

**UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH  
PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA**

**PLASTICITA PRIESTOROVÉHO POČUTIA VO VIRTUÁLNO M A  
REÁLNO M PROSTREDÍ**

**2019**

**Ondrej SPIŠÁK**

**UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH**  
**PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA**

**PLASTICITA PRIESTOROVÉHO POČUTIA VO**  
**VIRTUÁLNO M A REÁLNO M PROSTREDÍ**

**BAKALÁRSKA PRÁCA**

Študijný program:	Informatika
Pracovisko (katedra/ústav):	Ústav informatiky
Vedúci bakalárskej práce:	doc. Ing. Norbert Kopčo, PhD.
Konzultant bakalárskej práce:	Ing. Peter Lokša



Univerzita P. J. Šafárika v Košiciach  
Prírodovedecká fakulta

### ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

**Meno a priezvisko študenta:** Ondrej Spišák  
**Študijný program:** Informatika (Jednoodborové štúdium, bakalársky I. st., denná forma)  
**Študijný odbor:** 9.2.1. informatika  
**Typ záverečnej práce:** Bakalárska práca  
**Jazyk záverečnej práce:** slovenský  
**Sekundárny jazyk:** anglický

**Názov:** Plasticita priestorového počutia vo virtuálnom a reálnom prostredí

**Názov EN:** Plasticity of spatial processing in virtual and real environment

**Cieľ:**

- Pripraviť experimentálny setup pre meranie audiogramov a spolupracovať na príprave experimentálneho setupu pre hlavný experiment vo virtuálnom a reálnom prostredí.
- Na základe poskytnutých MATLAB skriptov vypomáhať pri modifikácii experimentálnej procedúry pre prezentovanie reálnych a virtuálnych sluchových a vizuálnych stimulov.
- Nazberať experimentálne dáta na nových subjektoch.
- Analyzovať a vyhodnotiť experimentálne dáta.

**Literatúra:** Ferber M, Laback B, Kopco N (2018) Vision-induced reweighting of binaural localization cues. The Journal of the Acoustical Society of America 143, 1813 (2018); <https://doi.org/10.1121/1.5035942>  
Ferber M (2018) Plasticity of Spatial Processing in Normal Hearing: Reweighting of Binaural Cues. Unpublished MSc. Thesis. University of Vienna.  
Kopčo, N, I-F Lin, BG Shinn-Cunningham, and JM Groh (2009). Reference frame of the ventriloquism aftereffect. Journal of Neuroscience, 29(44):13809-13814; doi:10.1523/JNEUROSCI.2783-09.  
Yost WA (2000). Fundamentals of Hearing: An introduction (4th ed.). San Diego: Academic Press.

**Kľúčové slová:** priestorové sluchové vnímanie, plasticita

**Vedúci:** doc. Ing. Norbert Kopčo, PhD.  
**Konzultant:** Ing. Peter Lokša  
**Ústav:** ÚINF - Ústav informatiky  
**Riaditeľ ústavu:** prof. RNDr. Viliam Geffert, DrSc.  
**Spôsob sprístupnenia elektronickej verzie práce:** bez obmedzenia

**Dátum schválenia:** 03.05.2019

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach  
Prírodovedecká fakulta  
Ústav informatiky

### Pod'akovanie

Chcem sa pod'akovať vedúcemu mojej práce doc. Ing. Norbertovi Kopčovi, PhD. za odbornú pomoc pri písaní práce a analyzovaní dát a konzultantovi Ing. Petrovi Lokšovi, za pomoc pri zbere dát a príprave experimentu.

### **Abstrakt v štátnom jazyku**

Binaurálne parametre používané sluchovým systémom na zistenie polohy zdroja zvuku v priestore sú do veľkej miery závislé na frekvenčnej úrovni daného zvuku. Pre nízkofrekvenčné úzkopásmové zvuky je dominantný interaurálny časový rozdiel (ITD), zatiaľ čo pre tie vysokofrekvenčné dominuje interaurálny rozdiel v hlasitosti (ILD). Táto práca popisuje výsledky behaviorálneho experimentu, v ktorom sme testovali či je možné zmeniť relatívne váženie vysokofrekvenčnej (VF) a nízkofrekvenčnej (NF) zložky širokopásmového stimulu za pomoci vizuálne orientovaného tréningu, a či sa táto zmena zovšeobecní aj na zmenu váženia ITD/ILD pre strednofrekvenčné zložky zvuku. V skupine subjektov trénovanej na VF sa zvýšilo váženie týchto zložiek, zatiaľ čo v skupine trénovanej na NF nenastala žiadna významná zmena. Zvýšenie váh VF zložiek sa nezovšeobecnilo na zmenu váženia ITD/ILD pre strednofrekvenčné zvuky. Tieto výsledky naznačujú, že vizuálnym tréningom je možné dosiahnuť zmenu váženia jednotlivých spektrálnych komponentov zvuku pri ich lokalizácii, ale táto zmena sa neprenáša na zmenu váženia binaurálnych parametrov.

**Kľúčové slová:** priestorové sluchové vnímanie, plasticita

### **Abstrakt v anglickom jazyku**

The binaural parameters used by the auditory system to determine the location of the sound source in space largely depends on the sound's frequency content. For low-frequency (LF) narrowband sounds, the interaural time difference (ITD) is the dominant cue, while for high-frequency (HF) narrowband sounds, the interaural level difference (ILD) dominates. This thesis describes the results of a behavioral experiment in which we tested whether it is possible to change spectral weighting of either the HF or the LF components of broadband stimuli by visually guided training in separate subject groups. We also tested whether this reweighting would generalize to a change in the ITD/ILD weighting for mid-frequency sounds. In the subject group trained on HF this training resulted in an increase in the HF weight, but no effect was found in the LF group. However, the change in spectral weighting did not generalize to an increase in the relative weighting of the ITD/ILD cue for mid-frequency sounds. Thus, the reweighting appears to be only spectral, but not binaural-cue specific.

**Key words:** spatial auditory perception, plasticity

---

## Obsah

<b>Zoznam ilustrácií .....</b>	<b>6</b>
<b>Zoznam skratiek a značiek.....</b>	<b>7</b>
<b>Slovník termínov .....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Teoretický úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Hypotézy a ciele .....</b>	<b>12</b>
<b>3 Metódy.....</b>	<b>14</b>
3.1 Účastníci.....	14
3.2 Testovanie na audiometri .....	14
3.2.1 Príprava testu .....	14
3.2.2 Priebeh testu.....	14
3.2.3 Záver testu.....	15
3.3 Experimentálna procedúra.....	15
3.3.1 Pretest.....	16
3.3.2 Tréning.....	19
3.3.1 Posttest .....	20
<b>4 Analýzy a Výsledky .....</b>	<b>21</b>
4.1 Spôsoby analyzovania .....	21
4.2 2-kanálové dáta.....	21
4.2.1 Odpovede subjektov ako funkcia vysokofrekvenčného reproduktora.....	21
4.2.2 Odchýlka ku nízkofrekvenčnému reproduktoru .....	22
4.3 VP dáta .....	25
4.3.1 Odpovede subjektov ako funkcia polohy ILD .....	25
4.3.2 Odchýlka ku ITD komponentu .....	26
4.4 Regresný model .....	28
4.5 Zhrnutie a diskusia .....	32
<b>Záver .....</b>	<b>34</b>
<b>Zoznam použitej literatúry .....</b>	<b>35</b>
<b>Appendix.....</b>	<b>36</b>
<b>Prílohy.....</b>	<b>38</b>

---

## Zoznam ilustrácií

Obr. 1	Audiogram vygenerovaný audiometrom SIBLESOUND 400 .....	15
Obr. 2	Náčrt možných target a non-target pozícií vo virtuálnej realite prevzatý zo štúdie [2] .....	17
Obr. 3	Náčrt rozloženia reproduktorov v reálnej miestnosti.....	19
Obr. 4	Odpovede subjektov z HF skupiny v RP .....	22
Obr. 5	Odpovede subjektov z LF skupiny v RP .....	23
Obr. 6	Odchýlka ku NF komponentu pre HF skupinu .....	23
Obr. 7	Odchýlka ku NF komponentu pre LF skupinu .....	24
Obr. 8	Odpovede subjektov z HF skupiny vo VP .....	26
Obr. 9	Odpovede subjektov z LF skupiny vo VP .....	26
Obr. 10	Odchýlka ku ITD komponentu pre HF skupinu .....	27
Obr. 11	Odchýlka ku ITD komponentu pre LF skupinu .....	27
Obr. 12	Regresná analýza v RP HF skupina .....	28
Obr. 13	Regresná analýza v RP LF skupina .....	29
Obr. 14	Váha VF komponentu v RP .....	30
Obr. 15	Regresná analýza vo VP HF skupina.....	31
Obr. 16	Regresná analýza vo VP LF skupina .....	31
Obr. 17	Váha ILD komponentu vo VP .....	32
Obr. 18	Odpovede na 4-kanálové dáta v RP, HF skupina .....	36
Obr. 19	Odchýlka ku NF komponentu vo 4-kanálových dátach pre HF skupinu.....	36
Obr. 20	Odpovede na 4-kanálové dáta vo VP, LF skupina.....	37
Obr. 21	Odchýlka ku NF komponentu vo 4-kanálových dátach pre LF skupinu .....	37

---

## Zoznam skratiek a značiek

**ITD**     **I**nteraural **T**ime **D**ifference – vyjadruje časový rozdiel s ktorým zvuk dorazí do jedného a druhého ucha

**ILD**     **I**nteraural **L**evel **D**ifference – vyjadruje rozdiel v hlasitosti s ktorým zvuk dorazí do uší v dôsledku akustického tieňa hlavy

**NF**       **N**ízkofrekvenčný zvuk - v kontexte našej práce zvuk s frekvenciou nižšou ako 2.8kHz

**RP**       **R**eálne **p**roستredie – miestnosť s reproduktormi v ktorej prebiehala časť experimentu

**VP**       **V**irtuálne **p**roستredie – zvukotesná miestnosť v ktorej prebiehala časť experimentu, kde mal subjekt nasadené slúchadlá a okuliare pre virtuálnu realitu

