

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

KLIŪČIŲ INDIKAVIMO TRIMAČIU ERDVINIU GARSU
GALIMYBIŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Biomedicininė inžinerija (kodas 621H16001)

Vadovas

Doc. dr. Darius Kybartas

Recenzentas

Doc. dr. Rytis Jurkonis

Projektą atliko

Lina Kundrotaitė

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Lina Kundrotaitė

(Studento vardas, pavardė)

Biomedicinos inžinerija, kodas 621H16001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pavadinimas“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano Linos Kundrotaitės baigiamasis projektas tema „Kliūčių indikavimo trimačiu erdviniu garsu galimybių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Kundrotaitė, L. Kliūčių indikavimo trimačiu erdviu garsu galimybių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Darius Kybartas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. 47 psl.

SANTRAUKA

Yra sukurta daug skirtingų būdų ir metodų, padedančių akliesiems orientuotis aplinkoje ir aptikti kliūtis kelyje. Vis tik populiariausia yra baltoji lazdelė. Jos populiarumui įtakos turi maža kaina ir paprastumas, tačiau ji suteikia labai ribotą kiekį informacijos – kliūtys aptinkamos maksimaliai 1,5 m atstumu. Be lytėjimo aklieji dažnai pasikliauja aplinkos garsais.

Vienas iš būdų, padedantis neregiam orientuotis aplinkoje, yra leisti garsus liežuvio, pirštais ar trinktelėti lazdele į žemę, kurių aidas įgudusiems akliesiems leidžia apytiksliai įvertinti kiek toli ir kurioje pusėje yra kliūtis. Šis metodas reikalauja ilgų apmokymų ir praktikos.

Žinant, kad aklųjų klausa yra aštresnė nei sveikų žmonių, projektuojant elektronines orientavimosi ir kliūčių aptikimo sistemas neregiam yra galimas erdvinio garso panaudojimas. Šiandien rinka nesūlo sistemų, kurios maksimaliai išnaudotų aštrią aklųjų klausą. Čia gali būti panaudojamas erdvinis garsas.

Šio darbo tikslas yra ištirti žmogaus gebėjimą skirti garso šaltinio kryptį horizontalėje ir vertikalėje bei įvertinti atstumą iki jo, apžvelgti galimas paklaidas, įvertinti erdvinio garso panaudojimo galimybę kliūčių indikavimui.

Siekiant sumodeliuoti erdvinį garšą, kuris suteiktų kuo tikslesnę informaciją, yra būtina surinti duomenis apie pokyčius, atsirandančius garso signale, jam keliaujant nuo garso šaltinio iki ausies kanalo. Šie pokyčiai atsiranda dėl žmogaus galvos ir ausų formų ir yra vadinami galvos perdavimo funkcija (HRTF). Galvos perdavimo funkcijos registruojamos tyrimų metu akustiniame kambaryje. Gavus galvos perdavimo funkcijas yra atliekami tiriamųjų erdvinio garso skiriamumo testavimai.

Šiame tyrime dalyvavo šeši sveiki, klausos ir regos sutrikimų neturintys savanoriai nuo 24 iki 33 metų. Galvos perdavimo funkcijų registravimas vykdytas keturiuose atstumuose (nuo 1 m iki 4 m, vieno metro tikslumu), keturiuose vertikalės vietos taškuose (15 cm virš ausų lygio, ausų lygyje bei 15 ir 30 cm žemiau ausų lygio) ir trylikoje horizontalės kampų (nuo 270° iki 90°, 15° tikslumu). Iš šių funkcijų buvo apskaičiuotos galvos impulsinių reakcijų (HRIR) funkcijos. Apdorojimo metu įvykdyta konvoliucija sumodeliuotam dviejų tonų akustiniam signalui ir galvos impulsinių reakcijų funkcijoms - taip gautas erdvinis garsas.

Sumodeliavus trimačio erdvinio garso duomenų bazę vykdomi mokymai ir testavimai, kurių metu tiriamasis turi nustatyti garso signalo vietą erdvėje.

Tyrimų metu nustatyti maksimalūs tikslumai: 31,3% vertikalėje, 20,7% horizontalėje ir 49,5% gylyje. Čia tikslumas procentais nusako kiek vidutiniškai kartų tiriamieji teisingai nustato trimačio erdvinio garso vietą. Testavimo metu didžiausios gautos paklaidos yra horizontalėje. Taip galėjo nutikti dėl ne preciziškai atlikto galvos perdavimo funkcijų registravimo, per trumpo mokymų laiko ar tiriamųjų klausos sutrikimų. Nustatyta, kad garso signalo vietai tolstant nuo priešakinio taško daromos visų trijų parametrų paklaidos didėja. Tyrimų metu pastebėta, kad triukšmo lygis ir nuovargis daro neigiamą įtaką erdvinio garso vietos erdvėje nustatymo rezultatams.

Reikšminiai žodžiai: erdvinis garsas, HRTF, HRIR, interauralinis laiko ir intensyvumų skirtumas.

Kundrotaitė L. Investigation of obstacle indication by 3D spatial sound. Final project of master's work in Biomedical Engineering / supervisor prof. D. Kybartas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronic engineering.

Kaunas, 2015. 47 p.

SUMMARY

There are developed many different means and methods helping the blind to orientate in the environment and to avoid obstacles on the road. Still, the most popular is a white cane. Its popularity is influenced by low cost and simplicity, but it provides very limited amount of information – obstacles are detected maximum at 1.5 m distance. Besides tactile sense, the blind often relies on spatial sounds.

One of the ways helping the blind to orientate in the surroundings is to make sounds with the tongue, fingers or hit the floor with the cane, thus echo is generated, which allows for the experienced blind to estimate approximately how far and in which side the barrier is. This method requires long training and practice.

Knowing that hearing of blind people is more acute compared to healthy ones, it is possible to use spatial sound when designing electronic orientation and obstacle detection systems for the blind. Today the market does not offer systems that would make the most of the blind acute hearing.

The aim of this work is to investigate the human ability to detect the direction of the sound source in horizontal and vertical planes and to estimate the distance to it, also to overview possible errors and to evaluate the possibility of using the spatial sound for obstacle identification.

In order to simulate the spatial sound, that would give the most accurate information, it is necessary to collect data on the changes that occur in the audio signal, as it travels from the sound source to the ear canal. These changes are the result of human head and ear shapes and are called head related transfer functions (HRTF). Head related transfer functions are recorded during the research performed in an acoustic room. When HRTF functions are obtained, there are performed tests with the experiment participants, on distinguishing the spatial sound location.

In this study there have participated six healthy volunteers from 24 to 33 years old, without any hearing and vision disorders. Head related transfer functions were registered in four distances (from 1 m to 4 m, with 1 m accuracy), at four vertical points (15 cm above the level of the ear, at the ear level, 15 and 30 cm below the level of the ear) and thirteen horizontal (from 270° to 90°, by 15° accuracy) points. From these functions there were calculated head-related impulse responses (HRIR) functions. During the processing there was performed convolution for the simulated acoustic two-tone signal and head impulse response function – thus obtained spatial sound.

After three dimensional spatial sound database was simulated, there were performed training and testing, during which the subject had to determine the location the sound signal in the space.

Maximum, during the study obtained accuracy, is: 31.3% in the vertical, 20.7% in the azimuth and 49.5% in the depth. Here accuracy in percentage refers to the average number of times the subjects correctly determined three dimensional spatial sound location. Maximum errors, received during the investigation, were in horizontal plane. This might have happened due to not precise HRTF measurements, caused by short training time or the subjects' hearing impairment. During the study it was determined, that when the sound signal source is moving away from the frontal point generatrix, errors of all three parameters increase. It was noticed, that certain level of noise and tiredness adversely affect determination results of spatial sound place in space.

Keywords: spatial sound, HRTF, HRIR, interaural time and intensity difference.

TURINYS

SANTRUPŲ SĄRAŠAS.....	8
ĮVADAS.....	9
1 LITERATŪROS APŽVALGA.....	11
1.1 Ausų anatomija, fiziologija ir garso suvokimo savybės	11
1.2 Techninės pagalbos neregiamis priemonių apžvalga	14
1.3 Galvos perdavimo funkcija ir impulsinė reakcija.....	18
1.4 Galvos perdavimo funkcijų registravimo metodikos.....	20
1.5 Literatūros apžvalgos apibendrinimas, tyrimo tikslas ir uždaviniai	21
2 INDIVIDUALIŲ GALVOS PERDAVIMO FUNKCIJŲ REGISTRAVIMAS.....	23
2.1 Individualių galvos perdavimo funkcijų registravimo metodika.....	23
2.2 Individualių galvos perdavimo funkcijų įrašų apdorojimas	25
2.3 Rezultatų įvertinimas ir išvados	26
3 TRIMAČIO ERDVINIO GARSO SKIRIAMUMO TYRIMAS.....	29
3.1 Erdvinio garso skiriamumo tyrimo metodika.....	29
3.2 Rezultatų įvertinimas ir išvados	30
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....	42
Darbą apibendrinančios išvados	42
Galimos tolimesnių tyrimų kryptys	43
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	44
PRIEDAI.....	47
Priedas 1. Vidutinės visų tiriamųjų testavimo metu gautos paklaidos tyrimo eilės tvarka.	47
Priedas 2. Pirmos testavimo dalies visų tiriamųjų apskaičiuoti paklaidų vidurkiai, suskirstyti į grupes.....	50
Priedas 3. Antros testavimo dalies visų tiriamųjų apskaičiuoti paklaidų vidurkiai, suskirstyti į grupes.....	50
Priedas 4. Trečios testavimo dalies visų tiriamųjų apskaičiuoti paklaidų vidurkiai, suskirstyti į grupes.....	51
Priedas 5. Ketvirtos testavimo dalies visų tiriamųjų apskaičiuoti paklaidų vidurkiai, suskirstyti į grupes.....	52

SANTRUPŲ SAŖAŠAS

HRTF (angl. Head Related Transfer Function) – galvos perdavimo funkcija;

HRIR (angl. Head Related Impulse response) – galvos impulsinė reakcija;

GPS (angl. Global Positioning System) – globalinė padėties nustatymo sistema;

GIS (angl. Geographical Information System) – geografinė informacinė sistema;

UG (angl. US- Ultrasound) – ultragarsas;

ITD (angl. Interaural Time Difference) – interauralinis laiko skirtumas;

IID (angl. Interaural Intensity Difference) – interauralinis intensivumų skirtumas;

FIR (angl. Finite Impulse Response) – ribotos impulsinės reakcijos;

MLS (angl. Maximal Length Sequences) – maksimalaus ilgio seka;

SNR (angl. Signal Noise Ratio) – signalas triukšmas santykis;

BEM (angl. Boundary Element Method) – ribinių elementų metodas;

SPL (angl. Sound Pressure Level) – garso slėgio lygis.

IVADAS

2014 metų statistikos duomenimis, pasaulyje yra 285 milijonai regėjimo negalią turinčių žmonių. Iš jų 39 milijonai yra akli, 246 milijonai žmonių turi regėjimo sutrikimų. 82% visų neįgaliųjų yra penkiasdešimties metų ir vyresni. Dažniausios aklumo ar regėjimo sutrikimų priežastys yra galvos ar akių traumos, įgimtos ar negydomos, užleistos ligos (pavyzdžiui, trumparegystės, toliaregystės, astigmatizmo ir kataraktos) padarinys [1].

Neregių gyvenime svarbų vaidmenį atlieka techninės pagalbos priemonės. Tokios priemonės - tai neįgaliųjų naudojami specialūs ar standartiniai gaminiai, techninės sistemos, padedančios kompensuoti žmogaus negalią ir sumažinti jos poveikį gyvenimo kokybei. Techninė pagalba šiandien neatstoja neįgaliesiems regos, tačiau gali padėti žmogui atgauti prarastą savarankiškumą, integruotis į visuomenę bei darbo rinką.

Žmogaus, netekusio regėjimo ar nuo gimimo aklo, klausa yra aštresnė nei sveiko [2]. Klausa žmogui yra vienas iš svarbiausių pojūčių, suteikiančių informaciją apie supančią aplinką. Didžiąją dalį žmonių nereikia matyti atvažiuojančio automobilio, kad galėtų nuspręsti, iš kurios pusės ir kur link jis važiuoja, tačiau tokios informacijos yra per maža, kad galėtų laisvai ir saugiai judėti. Remiantis šia prielaida, garsą galima ir net būtina taikyti projektuojant elektroninę pagalbos įrangą akliesiems.

Norint saugiai judėti ir orientuotis aplinkoje, žmogui nepakanka įdėmiai klausytis aplinkos garsų, jam itin svarbu aptikti ir žinoti apie jo kelyje pasitaikančias kliūtis, tokias kaip kelio ženklų stulpas, pastato sienos ar šaligatvyje stovinti šiukšlių dėžė. Vienas populiariausių ir dažniausiai naudojamų metodų kliūtims aptikti yra ultragarsas: ultragarsinis siųstuvas išspinduliuoja į aplinką aukšto dažnio bangas, o jo imtuvai jas priima. Kliūtis indikuojančios sistemos kompiuteris apskaičiuoja atstumą iki kliūties bei jos buvimo kryptį ir konvertuoja šią informaciją į atitinkamo intensyvumo garsinį signalą ar vibraciją. Deja šiandienai rinkoje dar nėra sukurta sistema, kuri maksimaliai išnaudotų erdvinio garso galimybes.

Siekiant, kad neregys kliūčių indikavimo erdviu garsu metu gautų kuo tikslesnę informaciją, galima remtis žmogaus galvos perdavimo funkcija, kuri gaunama tyrimų metu akustiškai izoliuotame kambarielyje, įrašant specialų leidžiamą garsą žmogaus ausyse patalpintais mikrofonais. Galvos perdavimo funkcija - tai pokyčiai, atsirandantys leidžiamame garso signale, jam keliaujant nuo garso šaltinio iki ausies kanalo. Gavus šiuos įrašus ir apskaičiavus atsirandančius pokyčius, galima modeliuoti indikacinius akustinius signalus, nurodančius garso šaltinio vietą erdvėje. Techninėje pagalboje neregiam garso šaltinis gali būti tapatinamas su kelyje aptikta kliūtimi, kur garso intensyvumas apibūdintų atstumą iki jos, fazės pokytis - kryptį horizontalėje, o dažniniai pokyčiai - vietą vertikalėje. Sekančiame etape svarbu ištirti žmogaus gebėjimą skirti garso šaltinio buvimo vietą erdvėje.

Darbo tikslas: Ištirti žmogaus gebėjimą skirti garso šaltinio kryptį horizontalėje ir vertikalėje bei įvertinti atstumą iki jo, apžvelgti galimas paklaidas bei įvertinti erdvinio garso panaudojimo galimybę kliūčių indikavimui.

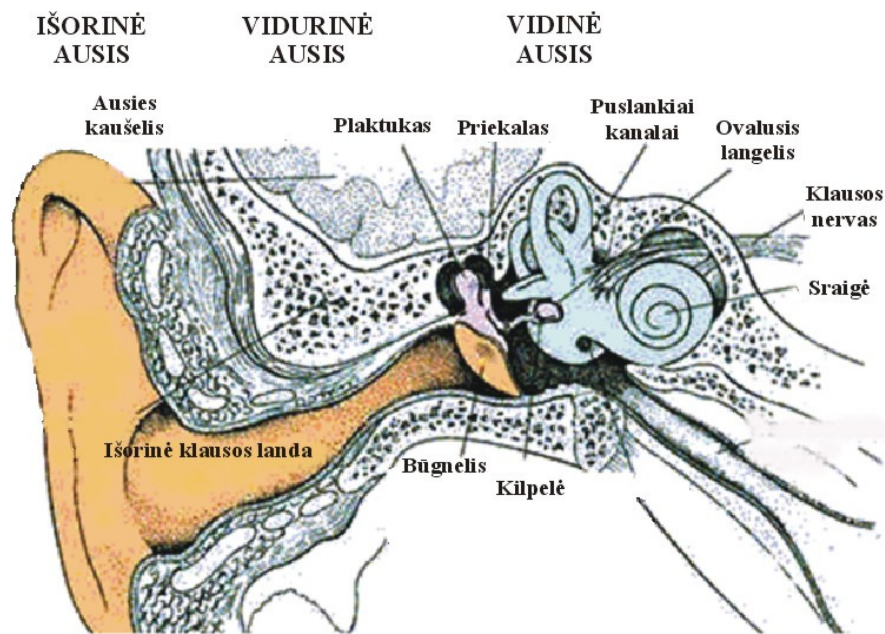
Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti galvos perdavimo funkcijos esamas registravimo ir erdvinio skiriamumo tyrimų metodikas.
2. Tyrimo metu užregistruoti tiriamųjų galvos perdavimo funkcijas.
3. Ištirti tiriamųjų erdvinį (horizontalėje, vertikalėje bei atstumo) skiriamumą, remiantis užregistruotomis galvos perdavimo funkcijomis.
4. Palyginti gautus tyrimo rezultatus bei paklaidas, naudojant užregistruotas galvos perdavimo funkcijas.

1 LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Ausų anatomija, fiziologija ir garso suvokimo savybės

Klausos organas - ausis, sudaryta iš trijų dalių: išorinės, vidurinės ir vidinės ausies (Pav. 1.1). Išorinę ausį sudaro ausies kaušelis ir išorinė klausomoji landa. Garsas pasiekia kaušelį, juo yra nukreipiamas į klausomąją landą, kur pasiekia vidurinę ausį (oro pripildytą terpę) - pirma suvirpina būgnelį, kuris savo ruožtu yra susijęs su klausomaisiais kaulėliais - plaktuku, priekalu ir kilpa, šiuos kaulėlius judina virpantis būgnelis. Kilpa savo pagrindu yra prisitvirtinusi prie ovaliojo langelio membranos, kuri skiria vidurinę ir vidinę ausies dalis. Vidinė ausis pripildyta skysčio. Čia svarbu tai, kad skysčiui suvirpinti reikia stipresnių svyravimų nei orui, bet, atsižvelgiant į tai, kad būgnelio plotas yra daug didesnis nei kilpos pagrindo plotas, todėl slėgis į ovalųjį langelį yra proporcingas būgnelio ir kilpos pagrindo plotų santykiui. Šį slėgį taip pat didina klausomieji kaulėliai - plaktukas ir priekalas, kurie sudaro svertų sistemą [3].

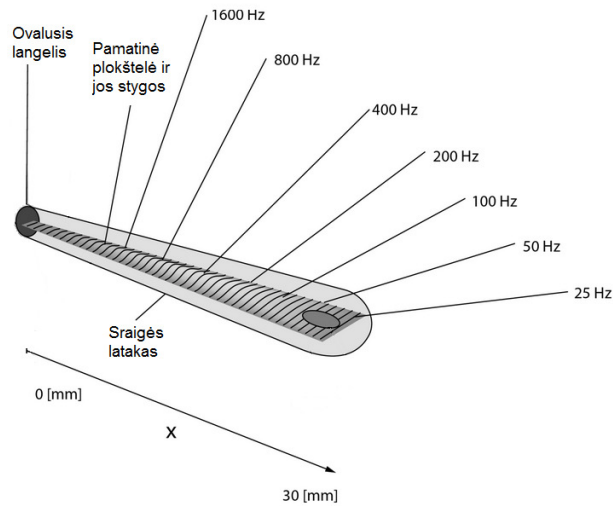


Pav. 1.1 Ausies sandara [4]

Ovalusis langelis yra susijęs su vidinėje ausyje esančia sraigė. Sraigė sudaro apie 32 mm ilgio ir 2 mm skersmens kaulinis kanalas, kuris yra susisukęs spirale apie kūgio formos ašį - sraigės ritę. Kilpa virpėdama dirgina sraigę, joje esančią pamatinę plokštelę, kurioje esančios statmenos bangai plaukuotosios ląstelės yra lenkiamos, o palenktos išskiria neurotransmiterį aksonams, kurie toliau perduoda signalą per pailgasias smegenis į klausos žievę [3].

Ausies sraigės pamatinė plokštelė nėra vientisa. Ji sudaryta iš tarpusavyje lygiagrečių 20 000 tam tikro specialaus jungiamojo audinio stygų. Šios stygos yra statmenos latakui ir viršūnės link ilgėja bei jų skersmuo siaurėja (Pav. 1.2). Dėl tokios fiziologijos skirtingos pamatinės

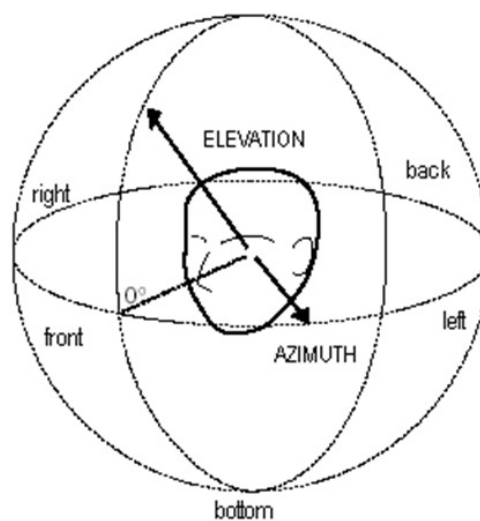
plokštelės vietos yra susijusios su skirtingais dažniais, t.y. skirtingo dažnio garso bangos dirgina skirtingą pamatinės plokštelės vietą: pamatinės plokštelės pradžia jautresnė aukštiesiems dažniams, pabaiga - žemiems. Tai pagrindinis dažnio kodavimo būdas žmogaus klausos sistemoje [3].



