabi zvočnih signalov višjih frekvenc se je večini testnih oseb lokacija izvora zvoka zdela višje, kot je bila v resnici.

V prihodnosti nameravamo z ustrezno opremo izmeriti HRIR za nekaj testnih oseb in test ločljivosti ponoviti s personificiranimi funkcijami. Izboljšanje rezultatov pričakujemo predvsem pri določanju elevacije izvorov,

saj opravljene meritve, predvsem del z dejanskimi izvori zvoka kažejo, da je elevacijo mogoče zaznati bolj natančno.

7 Zahvala

Raziskave je financiralo Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport v okviru programa Algoritmi in optimizacijske metode v telekomunikacijah.

8 Literatura

- [1] C. I. Cheng and G. H. Wakefield: Introduction to head-related transfer functions (HRTF's): representations of HRTF's in time, frequency, and space (invited tutorial), *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 49, no. 4, pp. 231-249, April 2001.
- [2] J. Sodnik, R. Susnik and S. Tomazic: Acoustic signal localization through the use of Head Related Transfer Functions, *Proceedings on International Conference on Computer, Communication and Control Technologies*, Orlando, Florida, vol. 2, pp. 100-103, August 2003.
- [3] V. R. Algazi, R. O. Duda, D. M. Thompson and C. Avendano: The CIPIC HRTF Database, *Proc. 2001 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Electroacoustics*, pp. 99-102, Mohonk Mountain House, New Paltz, NY, October, 2001.
- [4] B. Gardner and K. Martin: HRTF Measurements of a KE-MAR Dummy-Head Microphone, MIT Media Lab Perceptual Computing - Technical Report #280, May 1994.
- [5] R. Sušnik, J. Sodnik in S. Tomažič: Vpliv dolžine impulza na ločljivost v akustični sliki prostora, *Zbornik dvanajste mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2003*, str. 91-94, September 2003.
- [6] R. Susnik, J. Sodnik and S. Tomazic: Sound source choice in HRTF acoustic imaging *HCI International adjunct proceedings*, Heraklion, Crete, pp. 101-102, June 2003.
- [7] G. F. Kuhn: Model for the interaural time differences in the azimuthal plane, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 62, no. 1, pp. 157-167, July 1977.
- [8] V. R. Algazi, C. Avendano, R. O. Duda: Elevation localization and head-related transfer functions analysis at low frequencies, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 109, no. 3, pp. 1110-1122, March 2001.
- [9] E. M. Wenzel, M. Arruda and D. Kistler, F. L. Wightman: Localization using nonindividualized head-related transfer functions, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 94, no. 1, July 1993.
- [10] A. W. Bronkhorst: Localization of real and virtual sound sources, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 98, no. 5, November 1995.
- [11] S. Tomažič, S. Leonardis: *Diskretni signali in sistemi*, Fakulteta za elektrotehniko, 2004.
- [12] G. Žiberna, D. Zazula: Računalniška tvorba 3D zvoka v virtualnih prostorih, *Elektrotehniški vestnik*, Let. 70, št. 3, str. 96-102, 2003.

Jaka Sodnik je diplomiral leta 2002 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za komunikacijske naprave in je študent podiplomskega študija elektrotehnike. Njegovo raziskovalno delo obsega področje akustike in komunikacijskih omrežij.

Rudolf Sušnik je diplomiral leta 2001 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za komunikacijske naprave in je študent podiplomskega študija elektrotehnike. Njegovo raziskovalno delo je osredotočeno na komunikacijska omrežja in akustiko.

Goran Bobojević je diplomiral leta 2001 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za komunikacijske naprave in je študent podiplomskega študija elektrotehnike. Njegovo raziskovalno delo obsega področje varnosti v telekomunikacijah in akustike.

Sašo Tomažič je zaposlen je kot redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani in je predstojnik Katedre za telekomunikacije. Njegovo sedanje delo obsega raziskave na področju obdelave signalov, varnosti v telekomunikacijah, elektronskega poslovanja in porazdeljenih podatkovnih sistemov.