**VF**       **V**ysokofrekvenčný zvuk - v kontexte našej práce zvuk s frekvenciou vyššou ako 2.8kHz



---

## Slovník termínov

**Anechoický** je bezozvenový.

**Binaurálny** znamená, vzťahujúci sa na obe uši.

**Non-target** je necieľový(kontrolný) zvuk.

**Offset** je čiara na obrázku zobrazujúca dáta.

**Posttest** je záverečná fáza experimentu určená na zistenie efektu tréningu.

**Pretest** je úvodná fáza experimentu .

**Target** je cieľový zvuk.

**Trial** je jedno meranie.

---

## Úvod

Priestorový sluch je z evolučného hľadiska veľmi dôležitým elementom, pomocou ktorého vieme určiť polohu objektov okolo nás aj ak ich nevidíme. Sluch má preto veľmi dôležitú výstražnú funkciu a tiež uľahčuje každodenný život keďže vieme pomocou neho porozumieť reči v hlučnom prostredí, orientovať sa v priestore a podobne. Presné určovanie pozície zdroja zvuku v priestore je umožnené rozložením uší na hlave. To, že do jedného ucha nepríde úplne rovnaký zvuk ako do druhého umožňuje odhadovať vzdialenosť, azimut zdroja ale tiež potlačiť zvuky v pozadí a sústrediť sa len na požadovaný zvuk, keď napríklad hovorí viacero ľudí súčasne. Táto schopnosť je ale do značnej miery limitovaná pre ľudí s poškodeným sluchom, ktorí sa spoliehajú na rôzne protetické zariadenia. U ľudí s kochleárnym implantátom je schopnosť horizontálnej lokalizácie a rozlišovania zvukov v hlučnom prostredí podstatne obmedzená predovšetkým kvôli obmedzenosti takýchto zariadení. Pochopenie spracovávanie zvukov pri normálnom počutí je preto dôležité pre ďalší rozvoj audio-protetickej techniky ale aj napríklad pri vývoji virtuálnej reality.

V bakalárskej práci sa zaoberáme experimentom v ktorom sme sa pokúšali ovplyvniť určovanie polohy zdroja zvuku u ľudí so zdravým sluchom sériou vizuálne-orientovaných tréningov. Dopad tréningu na lokalizáciu zvukov sme testovali jednak v miestnosti s reproduktormi čo budeme označovať ako reálne prostredie(RP) a tiež aj v zvukotesnej miestnosti za pomoci slúchadiel a zariadenia pre virtuálnu realitu čo budeme označovať ako virtuálne prostredie(VP). Výsledky experimentu môžu dopomôcť k lepšiemu pochopeniu spracovávanie zvukových vnemov a tým prispieť k rozvoju virtuálnej reality alebo pomôcť ľuďom s poškodeným sluchom.

V práci sa najprv venujeme teoretickým základom problematiky a zdôvodneniu vybratia konkrétnej experimentálnej procedúry. Následne rozoberáme hypotézy výskumu a ciele samotnej práce. Tretia kapitola rozoberá metódy experimentu a to konkrétne účastníkov, audiologické vyšetrenie na audiometri, prístroje pre experiment, a jeho konkrétne fázy v chronologickej postupnosti. V štvrtej kapitole sa venujeme analýze výsledkov.

---

# 1 Teoretický úvod

Podľa všeobecne prijímanej „duplex theory“ [3] je lokalizácia zvuku v horizontálnej rovine podmienená hlavne dvoma fyzikálnymi parametrami: ITD- interaural time difference a ILD – interaural level difference. ITD vyjadruje časový rozdiel s akým príde zvuk do jedného a druhého ucha. ILD vyjadruje rozdiel v hlasitosti zvuku, ktorý uši zaznamenali. Tento rozdiel existuje kvôli akustickému tieňu hlavy, ktorý tlmí zvuk pre ucho vzdialenejšie od zdroja. Zatiaľ čo ITD je frekvenčne nezávislé, ILD rastie so zvyšujúcou sa frekvenciou [4]. Pri určovaní polohy počutého zvuku sa v rôznej miere spoliehame na obe tieto parametre. Tento jav označujeme ako váženie ITD/ILD. Existuje viacero spôsobov ako zistiť veľkosť váženia jednotlivých parametrov. Bežne používaným prístupom je zafixovať jeden parameter na určitý azimut, a úlohou testovaného subjektu je prispôbiť si druhý parameter tak, aby mal pocit, že zdroj zvuku je priamo pred ním. V experimente [5] bol v prvej fáze použitý spomínaný spôsob. Subjekt bol v anechoickej komore s monitorom a slúchadlami a jeho úlohou bolo prispôbiť si hodnotu jedného parametra, ktorého hodnota bola náhodne zvolená z určitého rozsahu, tak, aby zvuk prichádzal z prostriedku monitora, zatiaľ čo druhý parameter bol zafixovaný na pevnú hodnotu. V ďalšej fáze boli subjektom v jednotlivých trialoch prezentované zvuky s hodnotami ITD/ILD z predošlej fázy, teda pre danú hodnotu zafixovaného parametra taká hodnota druhého parametra ako si zvolil subjekt v predošlej fáze, a tiež kontrolné trialy kde hodnota prispôbovaného parametra bola nula. Úlohou subjektov bolo určiť pozíciu prezentovaného zvuku vzhľadom na ich hlavu, ktorá bola znázornená na monitore. Odpovede na trialy s hodnotami parametrov z predošlej fázy boli posunuté k pôvodnej pozícii prispôbovaného parametra. Autori štúdie z toho usúdili, že tento experimentálny prístup vedie k zvýšeniu váženia prispôbovaného parametra oproti zafixovanému.

V našom experimente sme použili iný prístup popísaný napr. v [6] kde ITD a ILD zložka zvuku boli na rôznych pozíciách v priestore a úlohou subjektu bolo určiť odkiaľ zvuk prichádza. Váhy jednotlivých parametrov sú určené na základe toho ako blízko bola odpoveď subjektu k jednému parametru vzhľadom na druhý. Pri týchto experimentoch sa používajú slúchadlá a spravidla sa vykonávajú v anechoických miestnostiach, teda vo VP. Predošlé experimenty ukazujú, že zmena váženia ITD a ILD pri určovaní polohy zdroja zvuku vo VP pomocou vizuálne orientovaného tréningu je možná [2] avšak nie vždy úspešná [7].

---

V štúdiu [2] bolo 20 účastníkov rozdelených do 2 skupín kde absolvovali experiment pozostávajúci z pretestu na zistenie počiatočných váh ITD a ILD, 7-dňového tréningu a posttestu na zistenie zmeny váženia binaurálnych parametrov. Tréning pozostával z určovania polohy zdroja zvuku pre určité kombinácie ITD a ILD s poskytnutím vizuálneho feedbacku na pozícii jedného z parametrov podľa experimentálnej skupiny. Celý experiment prebiehal vo VP s úzkopásmovými zvukmi s frekvenciou 2.8kHz. Po tréningu sa zvýšilo váženie toho parametra, ktorý korešpondoval s vizuálnym feedbackom.

Vo VP je možné simulovať ITD časovým rozdielom príchodu zvuku do jedného a druhého slúchadla a ILD rozdielom hlasitosti medzi pravým a ľavým slúchadlom. Takýmto spôsobom vieme spoľahlivo nasimulovať všetky azimuty zdroja zvuku v horizontálnej rovine. V RP s použitím reproduktorov nie je takéto presné určenie hodnôt ITD a ILD možné. Nakoľko je ITD frekvenčne nezávislé, ale ľudia sú naň citliví len pre nízke frekvencie(0.5 – 2kHz)[6], kdežto ILD je frekvenčne závislé a rastie so stúpajúcou frekvenciou, pričom najviac vážené je v rozmedzí 4-16kHz, je možné v RP zisťovať váženie týchto parametrov pomocou zvukov s vysokou a nízkou frekvenciou kde vysokofrekvenčné(VF) zvuky budú predstavovať ILD a nízkofrekvenčné(NF) ITD.

Týmto spôsobom vieme porovnávať výsledky z VP a RP čo je kľúčovou časťou nášho experimentu.

---

## 2 Hypotézy a ciele

V predošlej štúdií [2] na ktorú náš experiment nadväzuje, sa zistilo, že je možné zmeniť váženie ITD/ILD sériou tréningov vo VP. Cieľom bakalárskej práce je preskúmať možnosť zmeny váženia binaurálnych parametrov vizuálne orientovaným tréningom v RP – to je s prítomnosťou ozveny pri použití reproduktorov. Reálne prostredie má oproti virtuálnemu nevýhodu práve kvôli prítomnosti ozveny avšak v reálnom prostredí je lokalizácia zvukov pre subjekty jednoduchšia, viac intuitívna a menej vyčerpávajúca v porovnaní s virtuálnym prostredím.

Pre splnenie cieľa bolo potrebné splniť nasledujúce úlohy, ktorým sa postupne budeme venovať v jednotlivých kapitolách našej práce.

1. Pripraviť experimentálny setup pre meranie audiogramov a spolupracovať na príprave experimentálneho setupu pre hlavný experiment vo virtuálnom a reálnom prostredí.
2. Na základe poskytnutých MATLAB skriptov vypomáhať pri modifikácii experimentálnej procedúry pre prezentovanie reálnych a virtuálnych sluchových a vizuálnych stimulov.
3. Nazberať experimentálne dáta na nových subjektoch.
4. Analyzovať a vyhodnotiť experimentálne dáta.

Hypotézy ktoré takto chceme overiť sú nasledovné:

1. Tréningom, sa v závislosti od skupiny, dosiahne zmena váženia VF alebo NF komponentu zvuku.
2. Zmena váženia spektrálnych komponentov zvuku sa zovšeobecni na zmenu váženia ITD/ILD vo VP.

V priebehu tréningu boli subjekty tréňované určiť polohu cieľového zvuku(target), ktorý hral súčasne s necieľovým zvukom(non-target). Tieto zvuky sa odlišujú výškou frekvencie(VF a NF), a to, ktorý bol targetom, závisí od experimentálnej skupiny. Ak bol tréning úspešný, výsledkom má byť zmena pomeru váženia jednotlivých komponentov zvuku pri určovaní polohy zdroja zvuku v prospech target komponentu, čo možno vyjadriť ako zníženie odchýlky ku non-target zvuku.

Nakoľko sú ľudia citliví na ITD pre NF zvuky a ILD rastie s frekvenciou, čiže ľudia sú viac citliví na ILD pre VF zvuky, hypotetizujeme , že zmena váženia spektrálnych

---

komponentov zvuku sa v prípade úspešnosti tréningu prejaví aj v zmene váženia ITD/ILD vo virtuálnom prostredí. Táto zmena sa prejaví tak, že subjekty v skupine kde bol targetom VF komponent začnú viac vážiť ILD, a skupina kde bol targetom NF komponent začne viac vážiť ITD.