Pav. 1.2 Pamatinė sraigės plokštelė ir garso bangų dažnių kodavimas joje [5]

Didėjanti garso amplitudė gali arba stipriau lenkti plaukuotąsias ląsteles, tokiu atveju išsiskiria daugiau neurotransmiterio, arba gali lenkti didesnį jų kiekį, kurios būtų susijusios su tomis pačiomis ar daugiau nervinių skaidulų [3].

Garsas - tamprus oro molekulių svyravimas - tai slėgio kitimas. Garsas apibūdinamas bangos ilgiu, dažniu bei intensyvumu. Aiškinamasis norminis kompiuterijos žodynas erdvinį garsą apibūdina kaip garsą, ateinantį iš įvairių pusių ir sukeltą erdvės įspūdį [6]. Tai bet koks garsas, simuliuojamas programiškai ar natūralus, galintis sudaryti erdvėje išsidėsčiusių ar judančių garso šaltinių vaizdinį.



Pav. 1.3 Vertikalių ir horizontalių kampų vertinimas [7]

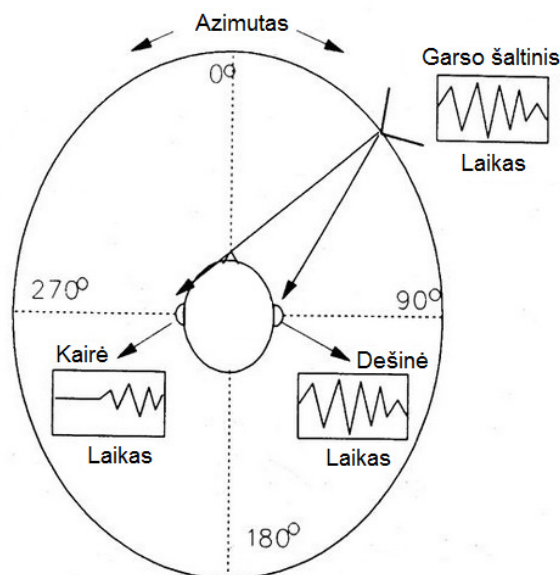
Nustatant akustinio signalo vietą erdvėje yra ieškoma garso šaltinio krypties (Pav. 1.3), kur elevacijos - vertikalųjį kampą padeda rasti ausies kaušelis, azimuto - horizontalųjį kampą randame lygindami į abi ausis atėjusius garso signalus:

- 1) skiriasi akustinio signalo nueitas atstumas;
- 2) skiriasi nueitas kelias - garso signalas kelyje į tolimesnę ausį susiduria su kliūtimis-veido/ galvos reljefu (Pav. 1.4) [8].

Šie du reiškiniai daro įtaką signalo vėlinimo, fazių ir intensyvumų skirtumų atsiradimui. Atsižvelgiant į šiuos reiškinius, teisingai sugeneruoto sintetinio signalo, leidžiamo per stereo ausines, rezultatas bus lateralizacija. Pagrindinė signalų intensyvumų skirtumo atsiradimo priežastis nėra nueito atstumo skirtumas – tam daro įtaką šešėliavimo efekto atsiradimas dėl kelio reljefo [8].

Vertinant atstumą tarp garso šaltinio ir klausytojo, pagrindinis parametras yra signalo amplitudė ir jos pokytis - atstumui padvigubėjus, amplitudė sumažės $\frac{1}{4}$ [8].

Aukšto dažnio signalams, t.y., kai dažnis yra didesnis nei 3 kHz, galva sudaro šešėlį, todėl reikia vertinti signalo amplitudę. Nustatant žemesnio nei 3 kHz dažnio garso šaltinio kryptį, svarbiau vertinti laiko skirtumą, nes šios bangos ilgesnės nei galvos skersmuo ir galvą jos aplenkia [3]. Vertinant tiksliau: bet koks garso signalas, kurio bangos ilgis yra didesnis už galvos skersmenį, bus difraguojamas ir bet koks garso signalas, kurio bangos ilgis yra mažesnis už galvos skersmenį, bus šešėliuojamas ir slopinamas - atsiras žemų dažnių filtro efektas [8]. Jei garso šaltinis yra žmogui iš šono (90° arba 270° Pav. 1.4), tai vidutinis laiko skirtumas, kada garsas pasiekia artimiausią ir kitoje galvos pusėje esančią ausį, yra $\sim 8\text{ms}$.



Pav. 1.4 Garso bangos intensyvumo skirtumų bei vėlinimo susidarymas [9]

Žmogus girdi 16- 20000 Hz dažnio garso bangas, kur kalba užima 250- 6000 Hz dažnių sritį. Bangos, kurių dažnis yra žemesnis už žmogaus girdimą, yra vadinamos infragarsu, o

aukštesnės - ultragarsu. Garso stiprumas slenkščio atžvilgiu yra apibūdinamas garso slėgio lygiu SPL ir yra matuojamas dsecibelais [10]:

$$SPL = 20 \cdot \log \left(\frac{p_x}{p_0} \right), \quad (1.1)$$

Kur SPL - tai garso slėgio lygis, p_x - tai matuojamas garso slėgis, p_0 - slenkstinis garso slėgis.

Garso lygio padidėjimas 10 dB žmogaus yra suvokiamas kaip dvigubas padidėjimas, o 1-2 dB padidėjimas yra mažiausias, kurį gali užfiksuoti klausos sistema [10].

Aplink mus visą laiką kas nors vyksta, kas nors juda, dirba, kalba ir pan., mūsų ausis ištiesai pasiekia vienu metu vykstančių veikslių garsai, o smegenys tuo tarpu sugeba apdoroti gaunamą informaciją, „sekti“ norimus garsus, pašalinius „filtruoti“, pavyzdžiui, klausydamiesi muzikos galime susikoncentruoti ties smuiko partija, tuo tarpu kiti instrumentai mums „nutyla“.

1.2 Techninės pagalbos neregiam priemonių apžvalga

Rega yra pagrindinis pojūtis, leidžiantis priimti informaciją apie supančią erdvę bei padedantis orientuotis aplinkoje. Žmogui netekus regėjimo ar jam susilpnėjus, kiti pojūčiai, tokie kaip klausa, lytėjimas, sustiprėja [11], [12]. Tokiu atveju aklasis remdamasis erdviniu garsu gali orientuotis aplinkoje.

Šimtus metų populiariausia priemonė akliems judėti savarankiškai, be pašalinių asmenų pagalbos buvo lazdelė. Baltoji neregio lazdelė oficialiai pasauliui pristatyta 1930- 1931 metais [13], tačiau ji teikia per mažai informacijos apie aplinką, kuri mus supa.

Vienas iš būdų, padedantis orientuotis aplinkoje, - leisti garsus liežuviu, pirštais ar pan., kurių aidas akliems leidžia apytiksliai įvertinti, kiek toli ir kurioje pusėje yra kliūtis [14]. Šis metodas reikalauja ilgų mokymų ir praktikos.

Šiandien, šiais technologijų ir inovacijų laikais, yra sukurta daug įvairių elektroninių įrenginių, padedančių neregiam orientuotis aplinkoje. Šiame skyriuje toliau bus aptarta, kokiomis technologijomis remiantis tokie elektroniniai įrenginiai veikia, kaip indikuoja akliems apie aptiktas kliūtis.

Pirmoji elektroninė techninė sistema akliems buvo sukurta 1897 metais lenkų mokslininkų Starkieviczo ir Kuliszewskio. Jų įrenginys skirdavo šviesą nuo tamsos ir konvertuodavo signalus į atitinkamo intensyvumo garsą [15].

Yra sukurta nemažai sistemų, kurios dirba remiantis GPS (Global Positioning Systems) informacija, viena jų aprašyta [16]. Maksimali šio prietaiso nustatyto atstumo paklaida siekė net 16m ir svėrė jis 2 kg. Ši sistema buvo sudaryta iš dviejų dalių: mobilios ir stacionarios bazinės stoties. Mobilioji dalis buvo sudaryta iš GPS imtuvo ir mobiliojo telefono. GPS imtuvo gautos

apskaičiuotos koordinatės mobiliuoju telefonu buvo siunčiamos į bazinę stotį per modemą. Stotyje esantis kompiuteris, gavęs koordinates, duomenų bazėje rasdavo artimiausio pastato pavadinimą/ adresą ir pranešdavo jį žodžiais telefonų akklajam [16].

[17] suprojektuotas prototipas, sudarytas iš komplekto jutiklių ir įrenginių, pritaistytų prie dviratininko šalmo, kur viskas prijungta prie nešiojamojo kompiuterio, esančio kuprinėje. Šią sistemą sudaro nešiojamas kompiuteris, dvi foto kameros, akcelerometras, kompasas, giroskopas bei viena vaizdo kamera Pav. 1.5 [17].



Pav. 1.5 [17] suprojektuota sistema, kurią sudaro prie dviratininko šalmo pritaistyti jutikliai, kameros, ausinės bei nešiojamasis kompiuteris kuprinėje

Kameros ir jutikliai perduoda informaciją kompiuteriui, kuris ją apdoroja ir garsiniais signalais indikuoja aplinką, kliūtis kelyje. Čia taip pat integruota pėstiesiems adaptuota GPS sistema, dar vadinama GIS (Geographical Information system), valdoma balsu [17].

Dalis sukurtų elektroninių „vedlių“ remiasi iš stereo kamerų gauta informacija, kurios procesorių pagalba pilkosios skalės metodu vOICE skaičiuoja atstumą iki artimiausios kliūties [18], [19], [20], [21].



Pav. 1.6 Profesoriaus L. Kay suprojektuota aklojo „vedlio“ sistema [22]

Populiariausias naudojamas būdas kliūtims aptikti yra ultragarsas. L. Kay yra vienas iš pirmųjų mokslininkų, plačiausiai išanalizavusių tokią sistemą, vieni iš pirmųjų jo tyrimų rezultatų pristatyti 1962 metais [23]. Jo siūloma sistema, ultragarso UG aidui pasiekus jutiklį, į abu ausų kanalus išduodavo tą patį garsą, kurio intensyvumas priklausė nuo atstumo tarp jutiklio ir kliūties, kas apskaičiuojama pagal UG signalo išsiuntimo ir aido priėmimo laiko skirtumą.

Profesorius L. Kay [22] 1974 metais ultragarsinį jutiklį įtaisė akiniuose nuo saulės Pav. 1.6. Čia jis atskyrė kairės ir dešinės ausų kanalus, kad neregys pagal atskiruose kanaluose girdimų signalų amplitudžių skirtumus galėtų įvertinti apytikslę kliūties vietą horizontalėje.

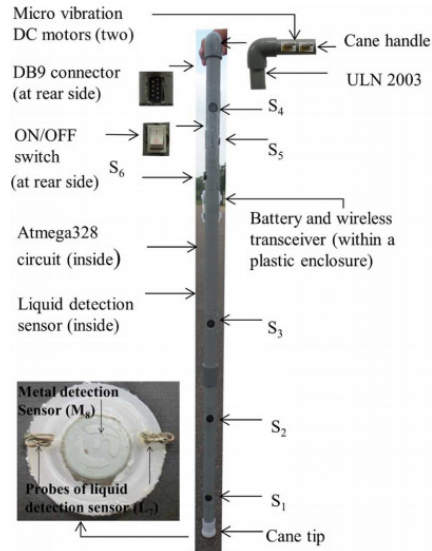
Primityvų, bet šiuolaikišką tokio tipo prietaisą šiandien galime rasti prekyboje Pav. 1.7 [24]. Šie akiniai apie atsiradusią kliūtį kelyje akląjį informuoja vibracija, o informaciją apie mažėjančią atstumą iki jos perteikia didėjančiu vibracijos intensyvumu. Šie akiniai ganėtinai primityvūs, tačiau brangūs, jų kaina šiandien siekia 120 €.



Pav. 1.7 Vibruojantys akiniai IGlasses™ [24]

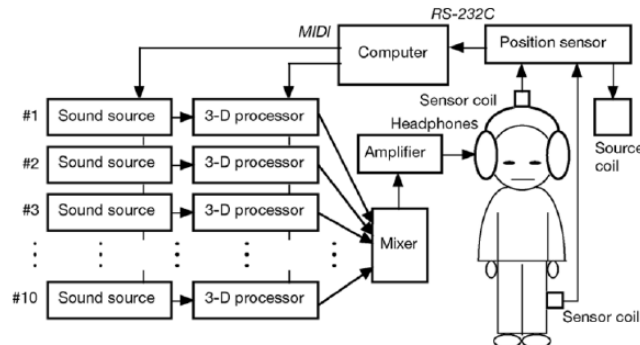
Paprastų, informuojančių tik apie atstumą iki kliūties vibracija arba garsu sistemų yra siūloma daug. Vienos jų suprojektuotos ant akinių, kaip aptarta prieš tai, kitos - ant neregio lazdelės, pvz. [25], [26]. [26] pateiktoje sistemoje yra skirtingose pusėse bei aukščiuose įtaisytos šešios ultragarsinių jutiklių poros. Čia vibruojantys elementai nurodo ne kliūties buvimo kryptį, o laisvo kelio kryptį Pav. 1.8.

[27] ultragarsinė sistema sumontuota ant šalmo. Ultragarsinis siųstuvas, įtaisytas priekyje, siunčia signalus kliūtims aptikti, UG imtuvai įtaisyti šalmo šonuose, dirbtinėse ausyse, sumodeliuotose pagal šikšnosparnio ausis. Priimtų signalų dažniai tiesiškai mažinami tam tikru koeficientu (20, 25), kad atitiktų žmogaus girdimus dažnius, o gauti naujų dažnių signalai yra leidžiami per stereo ausines tiriamajam [27].

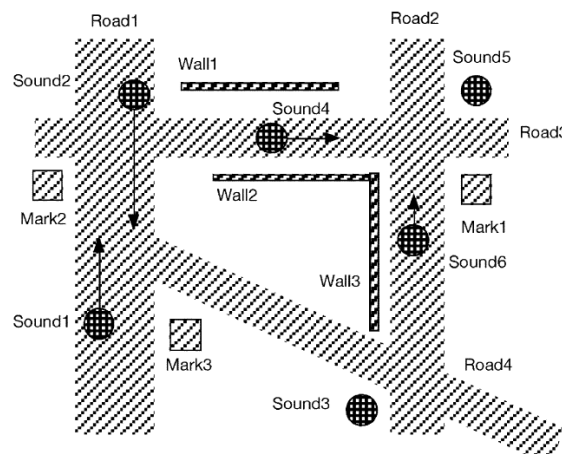


Pav. 1.8 [26] suprojektuota elektroninė neregio lazdelė, indikuojanti laisvo kelio kryptį

[28] atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad virtualūs garso šaltinio lokalizavimo mokymai yra efektyvesni nei mokymai atlikti realiomis sąlygomis. Čia suprojektuota virtuali mokymų erdvė, kurios bendroji schema pavaizduota Pav. 1.9. Tiriamajam per ausines yra leidžiami įvairūs aplinkos garsai: pro šalį važiuojančių automobilių, einančių pėsčiųjų, darinėjamų durų ir pan. (Pav. 1.9) [28].



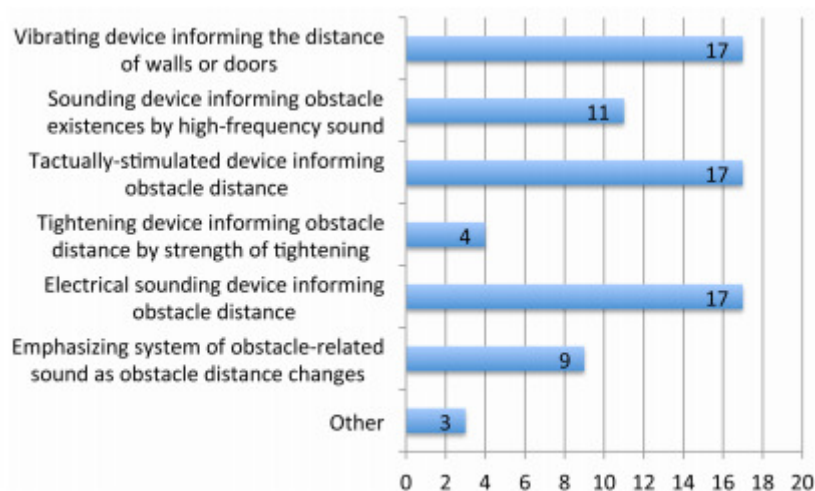
Pav. 1.9 [28] suprojektuotos virtualios apmokymų erdvės schema



Pav. 1.10 Erdviniu garso simuliuojamos virtualios erdvės planas [28]

Tyrimų metu stebima, kaip tiriamasis sugeba orientuotis virtualioje erdvėje, kuri apibūdinama akustiniais signalais. Simuliuojami garsai apibūdina virtualios erdvės aplinką, kurios plano pavyzdys pavaizduotas Pav. 1.10. Toks tyrimas yra kartojamas du kartus: pirmąkart prieš mokymus ir antrąkart - po mokymų pažinti ir teisingai vertinti erdvinius garsus. Tyrimai taip pat atlikti realioje erdvėje. Nustatyta, kad tiriamasis patiria mažiau streso ir pasiekia geresnių rezultatų greičiau, jei pirma yra mokomas virtualioje erdvėje [28].

[29] atlikta apklausa, kurioje dalyvavo 41 aklasis. Šios apklausos tikslas - išsiaiškinti, kiek aklieji remiasi aplinkos garsais orientuodamiesi erdvėje, kada renkasi lietimą ranka/ baltąja lazdele metodus, kada jiems yra sudėtingiausia pasikliauti aplinkos garsais ir ar yra linkę į technines inovacijas, kurios padeda orientuotis aplinkoje.



Pav. 1.11 Savarankišką judėjimą palengvinančių prietaisų poreikis [29]

Apklausos metu nustatyta, kad akliesiems sudėtingiausia orientuotis aplinkoje, remiantis klausa, kai lauke smarkiai lyja ar pučia stiprus vėjas. Lengviausia nustatyti garso šaltinio kryptį esant tylai. Visi 41 aklieji yra už techninę pagalbą. Kokį įrenginį rinkęsi, pateikta Pav. 1.11. Dvidešimt iš visų apklaustųjų pageidautų, kad perspėjimai apie kliūtis būtų signalizuojami žodžiais (atstumas, kurioje pusėje ir pan.), 14 - kad indikuotų skirtingais garso signalais, 13 - kad įrenginys ir vibruotų atitinkamais momentais [29].

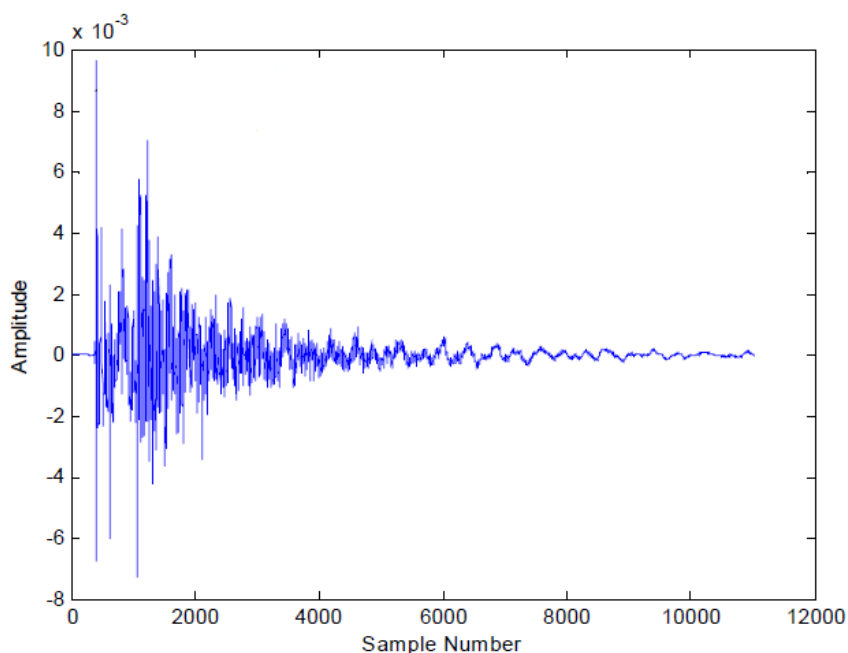
1.3 Galvos perdavimo funkcija ir impulsinė reakcija

Galvos perdavimo funkcija HRTF (dažnių srityje) - tai pokytis, atsiradęs signale, jam keliaujant nuo garso šaltinio iki ausies/ mikrofono.