---

## **3 Metódy**

### **3.1 Účastníci**

Celého experimentu sa zúčastnilo 33 účastníkov so zdravým sluchom ktorý bol audiometricky otestovaný. Horná hranica prahu počutia pre kvalifikáciu na experiment bola stanovená na 20dB. 13 subjektov bolo zaradených do HF skupiny a 12 subjektov do LF skupiny. Subjekty neboli informovaný ohľadom príslušnosti ku skupine alebo poskytovanom tréningu. Ostatné subjekty boli zaradené do tretej skupiny, ktorou sa ale v tejto bakalárskej práci nezaobráame. Všetci zúčastnení podpísali informovaný súhlas a výskumný protokol bol schválený etickou komisiou UPJŠ.

### **3.2 Testovanie na audiometri**

Na otestovanie prahu počutia účastníkov sme použili audiometer SIBLESOUND 400. Celé vyšetrenie trvalo maximálne 15 minút. Test bol vykonaný vzdušným vedením bez maskovania.

#### **3.2.1 Príprava testu**

Audiometer bol pripojený podľa návodu a nastavený na „pure-tone“ test. Testovali sme na pulzujúcich tónoch nakoľko sú podľa štúdie [1] pacientmi preferované. Každý subjekt bol pred vyšetrením oboznámený s priebehom testu a bola mu vysvetlená jeho úloha. Počas vyšetrenia bol subjekt v zvukotesnej miestnosti a mal na hlave slúchadlá so samostatným kanálom pre každé ucho.

#### **3.2.2 Priebeh testu**

Samotnému meraniu predchádzal tréning aby sa zistilo či subjekt správne porozumel inštrukciám a tiež kvôli zisteniu inicializačnej hodnoty prahu počutia. Na frekvencii 1000Hz sme pustili zvuk s intenzitou 40dB a postupne znižovali intenzitu o 20dB až pokiaľ subjekt zvuk nepočul, následne sa zvyšovala hladina o 5dB po prvú počuteľnú hladinu. Tá bola stanovená ako referenčná hodnota prahu počutia. Vždy keď subjekt počul zvuk stlačil reakčné tlačidlo. Rovnaký postup bol zopakovaný aj pre druhé ucho.

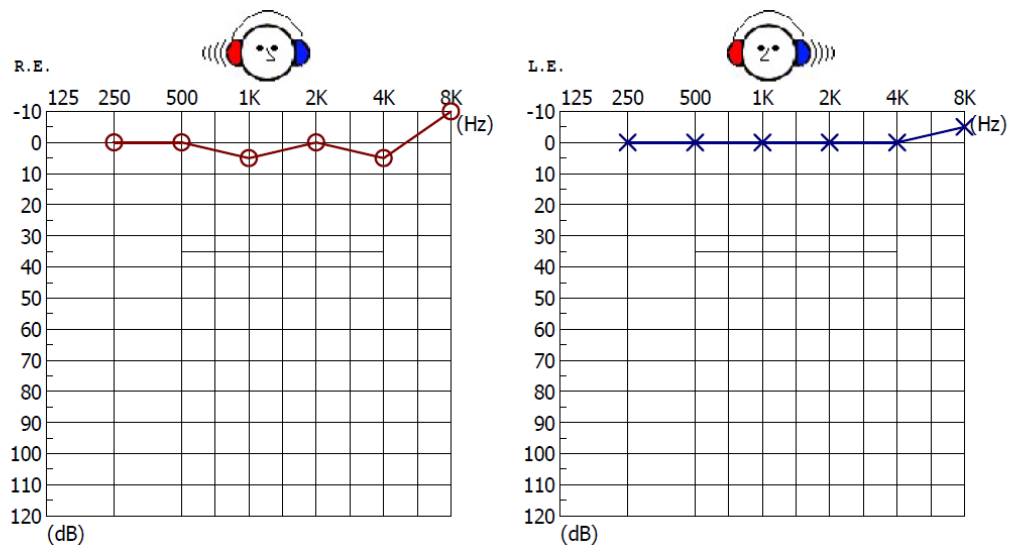
---

Po tréningu nasledoval samotný test. Testovalo sa 6 frekvencií(250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz, 8000Hz) podľa postupu uvedeného v manuáli na obsluhu audiometra[8]. Postup bol nasledovný:

1. Vyberieme testovanú frekvenciu a aplikujeme zvuk 10dB pod prahom počutia zaznamenaným počas tréningu. Postupne zvyšujeme o 5dB až na prvú hladinu kde subjekt zareaguje.
2. Znížime hlasitosť o 10dB a opäť zvyšujeme o 5dB až na hladinu ktorú subjekt počuje. Opakujeme bod 2 až kým nezaznamenáme 3 odpovede na rovnakej hlasitosti počas maximálne 5 zvýšení. Ak sa tak nestane zvýšime hlasitosť o 10dB a postup opakujeme od bodu 1.
3. Vyberieme ďalšiu frekvenciu a postup opakujeme.

### 3.2.3 Záver testu

Výsledkom merania je audiogram so zaznamenanými hodnotami prahov počutia. Subjekt dostal zadarmo vytlačenú verziu (Obr. 1). Ak hodnota prahu počutia neprekročila na žiadnej frekvencii hladinu 20dB, subjekt sa mohol zúčastniť experimentu.



Obr. 1: Audiogram vygenerovaný audiometrom SIBLESOUND 400

## 3.3 Experimentálna procedúra

Experiment pozostával z 3 fáz. Najprv bol vykonaný pretest vo VP a RP, nasledoval 3-dňový tréning v RP a v posledný tréningový deň aj posttest, ktorý bol totožný s pretestom. Celkovo sme v experimente na základe frekvencií rozlišovali 5 druhov zvukov. 5.6 kHz a 11.2 kHz tóny považujeme za vysokofrekvenčné (VF), 0.7 kHz a 0.35



---

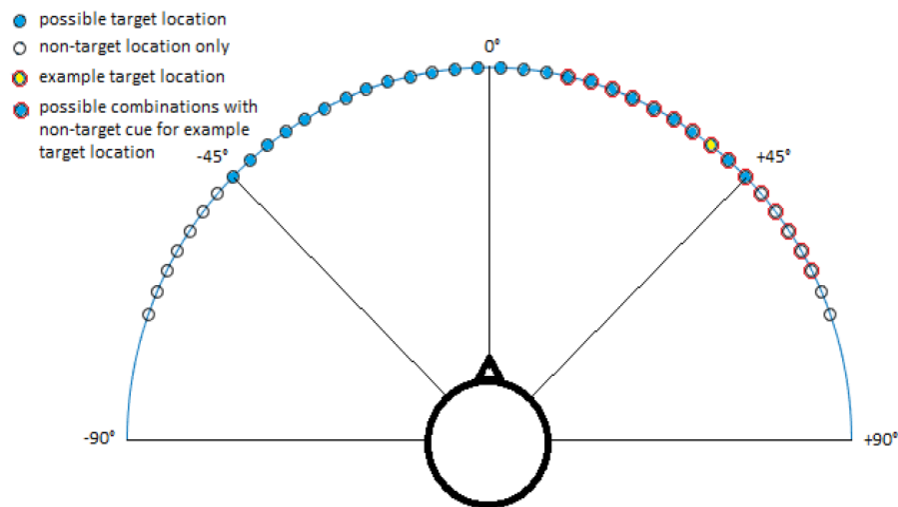
kHz považujeme za nízkofrekvenčné (NF) a 2.8 kHz je stredná frekvencia. Nakoľko je ITD viac vážené pre NF zvuky a ILD je viac vážené pre VF zvuky umožňuje nám uvedené rozdelenie frekvencií simulovať ITD a ILD aj v RP. V RP boli zvuky generované zvukovou kartou RME Fireface a posielané cez zosilňovač KNOLL MX1255 do reproduktorov Canton Plus X3. Vo VP slúžil na prezentáciu vizuálnych stimulov headset Oculus Development Kit 2 a na prezentáciu zvukových stimulov slúchadlá Sennheiser HD 800 S do ktorých prichádzal zvuk generovaný systémom pre viacnásobné vstupy a výstupy TDT RX8.

### 3.3.1 Pretest

Najprv bol vykonaný pretest vo virtuálnom prostredí. Vo zvukotesnej miestnosti mal subjekt na očiach okuliare pre virtuálnu realitu kvôli poskytovaniu vizuálneho feedbacku, a na ušiach slúchadlá z ktorých prichádzal zvuk vo forme šumu s frekvenciou 2.8kHz ktorého polohu mal určiť. Prvých 80 trialov(meraní) bolo tréningových, určených predovšetkým na zoznámenie sa s prostredím(pretrening). Subjekt sa pozeral pred seba, kde videl trojuholník symbolizujúci stred(nulový azimut) a stlačil tlačidlo ctrl. Následne prišiel zvuk, zložený z určitej hodnoty ITD a ILD, ktorý predstavoval pozíciu v priestore. Celkovo sme mali 40 rôznych polôh pre ILD a ITD, s rozstupom medzi jednotlivými pozíciami  $3.6^\circ$ , z ktorých niektoré sa používali na prezentovanie target(teda poloha ITD pre LF skupinu a poloha ILD pre HF skupinu) aj non-target(poloha ITD pre HF skupinu a poloha ILD pre LF skupinu) zložiek a iné len na prezentovanie non-target zložiek(obr.2). Non-target pozície mohli byť od target pozície vzdialené do rozsahu  $25.2^\circ$ . Tento dizajn bol prevzatý z práce Maïke Ferber [2].

---

## REWEIGHTING OF BINAURAL CUES



**Obr. 2 :** Náčrt možných target a non-target pozícií vo virtuálnej realite prevzatý zo štúdie [2]

Úlohou subjektu bolo otočiť hlavu na miesto odkiaľ počul prichádzať zvuk a túto pozíciu potvrdiť stlačením ctrl. Potom sa zobrazil vizuálny feedback v podobe presýpacích hodín ukazujúci skutočnú polohu stimulu, následne sa subjekt otočil k feedbacku a potvrdil pozíciu stlačením ctrl. Potom sa vrátil na stred a nasledoval ďalší trial. Po tomto pretréningu nasledovalo 446 pretestových meraní, ktoré boli podobné pretréningovým meraniam s tým rozdielom, že nebol poskytnutý žiaden vizuálny feedback. Všetky trialy boli prezentované v náhodnom poradí. Po každých 150 meraniach mal subjekt možnosť odpočinúť si.

Po absolvovaní pretestu vo VP nasledoval pretest v reálnej miestnosti s reproduktormi. Jedenásť reproduktorov bolo rozmiestnených do polkruhu od -56.25° do 56.25° azimutu s posunom 11.25°, kde všetky boli „non-target“ a stredných 9 bolo „target“ (obr.3). Z reproduktorov prichádzal zvuk pozostávajúci z vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej zložky

Trialy v RP mohli byť nasledovné: „2-kanálové“, „4-kanálové“ alebo s „2.8kHz“ komponentom. Pri 2-kanálových bol stále jeden komponent VF a jeden NF, pričom mohli byť od seba vzdialené o jednu alebo dve pozície (Tab.1). Pri 4-kanálových hrali všetky komponenty okrem 2.8kHz súčasne, pričom všetky VF komponenty alebo všetky NF komponenty hrali z rovnakého reproduktora (konzistentná dvojica) a zvyšné dva komponenty hrali z rôznych reproduktorov pričom mohli byť vzdialené od konzistentnej dvojice o nula, jednu alebo 2 pozície v rovnakom smere (Tab. 2). Pri 2.8kHz trialoch hral 2.8kHz komponent súčasne s jedným VF alebo NF komponentom vzdialeným o jednu alebo dve pozície (Tab.3).

**Tab. 1: Príklady 2-kanálových trialov. Čísla vyjadrujú pozíciu reproduktorov z ktorých prichádzal zvuk v danom triale.**

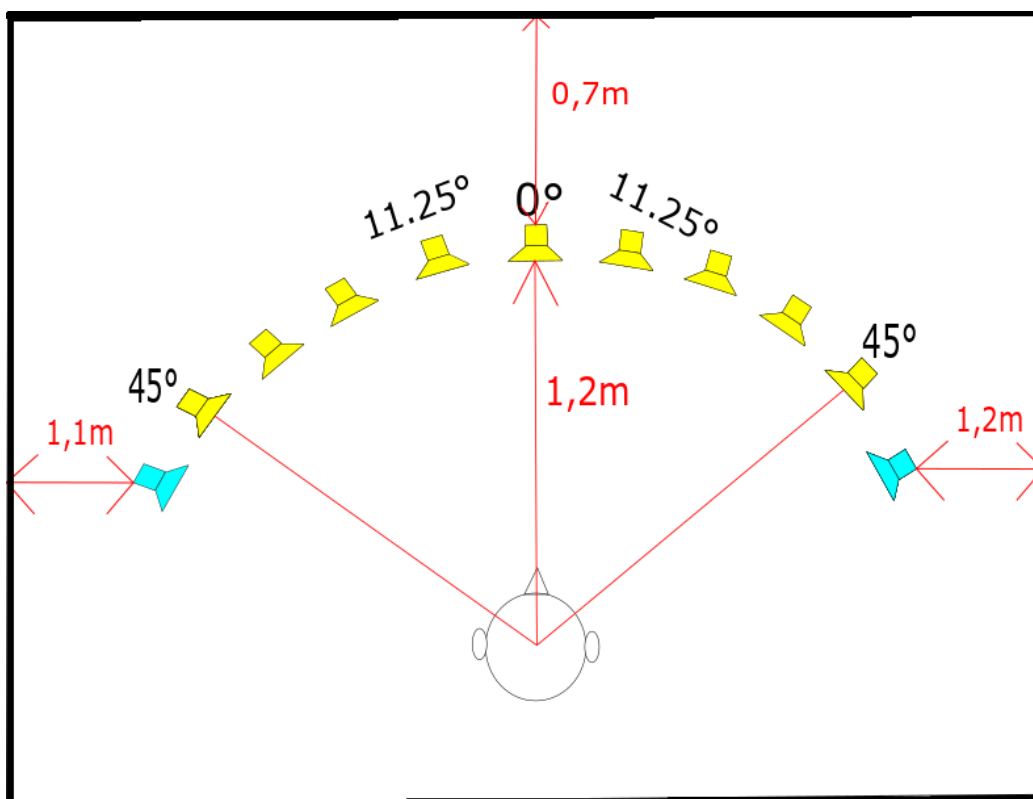
Komponent	VF1	VF2	NF1	NF2	2.8kHz
Trial					
1.	5	-	7	-	-
2.	-	8	8	-	-
3.	-	3	4	-	-
4.	10	-	-	8	-
5.	-	7	-	6	-

**Tab. 2: Príklady 4-kanálových trialov. Čísla vyjadrujú pozíciu reproduktorov z ktorých prichádzal zvuk v danom triale.**

Komponent	VF1	VF2	NF1	NF2	2.8kHz
Trial					
1.	3	4	4	4	-
2.	6	6	7	8	-
3.	6	6	8	7	-
4.	3	2	4	4	-
5.	7	7	7	6	-

**Tab. 3: Príklady trialov s 2.8kHz komponentom. Čísla vyjadrujú pozíciu reproduktorov z ktorých prichádzal zvuk v danom triale.**

Komponent	VF1	VF2	NF1	NF2	2.8kHz
Trial					
1.	2	-	-	-	3
2.	-	-	4	-	3
3.	-	2	-	-	3
4.	-	-	-	6	5
5.	-	7	-	-	8



Obr. 3 : Náčrt rozloženia reproduktorov v reálnej miestnosti . Žlté znázorňujú polohu možných target reproduktorov a modré polohu reproduktorov ktoré boli len non-target.

Subjekt mal na čele senzor snímajúci polohu hlavy a jeho úlohou bolo otočiť hlavu k miestu odkiaľ počul zvuk prichádzať a potvrdiť pozíciu stlačením klávesy enter. Následne sa otočil späť na stred a po opätovnom stlačení enteru nasledoval ďalší trial. Počas pretestu boli 3 prestávky, počas ktorých si subjekt mohol oddýchnuť.

### 3.3.2 Tréning

Tréning prebiehal len v RP a pozostával z 3 sedení v troch po sebe nasledujúcich dňoch. Úloha subjektu bola rovnaká ako v preteste s tým rozdielom, že po potvrdení pozície zvuku sa zobrazil feedback v podobe zeleného trojuholníka spolu s opakujúcim sa zvukom. Subjekt sa mal následne otočiť k miestu feedbacku a potvrdiť pozíciu stlačením enteru. Potom sa mal otočiť späť na stred a nasledoval ďalší trial. Od potvrdenia pozície zvuku až po začiatok ďalšieho trialu bolo počuť prichádzať zvuk z pozície zeleného trojuholníka.

---

Vizuálne vodítko sa zobrazovalo na pozícii target reproduktora, čo bol pre HF skupinu reproduktor z ktoré hral VF komponent a pre LF skupinu reproduktor z ktorého hral NF komponent.

### **3.3.3 Posttest**

V posledný tréningový deň bol po tréningu vykonaný posttest ktorý bol totožný s pretestom až nato, že najprv prebehla časť v reálnej miestnosti a potom vo virtuálnej realite avšak bez prvotného pretréningu.

---

## 4 Analýzy a Výsledky

Cieľom analýz je zistiť do akej miery sa v dôsledku tréningu zmenilo váženie VF a NF zvukov v postteste v porovnaní s pretestom a či sa táto zmena prejavila aj vo vážení ITD/ILD. Všetky analýzy boli spravené v softvéri MATLAB.

### 4.1 Spôsoby analyzovania

Konkrétna realizácia analýz sa líšila v závislosti od druhu prostredia, teda reálne alebo virtuálne prostredie a taktiež podľa typov stimulov v reálnom prostredí. Všade sme ale skúmali odpovede subjektov v preteste a postteste pre všetky pozície target a non-target zložiek stimulov. Na základe týchto analýz sme dospeli k záverom o účinnosti tréningu na jednotlivé testovacie skupiny. V tejto práci sú analyzované trialy z VP a 2-kanálové trialy z RP nakoľko sú najviac podobné tým z VP a prinášajú najzaujímavejšie výsledky. Analýzy 4-kanálových trialov sú kvôli ilustrácii pripojené v appendixe a podporujú výsledky 2-kanálových dát.

Keďže pretest a posttest boli totožné pre obe skupiny, získané dáta sme roztriedili podľa identifikačných symbolov jednotlivých subjektov za pomoci regulárnych výrazov. Analýzy boli následne vykonané pre každý subjekt zvlášť za účelom odhaliť prípadné extrémne hodnoty, ktoré by mohli spôsobovať skresľovanie výsledkov pre celú skupinu, a nakoniec boli výsledky analyzované ako priemer pre celú skupinu.

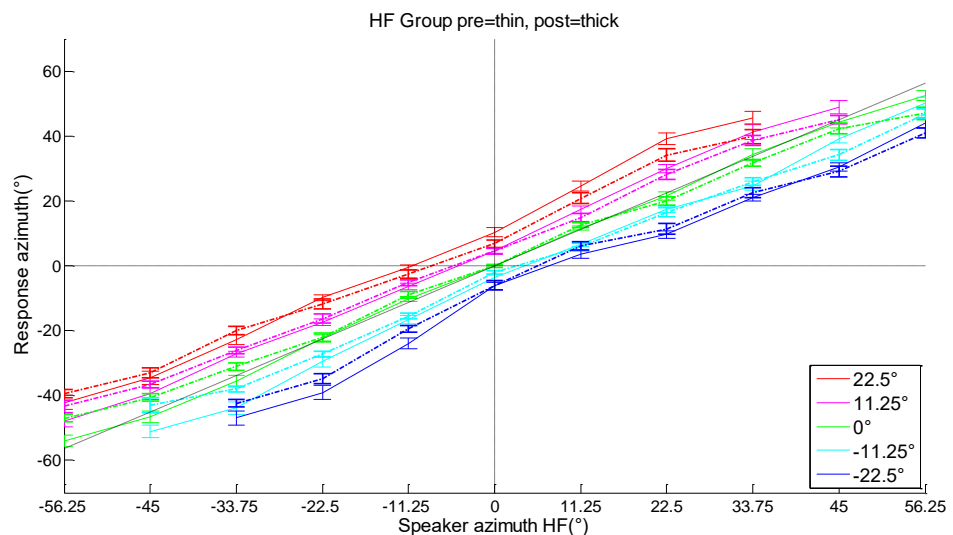
### 4.2 2-kanálové dáta

V RP sme analyzovali odpovede subjektov na jednotlivé trialy kde bol stimul zložený práve z jednej VF a jednej NF zložky pre rôzne rozostupy reproduktorov v závislosti od polohy VF reproduktora. Takto navrhnuté trialy boli veľmi podobné tým vo VP a preto bolo možné ľahko sledovať efekt tréningu v RP na výsledky vo VP.