[8] aprašoma, kaip žmogaus smegenys įvertina klausos sistemos perduotą signalo garso šaltinio kryptį. Šį procesą apibūdina „Precedento“ efektas, kuris teigia, kad nustatant garso šaltinio padėtį erdvėje smegenys vertina HRIR funkcijos pirmąjį amplitudės šuolį Pav. 1.12.

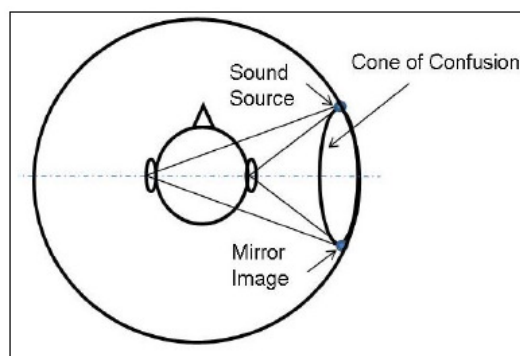
Kaip jau aptarta 1.1 skyriuje, nustatant garso šaltinio kryptį, yra svarbūs trys parametrai: interauralinis laikų skirtumas (ITD - interaural time difference), interauralinis intensyvumų

skirtumas (IID - interaural intensity difference) bei į abu ausų kanalus atkeliavusių bangų fazių skirtumas. Atitinkamo dydžio ITD reikšmė leidžia nustatyti, koku kampu garso šaltinis yra nutolęs nuo 0° horizontalėje. Esant tam tikriems garsinio signalo dažniams, šį kampą galima įvertinti ir pagal signalų fazių skirtumą. IID leidžia nustatyti atstumą iki garso šaltinio [8].



Pav. 1.12 Galvos impulsinės reakcijos funkcijos pavyzdys [8]

Šie trys parametrai ir jų kitimas dar neleidžia tiksliai nustatyti erdvinio garso šaltinio vietos erdvėje. 1920 metais Hornbostelis ir Vertheimeris mokslinėje ataskaitoje paaikškino „painiavos kūgio“ principą, kuris pavaizduotas Pav. 1.13 [30]. Šis principas teigia, kad garso šaltinio taškų su tokiomis pačiomis ITD ir IID reikšmėmis yra daug ir šie taškai sudaro kūgio formas nuo abiejų ausų. Žmogaus smegenys analizuoja abiejų kanalų priimtų bangų spektrus. Turint omenyje, kad vertinant ITD ir IID galime matyti tiesinę priklausomybę tarp jų reikšmių ir garso šaltinio vietos gylyje bei horizontalėje, tai bangų spektrą taip paprastai susieti su tam tikru tašku erdvėje yra sudėtinga, todėl mokslininkai į pagalbą pasitelkia HRTF (jas matuoja, modeliuoja, sintezuoja ar pritaiko). Galvos perdavimo funkcija apibūdina krypties priklausomybę nuo akustinio filtravimo, atsižvelgiant į galvos, kūno bei išorinės ausies formas [30].



Pav. 1.13 Hornbostelio ir Vertheimerio „painiavos kūgio“ principas [31]

HRTF matavimas, įrašymas gali būti atliekamas tyrimų metu žmogui [32], [33] arba manekenui [34], [35], [36]. Ši funkcija matuojama keičiant garso šaltinio kryptį tiriamojo atžvilgiu horizontalėje ir vertikalėje bei keičiant atstumą iki tiriamojo. Galvos perdavimo funkcija gali būti tapatinama su FIR ribotos impulsinės reakcijos filtru, kur ITD atspindi fazės kitimo spektras, o IID – filtro galia [37].

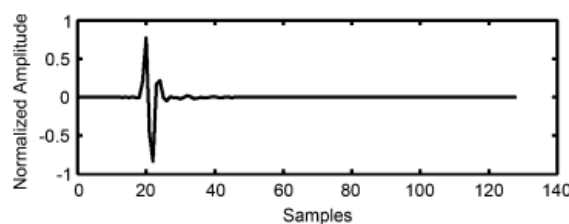
1.4 Galvos perdavimo funkcijų registravimo metodikos

Vienas dažniausiai naudojamų HRTF registravimo metodų yra toks: du mini mikrofonai patalpinami abiejų ausų kanaluose, nustačius tam tikrą garso šaltinio padėtį, leidžiamas žinomo spektro signalas garsiakalbiu, tuo pačiu metu įrašant akustinius signalus, atėjusius iki mikrofonų. Atliekant šiuos matavimus, gali būti generuojami įvairūs signalai: vienetinio šuolio, baltojo Gauso triukšmo [33], maksimalaus ilgio sekos (MLS – Maximal Length Sequences), kintančio dažnio [36] ir kiti. Vienetinio šuolio signalai gali sukelti netiesinius, nepageidaujamus garsiakalbio triukšmus. Baltojo Gauso triukšmo ir kintančio dažnio signalus būtinai reikia kartoti viename taške kelis kartus ir vėliau juos vidurkinti. Naudojant MLS signalus, kyla problemų nustatant komponentes žinant, kad šis signalas yra begalinis, tačiau gaunamas didesnis signalas triukšmas santykis SNR (Signal Noise Ratio) [37].

Turint omenyje, kad HRTF registravimas gali būti problematiškas ir užima daug laiko, šias funkcijas galima sintezuoti matematiškai [35]. [35] galvos perdavimo funkcija sintezuojama remiantis ribinių elementų metodu BEM. Naudojant šį metodą svarbiausia yra išgauti tikslų erdvinį tinklelio modelį, kurio pavyzdys pateiktas Pav. 1.14. Erdvinis galvos modelis išgaunamas skaneriu, o tinklelio modelis - pritaikant matematinius algoritmus [35].



Pav. 1.14 KEMAR manekeno galvos ir, matematiškai išgauto, jo tinklelio pavyzdys [35]



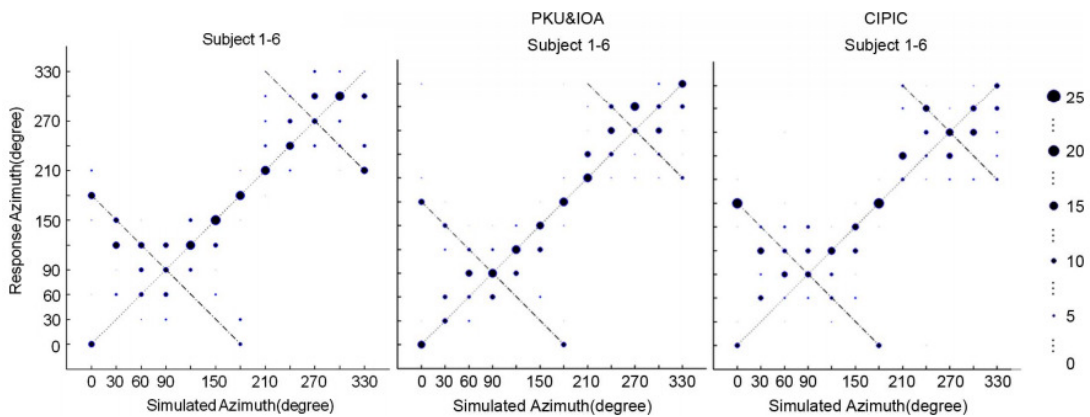
Pav. 1.15 Normalizuotas kibirkšties garso signalas [12]

[12] HRTF įrašinėjimui naudojamas KEMAR manekenas, o, siekiant išgauti generuojamą garsą, kuo artimesnį taškiniam garso šaltiniui, naudojama kibirkštis, kurios normalizuotos amplitudės signalas laike pavaizduotas Pav. 1.15 .

Reikalingą HRTF funkciją taip pat galima gauti iš atvirų duomenų bazių [12], [32], [36].

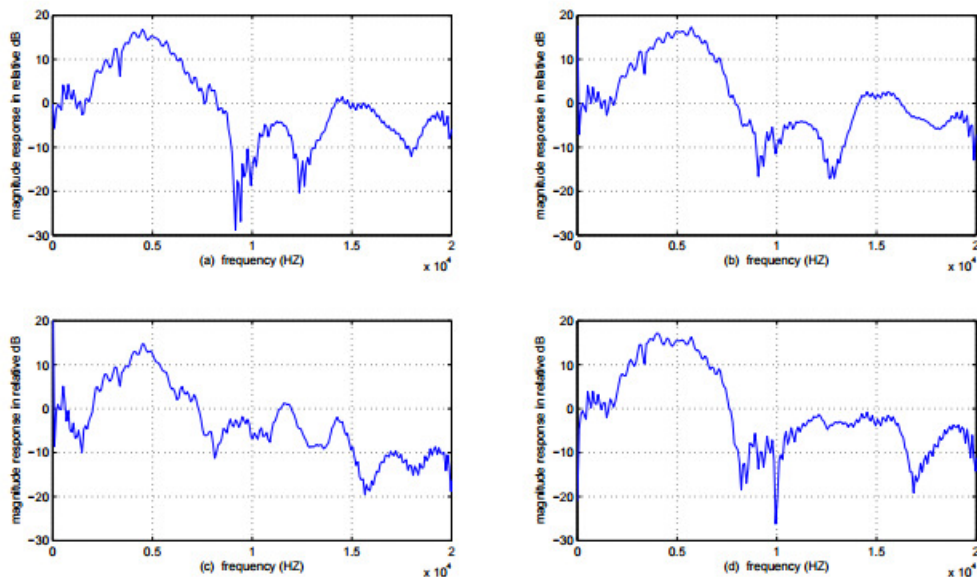
1.5 Literatūros apžvalgos apibendrinimas, tyrimo tikslas ir uždaviniai

[12] tyrimo metu šešiams tiriamiesiems buvo leidžiami HRTF registravimo metu gauti ir apdoroti signalai. Rezultatams palyginti, tyrimas kartojamas, naudojant iš dviejų skirtingų duomenų bazių (PKU&IOA bei CIPIC) gautus HRTF įrašus. Gauti rezultatai visais trimis atvejais, nustatant horizontalės kampą, pateikti Pav. 1.16 .



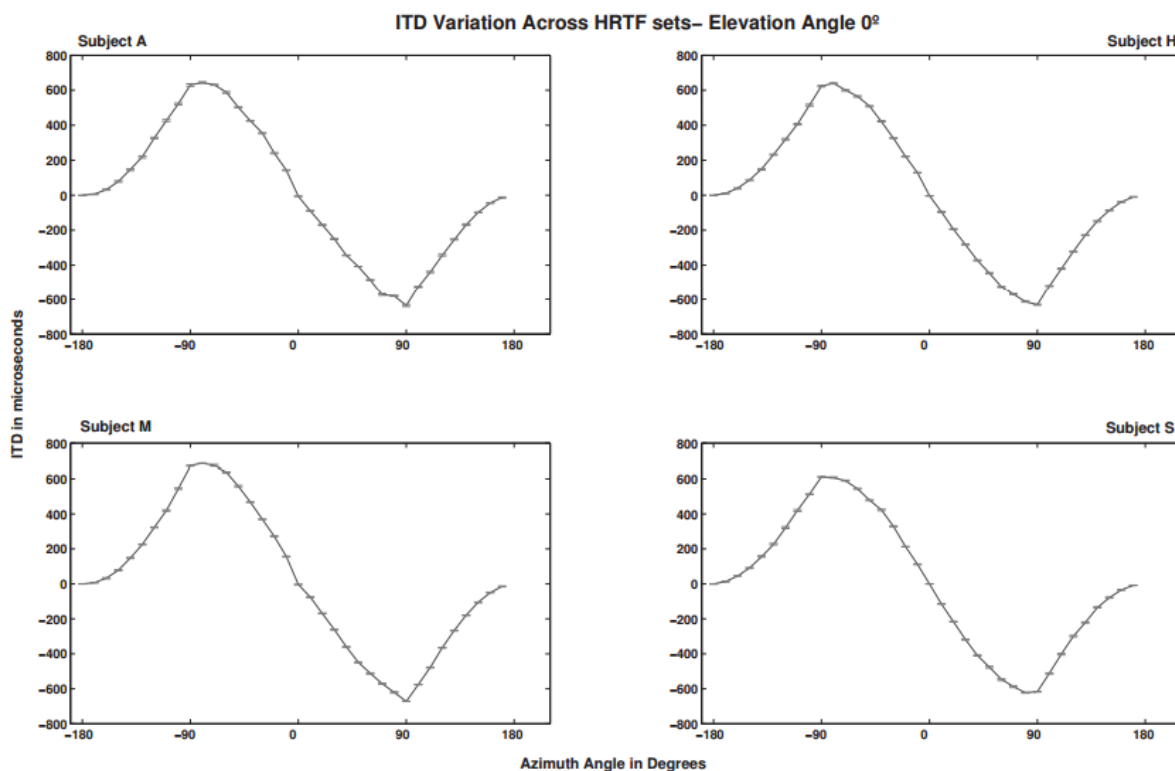
Pav. 1.16 [12] tyrimo metu gauti azimuto skiriamumo rezultatai, naudojant iš duomenų bazių gautas HRTF

[36] tyrimų metu gauti skirtingų KEMAR manekenu galvų įrašai. Skyrėsi manekenu galvų ir ausų formos. Pav. 1.17 pateiktas pavyzdys, kaip skiriasi užregistruotos HRTF funkcijos 0° horizontalėje, 0° vertikalėje vieno metro atstumu (a) kairei mažai ausiai, (b) dešinei mažai ausiai, (c) kairiai didesnei ausiai ir (d) dešinei didesnei ausiai.



Pav. 1.17 [36] tyrimų metu gautų dviejų skirtingų dydžių manekenu galvų HRTF

[32] gautos keturių tiriamųjų asmenų HRTF funkcijos. Pav. 1.18 pateikta, kaip keičiasi ITD reikšmės, esant 0° vertikalei, o horizontalės kampą keičiant nuo -180° iki 180° .



Pav. 1.18 [32] tyrimų metu gautų keturių tiriamųjų apskaičiuoti ITD rezultatų kitimai, kintant horizontalės kampui

[37] sukonstruotas specialus HRTF registravimo mechanizmas, leidžiantis gauti įrašus 1° tikslumu horizontalėje, 9° tikslumu vertikaloje, 1 m atstumu. Tyrimo metu gauti keturių sveikų ir keturių aklųjų savanorių galvos perdavimo funkcijų įrašai ir atlikti krypties azimute ir elevacijoje skiriamumo tyrimai. Šiame tyrime gauti vidutinių paklaidų rezultatai pateikti Pav. 1.18, kur matome, kad, naudojant plačiajuosčius garso signalus, gaunamos mažesnės paklaidos, nei naudojant vieno dažnio signalus.

Source type	Average localization error [deg]			
	Sighted volunteers		Blind volunteers	
	Azimuth	Elevation	Azimuth	Elevation
Static – vowel	8.08	15.35	14.42	22.97
Static – wideband	6.74	10.22	12.79	16.75
Moving	6.36	9.47	8.9	16.04

Pav. 1.19 [33] tyrimo metu gauti vertikalės ir horizontalės skiriamumo rezultatai. Naudojant skirtingus indikacinius signalus

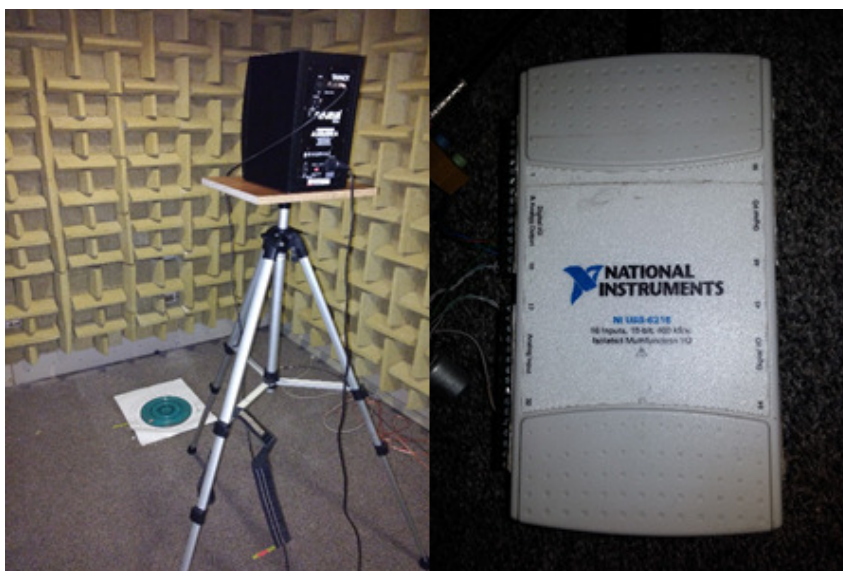
Šiame skyriuje pateikti tyrimų rezultatai įrodo, kad rezultatų tikslumui įtakos turi naudojamos galvos perdavimo funkcijos pasirinkimas. Tiksliausi ir patikimiausi rezultatai gaunami, registruojant kiekvieno tiriamojo individualias galvos perdavimo funkcijas, o tikslesni garso skiriamumo rezultatai gaunami indikacijai naudojant plačiajuosčius signalus [33].

2 INDIVIDUALIŲ GALVOS PERDAVIMO FUNKCIJŲ REGISTRAVIMAS

Šis tiriamasis darbas sudarytas iš dviejų etapų: pirmame etape yra registruojamos kiekvieno tiriamojo individualios galvos perdavimo funkcijos HRTF, jos apdorojamos - išgaunamos atitinkamos galvos impulsinės reakcijos HRIR, kuriomis remiantis, yra sintezuojami indikaciniai akustiniai signalai; antrame etape yra vykdomas tiriamųjų indikacinių akustinių signalų - erdvinio garso skiriamumo tyrimas.

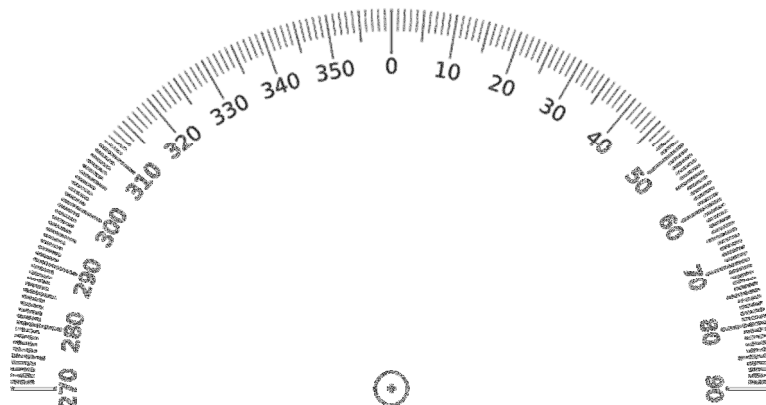
2.1 Individualių galvos perdavimo funkcijų registravimo metodika

Individualių galvos perdavimo funkcijų registravimas buvo vykdomas specialiame akustiškai izoliuotame kambaryje, kurio išmatavimai yra 5,2 x 2,2 x 2,1 m Pav. 2.1.



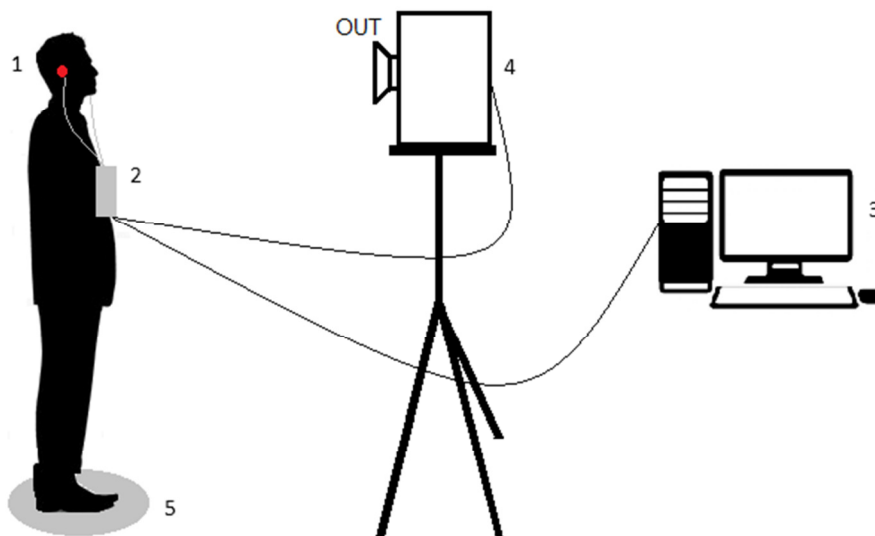
Pav. 2.1 Akustinis kambarys, kuriame buvo registruojamos HRTF funkcijos (kairėje) ir naudotas 16-bit „National Instruments“ diskretizatorius (dešinėje)

HRTF registravimui buvo naudojama (Pav. 2.3): 1- mini elektretiniai mikrofonai 4 x 1.5 mm; 2- „National Instruments“ 16-bit diskretizatorius (Pav. 2.1); 3- kompiuteris; 4- aktyvinis garsiakalbis (dažnių juosta 64 Hz – 30 kHz, SPL – 108 dB); 5- sportinis sukamasis diskas.