#### 4.2.1 Odpovede subjektov ako funkcia vysokofrekvenčného reproduktora

Na obrázku 4 môžeme vidieť odpovede subjektov pre jednotlivé rozostupy reproduktorov. Offset je odpoveď subjektu na trial kde pozícia VF komponentu je znázornená na x-ovej osi a pozícia NF komponentu vyjadrená ako odchýlka od VF komponentu. Pozícia reproduktora s nízkofrekvenčnou zložkou je znázornená číslom

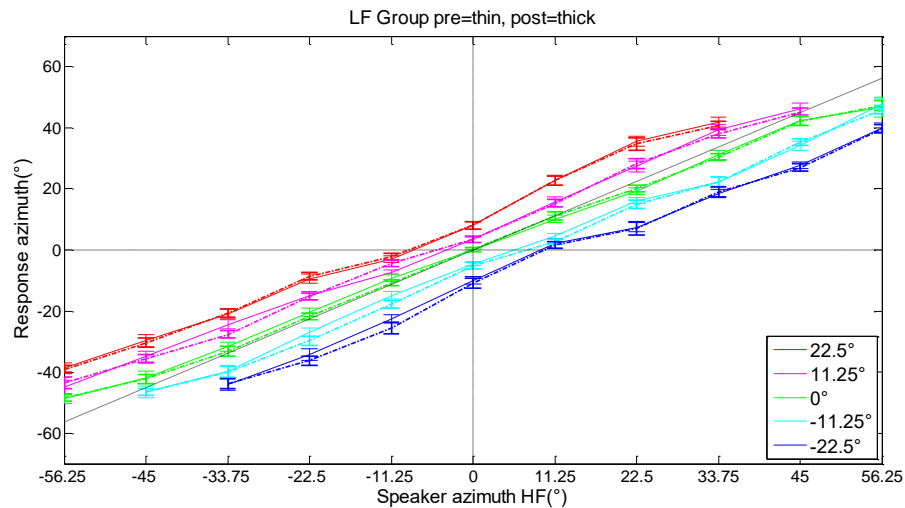
vyjadrujúcim odstup od reproduktora s vysokofrekvenčnou zložkou. Kladné číslo znamená, že bola od neho napravo o jednu(11.25) alebo 2 pozície(22.5), záporné číslo, že bola naľavo o jednu(-11.25) alebo 2 pozície(-22.5) a nula znamená že bola totožná s pozíciou vysokofrekvenčného reproduktora. Prerušovaná farebná čiara znázorňuje posttest a spojitá farebná čiara zasa pretest.



**Obr. 4 :** Odpovede subjektov z HF skupiny pre jednotlivé rozostupy reproduktorov ako funkcia pozície vysokofrekvenčného reproduktora, spojitá čiara znázorňuje odpovede v preteste a prerušovaná odpovede v postteste. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.

Na obrázku 4 možno vidieť, že prerušované čiary, teda výsledky posttestov pre jednotlivé rozostupy reproduktorov, sú vo všeobecnosti bližšie k čiernej diagonále, ktorá predstavuje pozície VF zložky stimulov, ako výsledky pretestov(spojité čiary). Z toho vyplýva, že HF skupina sa v postteste viac priblížila k hodnotám reproduktora s VF zložkou a to pre všetky možnosti rozstupov, a teda subjekty začali viac vážiť vyššie frekvencie po tréningu v porovnaní s vážením pred tréningom.

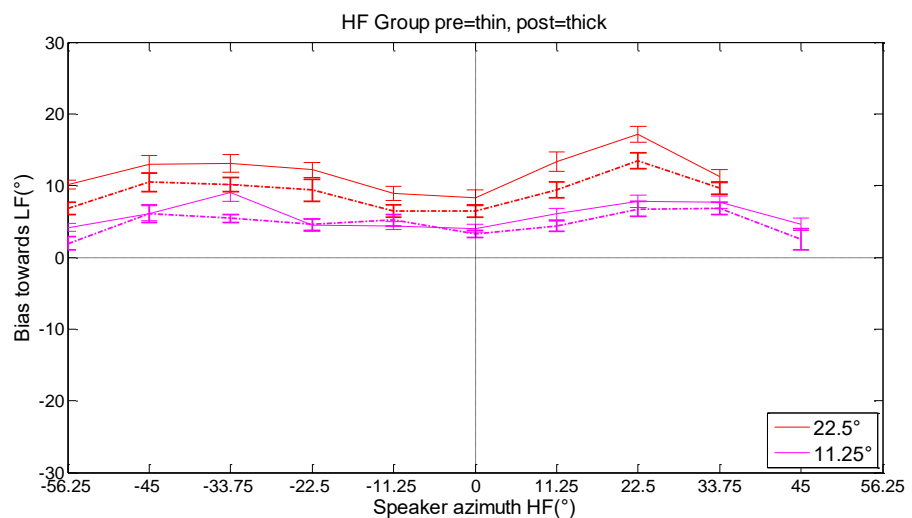
Analogická analýza pre LF skupinu na obrázku 5 ale ukazuje, že táto zmena váženia pre LF skupinu nastala vo veľmi obmedzenej miere. Výsledky posttestov(prerušované čiary) takmer splývajú s výsledkami pretestov(spojité čiary) a nenastal žiaden viditeľný posun vo vzťahu k čiernej diagonále ako tomu bolo u HF skupiny. Keďže LF skupina bola trénovaná na nízke frekvencie očakávaný posun výsledkov posttestu bol smerom od čiernej diagonály.



**Obr. 5 : Odpovede subjektov z LF skupiny pre jednotlivé rozostupy reproduktorov ako funkcia pozície vysokofrekvenčného reproduktora, spojité čiara znázorňuje odpovede v preteste a prerušovaná odpovede v postteste. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.**

#### 4.2.2 Odchýlka ku nízko-frekvenčnému komponentu

Odpovede subjektov pre jednotlivé pozície reproduktorov možno vyjadriť ako odchýlku od odpovedí na konzistentné trialy – t.j. tie kde bol VF aj NF komponent na rovnakej pozícii – teda offset 0. Pre jednotlivé skupiny sme z dát na obrázkoch 4 a 5 odčítali jednotlivé offsety (22.5, 11.25, -11.25, -22.5) od offsetu 0. Dáta kde bola NF zložka naľavo od VF zložky sme preklopili napravo a tým sme získali dvojnásobný počet dát čo eliminovalo šum a prinieslo jasnejšie výsledky. Prerušovaná čiara predstavuje odchýlku v postteste a spojité odchýlku v preteste.

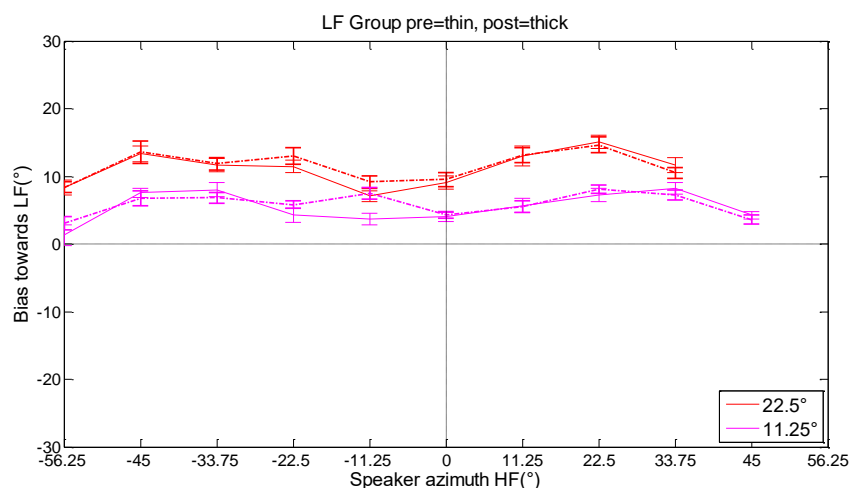




**Obr. 6 : Odchýlka ku NF komponentu pre jednotlivé rozostupy reproduktorov ako funkcia pozície VF komponentu pre HF skupinu – preklopené dáta. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.**

Pre HF skupinu je v postteste zreteľný posun odchýlky smerom ku VF komponentu v porovnaní s pretestom a to pre všetky rozostupy reproduktorov. Odchýlka je badateľne väčšia pre väčší rozostup(22.5°). To znamená, že subjekty začali viac vážiť VF komponent stimulu, čo bolo cieľom tréningu.

V LF skupine bol posun, okrem lokácie -11,25°, menej viditeľný na celom rozsahu HF reproduktorov a pre všetky rozostupy reproduktorov. To znamená, že u subjektov trénovaných na nízke frekvencie sa nijako výrazne neprejavila zmena váženía jednotlivých komponentov, nakoľko odchýlky posttestu a pretestu sú veľmi podobné.



**Obr. 7 : Odchýlka ku NF komponentu pre jednotlivé rozostupy reproduktorov ako funkcia pozície VF komponentu pre LF skupinu – preklopené dáta. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.**

Analýzy odchýliek ku NF komponentu potvrdzujú výsledky z analýz odpovedí a teda, že kým HF skupina sa úspešne naučila viac vážiť VF komponent zvuku v LF skupine výrazná zmena nenastala, avšak pre obe tréningové skupiny sa v RP znížila odchýlka ku non-target komponentu.