Pav. 2.2 HRTF registravimo tikslumui užtikrinti naudotos laipsnių horizontalėje nuorodos

Siekiant maksimalaus tikslumo, prie sportinio sukamojo disko apačios buvo pritvirtintas lapas su pažymėtais laipsniais Pav. 2.2, prie disko viršutinės dalies - rodyklė, pagal kurią buvo reguliuojama stovėjimo kryptis. Į kairę ir dešinę ausis buvo patalpinti pažymėti mini elektretiniai mikrofonai, kurie buvo įtaisyti otoakustinei emisijai matuoti skirtuose ausų kamščeliuose, uždarant ausies kanalo angą. Mikrofonai įjungti į „National Instruments“ diskretizatoriaus analoginį įėjimą. Pats diskretizatorius elastiniu diržu buvo pritvirtintas prie tiriamojo juosmens. Prie diskretizatoriaus analoginio išėjimo buvo prijungtas aktyvinis garsiakalbis, o pats diskretizatorius per USB sąsają prijungtas prie personalinio kompiuterio. Ši tyrimo vykdymo schema pateikta Pav. 2.3.



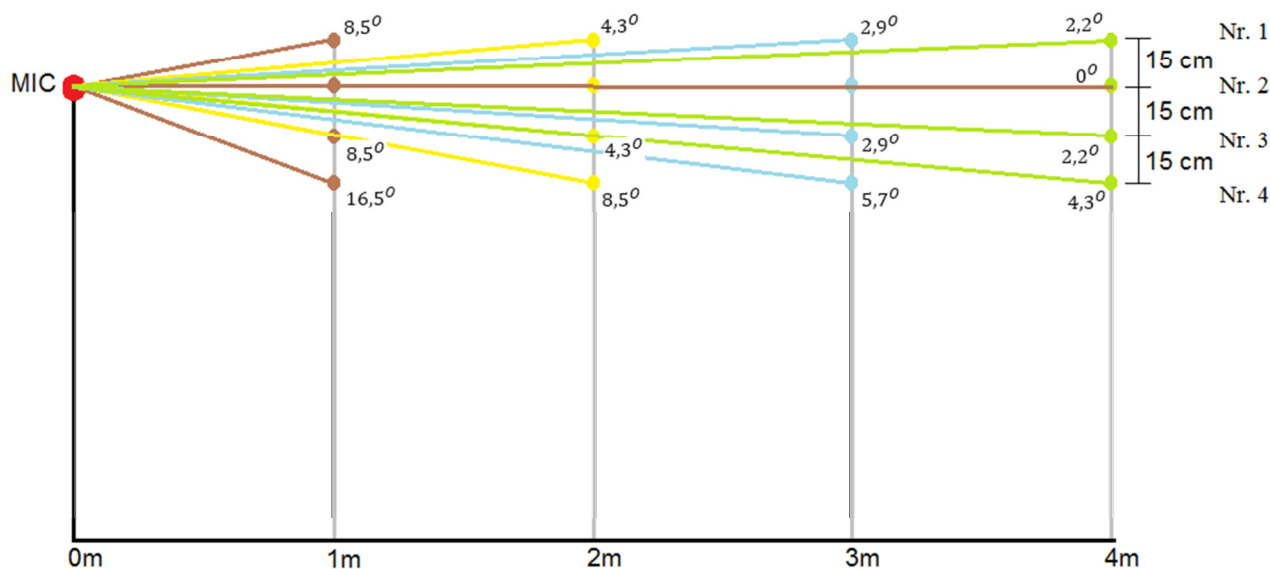
Pav. 2.3 Tiriamųjų HRTF funkcijų registravimo schema

Garsinis signalas HRTF registravimui buvo generuojamas LabVIEW programa. Buvo naudojamas akustinis signalas nuo 100 iki 4000 Hz dažnio diapazono ir 0,19 s trukmės leidžiamas per aktyvinį garsiakalbį. Atsižvelgiant, kad garsas yra vėlinamas atitinkamai nueitam keliui nuo garsiakalbio iki mikrofonų, įrašymas buvo vykdomas lygiagrečiai leidžiamam garsiniam signalui, bet truko 0,215 s.

Tiriamasis pastatomas ant sportinio sukamojo disko, kampas horizontalėje keičiamas kas 15° , nuo 270° iki 90° Pav. 2.2. Daromi įrašai keturiems garsiakalbio aukščiams: ausų lygyje, 15 cm į viršų nuo ausų lygio, 15 cm į apačią nuo ausų lygio ir 30 cm į apačią nuo ausų lygio. Keičiamas atstumas tarp tiriamojo ir aktyvinio garsiakalbio kas metras: 1 m, 2 m, 3 m, 4 m. Aktyvinio garsiakalbio visų įrašų metu ir tiriamojo padėtys yra pateiktos Pav. 2.4.

Vieno metro atstumu nuo tiriamojo gaunami vertikalės - elevacijos kampai: 15 cm virš ausų lygio $8,5^\circ$ (taškas Nr. 1), ausų lygyje 0° (taškas Nr. 2), 15 cm į apačią nuo ausų lygio $-8,5^\circ$ (taškas Nr. 3), 30 cm į apačią nuo ausų lygio $-16,5^\circ$ (taškas Nr. 4). Atitinkamai 2 m atstumu $0^\circ, 4,3^\circ, -4,3^\circ, -8,5^\circ$; 3 m atstumu $0^\circ, 2,9^\circ, -2,9^\circ, -5,7^\circ$; 4 m atstumu $0^\circ, 2,2^\circ, -2,2^\circ, -4,3^\circ$.

Šio tyrimo etapo metu gauti šešių tiriamųjų HRTF įrašai. Visi tiriamieji buvo sveiki - klausos ir regos sutrikimų neturėjo. Matavimai atlikti keturiems vyrams nuo 27 iki 33 metų ir dviem merginoms 24 ir 27 metų. Garsiniai signalai kiekviename registravimo taške kartojami keturis kartus siekiant tikslumo. Vienam tiriamajam iš viso gauti 832 įrašai kairei ir dešinei ausims. Šie įrašai išsaugoti tekstiniu formatu .txt plėtinį turinčiame faile, grupuojant pirmiausia pagal įrašų gavimo atstumą, toliau - pagal įrašų gavimo vertikalųjį kampą. Viename tekstiniame faile saugomi dviejų kanalų – abiejų ausų mikrofonų užregistruoti signalai, taip pat ir generuojamas signalas.



Pav. 2.4 Tyrimo metu nustatytos garsiakalbio ir tiriamojo padėties erdvėje

2.2 Individualių galvos perdavimo funkcijų įrašų apdorojimas

Gauti įrašai apdorojami MatLab aplinkoje. Šia programa tekstinis .txt plėtinio failas išsaugojamas .m plėtinį turinčiame faile.

Siekiant maksimalaus tikslumo ir atsižvelgiant į akustinio kambario neidealumą, HRTF įrašų registravimas kiekviename tyrimo taške buvo kartojamas keturis kartus. Apdorojant gautus įrašus, šie keturi užregistruoti signalai MatLab aplinkoje suvidurkinami, pašalinant galimus triukšmus, algoritmu:

$$A[n] = \frac{A1[n]+A2[n]+A3[n]+A4[n]}{4}, \quad (2.1)$$

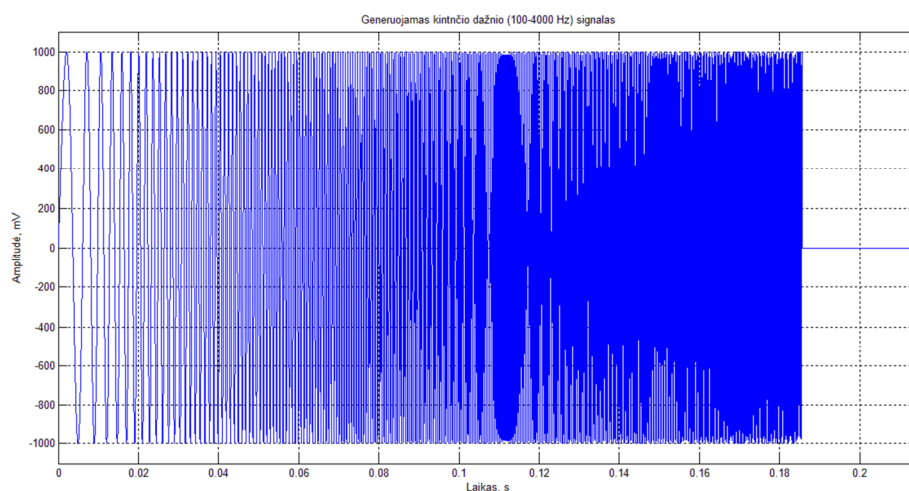
Čia n - atskaitos numeris; A – vidurkio signalas; $A1, A2, A3, A4$ – tyrimo metu gauti įrašai.

Siekiant sumažinti triukšmą signaluose, jie buvo filtruojami aukštų ir žemų dažnių ketvirtos eilės Butterworth filtrais, kur AD filtro dažnis 20 Hz, ŽD filtro dažnis 4000 Hz. Siekiant išvengti momentinių šuolių ir sunormalizuoti signalą y ašyje, po filtravimo pirmosios dešimt signalų atskaitų buvo prilygintos nuliams, kas įtakos tolimesniems tyrimams neturėjo.

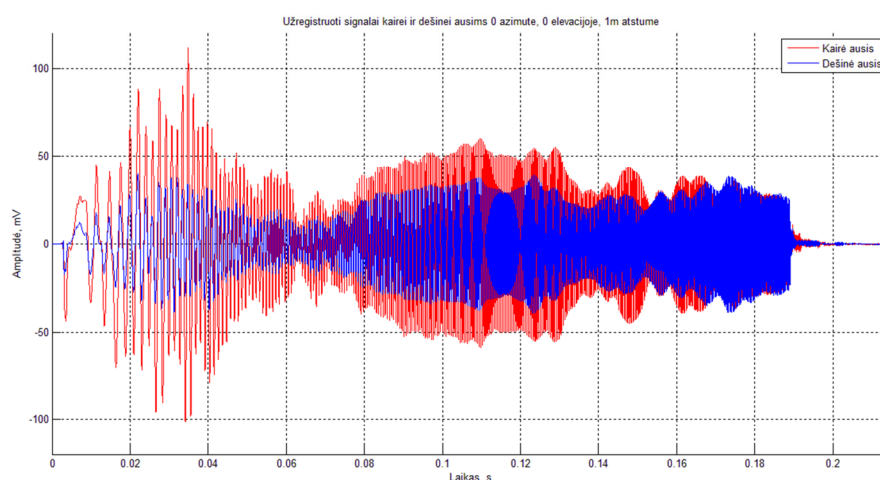
Nufiltravus abiejų kanalų ir generuotą signalus AD ir ŽD filtrais, signalai perkeliama iš laiko į dažnių sritį greitąja Furjė transformacija. Toliau atskirai skaičiuojami kanalų ir generuoto signalų spektrų santykiai, kur gauname pokytį, atsiradusį signalui keliaujant nuo garsiakalbio iki ausų kanalų, kas yra galvos perdavimo funkcija HRTF dažnių srityje. Šie apskaičiuoti pokyčiai perkeliama atgal iš dažnių į laiko sritį atvirkštine Furjė transformacija. Gauti signalai laiko srityje - tai galvos impulsinės reakcijos - HRIR.

2.3 Rezultatų įvertinimas ir išvados

HRTF įrašams gauti akustiniame kambaryje generuotas signalas pateiktas Pav. 2.5, vieno iš tiriamųjų 0° azimute, 0° elevacijoje, 1 m atstumu gauti kairės ir dešinės ausų signalų įrašų pavyzdžiai pateikti Pav. 2.6.



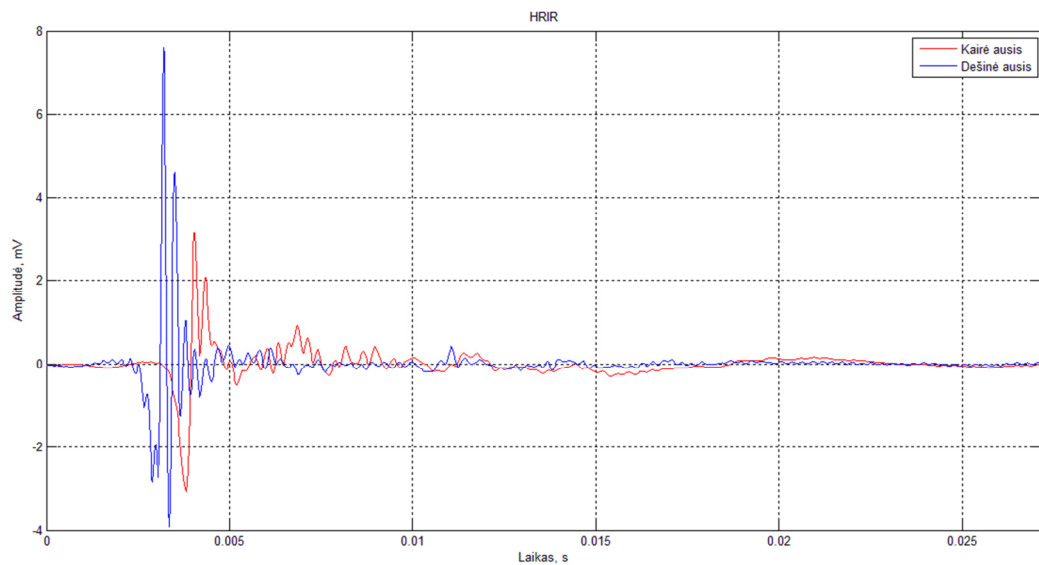
Pav. 2.5 LabView programa sumodeliuotas kintančio dažnio (nuo 100 iki 4000 Hz) signalas



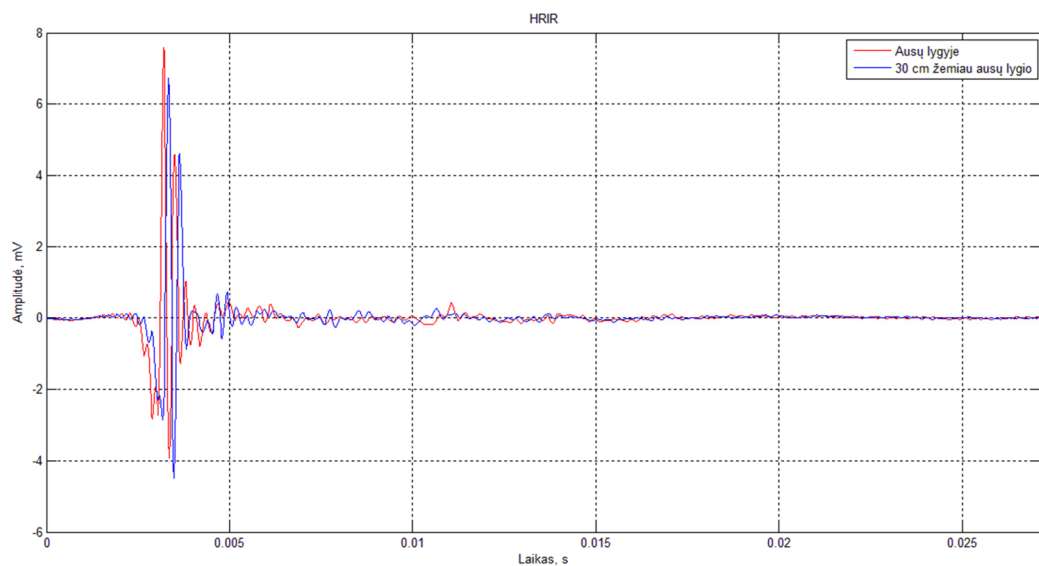
Pav. 2.6 Abiejose ausyse esančiais mikrofonais užregistruoti signalai, kai garso šaltinis yra 0° horizontalėje ir 0° vertikalėje

Teoriškai kairės ir dešinės ausų mikrofonų užregistruoti signalai 0° azimute ir 0° elevacijoje turėtų visiškai sutapti, tačiau praktiškai gaunamas neatitikimas (Pav. 2.6). Taip gali atsitikti dėl nepreciziškai atliktų matavimų, galvos, veido formų ne simetriškumo. Dėl tos pačios priežasties impulsinėse reakcijose atsiranda vėlinimas - laiko momentai, kada signalas pasiekia abu kanalus, nesutampa. Visų tiriamųjų kairės ir dešinės ausų signalai šiame erdvės taške yra nevienodi.

Pav. 2.7 pateikta vieno iš tiriamųjų galvos impulsinė reakcija, kai garso šaltinio padėtis erdvėje yra 90° horizontalėje ausų lygyje vieno metro atstumu. Čia puikiai matome, kad akustinis signalas į kairę ausį atkeliauja vėluodamas, jo amplitudė yra mažesnė.



Pav. 2.7 Vieno iš tiriamųjų galvos impulsinė reakcija, kai garso šaltinis yra 90° horizontalėje, ausų lygyje, vieno metro atstumu



Pav. 2.8 Vieno iš tiriamųjų dešinės ausies galvos impulsinės reakcijos, kai garso šaltinis yra 45° horizontalėje, vieno metro atstumu, ausų lygyje ir 30 cm žemiau ausų lygio

Pav. 2.8 pateiktos vieno iš tiriamųjų dešinės ausies galvos impulsinės reakcijos, kai garso šaltinio padėtis erdvėje yra 45° horizontalėje, vieno metro atstumu, ausų lygyje ir 30 cm žemiau ausų lygio. Akivaizdu, kad, kai garso šaltinis yra žemiau, impulsinės reakcijos amplitudė yra mažesnė, taip pat signalas yra šiek tiek vėlinamas. Taip nutinka dėl signalo kelio reljefo pasikeitimo - ausies, torso formos.

[38] tyrime nustatyta, kad mažiausias kampo pokytis horizontalėje, kurį fiksuoja žmogaus klausos sistema, yra 5°. Siekiant įvertinti gautų įrašų kokybę ir nuspręsti, ar įrašai gali būti naudojami tolimesniems tyrimams, nustatomas gaunamas laiko skirtumas $t_{vėlinimas}$ tarp momentų, kada signalas pasiekia kairę ir dešinę ausis, garsui keliaujant iš 0° horizontalės, 0° vertikalės. Šis atsirandantis laiko skirtumas nusako susidarantį kampo poslinkį $\alpha_{poslinkis}$. Apskaičiuojamas visų tiriamųjų įrašuose gaunamas kampo poslinkis pagal (2.2) formulę [8]. Jei šis kampas bus didesnis nei 5°, naudojant tokius HRIR įrašus indikaciniams signalams modeliuoti, erdvinio skiriamumo rezultatai būtų iškraipyti ir nepatikimi. Jei poslinkio kampas mažesnis - tiriamasis klaidinamas nebus ir tokias impulsines reakcijas mes galėsime naudoti tolimesniame darbe.

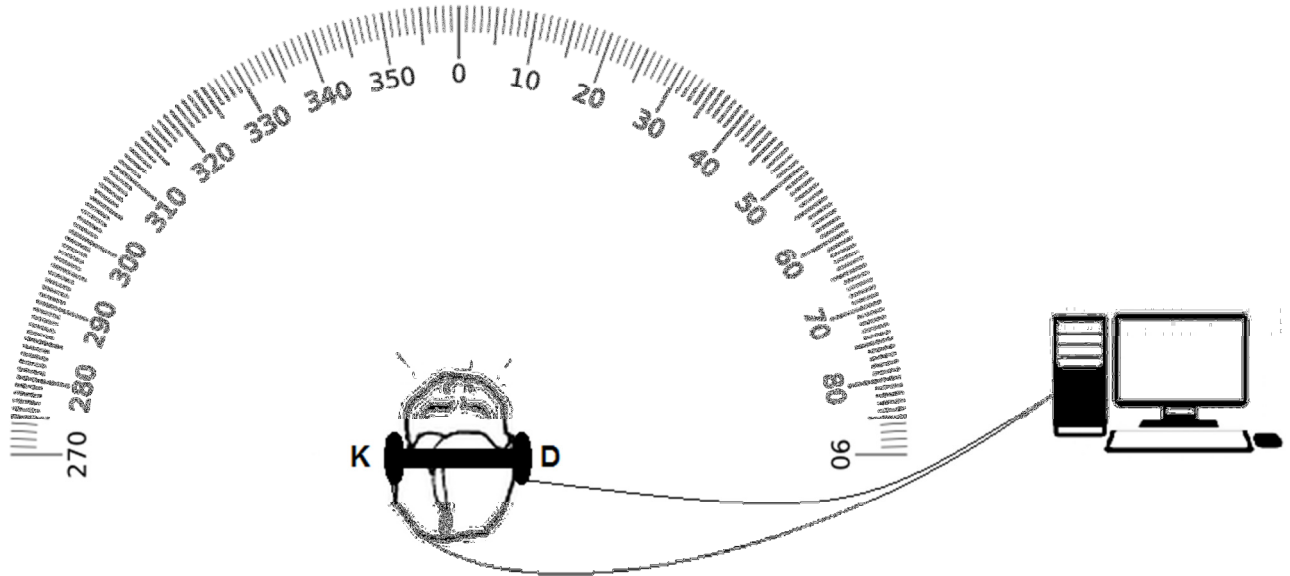
$$t_{vėlinimas} = \frac{A \cdot \sin(\alpha_{poslinkis})}{v}, \quad (2.2)$$

Kur A yra atstumas tarp ausų ~0,15 m; v yra garso greitis ore (343,5 m/s).

Maksimalus gautas vėlinimas turimose impulsinėse reakcijose, kai garso signalas skleidžiamas iš erdvės taško 0° horizontalėje ir 0° vertikalėje, yra 2,93 μ s. Tada maksimalus gaunamas poslinkio kampas yra 0,36°, kas neviršija leistino 5° kampo, todėl tariame, kad pirmoje tyrimų dalyje gautos HRTF funkcijos yra kokybiškos ir bus naudojamos tolimesniuose tyrimuose.

3 TRIMAČIO ERDVINIO GARSO SKIRIAMUMO TYRIMAS

Remiantis [11] darbo išvadomis, kad geresni - tikslesni rezultatai gaunami naudojant personalizuotus HRTF įrašus, buvo naudojami tik 2 skyriuje aprašyti akustiniame kambaryje gauti tiriamųjų galvos perdavimo funkcijų įrašai. Tyrimams naudota įranga (Pav. 3.1): personalinis kompiuteris, MatLab programavimo aplinka, stereo ausinės (Audio-technica ATH-M40fs, 5 Hz – 28 kHz dažnių juosta, SPL 100 dB).



Pav. 3.1 Erdvinio garso skiriamumo testavimo schema

3.1 Erdvinio garso skiriamumo tyrimo metodika

Erdvinio garso skiriamumo tyrimui, remiantis [11] išvadomis, buvo naudojamas dviejų tonų, 800 Hz ir 1000 Hz dažnių signalas. Tyrime dalyvavo penkti tiriamieji: keturi vyrai nuo 27 iki 33 metų ir viena 24 metų mergina, visi sveiki - klausos ir regos sutrikimų neturėjo.

Tyrimams atlikti buvo parašyti programų kodai MatLab aplinkoje. Sumodeliuoti du atskiri sinusiniai 800Hz ir 1000Hz, tokio pat ilgio kaip ir HRIR funkcijos, audio signalai. Toliau vykdyta šių signalų konvoliucija su visomis gautomis impulsinėmis reakcijomis. Taip pat, siekiant išvengti nepageidaujamo spektro komponentių atsiradimo naujame signale, naudojama Gauso gaubtinės lango funkcija. Tada galutinis akustinis testavimo signalas $y[n]$ yra toks:

$$y[n] = w[n] \cdot a[n] * I[n], \quad (3.1)$$

Kur n - atskaitos numeris, $a[n]$ - sumodeliuotas audio signalas, $I[n]$ - impulsinės reakcijos funkcija, $w[n]$ – lango funkcija.

Prieš pradėdant testavimą tiriamiesiems buvo duoti išklausti parengimo - mokymo signalai:

- 1) garso šaltinis vieno metro atstumu, 0° elevacijoje- vertikalėje, 270° , 285° , 300° , 315° , 330° , 345° , 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 90° azimute- horizontalėje;
- 2) garso šaltinis 0° vertikalėje, 0° horizontalėje, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m atstumais;

- 3) garso šaltinis ausų lygyje, pakeltas 15 cm virš ausų lygio, nuleistas 15 cm ir 30cm žemiau ausų lygio, 0° horizontalėje, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m atstumais.

Parengimo - mokymo signalai buvo kartojami po 3-4 kartus pagal poreikį.

Testavimo signalai buvo leidžiami ne eilės tvarka, bet suskirstyti į keturias grupes:

- 1) garso šaltinis ausų lygyje, pakeltas 15 cm virš ausų lygio, nuleistas 15 cm ir 30 cm žemiau ausų lygio, 1 metro atstumu, nuo 270° iki 90°, kas 15°, horizontalėje (52 garso šaltinio padėties taškai erdvėje);
- 2) garso šaltinis 0° horizontalėje, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m atstumais ausų lygyje, pakeltas 15 cm virš ausų lygio, nuleistas 15 cm ir 30 cm žemiau ausų lygio (16 garso šaltinio padėties taškų erdvėje);
- 3) garso šaltinis 0° vertikalėje, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m atstumais, nuo 270° iki 90°, kas 15°, horizontalėje (52 garso šaltinio padėties taškai erdvėje);
- 4) garso šaltinis ausų lygyje, pakeltas 15 cm virš ausų lygio, nuleistas 15 cm ir 30 cm žemiau ausų lygio, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m atstumais, nuo 270° iki 90°, kas 15°, horizontalėje (208 garso šaltinio padėties taškai erdvėje).

Akustiniai signalai tiriamiesiems buvo leidžiami per ausines po vieną, kiekvieną kartojant po tris kartus, esant poreikiui - signalas dar kartą kartotas tris kartus. Prieš kiekvieną testavimo etapą buvo kartojami parengimo - mokymo signalai. Rezultatai buvo registruojami Excel aplinkoje, taip pat buvo registruojami tiriamųjų atsiliepimai bei komentarai apie testavimus, jų eigą.

3.2 Rezultatų įvertinimas ir išvados

Šiame tyrime ištirti penki sveiki - regėjimo ir klausos sutrikimų neturintys asmenys. Čia testavimui buvo naudojamas dviejų tonų signalas. Testavimo metu tiriamieji turėjo nustatyti horizontalės kampą laipsniais, gylį metrais, o vertikalės vietą erdvėje, siekiant supaprastinti apibūdinimą, taškais, kur pirmas taškas - garso šaltinis 15 cm virš ausų lygio, antras taškas - ausų lygyje, trečias - 15 cm žemiau ausų lygio ir ketvirtas - 30 cm žemiau ausų lygio. Kadangi šio darbo tikslas ištirti erdvinio garso skiriamumą, tai pirma bus aptarti ketvirtos testavimo dalies rezultatai, kur kinta visi trys garso šaltinio vietos erdvėje parametrai.

Atlikus erdvinio garso skiriamumo tyrimų mokymus, dalyvavę asmenys pastebėjo, kad užsimerkus yra lengviau įsivaizduoti ir nustatyti garso šaltinio vietą erdvėje, kas leidžia teigti, kad žmogaus pojūčiai adaptuojasi pagal esamą situaciją ir padeda žmogui susirinkti daugiau informacijos kitais pojūčiais, nei suteikia rega. Tyrimo eigoje pastebėta, kad tiriamųjų priimti garso šaltinio vietos nustatymo sprendimai priklauso nuo tiriamojo sėdėjimo pozos, pavyzdžiui: jei yra simuliuojamas garsas 0° horizontalėje ir 0° vertikalėje, o tiriamasis sėdi susmukęs, nuleidęs galvą - jam atrodo, kad garso šaltinis yra aukščiau ausų lygio.

Erdvinio garso skiriamumo tyrimo metu tiriamieji pastebėjo, kad kartojant tą patį garso signalą daugiau kartų, nei nustatyta tyrimo metodikos 3.1 skyriuje – maksimaliai du kartus po tris signalus, susidaro įspūdis, kad garso šaltinis artėja. Taip pat pastebėta, kad vieta erdvėje tiksliau nustatoma, jei žmogus daugiau pasikliauja nuojauta - pirminiu įspūdžiu, per ilgai negalvodamas. Tyrimų metu visiems tiramiesiems nežinant buvo kelis kartus kartojami tie patys signalai kaip skirtingi. Tik vienas iš penkių žmonių pastebėjo šią manipuliaciją, kiti šių akustinių signalų vietas erdvėje apibūdino skirtingai. Taip gali būti dėl to, kad tiriamieji per daug susikoncentruoja į galimą garso signalų pozicijos kaitą.

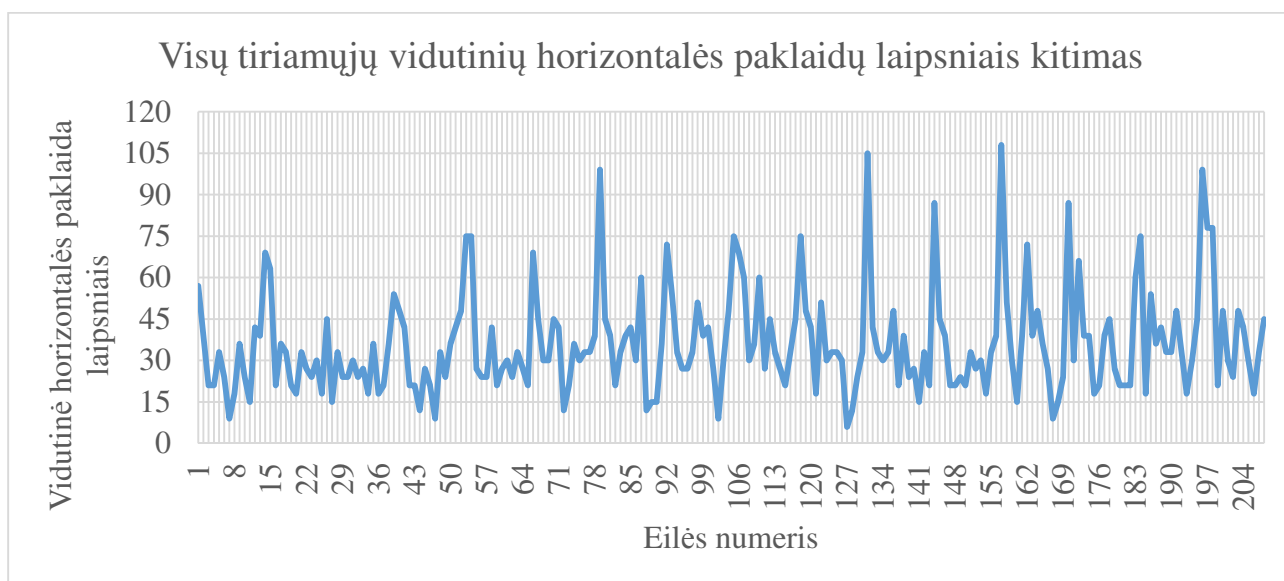
Jei testavimo metu vienas po kito seka signalai, kurių, pavyzdžiui, atstumas, pasikeičia per vieną poziciją į didesnę/ mažesnę pusę, tada dažnai tiriamasis norėdavo pataisyti prieš tai nustatytą garso šaltinio vietą erdvėje. Pastebėta, kad tyrimo eigoje reakcijos - sprendimo priėmimo laikas trumpėja ir tiriamasis greičiausiai nustato atstumą. Tai rodo, kad mokymai yra būtini ir praktikos laikas yra proporcingas pasiektiems rezultatams - garso šaltinio pozicijos erdvėje nustatymo tikslumui.

Kadangi antroji tyrimų dalis tiramiesiems atlikta jų namų ar darbinėje aplinkoje, buvo pastebėta, kad yra itin sunku nustatyti garso šaltinio vietą triukšmingoje aplinkoje, kai girdimas gatvės triukšmas, netoliese kalba žmonės ir pan. Tai taip pat nustatė ir [29]. Projektuojant sistemą, kur aptikta kliūtis indikuojama tik erdvinio garsu, šis aspektas būtų neigiamas ir akliems itin nepatogus, nes neregiui svarbu girdėti ir aplinkos garsus, o triukšme yra sunku susikaupti, greitai pavargstama.

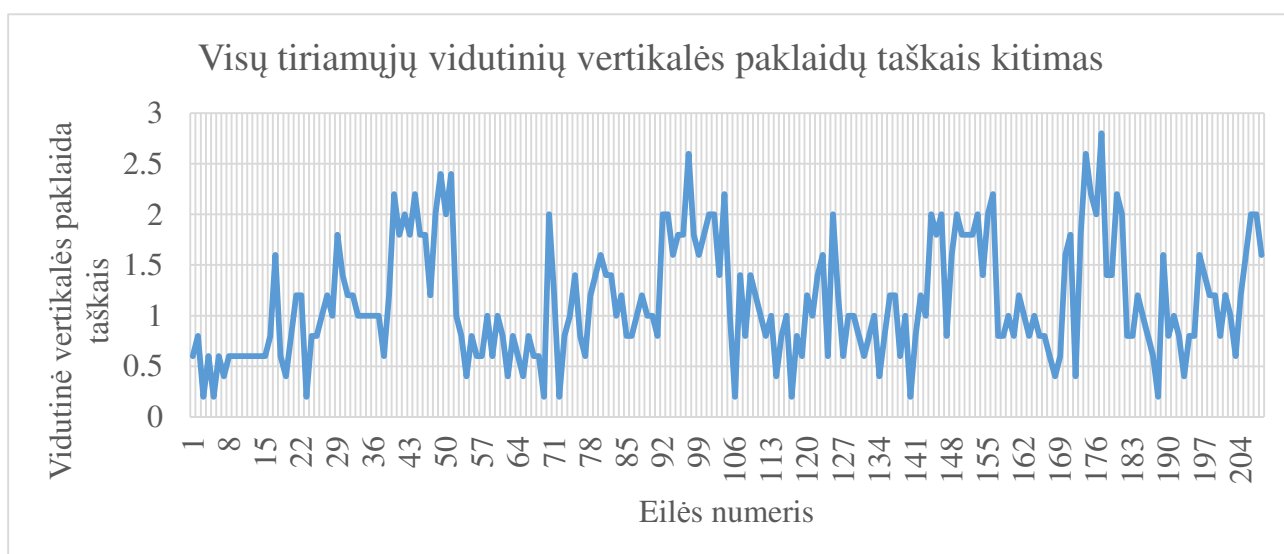
Antros dalies testavimas truko nuo 2,5 val. iki 3 val. Įpusėjęs šią tyrimų dalį keturi tiriamieji iš penkių skundėsi nuovargiu, kad tampa vis sunkiau nustatyti garso padėtį. Laikas, kada nuovargis tapdavo pastebimas, taip pat priklauso nuo dienos meto, kada atliekami tyrimai: jei testavimas vykdomas tiriamajam po darbo – vakare, jis pavargdavo greičiau.

Garsiniai signalai tiramiesiems buvo leidžiami atsitiktinai. Tikrųjų reikšmių ir visų tiriamųjų nustatytų skirtumų - paklaidų vidurkių kitimas, atliekant tyrimų ketvirtąjį testavimą, pateiktas (Priedas 1): Pav. 3.2 - paklaidų horizontalėje laipsniais kitimas; Pav. 3.3 – paklaidų vertikalėje taškais kitimas; Pav. 3.4 – gylio paklaidų metrais kitimas. Čia nulis reiškia, kad nustatytas parametras yra lygus tikrajam, o y ašies reikšmės rodo, kokio dydžio gauta paklaida nustatant garso šaltinio vietą erdvėje.

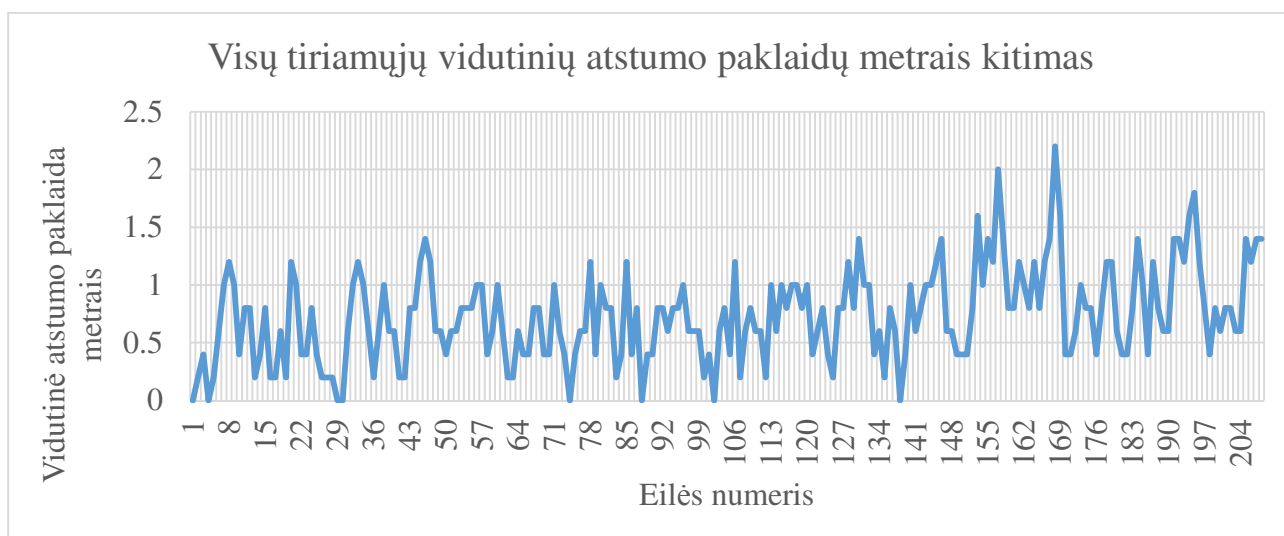
Čia matome, kad ketvirtos dalies testavimo pirmajame penktadalyje tiriamieji darė mažesnes klaidas nei tolimesniame tyrime. Kadangi tyrimai atlikti eilės tvarka, kaip aprašyta 3.1 skyriuje, o pirmų trijų dalių testavimas, palyginus su ketvirtąja, truko du kartus trumpiau, ketvirtąjį testavimo dalį tiriamieji jau buvo pripratę prie sintezuojamų akustinių signalų, dėl to klaidos buvo mažesnės, tačiau netrukus pajuto nuovargį, dėl kurio paklaidų reikšmės išaugo.



Pav. 3.2 Visų tiriamųjų horizontalės paklaidų vidurkių laipsniais kitimas laike testavimo metu

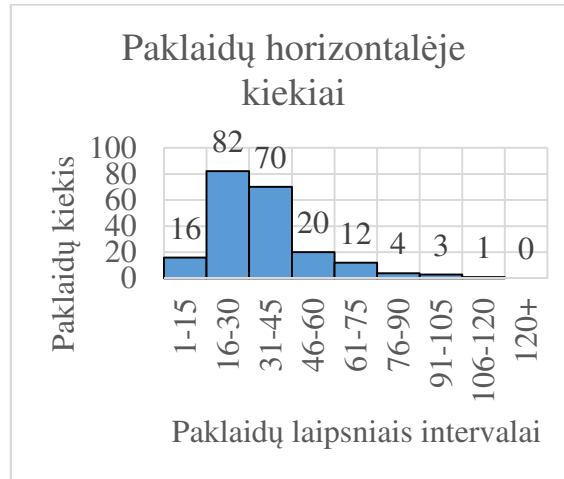


Pav. 3.3 Visų tiriamųjų vertikalės paklaidų vidurkių taškais kitimas laike testavimo metu

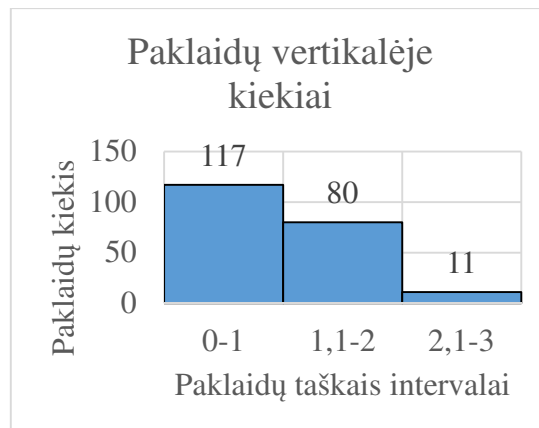


Pav. 3.4 Visų tiriamųjų gylio paklaidų vidurkių metrais kitimas laike testavimo metu

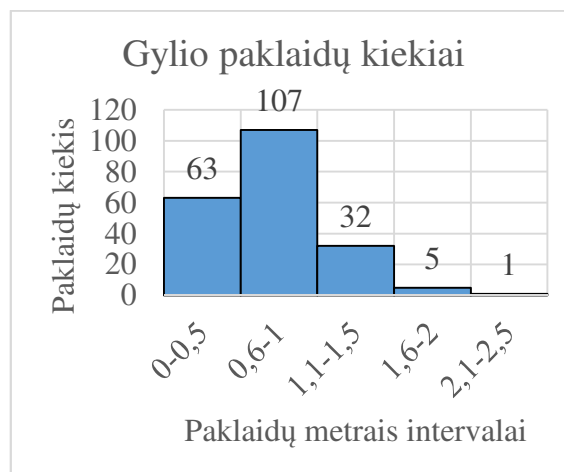
Siekiant įvertinti, kokio dydžio paklaidas daugiausiai darė tiriamieji, buvo sudarytos paklaidų kiekių histogramos Pav.3.5, Pav. 3.6 ir Pav. 3.7. Histograma- tai matavimo rezultatų paklaidų skirstinio kreivė. Čia matome, kad dažniausiai daromos paklaidos horizontalėje laipsniais reikšmė yra intervale $16^{\circ} - 30^{\circ}$, vertikalėje tiriamieji dažniausiai klydo vienu tašku, o nustatant gylį daugiausiai klydo 0,6 – 1 m intervale.