Analýza rozptylu pre opakované merania(ANOVA) s tromi faktormi – lokácia(od -56.25 po 33.75 s krokom 11.25, teda 9 pozícií), fáza(pretest, posttest) a offset(inkonzistencia 22.5 a 11.25) ukázala pre HF skupinu signifikantný efekt vo fázach [  $F(1,12) = 17.39$ ;  $p < 0.01$  ], offsete [  $F(1,12) = 336.16$ ;  $p < 0.01$  ] aj lokácii [  $F(8,96) = 10.01$ ;  $p < 0.01$  ] a tiež v interakcii fáza x offset [  $F(1,12) = 14.84$ ,  $p < 0.01$  ] a lokácia x offset

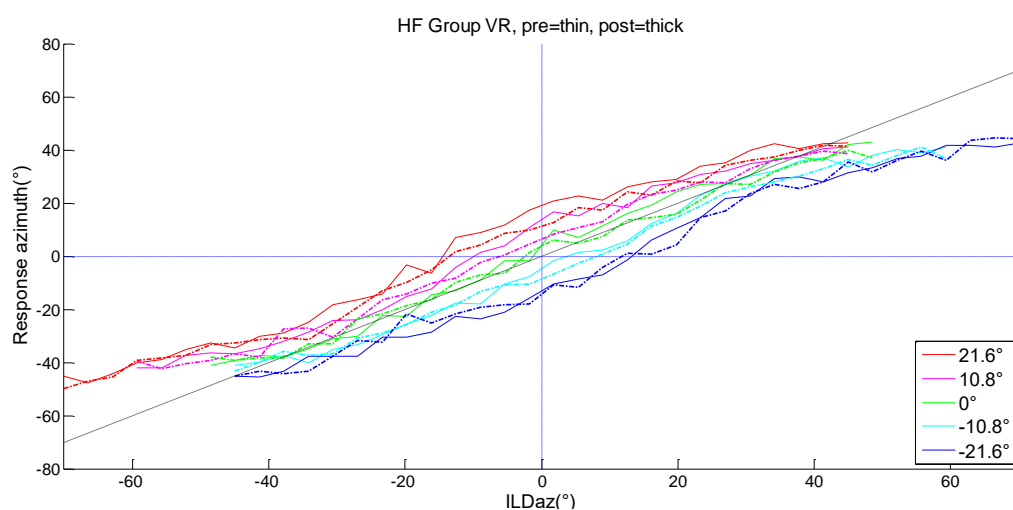
[F(8,96) = 8.77, p<0.01]. Pre LF skupinu nastal signifikantný efekt v offsete [F(1,11) = 364.65;p<0.01] , lokácii [F(8,88) = 9.11;p<0.01] a interakcii lokácia x offset [F(8,88) = 10.71;p<0.01]. Pre fázy v LF skupine nebol rozdiel v odchýlke ku NF reproduktoru signifikantný. Po pridaní 4 faktora – testovacej skupiny(HF, LF) – bola zistená aj interakcia skupina x fáza [F(1,23) = 14.74;p<0.01]. Výsledky ANOVY potvrdzujú úspešnosť tréningu pre HF skupinu.

### 4.3 VP dáta

Vo VP sme sledovali váženie ITD a ILD parametra v preteste a postteste. Analýzy sú vykreslené ako funkcia pozície ILD zložky.

#### 4.3.1 Odpovede subjektov ako funkcia polohy ILD

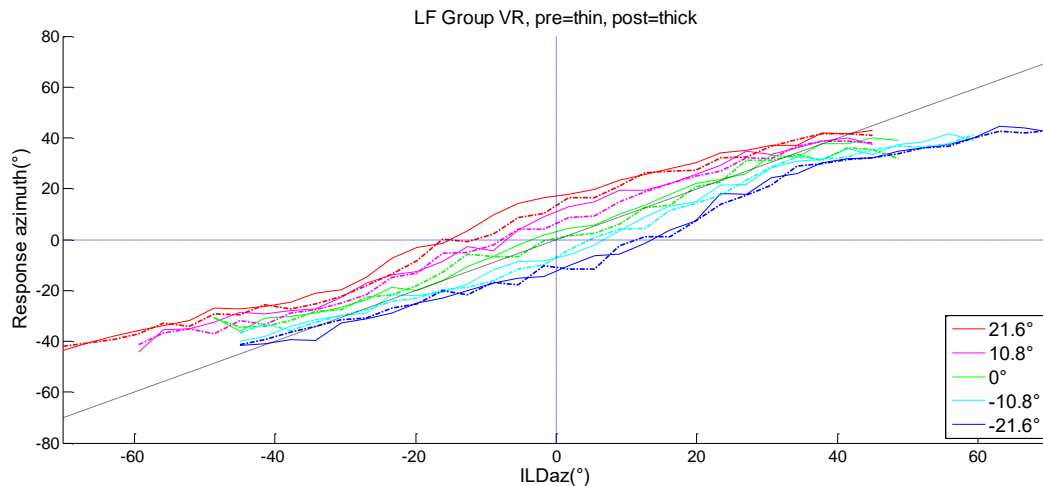
Na obr. 8 vidíme analýzu odpovedí subjektov v HF skupine ako funkciu pozície ILD komponentu. Analýza je analógiou k analýze pre RP na obrázku 4. Offset je odpoveďou subjektu na trialy kde je pozícia ILD vyjadrená na x-ovej osi a pozícia ITD je vyjadrená ako vertikálny posun od ILD. Nakoľko bolo možných až 15 rôznych pozícií ITD od jedného ILD komponentu, tak odchýlky sú spriemernené po susedných trojiciach(napr. offset 21.6 je priemerom odpovedí pre trialy kde bola ITD zložka od ILD zložky vzdialená o 25.2°,21.6° a 18°).



**Obr. 8 :** Odpovede subjektov z HF skupiny pre jednotlivé priemery rozstupov ITD/ILD ako funkcia pozície ILD zložky, spojitá čiara znázorňuje odpovede v preteste a prerušovaná odpovede v postteste. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.

---

Na obr. 9 vidíme analýzu odpovedí vo VP pre LF skupinu. Z obrázku možno dedukovať, že subjekty porozumeli úlohe a odchýlky sú konzistentné pre jednotlivé pozície reproduktorov.

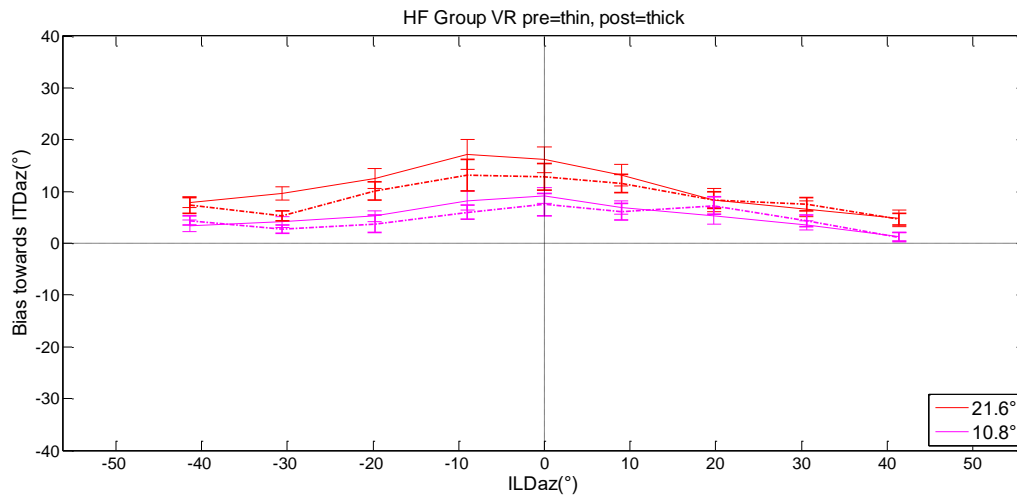


**Obr. 9 :** Odpovede subjektov z LF skupiny pre jednotlivé priemery rozostupov ITD/ILD ako funkcia pozície ILD zložky, spojitá čiara znázorňuje odpovede v preteste a prerušovaná odpovede v postteste. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.

#### 4.3.2 Odchýlka ku ITD komponentu

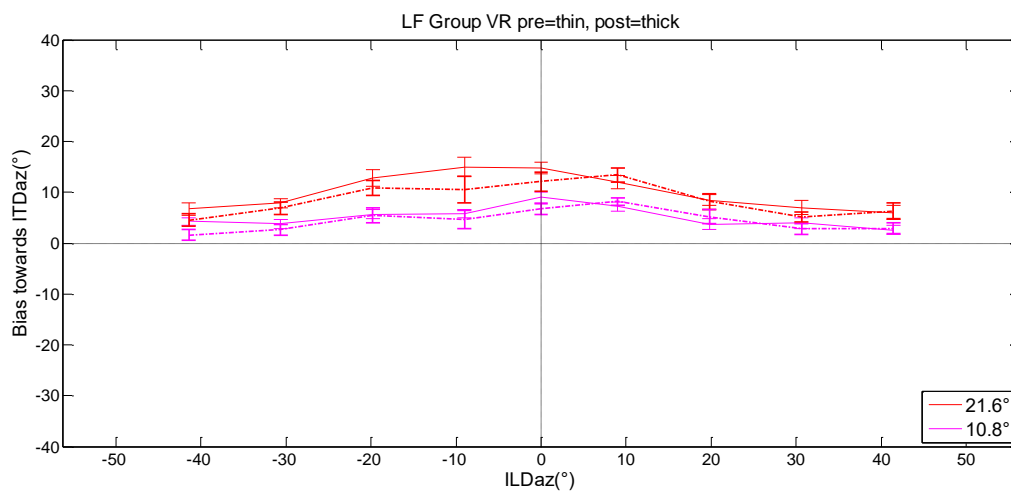
Podobne ako pri analýzach v RP, aj tu sme vypočítali odchýlku od nulového offsetu k ITD komponentu. Dáta kde bola ITD zložka naľavo od ILD zložky sme preklopili napravo a tým sme získali dvojnásobný počet dát. Kvôli zašumeniu dát sme spriemernili lokácie po trojiciach a v prostriedku dvojicu.

Na obrázku 10 vidíme výsledky pre HF skupinu po preklopení dát a spriemernení cez trojice. Odchýlku ku ITD komponentu nastala pre obe úrovne inkonzistencie ale pre väčšiu inkonzistenciu(21.6°) je rozdiel medzi pretestom a posttestom väčší.



**Obr. 10 :** Odchýlka ku ITD komponentu pre jednotlivé priemery rozostupov ITD/ILD ako funkcia ILD komponentu pre HF skupinu – preklopené dáta. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.

Obrázok 11 ukazuje analogickú analýzu pre LF skupinu. Odchýlka nenastala ale žiadaným smerom, a teda od non-target komponentu, ale ku non-target komponentu rovnako ako tomu bolo v HF skupine.



**Obr. 11 :** odchýlka ku ITD komponentu pre jednotlivé priemery rozostupov ITD/ILD ako funkcia ILD komponentu pre LF skupinu – preklopené dáta. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.