Pav. 3.5 Paklaidų horizontalėje histograma



Pav. 3.6 Paklaidų vertikalėje histograma



Pav. 3.7 Gylio paklaidų histograma

Ketvirtos tyrimo dalies visų tiriamųjų apskaičiuoti paklaidų vidurkiai, suskirstyti į grupes, lentelėse pateikti Priedas 2.

Lentelėje 3.1 pateikta, kiek kartų iš dviejų šimtų aštuonių leistų signalų, kiek parametrų iš trijų (horizontalės kampas, vertikalės vieta, gylis) tiriamieji nustatė teisingai. Antrasis tiriamasis daugiausiai kartų nustatė visus tris parametrus teisingai. Vis tik atveju, kada tiriamieji teisingai nenustato nė vieno parametro, yra daug ir jų skaičius artimas skaičiui atveju, kada nustato teisingai tik vieną parametrą iš trijų.

Lentelė 3.1 Ketvirtosios testavimo dalies apibendrinti rezultatai

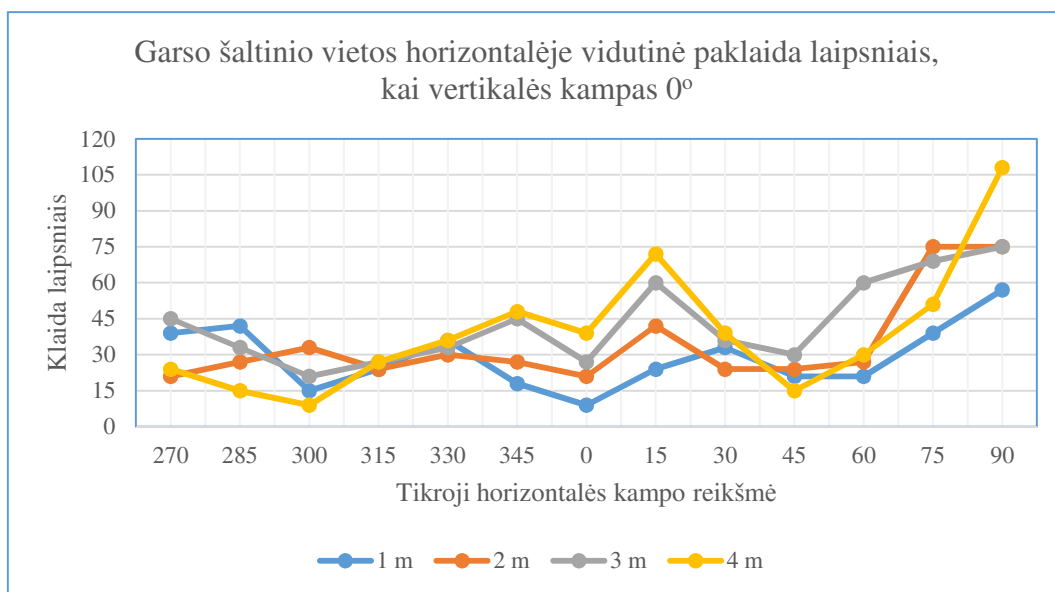
	Tiriamasis Nr. 1	Tiriamasis Nr. 2	Tiriamasis Nr. 3	Tiriamasis Nr. 4	Tiriamasis Nr. 5
Teisingai nustatė 3 parametrus	7	11	5	2	3
Teisingai nustatė 2 parametrus	31	38	33	21	44
Teisingai nustatė 1 parametrą	103	86	98	98	90
Nenustatė nei vieno parametro teisingai	67	73	72	87	71
Teisingai nustatyta horizontalė, proc.	20,7	19,3	18,7	10,6	10,1
Teisingai nustatyta vertikalė, proc.	31,3	29,3	26,4	24,5	29,3
Teisingai nustatytas gylis, proc.	37,5	45,2	39,9	34,6	49,5
Vidutinė absoliutinė paklaida horizontalėje laipsniais	28	29	36	39	46
Standartinis nuokrypis horizontalėje	37	37	51	50	58
Vidutinė absoliutinė paklaida vertikalėje taškais	1,1	1	1,3	1	1,2
Standartinis nuokrypis vertikalėje	1,4	1,3	1,6	1,3	1,5
Vidutinė absoliutinė gylio paklaida metrais	0,8	0,6	0,8	0,8	0,5
Gylio standartinis nuokrypis	1	0,9	1,2	1	0,8

Lentelėje 3.1 taip pat pateikta, kiek kartų tiriamieji teisingai nustatė horizontalės, vertikalės ir gylio parametrus procentais. Čia matome, kad nustatyti elevaciją ir atstumą jiems sekėsi geriau nei azimutą. Vis tik šis vertinimas nėra objektyvus, turint omenyje, kad vertikalės ir gylio taškų yra tik po keturis, o horizontalės – 13.

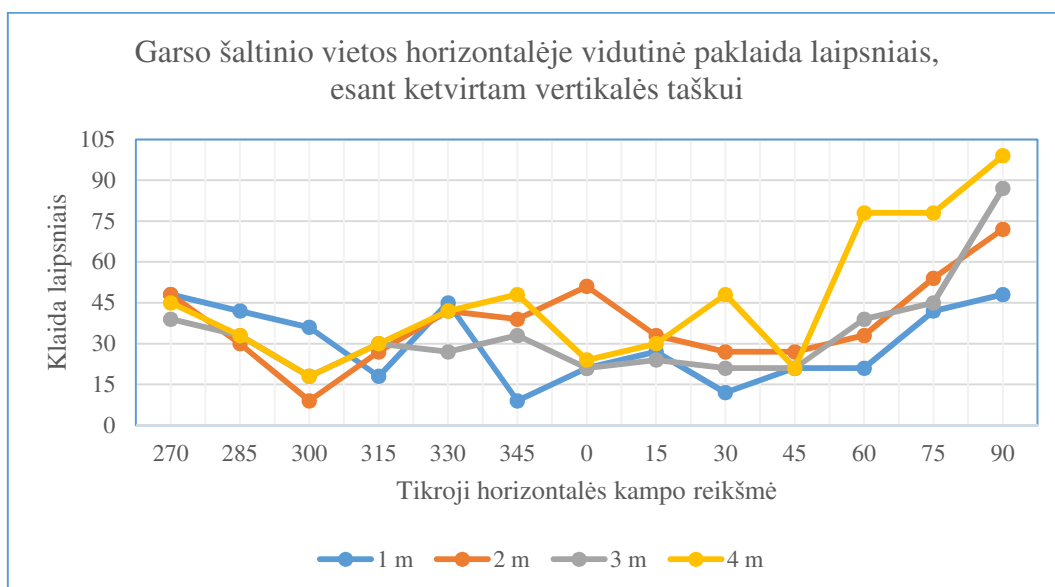
Tiriamieji, nustatydami horizontalės kampą, vidutiniškai klydo 35,6°, nustatydami vertikalės tašką - 1,12 taško, nustatydami gylį - 0,7 m.

Lentelėje 3.1 taip pat pateiktos apskaičiuotos paklaidų standartinių nuokrypių reikšmės, kurios apibūdina reikšmių sklaidą apie vidurkį.

Pav. 3.8 pateiktos gautos visų tiriamųjų vidutinės paklaidos kiekviename horizontalės taške, visuose atstumuose, kai garso šaltinis ausų lygyje, Pav. 3.9 - kai garso šaltinis nuleistas 30cm žemiau ausų lygio. Didžiausios paklaidos visais atstumais abiem garsiakalbio aukščiams gautos ties horizontalės 90° . Gauta mažiausia vidutinė horizontalės paklaida visiems tiriamiesiems visuose atstumuose $34,73^\circ$, kai garso šaltinis pakeltas 15 cm virš ausų lygio, didžiausia $36,81^\circ$ – kai garso šaltinis nuleistas 30 cm žemiau ausų lygio.



Pav. 3.8 Garso šaltinio vietos horizontalėje vidutinė paklaida laipsniais, kai vertikalės kampas 0°



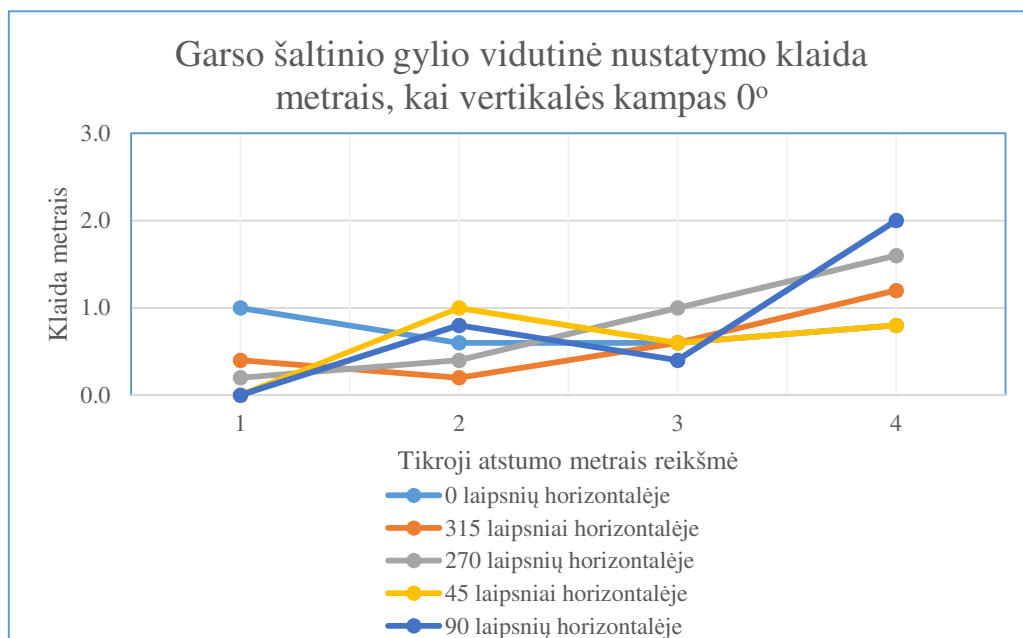
Pav. 3.9 Garso šaltinio vietos horizontalėje vidutinė paklaida laipsniais, esant ketvirtam vertikalės taškui

Vidutinės absoliutinės horizontalės paklaidos, daromos kiekviename gylyje, varijuoja nuo $27,7^\circ$ iki $45,7^\circ$. Lyginant tyrimo rezultatus su [11], [12] ir [33] tyrimų rezultatais - šios paklaidos

yra didelės. [12] vidutinis tikslumas horizontalėje visiems tiriamiesiems gautas 37 procentai, tuo tarpu šiame tyrime gautas vidutinis tikslumas horizontalėje visiems tiriamiesiems vos siekia 16 procentų, t.y., vidutiniškai visi tiriamieji teisingai nustatydavo horizontalės kampą šešiolika kartų iš šimto.

Analizuojant kiekvieno tiriamojo horizontalės skiriamumo rezultatus atskirai, pastebėta, kad paklaidos, tolstant nuo 0° į šonus (link 270° ir link 90°), didėja. Didžiausios paklaidos yra gaunamos periferinėse tiriamųjų zonose. Rezultatams įtakos galėjo turėti testavimo aplinka, triukšmo lygis, nuovargis. Siekiant objektyviai įvertinti horizontalės skiriamumo rezultatus, reikėtų atlikti tiriamųjų audiogramų registravimą. Galbūt kai kurie tiriamieji prasčiau girdi kuria nors ausimi, todėl krypties skiriamumas toje pusėje būtų prastesnis.

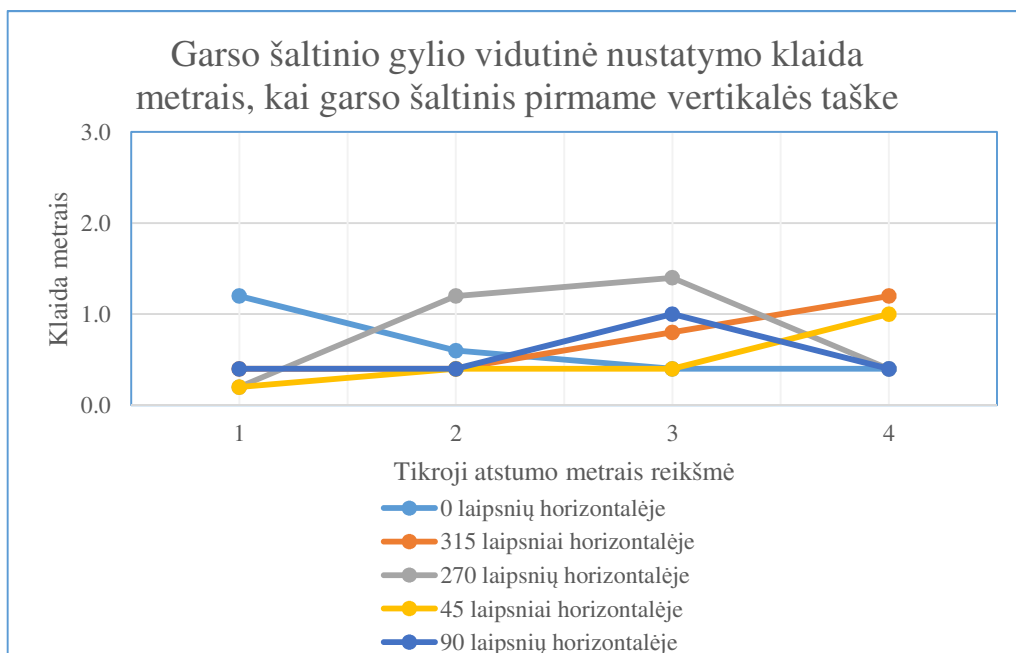
Pav. 3.10 pateiktos testavimo metu gautos gylis vidutinės tiriamųjų paklaidos, kai garso šaltinis yra ausų lygyje. Maksimali nustatyta vidutinė gylis paklaida yra 2 m, vidutinė paklaida vieno metro atstumu yra 0,52 m, dviejų metrų - 0,65 m, trijų metrų - 0,69 m, keturių metrų gylis - 1,26 m. Akivaizdu, kad garso šaltiniui tolstant yra daromos didesnės paklaidos. Šias paklaidas vertinti sudėtinga, nes rastas tik vienas tyrimas [12], kurio metu testuotas gylis skiriamumas. [12] atliktame tyrime pasiektas 38 procentų tikslumas, t.y., tiriamasis teisingai vidutiniškai nustatė 38 procentus visų signalų gylis. Šio tyrimo metu tiriamieji teisingai vidutiniškai nustatė 41,4 procentus visų signalų gylis.



Pav. 3.10 Garso šaltinio gylis vidutinė nustatymo klaida metais, kai vertikalės kampas 0°

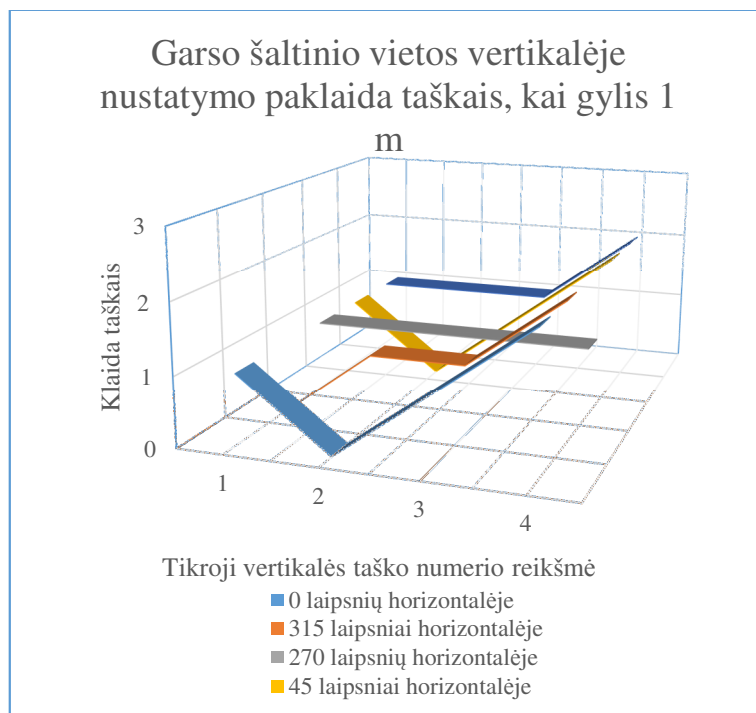
Vertinant vidutinės tiriamųjų darytas gylis paklaidas, mažiausia paklaida gauta, kai garso šaltinis pakeltas 15 cm virš ausų lygio, čia atstumo iki garso šaltinio paklaida gauta 0,66 m. Didžiausia vidutinė gylis nustatymo paklaida visiems tiriamiesiems gauta 0,79 m ketvirtajame elevacijos taške - kai garso šaltinis nuleistas 30 cm žemiau ausų lygio. Vidutinių paklaidų kitimas

visais atstumais, kai garso šaltinis pakeltas 15 cm, o horizontalės kampas keičiamas nuo 270° iki 90° , kas 15° , pateiktas Pav. 3.11. Vidutinė visų tiriamųjų atstumo nustatymo paklaida, didėjant atstumui, didėja.



Pav. 3.11 Garso šaltinio gylio vidutinė nustatymo klaida metrais, kai garso šaltinis pirmame vertikalės taške

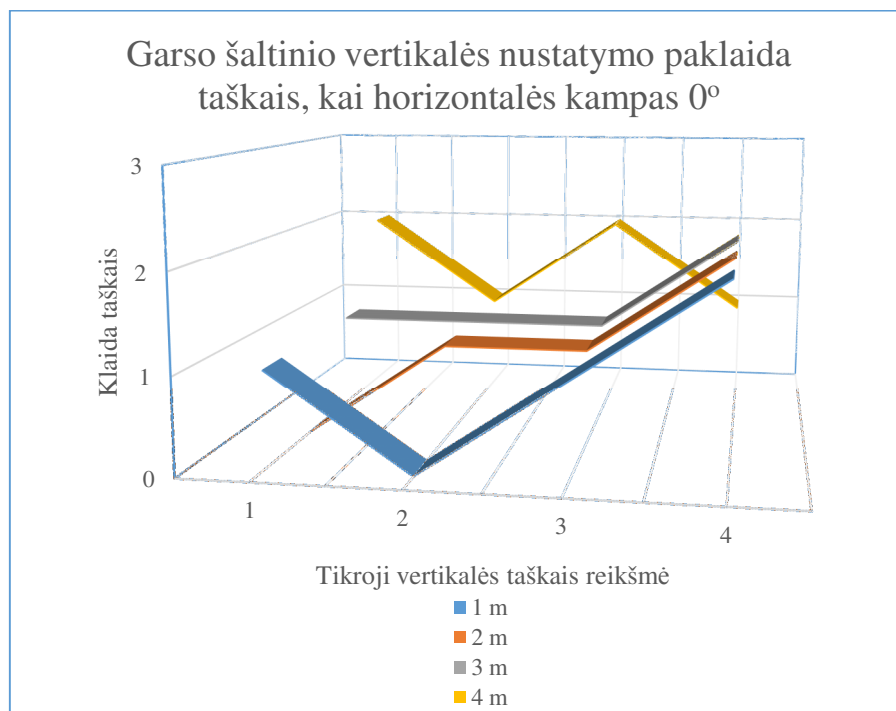
[12] atliktame tyrime vidutinis elevacijos tikslumas visiems tiriamiesiems yra 65 procentai. Atlikto testavimo metu nustatyta, jog vidutinis elevacijos tikslumas visiems tiriamiesiems yra tik 28,15 procentai.



Pav. 3.12 Garso šaltinio vietos vertikalėje nustatymo paklaida taškais, kai gylis 1 m

Šio tyrimo metu gauta mažiausia vidutinė elevacijos paklaida visiems tiriamiesiems yra 1,09 taško. Ji gauta, kai garso šaltinis yra 1 m atstumu. 1,09 taško paklaida čia reiškia, kad tiriamasis, nustatydamas garso šaltinį vertikalėje 1 m atstumu, kai horizontalės kampas keičiamas nuo 270° iki 90° (Pav. 3.12), vidutiniškai suklysta per 1,09 taško. Didžiausia gauta vertikalės paklaida yra 1,19 taško ir ji nustatyta, kai garso šaltinis yra 4 m atstumu. Elevacijos paklaida, didėjant atstumui, didėja.

Vertikalės paklaidų kitimas kai horizontalės kampas yra 0° pateiktas Pav. 3.13. Čia matome, kad tiriamieji mažiau klysta nustatydami antrąjį vertikalės tašką (paklaida 0,5 taško). Garso šaltiniui tolstant nuo 0° elevacijos - paklaida didėja. Elevacijos nustatymo paklaida didėja, tolstant nuo 0° , prie visų horizontalės kampų.



Pav. 3.13 Garso šaltinio vertikalės nustatymo paklaida taškais, kai horizontalės kampas 0°

Pirmosios, antrosios ir trečiosios testavimo dalių rezultatai aptariami paskutiniai (Priedas 2, Priedas 3, Priedas 4), nes juose keičiami tik du iš trijų parametrai. Pirmoje testavimo dalyje buvo keičiami horizontalės ir vertikalės kampai, o garso šaltinio atstumas iki tiriamojo buvo 1 m. Lentelėje 3.2 pateikta, kiek kartų iš penkiasdešimt dviejų leistų signalų kiek parametru iš dviejų tiriamieji nustatė teisingai. Iš lentelės matome, kad čia pasiektas maksimalus horizontalės kampo nustatymo tikslumas siekia vos 17,3 procentų, o vertikalės – 32,7 procentus. Žemam horizontalės tikslumui įtakos galėjo turėti per trumpos mokymo laikas – tiriamieji nespėjo priprasti prie erdviųjų indikuojančių garsų, todėl nustatyti vietą azimute buvo sudėtinga. Čia vidutinė paklaida svyravo nuo 34° iki 44° , o vidutinė paklaida elevacijoje – nuo 1 iki 1,3 taško. Iš penkiasdešimt dviejų signalų abu kintančius parametrus teisingai nustatė vos du kartus ir tik du tiriamieji, o atveju, kada

nei vieno parametro teisingai nenustatė, yra gerokai daugiau, nei atvejų, kada teisingai iš dviejų parametrų nustatė vieną.

Lentelė 3.2 Pirmosios testavimo dalies apibendrinti rezultatai

	Tiriamasis Nr. 1	Tiriamasis Nr. 2	Tiriamasis Nr. 3	Tiriamasis Nr. 4	Tiriamasis Nr. 5
Teisingai nustatė 2 parametrus	1	0	2	1	2
Teisingai nustatė 1 parametrą	20	18	16	21	20
Nenustatė nei vieno parametro teisingai	31	34	34	30	30
Teisingai nustatyta horizontalė, proc.	13,5	9,6	11,5	11,5	17,3
Teisingai nustatyta vertikalė, proc.	28,8	25,0	26,9	32,7	28,8
Vidutinė absoliutinė paklaida horizontalėje laipsniais	34	44	38	41	38
Vidutinė absoliutinė paklaida vertikalėje taškais	1,1	1,0	1,2	1,1	1,3

Antroje testavimo dalyje buvo keičiami elevacijos kampas ir atstumas, o azimuto kampas buvo 0°. Lentelėje 3.3 pateikta, kiek kartų iš šešiolikos leistų signalų kiek parametrų iš dviejų tiriamieji nustatė teisingai. Čia abu kintančius signalo parametrus daugiausiai du kartus nustatė du tiriamieji, o atvejų, kad teisingai nenustatyto nei vieno parametro yra mažiau. Čia maksimalus tikslumas vertikalėje siekia 37,5 procentus. Šioje dalyje gauti elevacijos tikslumo rezultatai yra artimi pirmoje ir ketvirtoje testavimo dalyse gautiems rezultatams. Tikslumas nustatant garso šaltinio gylį varijuoja nuo 50 iki 62,5 procentų. Čia gauti gylio nustatymo tikslumo rezultatai yra aukštesni, nei gauti ketvirtojoje testavimo dalyje. Taip galėjo nutikti dėl to, kad čia kito tik du parametrai ir tiriamiesiems buvo lengviau susikaupti.

Lentelė 3.3 Antrosios testavimo dalies apibendrinti rezultatai

	Tiriamasis Nr. 1	Tiriamasis Nr. 2	Tiriamasis Nr. 3	Tiriamasis Nr. 4	Tiriamasis Nr. 5
Teisingai nustatė 2 parametrus	3	1	0	2	3
Teisingai nustatė 1 parametrą	6	10	12	10	7
Nenustatė nei vieno parametro teisingai	7	5	4	4	6
Teisingai nustatyta vertikalė, proc.	25,0	18,8	25,0	37,5	18,8
Teisingai nustatytas gylis, proc.	50,0	56,3	50,0	50,0	62,5
Vidutinė absoliutinė paklaida vertikalėje taškais	1,1	1,1	1,2	0,9	1,4
Vidutinė absoliutinė gylio paklaida metrais	0,6	0,6	0,8	0,6	0,5

Trečiojoje testavimo dalyje kito garso šaltinio gylis bei horizontalės kampas, o vertikalės kampas buvo 0o. Čia gauti rezultatai pateikti lentelėje 3.4. Šioje tyrimų dalyje gautas maksimalus tikslumas horizontalėje yra 19,2 procentų, gylyje – 46,2 procentai. Atvejų „Teisingai nustatė 1 parametrą“ kiekis yra artimas atvejų „Nenustatė nei vieno parametro teisingai“.

Lygindami visų keturių testavimo dalių tikslumo rezultatus Lentelė 3.5 matome, kad gautos parametrų tikslumo reikšmės yra artimos. Horizontalėje jo maksimaliai skiriasi 4,28 procentais, vertikalėje – 3,4 procentais, o gylyje – 13 procentų.

Lentelė 3.4 Trečios testavimo dalies apibendrinti rezultatai

	Tiriamasis Nr. 1	Tiriamasis Nr. 2	Tiriamasis Nr. 3	Tiriamasis Nr. 4	Tiriamasis Nr. 5
Teisingai nustatė 2 parametrus	2	1	3	2	2
Teisingai nustatė 1 parametrą	24	20	28	17	27
Nenustatė nei vieno parametro teisingai	26	31	21	33	23
Teisingai nustatyta horizontalė, proc.	13,5	3,8	19,2	5,8	15,4
Teisingai nustatytas gylis, proc.	40,4	38,5	46,2	34,6	44,2
Vidutinė absoliutinė paklaida horizontalėje laipsniais	34	55	38	49	46
Vidutinė absoliutinė gylio paklaida metrais	0,8	0,9	0,9	0,9	0,7

Lentelė 3.5 Gautas vidutinės tikslumo reikšmės tiriamiesiems nustatant horizontalės ir vertikalės kampus bei atstumą iki garso šaltinio

	Vidutinis tikslumas procentais		
	Horizontalė	Vertikalė	Gylis
Pirma testavimo dalis	12,7	28,4	-
Antra testavimo dalis	-	25	53,8
Trečia testavimo dalis	11,6	-	40,8
Ketvirta testavimo dalis	15,88	28,2	41,34

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Darbą apibendrinančios išvados

- Tyrimų analizės metu nustatyta, kad tikslesni skiriamumo rezultatai gaunami naudojant personalizuotas galvos perdavimo funkcijas. Taip pat rezultatams įtakos turi mokymai – kuo ilgiau trunka mokymai, tuo geriau tiriamieji pripranta prie indikacinių signalų ir tiksliau nustato garso šaltinio vietą erdvėje.
- Remiantis aptartais tyrimais, siekiant gauti maksimalų indikacinių signalų vietos erdvėje nustatymo tikslumą, tiriamųjų galvos perdavimo funkcijos buvo registruojamos akustiniame kambaryje. Atstumas buvo keičiamas nuo 1 m iki 4 m, 1 m tikslumu, horizontalės kampas – nuo 270° iki 90° , 15° tikslumu, vietos vertikalėje taškai: 15 cm virš ausų lygio, ausų lygyje, 15 cm ir 30 cm žemiau ausų lygio.
- Šis darbas atliktas siekiant nustatyti galimybę techninėje pagalboje neregiamis pritaikyti ir maksimaliai išnaudoti erdvinio garso galimybes – juo indikuoti horizontalės kryptį, elevacijos vietą bei atstumą iki kliūtis. Erdvinio garso skiriamumo testavimo metu pastebėta, kad nustatyti garso šaltinio vietą erdvėje triukšmingoje aplinkoje yra itin sudėtinga. Projektuojant sistemą akliesiems, kur kliūtys indikuojamos tik erdviu garsu, šis aspektas neigiamas ir labai nepatogus neregiamis, nes jiems taip pat svarbu girdėti ir aplinkos garsus, o triukšme yra sunku susikaupti, greitai pavargstama. Triukšmo lygis ir nuovargis daro neigiamą įtaką erdvinio garso vietos erdvėje nustatymo rezultatams.
- Testavimo metu, kintant visiems trimis garso šaltinio vietos erdvėje parametrams, daugiausiai horizontalės paklaidų gauta $15^\circ - 30^\circ$ intervale, vertikalės: 0 – 1 taško intervale, gylio: 0,6 – 1 m intervale. Iš visų trijų garso šaltinio vietos erdvėje parametrų gautas didžiausias gylio tikslumas penktojo tiriamojo – 49,5%, kur nustatyta vidutinė absoliutinė paklaida yra 0,5 m. Gautas maksimalus vertikalės tikslumas pirmojo tiriamojo - 31,3%, kur paklaida yra 1,1 taško. Tai rodo, kad projektuojant techninę pagalbą neregiamis galima ir net būtina naudoti erdvinį garsą atstumo iki kliūtis ir vertikalės vietos indikavimui.

Tyrimo metu gautas maksimalus horizontalės tikslumas vos siekė 21%, kur vidutinė absoliutinė paklaida yra 28° . Šie rezultatai yra prasti, lyginant juos su darbe aptartais kitų tyrimų rezultatais. Taip galėjo nutikti dėl ne preciziškai atlikto galvos perdavimo funkcijų registravimo, per trumpo mokymų laiko ar tiriamųjų klausos sutrikimų. Pastebėta, kad visų parametrų nustatymo paklaidos didėja, garso šaltinio vietai erdvėje tolstant nuo priešakinio taško, t.y. kai horizontalės ir vertikalės kampai yra 0° .

Galimos tolimesnių tyrimų kryptys

- Šiame darbe kliūties indikavimas garsu buvo simuliuojamas garsu. Turint omenyje, kad visi neregių jutimai yra aštresni nei sveikųjų, reikėtų suprojektuoti ir atlikti tyrimus lygiagrečiai klausos įtraukiant lietimo pojūčius - galbūt panaudoti taktilinius žemėlapius ar vibraciją, pritaikant tokią techninę pagalbą ir kurtiesiems.
- Šiame tyrime dalyvavo tik sveiki - regos sutrikimų neturintys asmenys. Rezultatai ir išvados būtų tikslesni, jei tyrimuose dalyvautų aklieji.
- Siekiant nustatyti didesnių paklaidų atsiradimą, reikėtų atlikti tiriamųjų audiogramų registravimą, kas tam tikrais atvejais paaiškintų garso šaltinio krypties skyrimo paklaidas.
- Šiame darbe galvos perdavimo funkcijoms registruoti naudotas kintančio dažnio signalas. Reikėtų atlikti HRTF registravimus naudojant kelių tipų signalus (pavyzdžiui – kibirkštis), kad būtų galima palyginti rezultatus.
- Čia erdvinio skiriamumo testavimui naudoti nekompensuoti duomenys, kas galėjo turėti įtakos rezultatams. Siekiant maksimalaus tikslumo, reikėtų atlikti gautų galvos perdavimo funkcijų filtravimą - pašalinti įrangos skleidžiamą triukšmą.
- Šiame tyrime testavimui buvo naudotas vienas vieno tipo signalas. Reikėtų atlikti visų parametru skiriamumo testavimą keliais signalais, juos palyginti.
- Atsižvelgiant į tai, kad tokia sistema būtų naudojama įvairiose aplinkose, reikėtų atlikti tyrimus tiek tyloje, tiek ir triukšme, nustatyti erdvinio garso skiriamumą abiem atvejais ir palyginti.
- Šiame darbe buvo gauti galvos perdavimo funkcijų įrašai ir atlikti skiriamumo testavimai keturiems elevacijos taškams. Reikėtų užregistruoti įrašus ir atlikti testavimus su daugiau vertikalės kampų.
- Siekiant tiriamajam palengvinti garso šaltinio padėties nustatymą, būtų galima, prieš leidžiant indikacinį signalą, paleisti atraminį, pavyzdžiui, kai garso šaltinis yra 1 m atstumu, 0° azimute ir 0° elevacijoje. Reikėtų atlikti testavimą su atraminiu signalu ir be jo.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

- [1] Visual impairment and blindness [žiūrėta 2015-03-25]. Prieiga per internetą: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/en/>
- [2] The Blind Really do Hear Better [žiūrėta 2014-11-09]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedaily.com/releases/2004/07/040723093712.htm>
- [3] KĖVELAITIS, E. Žmogaus fiziologija. KMU leidykla, Kaunas, 2006, P. 122-137.
- [4] Kaip prižiūrėti ausis? [žiūrėta 2015-03-22]. Prieiga per internetą: http://edu.glogster.com/glog.php?glog_id=28390552&scale=57
- [5] Sraigė (organas) [žiūrėta 2015-04-12]. Prieiga per internetą: [http://lt.wikipedia.org/wiki/Sraig%C4%97_\(organas\)](http://lt.wikipedia.org/wiki/Sraig%C4%97_(organas))
- [6] DAGIENĖ, V. Aiškinamasis norminis kompiuterijos žodynos [žiūrėta 2015-03-22]. Prieiga per internetą: <http://www.raštija.lt/>
- [7] 24-bit Multiple Effects Processor [žiūrėta 2015-03-22]. Prieiga per internetą: <http://roland.com/support/article/?q=faq&p=VF-1&id=1832032>
- [8] WIGGINS, B. An investigation into the real-time manipulation and control of three- dimensional sound fields. University of Derby, Derby, UK, 2004.
- [9] Perception lecture notes: auditory pathways and sound localization [žiūrėta 2015-01-11]. Prieiga per internetą: <http://www.cns.nyu.edu/~david/courses/perception/lecturenotes/localization/localization.html>
- [10] Bendroji informacija apie garsą. Garsas kaip bangų sklidimas [žiūrėta 2015-04-12]. Prieiga per internetą: <http://www.paroc.lt/verta-zinoti/garsas/bendroji-informacija-apie-garsa>
- [11] KILINSKAITĖ, I. Erdvinio garso suvokimo ir sintezavimo galimybių tyrimas. Magistro darbas, KTU, Kaunas, Lietuva, 2013.
- [12] QU, T., XIAO, Z., GONG, M., HUANG, Y., LI, X., WU, X. Distance-dependent Head-Related Transfere Functions measured with high spatial resolution using a spark gap. Audio, Speech, and Language Processing, August, 2009, Vol. 17, No. 6, p. 1124 - 1132.
- [13] Aklumas- tik didelis nepatogumas [žiūrėta 2013-12-19]. Prieiga per internetą: http://svencioniu.krastas.w3.lt/v2/index.php?option=com_content&view=article&id=323:aklumas-tik-didelis-nepatogumas&catid=78:2011-m-spalio-19-d-treiadienis-nr77-1124&Itemid=59
- [14] TENG, S., PURI, A., WHITNEY, D. Ultrafine spatial acuity of blind expert human echolocators. Experimental Brain Research Journal, 2012, p. 483-488.
- [15] DUNAI, L., LENGUA, I. Obstacle detectors for visually impaired people. Optimization of electrical and electronic equipmen, International Conference, May, 2014, p. 809 - 816.
- [16] MAKINO, H., ISHII, I., NAKASHIZUKA, M. Development of navigation systems for the blind using GPS and mobile phone combination. Engineering in Medicine and Biology Society, Amsterdam, November, 1996, p. 506 - 507.
- [17] BRILHAULT, A., KAMMOUN, S. Fusion of artificial vision and GPS to improve blind pedestrian positioning. New Technologies, Mobility and Security, February, 2011, p. 1 - 5.
- [18] DAMBHARE, S., SAKHARE, A. Smart stick for blind: obstacle detection, artificial vision and real-time assistance via GPS. 2nd National Conference on Information and Communication Technology, 2011, p. 31 - 33.
- [19] CARTER, J. P., BRAASCH, J. Cross-modal soundscape mapping: integrating ambisonic

- environmental audio recordings and high dynamic range spherical panoramic photography. The 20th International Conference on Auditory Display, New York, USA, June, 2014.
- [20] YELAMARTHI, K., DEJONG, B. P., LAUBHAN, K. A kinect based vibrotactile feedback system to assist the visually impaired. *Circuits and Systems*, August, 2014, p. 635 - 638.
- [21] ARDITI, A. Auditory display of coarse optical imagery: concept for a rehabilitation aid for blind spatial orientation. The 20th International Conference on Auditory Display, New York, USA, June, 2014
- [22] KAY, L. A sonar aid to enhance spatial perception of the blind: engineering design and evaluation. *The Radio and Electronic Engineer*, November, 1974, Vol. 44, p. 605 - 627.
- [23] KAY, L. Auditory perception and its relation to ultrasonic blind guidance aids. *Practical Electronic Aids for the handicapped*, London, March, 1962, p. 309 - 317.
- [24] Vibruojantys akiniai IGlasses [žiūrėta 2013-11-03]. Prieiga per internetą: <http://www.regostechnika.lt/baltos-lazdeles-akiniai/iglasses/>
- [25] SAKHARDANDE, J., PATTANAYAK, P., BHOWMICK, M. Smart cane assisted mobility for the visually impaired. *Engineering and Technology* 70, 2012, p. 1103 - 1106.
- [26] BHATLAWANDE, S. Design, development, and clinical evaluation of the electronic mobility cane for vision rehabilitation. *Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, November, 2014, Vol. 22, No. 6, pp. 1148 - 1158.
- [27] SOHL-DICKSTEIN, J., TENG, S. A device for human ultrasonic echolocation. *Transactions on Biomedical Engineering*, January, 2015.
- [28] SEKI, Y., SATO, T. A training system of orientation and mobility for blind people using acoustic virtual reality. *Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, February, 2011, VOL. 19, NO. 1, p. 95-104.
- [29] MIURA, T., EBIHARA, Y., SAKAJIRI, M., IFUKUBE, T. Utilization of auditory perceptions of sound and silent objects for orientation and mobility by visually- impaired people. *Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, October, 2011, pp. 1080 -1087.
- [30] HORNBOSTEL, E. M., WERTHEIMER, M. SB (Sitzungsberichte) der preussischen akademie der Wissenschaften, 1920, p. 388 - 396.
- [31] LETOWSKI, T. R., LETOWSKI, S. T. Auditory spatial perception: auditory localization. *Evidence Based Research, Inc.*, Vienna, 2012.
- [32] ANDREAPOULOU, A., ROGINSKA, A., MOHANRAJ, H. A database of repeated Head-Related transfer function measurements. *International Conference on Auditory Display*, Lodz, Poland, July, 2013, p. 287 - 291.
- [33] PEC, M., BUJACZ, M., STRUMILLO, P., MATERKA, A. Individual HRTF measurements for accurate obstacle sonification in an electronic travel aid for the blind. *International Conference on Signals and Electronic Systems*, Krakow, Poland, September, 2008, p. 235 - 238.
- [34] KEYROUZ, F. Advanced binaural sound localization in 3-D for humanoid robots. *Instrumentation and Measurement*, August, 2014, Vol. 63, No. 9.
- [35] TANG, L., FU, Z. H., XIE, L. Numerical calculation of the Head-Related Transfer Functions with Chinese dummy head. *Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*, Kaohsiung, November, 2013.
- [36] ZHANG, M., ZHANG, W., KENNEDY, R. A., ABHAYAPALA, T. D. HRTF measurement on KEMAR manikin. *Processing of Acoustics*, Adelaide, Australia, November, 2009.
- [37] CHENG, C. I., WAKEFIELD, G. H. Introduction to Head-Related Transfer Functions (HRTFs): representations of HRTFs in time, frequency, and space. *Audio Eng Soc*, April, 2001, Vol. 49, No.

4.

- [38] SODNIK, J., SUSNIK, R., TOMAZIC, S. Acoustic signal localization through the use of Head Related Transfer Functions. Systemics, Cybernetics and Informatics, 2004, Vol. 2, No. 6, p. 56 - 59.

PRIEDAI

Priedas 1. Vidutinės visų tiriamųjų testavimo metu gautos paklaidos tyrimo eilės tvarka.