Vo VP nastala odchýlka rovnakým smerom pre obe skupiny a to ku ILD komponentu. ANOVA s 3 faktormi – lokácia(od  $-45^\circ$  po  $45^\circ$  s krokom  $3.6^\circ$ , 27 pozícií ), offset(inkonzistencia 21.6 a 10.8) a fáza(pretest, posttest) ukázala signifikantný efekt v HF skupine pre offset [ $F(1,11) = 44.94$ ;  $p < 0.01$ ] a lokáciu [ $F(26,286) = 4.65$ ;  $p < 0.01$ ]. V LF skupine sa taktiež ukázal signifikantný efekt pre offset [ $F(1,11) = 125.45$ ;  $p < 0.01$ ], lokáciu [ $F(26,286) = 5.77$ ;  $p < 0.01$ ] aj fázou [ $F(1,11) = 7.56$ ;  $p < 0.05$ ]. Po pridaní 4 faktora-

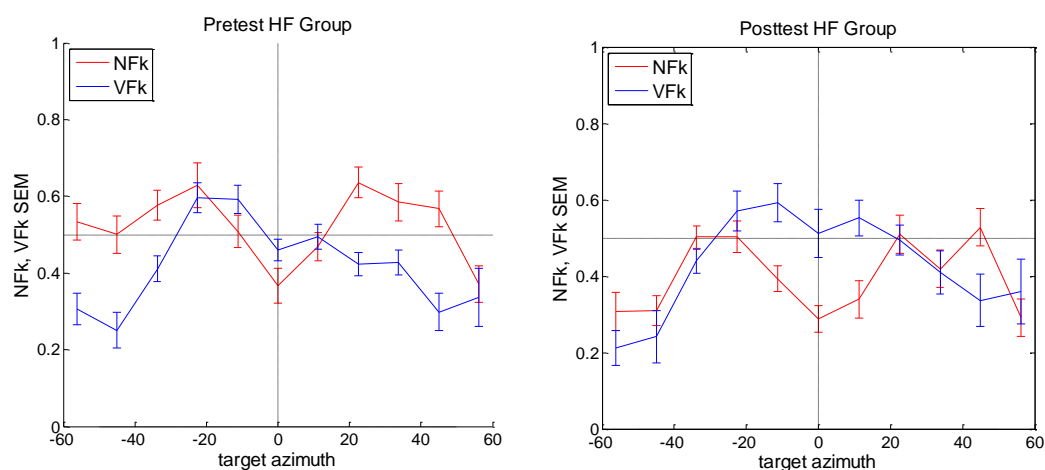
skupiny(LF,HF) – bol, okrem iného, prítomný signifikantný efekt pre fázu [ $F(1,22) = 10.77$  ; $p<0.01$ ] avšak žiaden v interakcii so skupinou ani skupina samostatne. Z toho možno usudzovať, že zmena váženía ITD/ILD komponentu sa udiala nezávisle na tréningovej skupine.

#### 4.4 Regresný model

Na analýzu dát a zistenie váženía jednotlivých parametrov vo VP a RP sme použili regresný model. Pre 2-kanálové trialy v RP bol model definovaný ako:

$$R(\text{az}, \Delta\text{NF}, \Delta\text{VF}) = \text{NFk} * \Delta\text{NF} + \text{VFk} * \Delta\text{VF} + Q,$$

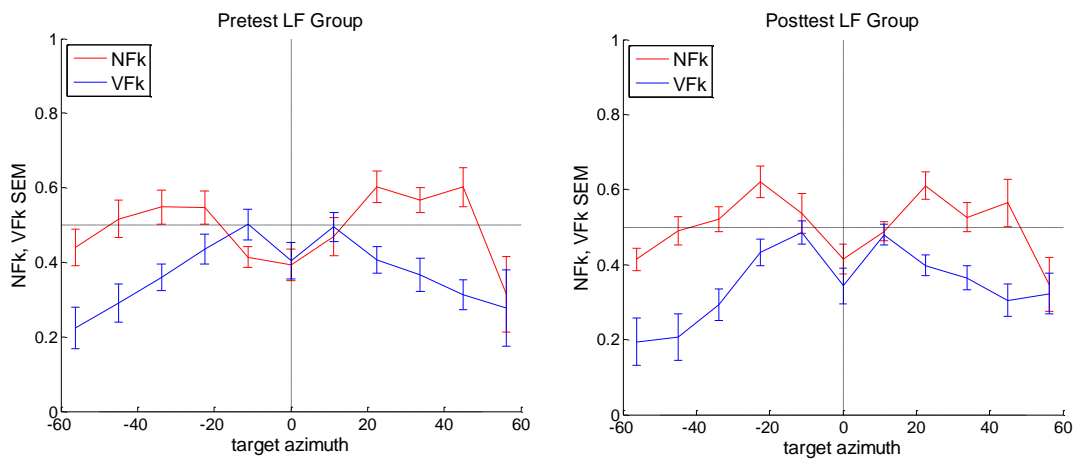
kde R je azimut odpovede subjektu v danom triali, v ktorom  $\text{az} + \Delta\text{NF}$  a  $\text{az} + \Delta\text{VF}$  sú azimuty nízkofrekvenčnej a vysokofrekvenčnej zložky stimulu, a NFk, VFk a Q predstavujú aproximované parametre regresného modelu, kde NFk a VFk sú smernice určujúce váhu parametrov a Q je celková odchýlka odpovedí pre azimut az a jeho okolie. Tento model bol jednotlivo použitý pre každý azimut az od  $-45^\circ$  do  $+45^\circ$  s tým, že fitovacia procedúra vždy vybrala len trialy, ktoré sa od azimutu az líšili len maximálne jedným z posunov  $\Delta\text{NF}$  a  $\Delta\text{VF}$ . Na obrázku 12 sú znázornené hodnoty NFk a VFk parametrov pre HF skupinu v preteste a postteste ako funkcia azimutu.



**Obr. 12: Parametre regresnej analýzy  $R = \text{NFk} * \Delta\text{NF} + \text{VFk} * \Delta\text{VF} + Q$  ako funkcia polohy azimutu pre HF skupinu. Errorbary sú štandardná chyba priemeru.**

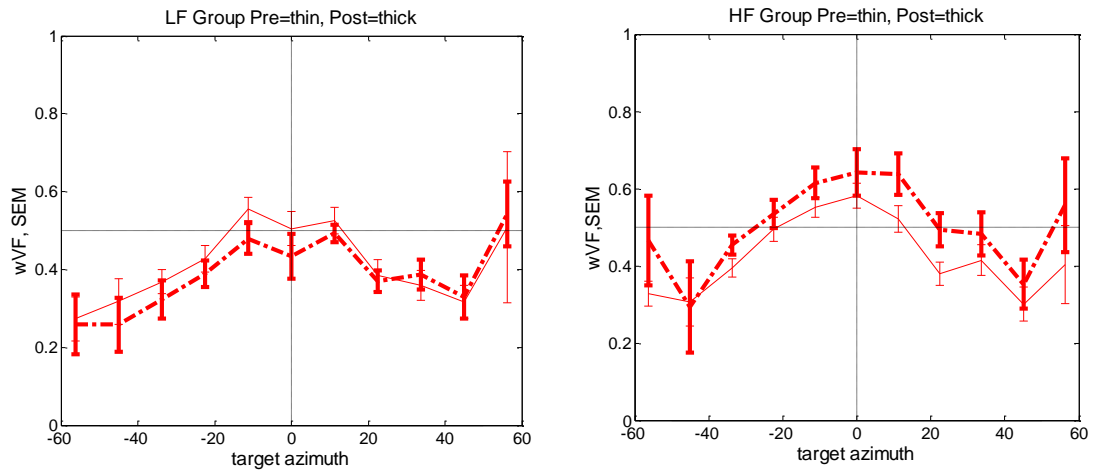
Z obrázku vyplýva, že nastala zmena vo vážení v prospech vysokofrekvenčnej zložky nakoľko sa zvýšila hodnota VFk parametra a znížila hodnota NFk parametra v postteste v porovnaní s pretestom. To potvrdzuje výsledky predošlých analýz, kde sa taktiež v RP pre HF skupinu znížila odchýlka ku NF komponentu.

Rovnaká analýza pre LF skupinu na obrázku 13 ukazuje mierne zvýšenie hodnoty NFk parametra čo je opäť v súlade s predošlými analýzami, ktoré tiež ukazovali zväčšenie odchýlky ku NF komponentu pre LF skupinu v RP, avšak táto zmena bola nezanedbateľne menšia v porovnaní s HF skupinou.



**Obr.13: Parametre regresnej analýzy  $R = NFk \cdot \Delta NF + VFk \cdot \Delta VF + Q$  ako funkcia polohy azimutu pre LF skupinu. Errorbary sú štandardná chyba priemeru.**

VF váhu v modeli môžeme vyjadriť ako veľkosť uhla, ktorý zvierá priamka vektorového súčtu VFk a NFk s kladnou časťou x-ovej osi, teda  $\alpha = \text{atan}(VFk/NFk)$ . Výsledný uhol  $\alpha$  ešte predelíme  $90^\circ$  aby sme dostali váhy v intervale 0 až 1. Na obrázku 14 vidíme váhy VF komponentu z regresného modelu pre obe skupiny. Hrubá čiara znázorňuje výsledky posttestu a tenká čiara výsledky pretestu.



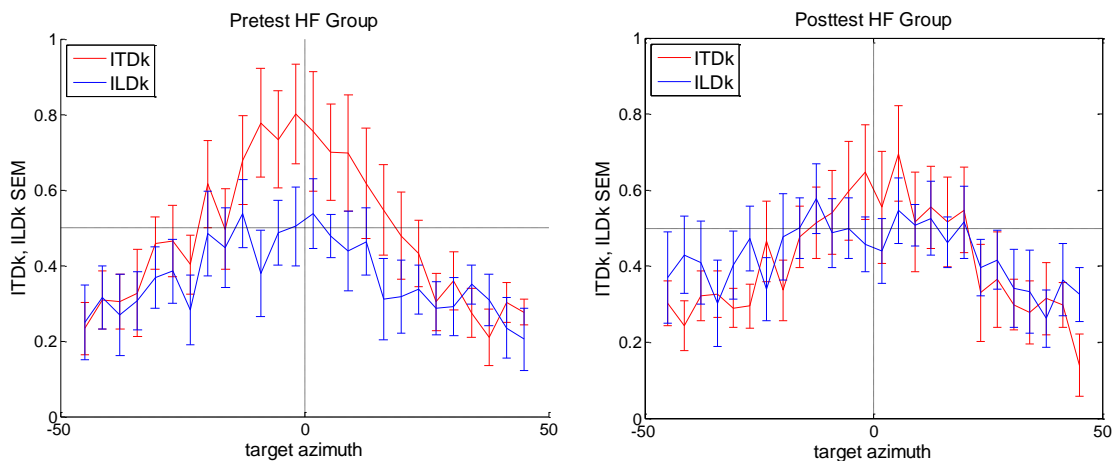
**Obr.14: Váha VF komponentu pre LF a HF skupinu. Hrubá čiara znázorňuje posttest a tenká pretest. Errorbary sú štandardná chyba priemeru.**

Zmena váženía VF komponentu nastala v oboch skupinách očakávaným smerom, avšak bola výraznejšia pre HF skupinu.