Signalo Nr.	Horizontalės paklaida	Vertikalės paklaida	Gylio paklaida	Signalo Nr.	Horizontalės paklaida	Vertikalės paklaida	Gylio paklaida
1	57	0,6	0	39	54	1,2	0,6
2	39	0,8	0,2	40	0,2	65,4	0,72
3	21	0,2	0,4	41	0,4	43,8	0,96
4	21	0,6	0	42	0,6	22,2	0,24
5	33	0,2	0,2	43	0,8	19,2	0,52
6	24	0,6	0,6	44	1	39,6	0,24
7	9	0,4	1	45	1,2	22,8	0,72
8	18	0,6	1,2	46	1,4	10,8	0,48
9	36	0,6	1	47	1,6	15,6	0,52
10	24	0,6	0,4	48	1,8	25,2	0,72
11	15	0,6	0,8	49	2	25,8	0,72
12	42	0,6	0,8	50	2,2	15	0,52
13	39	0,6	0,2	51	2,4	50,4	0,72
14	69	0,6	0,4	52	2,6	46,8	0,52
15	63	0,6	0,8	53	2,8	61,8	0,52
16	21	0,8	0,2	54	3	75,6	0,52
17	36	1,6	0,2	55	3,2	25,2	0,76
18	33	0,6	0,6	56	3,4	34,2	1,72
19	21	0,4	0,2	57	3,6	33,6	0,52
20	18	0,8	1,2	58	3,8	22,2	0,28
21	33	1,2	1	59	4	12,6	0,76
22	27	1,2	0,4	60	4,2	27,6	1,04
23	24	0,2	0,4	61	4,4	26,4	1,24
24	30	0,8	0,8	62	4,6	25,8	0,24
25	18	0,8	0,4	63	4,8	33	0,96
26	45	1	0,2	64	5	21,6	0,96
27	15	1,2	0,2	65	5,2	51	1,2
28	33	1	0,2	66	5,4	12	1,24
29	24	1,8	0	67	5,6	36,6	1
30	24	1,4	0	68	5,8	22,8	1,76
31	30	1,2	0,6	69	6	22,8	1,48
32	24	1,2	1	70	6,2	30	1,04
33	27	1	1,2	71	6,4	25,8	1,24
34	18	1	1	72	6,6	26,4	0,8
35	36	1	0,6	73	6,8	15,6	0,8
36	18	1	0,2	74	7	43,2	1
37	21	1	0,6	75	7,2	12,6	1
38	36	0,6	1	76	7,4	19,2	1

Signalo Nr.	Horizontalās paklaida	Vertikalās paklaida	Gylio paklaida	Signalo Nr.	Horizontalās paklaida	Vertikalās paklaida	Gylio paklaida
77	7,6	31,2	0,52	115	29,6	7,4	16,2
78	7,8	49,8	1,24	116	30,4	7,6	16,2
79	0,8	0,2	56,4	117	31,2	7,8	49,8
80	1,6	0,4	40,8	118	0	0,6	0,2
81	2,4	0,6	19,2	119	0,04	1,2	0,4
82	3,2	0,8	13,2	120	0,28	1,8	0,6
83	4	1	27,6	121	0	2,4	0,8
84	4,8	1,2	22,8	122	0,04	3	1
85	5,6	1,4	10,8	123	0,52	3,6	1,2
86	6,4	1,6	12,6	124	1	4,2	1,4
87	7,2	1,8	22,2	125	1,04	4,8	1,6
88	8	2	16,8	126	1	5,4	1,8
89	8,8	2,2	9	127	0,48	6	2
90	9,6	2,4	38,4	128	0,76	6,6	2,2
91	10,4	2,6	34,8	129	0,96	7,2	2,4
92	11,2	2,8	55,8	130	0,04	7,8	2,6
93	12	3	75,6	131	0,48	8,4	2,8
94	12,8	3,2	25,2	132	0,96	9	3
95	13,6	3,4	28,2	133	0,04	9,6	3,2
96	14,4	3,6	24,6	134	0,24	10,2	3,4
97	15,2	3,8	22,2	135	0,52	10,8	3,6
98	16	4	6,6	136	0,24	11,4	3,8
99	16,8	4,2	21,6	137	0,84	12	4
100	17,6	4,4	17,4	138	0,8	12,6	4,2
101	18,4	4,6	22,8	139	0,48	13,2	4,4
102	19,2	4,8	30	140	0,28	13,8	4,6
103	20	5	15,6	141	0,96	14,4	4,8
104	20,8	5,2	51	142	0,48	15	5
105	21,6	5,4	9	143	0,24	15,6	5,2
106	22,4	5,6	33,6	144	0,24	16,2	5,4
107	23,2	5,8	19,8	145	0,04	16,8	5,6
108	24	6	22,8	146	0	17,4	5,8
109	24,8	6,2	21	147	0	18	6
110	25,6	6,4	25,8	148	0,32	18,6	6,2
111	26,4	6,6	23,4	149	1,2	19,2	6,4
112	27,2	6,8	9,6	150	1,04	19,8	6,6
113	28	7	34,2	151	0,8	20,4	6,8
114	28,8	7,2	12,6	152	0,52	21	7

Signalo Nr.	Horizontalės paklaida	Vertikalės paklaida	Gylio paklaida	Signalo Nr.	Horizontalės paklaida	Vertikalės paklaida	Gylio paklaida
153	0,24	21,6	7,2	191	0,6	0,52	14
154	0,32	22,2	7,4	192	0,4	0,04	14,4
155	0,8	22,8	7,6	193	0,6	0,32	14,8
156	0,32	23,4	7,8	194	0,32	0,6	15,2
157	0,52	0	0,4	195	0,84	0,32	15,6
158	0,56	0,04	0,8	196	26,4	0,32	0
159	0,04	0,08	1,2	197	10,8	0,56	0,04
160	0,12	0	1,6	198	16,2	0,04	0,08
161	0,24	0,04	2	199	10,2	0,12	0
162	0,52	0,52	2,4	200	18,6	0,04	0,04
163	0,28	0,6	2,8	201	13,8	0,32	0,32
164	0,32	0,84	3,2	202	4,8	0,28	0,4
165	0,52	0,8	3,6	203	6,6	0,32	0,44
166	0,32	0,28	4	204	13,2	0,32	0,4
167	0,32	0,56	4,4	205	13,8	0,12	0,08
168	0,32	0,36	4,8	206	6	0,12	0,16
169	0,12	0,04	5,2	207	20,4	0,32	0,16
170	0,32	0,28	5,6	208	22,8	0,12	0,04
171	0,32	0,36	6				
172	0,56	0,04	6,4				
173	1,52	0,24	6,8				
174	0,52	0,52	7,2				
175	0,28	0,24	7,6				
176	0,56	0,64	8				
177	0,44	0,6	8,4				
178	0,64	0,48	8,8				
179	0,24	0,08	9,2				
180	0,96	0,36	9,6				
181	0,36	0,28	10				
182	0,8	0,04	10,4				
183	0,84	0,04	10,8				
184	0,4	0,04	11,2				
185	0,96	0	11,6				
186	0,88	0	12				
187	0,44	0,32	12,4				
188	0,44	0,6	12,8				
189	0,2	0,64	13,2				
190	0,2	0,6	13,6				

Priedas 2. Pirmos testavimo dalies visų tiriamųjų apskaičiuoti paklaidų vidurkiai, suskirstyti į grupes.

Atstumas 1 m	Klaida laipsniais													
	Azimuto kampas													
Elevacija taškais	270°	285°	300°	315°	330°	345°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	Vidutinė absoliutinė paklaida laipsniais
1	75	18	27	15	48	45	51	54	39	36	90	54	111	51,00
2	24	9	24	18	45	27	51	45	51	30	60	82	75	41,58
3	30	24	12	15	24	48	33	54	36	24	27	15	96	33,69
4	36	21	24	24	45	45	21	48	39	33	15	18	33	30,92

Atstumas 1 m	Klaida taškais				
	Elevacijos taškas				
Elevacija taškais	1	2	3	4	Vidutinė absoliutinė paklaida laipsniais
270°	0,60	0,60	1,20	2,40	1,05
285°	0,80	1,20	1,00	2,20	1,10
300°	1,6	0,2	1	2,4	0,90
315°	0,8	1,2	1,6	1,2	1,00
330°	1,4	1,2	0,8	1,8	0,95
345°	1,6	1	1,2	1,4	0,90
0°	1,2	0,8	0,6	1	0,60
15°	1,8	0,4	1,6	1,8	0,95
30°	0,6	0,2	1,2	1,8	0,80
45°	1	0,4	1	1,8	0,80
60°	0,4	0	1,2	1,6	0,70
75°	1	0,2	1,2	2,2	0,90
90°	1	0,6	1,2	2,2	1,00

Priedas 3. Antros testavimo dalies visų tiriamųjų apskaičiuoti paklaidų vidurkiai, suskirstyti į grupes.

Azimutas 0°	Klaida metrais				
	Atstumas metrais				
Elevacija taškais	1	2	3	4	Vidutinė absoliutinė paklaida taškais
1	0,6	0,4	0,8	0,6	0,6
2	0,2	0,4	0,4	1,2	0,55
3	0,4	0,6	0,4	1,4	0,7
4	0,6	0,6	0,8	0,4	0,6

Azimutas 0°	Klaida taškais				
	Elevacija taškais				
Atstumas metrais	1	2	3	4	Vidutinė absoliutinė paklaida metrais
1	0,8	0,4	1,2	1,6	1
2	1	0,6	0,6	1,8	1
3	1,2	1	0,6	2	1,2
4	1,8	1	1,4	0,6	1,2

Priedas 4. Trečios testavimo dalies visų tiriamųjų apskaičiuoti paklaidų vidurkiai, suskirstyti į grupes.

Elevacija 0°	Klaida metrais				
	Atstumas metrais				Vidutinė absoliutinė paklaida laipsniais
Azimuto kampas	1	2	3	4	
270°	0,60	1,00	1,40	1,40	1,10
285°	0,40	0,60	1,00	2,00	1,00
300°	0,2	0,4	1,2	1,6	0,85
315°	0,4	0,8	0,6	0,8	0,65
330o	1,2	0,4	1	0,8	0,85
345°	1,2	1,2	0,8	0,6	0,95
0°	0,8	1,2	0,8	0,4	0,80
15°	0	1	0,6	1	0,65
30°	0	0,8	0,6	0,4	0,45
45°	0,2	0,6	0,8	1	0,65
60°	0	0,8	0,6	1,4	0,70
75°	0,2	0,4	0,6	0,6	0,45
90°	0,4	0,2	0,4	2	0,75

Elevacija 0°	Klaida laipsniais													
	Azimuto kampas													Vidutinė absoliutinė paklaida laipsniais
Atstumas metrais	270°	285°	300°	315°	330°	345°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
1	48	27	30	21	24	33	45	54	54	24	42	66	84	42
2	39	33	30	24	39	39	15	48	33	30	45	60	111	42
3	51	27	21	21	21	63	18	57	42	39	60	90	111	48
4	33	45	18	30	33	36	36	42	30	36	57	78	135	47

Priedas 5. Ketvirtos testavimo dalies visų tiriamųjų apskaičiuoti paklaidų vidurkiai, suskirstyti į grupes.

Elevacijos pirmas taškas	Klaida laipsniais													
	Azimuto kampas													
Atstumas, m	270°	285°	300°	315°	330°	345°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	Vidutinė absoliutinė paklaida laipsniais
1,00	45	18	30	24	27	33	12	21	33	36	21	63	69	33,23
2,00	39	33	33	30	36	21	12	42	45	30	30	45	69	35,77
3,00	33	24	12	6	30	33	33	30	51	18	42	48	75	33,46
4,00	21	21	21	27	45	39	21	18	39	39	66	30	87	36,46

Elevacijos antras taškas	Klaida laipsniais													
	Azimuto kampas													
Atstumas, m	270°	285°	300°	315°	330°	345°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	Vidutinė absoliutinė paklaida laipsniais
1,00	39	42	15	24	36	18	9	24	33	21	21	39	57	29,08
2,00	21	27	33	24	30	27	21	42	24	24	27	75	75	34,62
3,00	45	33	21	27	33	45	27	60	36	30	60	69	75	43,15
4,00	24	15	9	27	36	48	39	72	39	15	30	51	108	39,46

Elevacijos trečias taškas	Klaida laipsniais													
	Azimuto kampas													
Atstumas, m	270°	285°	300°	315°	330°	345°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	Vidutinė absoliutinė paklaida laipsniais
1,00	54	36	21	18	36	18	27	24	30	24	24	33	15	27,69
2,00	36	15	15	12	60	30	42	39	33	21	39	45	102	37,62
3,00	21	33	15	27	24	39	21	48	33	30	33	42	105	36,23
4,00	45	30	18	33	48	33	33	42	36	27	18	75	60	38,31

Elevacijos ketvirtas taškas	Klaida laipsniais													
	Azimuto kampas													
Atstumas, m	270°	285°	300°	315°	330°	345°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	Vidutinė absoliutinė paklaida laipsniais
1,00	48	42	36	18	45	9	21	27	12	21	21	42	48	30,00
2,00	48	30	9	27	42	39	51	33	27	27	33	54	72	37,85
3,00	39	33	18	30	27	33	21	24	21	21	39	45	87	33,69
4,00	45	33	18	30	42	48	24	30	48	21	78	78	99	45,69

Elevācijas antras taškas	Klaida, m					Elevācijas pirmas taškas	Klaida, m				
	Atstumas, m						Atstumas, m				
Azimuto kampas	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine pakļaida metrais	Azimuto kampas	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine pakļaida metrais
270°	0,2	0,4	1,0	1,6	0,80	270°	0,2	1,2	1,4	0,4	0,80
285°	0,8	0,6	0,8	2,2	1,10	285°	0,4	0,6	0,8	0,4	0,55
300°	0,8	0,2	1,0	1,4	0,85	300°	0,8	0,6	1,2	0,6	0,80
315°	0,4	0,2	0,6	1,2	0,60	315°	0,4	0,4	0,8	1,2	0,70
330°	1,0	0,6	1,0	0,8	0,85	330°	0,4	0,0	0,8	1,2	0,60
345°	1,2	1,0	0,2	1,2	0,90	345°	1,0	0,4	0,2	0,8	0,60
0°	1,0	0,6	0,6	0,8	0,75	0°	1,2	0,6	0,4	0,4	0,65
15°	0,6	0,4	0,6	1,0	0,65	15°	0,2	1,0	0,8	0,8	0,70
30°	0,2	1,0	0,8	1,2	0,80	30°	0,6	0,4	0,6	0,8	0,60
45°	0,0	1,0	0,6	0,8	0,60	45°	0,2	0,4	0,4	1,0	0,50
60°	0,4	0,8	0,2	0,8	0,55	60°	0,2	0,8	1,0	1,0	0,75
75°	0,2	0,8	1,2	1,4	0,90	75°	0,8	0,8	0,8	0,8	0,80
90°	0,0	0,8	0,4	2,0	0,80	90°	0,4	0,4	1,0	0,4	0,55

Elevācijas trešais taškas	Klaida, m					Elevācijas ketvirtas taškas	Klaida, m				
	Atstumas, m						Atstumas, m				
Azimuto kampas	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine pakļaida metrais	Azimuto kampas	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine pakļaida metrais
270°	0,6	0,8	1,0	1,8	1,05	270°	0,6	0,8	1,2	1,4	1,00
285°	1,0	0,4	0,8	1,6	0,95	285°	0,6	0,6	1,4	1,4	1,00
300°	0,6	0,4	0,6	1,2	0,70	300°	0,4	0,0	1,0	1,2	0,65
315°	0,2	0,0	1,0	1,4	0,65	315°	0,6	0,4	1,6	1,4	1,00
330°	0,6	0,8	0,4	1,4	0,80	330°	0,6	0,2	0,8	0,6	0,55
345°	1,0	0,4	0,0	0,6	0,50	345°	1,2	0,6	0,4	0,6	0,70
0°	1,2	1,2	0,6	0,6	0,90	0°	1,4	0,6	0,4	0,8	0,80
15°	1,0	0,4	0,8	0,8	0,75	15°	1,2	0,6	0,4	0,8	0,75
30°	0,6	0,2	0,2	1,2	0,55	30°	0,8	1,0	0,6	0,6	0,75
45°	0,0	0,8	0,6	0,4	0,45	45°	0,8	0,8	0,6	0,8	0,75
60°	0,0	0,8	0,4	1,0	0,55	60°	0,2	0,8	1,4	0,4	0,70
75°	0,2	1,0	1,0	1,4	0,90	75°	0,2	0,6	1,2	0,8	0,70
90°	0,2	0,4	1,0	0,8	0,60	90°	0,6	0,8	1,0	1,2	0,90

Atstumas 1 m	Klaida taškais					Atstumas 2 m	Klaida taškais				
	Elevacija taškais						Elevacija taškais				
Azimuto kampas	1,00	2,00	3,00	4,00	Vidutinė absoliutinė paklaida taškais	Azimuto kampas	1,00	2,00	3,00	4,00	Vidutinė absoliutinė paklaida taškais
270°	1	1	1	1	0,95	270°	1	0	1	2	1,15
285°	1	1	1	2	1,10	285°	1	1	1	1	0,90
300°	1	1	1	2	1,10	300°	1	1	1	2	1,15
315°	0	1	1	2	1,05	315°	1	0	1	2	1,25
330°	1	1	1	2	1,20	330°	1	1	1	2	1,15
345°	1	1	1	1	1,00	345°	1	1	1	2	1,05
0°	1	0	1	2	1,00	0°	0	1	1	2	0,85
15°	0	1	1	2	1,00	15°	1	1	1	3	1,50
30°	1	0	1	2	1,05	30°	2	1	1	2	1,35
45°	2	1	1	2	1,35	45°	0	1	1	2	1,00
60°	1	0	2	2	1,20	60°	1	1	1	2	1,10
75°	1	1	1	2	1,05	75°	1	0	2	2	1,15
90°	1	1	1	2	1,15	90°	1	1	1	2	1,30

Atstumas 3 m	Klaida taškais					Atstumas 4 m	Klaida taškais				
	Elevacija taškais						Elevacija taškais				
Azimuto kampas	1,00	2,00	3,00	4,00	Vidutinė absoliutinė paklaida taškais	Azimuto kampas	1,00	2,00	3,00	4,00	Vidutinė absoliutinė paklaida taškais
270°	1	0	1	2	1,05	270°	1	1	1	2	0,95
285°	1	1	1	2	1,30	285°	2	0	1	2	1,30
300°	1	1	1	1	1,00	300°	2	1	0	2	1,30
315°	1	0	0	2	0,85	315°	1	1	1	2	1,15
330°	1	1	1	2	1,25	330°	1	1	1	1	1,10
345°	2	1	1	2	1,30	345°	3	1	1	1	1,30
0°	1	1	1	2	1,15	0°	2	1	2	1	1,35
15°	2	1	1	2	1,50	15°	2	1	0	1	1,15
30°	1	1	1	2	1,30	30°	3	1	1	1	1,30
45°	1	1	0	1	0,75	45°	2	1	1	1	1,15
60°	1	1	1	2	1,40	60°	1	1	1	1	0,95
75°	1	0	1	2	0,85	75°	2	1	1	1	1,30
90°	1	1	1	2	1,10	90°	2	1	1	2	1,20

Azimutas 270°	Klaida taškais					Azimutas 315°	Klaida taškais				
	Elevacija taškais						Elevacija taškais				
Atstumas, m	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine paklaida taškais	Atstumas, m	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine paklaida taškais
1	1	1	1	1	0,95	1	0	1	1	2	1,10
2	1	0	1	2	1,15	2	1	0	1	2	1,25
3	1	0	1	2	1,05	3	1	0	0	2	0,85
4	1	1	1	2	0,95	4	1	1	1	2	1,15

Azimutas 0°	Klaida taškais					Azimutas 45°	Klaida taškais				
	Elevacija taškais						Elevacija taškais				
Atstumas, m	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine paklaida taškais	Atstumas, m	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine paklaida taškais
1	1	0	1	2	0,95	1	2	1	1	2	1,40
2	0	1	1	2	0,85	2	0	1	1	2	1,00
3	1	1	1	2	1,15	3	1	1	0	1	0,75
4	2	1	2	1	1,35	4	2	1	1	1	1,15

Azimutas 90°	Klaida taškais				
	Elevacija taškais				
Atstumas, m	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine paklaida taškais
1	1	1	1	2	1,20
2	1	1	1	2	1,25
3	1	1	1	2	1,10
4	1	1	1	2	1,10

Azimutas 270°	Klaida, m					Azimutas 315°	Klaida, m				
	Atstumas, m						Atstumas, m				
Elevacija taškais	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine paklaida metrais	Elevacija taškais	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine paklaida metrais
1	0,2	0,8	1,4	0,6	0,75	1	0,4	0,4	1,0	0,8	0,65
2	0,6	0,4	1,2	2,0	1,05	2	0,4	0,2	0,4	1,2	0,55
3	1,0	0,6	1,0	1,6	1,05	3	0,4	0,2	1,0	1,6	0,80
4	0,4	0,4	1,4	1,4	0,90	4	1,0	0,4	1,4	1,4	1,05

Azimutas 0°	Klaida, m					Azimutas 45°	Klaida, m				
	Atstumas, m						Atstumas, m				
Elevācija taškais	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine pakļaida metrais	Elevācija taškais	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine pakļaida metrais
1	1,2	1,0	0,6	0,8	0,90	1	0,2	0,4	0,8	1,4	0,70
2	0,6	0,6	0,8	1,0	0,75	2	0,0	1,0	0,8	1,0	0,70
3	0,8	1,0	0,6	0,4	0,70	3	0,0	0,6	0,6	0,6	0,45
4	1,0	0,4	0,6	0,8	0,70	4	0,4	0,6	0,4	0,8	0,55

Azimutas 90°	Klaida, m				
	Atstumas, m				
Elevācija taškais	1	2	3	4	Vidutinē absolūtine pakļaida metrais
1	0,4	0,2	1,0	0,8	0,60
2	0,2	0,8	0,4	1,6	0,75
3	0,2	0,4	1,0	0,8	0,60
4	0,2	1,2	1,0	1,2	0,90