Analogicky vzorec sme použili pre VP:

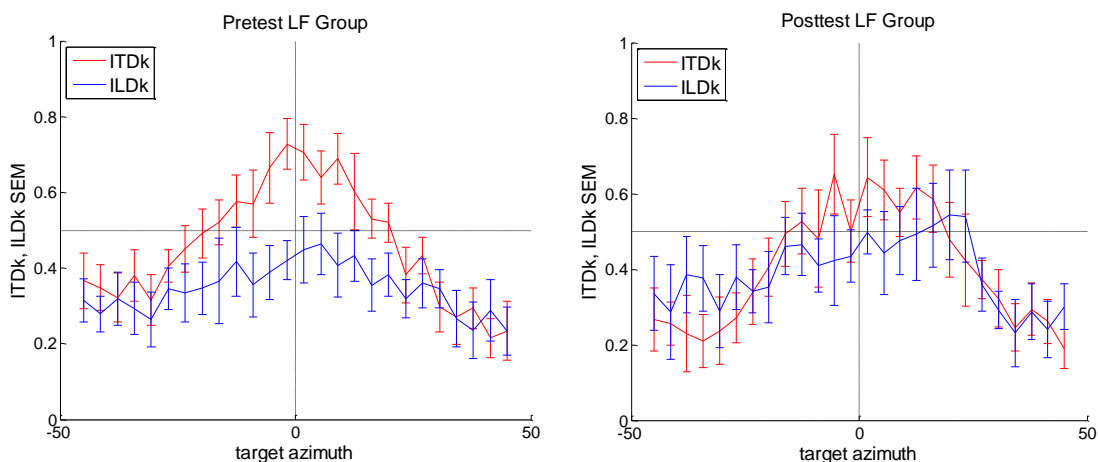
$$R(\text{az}, \Delta\text{ITD}, \Delta\text{ILD}) = \text{ITDk} * \Delta\text{ITD} + \text{ILDk} * \Delta\text{ILD} + Q,$$

kde R je azimut odpovede subjektu v danom trialu, v ktorom  $\text{az} + \Delta\text{ITD}$  a  $\text{az} + \Delta\text{ILD}$  sú azimuty ITD a ILD zložky stimulu, a ITDk, ILDk a Q predstavujú aproximované parametre regresného modelu, kde ITDk a ILDk sú smernice určujúce váhu parametrov a Q je celková odchýlka odpovedí pre azimut az a jeho okolie. Tento model bol jednotlivo použitý pre každý azimut az od  $-45^\circ$  do  $+45^\circ$ . Na obrázku 15 sú znázornené hodnoty ITDk a ILDk parametrov pre HF skupinu v preteste a postteste ako funkcia azimutu.



**Obr. 15: Parametre regresnej analýzy  $R = ITDk * \Delta ITD + ILDk * \Delta ILD + Q$  ako funkcia polohy azimutu pre HF skupinu. Errorbary sú štandardná chyba priemeru.**

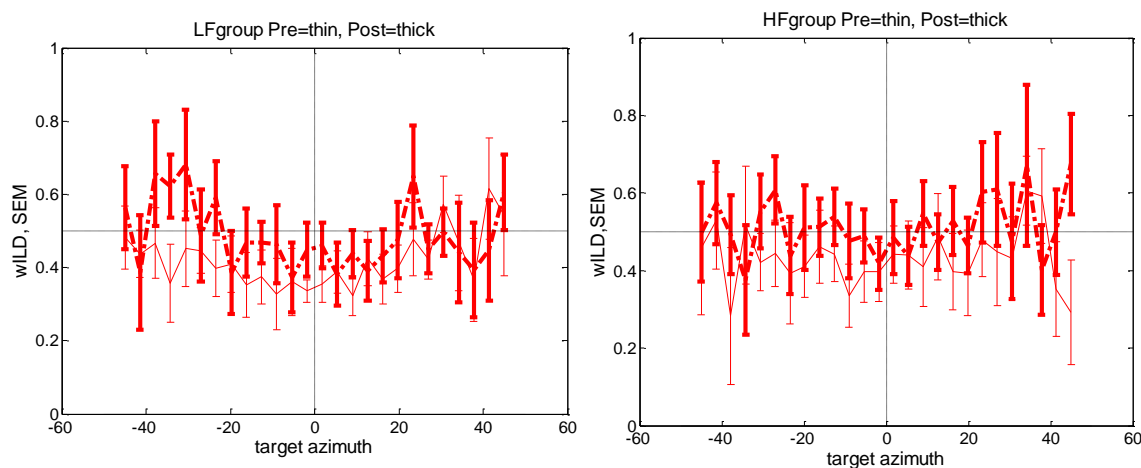
Z obrázka vidíme, že pre HF skupinu klesli hodnoty ITDk parametra a zvýšili sa hodnoty ILDk parametra. Rovnaká situácia nastala aj pre LF skupinu (obrázok 16) a teda zníženie hodnôt ITDk parametra a zvýšenie ILDk parametra. To je v súlade s predchádzajúcimi analýzami, ktoré ukazovali, že zníženie váženia ITD zložky možno pozorovať u oboch tréningových skupín.



**Obr. 16: Parametre regresnej analýzy  $R = ITDk * \Delta ITD + ILDk * \Delta ILD + Q$  ako funkcia polohy azimutu pre LF skupinu. Errorbary sú štandardná chyba priemeru.**

Podobne ako v RP vieme váhy vyjadriť aj vo VP, a to takým spôsobom, že namiesto VFk vezmeme ILDK a namiesto NFk vezmeme ITDk.





**Obr. 17: Váha ILD pre LF a HF skupinu. Hrubá čiara znázorňuje posttest a tenká pretest. Errorbary sú štandardná chyba priemeru.**

Pre obe skupiny nastalo zvýšenie váženia ILD komponentu v postteste, čo podporuje výsledky predošlých analýz.

## 4.5 Zhrnutie a diskusia

Experiment pozostával z pretestu a postestu, ktoré boli vykonané vo VP a RP a tréningu v RP. Vo VP boli jednotlivé trialy zložené z určitej hladiny ILD a ITD a v RP VF a NF komponentov. Dve experimentálne skupiny boli tréňované spôsobom, ktorý mal zvýšiť buď váženie VF zložky stimulu alebo váženie NF zložky stimulu. Pre VP sme analyzovali odpovede z pretestov a posttestov ako funkciu pozície ILD zložky stimulu a tiež ako odchýlku ku ITD zložke. Pre RP sme tiež analyzovali odpovede z 2-kanálových trialov, nakoľko sú najlepšie porovnateľné s dátami z VP, a to ako funkciu pozície VF komponentu stimulu a tiež ako odchýlku ku NF komponentu. Na záver sme pre získané dáta spravili aj regresný model.

Po zhodnotení výsledkov v reálnom prostredí sa tréning javí funkčným pre HF skupinu avšak nie pre LF skupinu. To možno pripísať relatívne silnému váženiu NF komponentu už v preteste a teda zmena váženia, aj keď nastala, bola malá a nemohla byť vyhodnotená ako významná alebo ako jednoznačný dôsledok tréningu. Ďalšími faktormi ovplyvňujúcimi úspešnosť lokalizácie zvukov v RP mohli byť ozvena v miestnosti alebo miera koherencie zvukových vln[9]. Vo VP výrazná zmena váženia nenastala, a ak aj nejaká nastala nebola zrejme priamym dôsledkom tréningu nakoľko bola pre obe skupiny rovnakým smerom, ku ILD komponentu.

---

Pre jednoznačné potvrdenie efektu tréningu by bolo najlepším riešením vytvoriť kontrolnú skupinu, ktorá by absolvovala len pretest a posttest. Týmto spôsobom by sme vedeli vylúčiť možnosť, že zmena váženia je len dôsledkom adaptácie na miestnosť a nie výsledkom tréningu.

---

## Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo zistiť ako sa zmení váženie binaurálnych parametrov vizuálne orientovaným tréningom v reálnom prostredí. Na začiatku sme zhrnuli aktuálny stav výskumu plasticity spracovávania priestorového sluchu v súvislosti s naším experimentom a určili jeho východiskové body. Určili sme ciele práce a hypotézy, ktoré chceme experimentom overiť, čomu boli prispôsobené jednotlivé experimentálne podmienky a celkový dizajn experimentu. Nazberali sme dáta celkovo na 33 subjektoch, vyšetrili ich sluch pomocou audiometra a analyzovali výsledky experimentu. Všetky stanovené ciele práce sa podarilo splniť.

Zatiaľ sme preskúmali čiastočné dáta, konkrétne 2-kanálové trialy v RP a dáta z VP, avšak na komplexné vyhodnotenie experimentu je potrebné podrobne preskúmať aj ostatné druhy trialov a analyzovať tréningové dáta. Až analýza všetkých dát nám umožní potvrdiť alebo vyvrátiť stanovené hypotézy s konečnou platnosťou. Aktuálne výsledky však ukazujú, že je možné zmeniť váženie jednotlivých spektrálnych komponentov zvuku prispievajúcich k lokalizácii zvukov v horizontálnej rovine. Tréning bol úspešný len pre HF skupinu kde sa odchýlka ku non-target komponentu znížila čo potvrdzuje hypotézu 1 avšak v LF skupine podobná zmena nenastala, resp. nastala len vo veľmi obmedzenej miere, zrejme kvôli silnému váženiu NF komponentov už v preteste. Zmena váženia sa však nezovšeobecnila na váženie ITD/ILD vo virtuálnom prostredí ako sme hypotetizovali v bode 2 čo naznačuje, že váženie je spektrálne špecifické ale rovnako k tomu mohli prispieť aj rozdiely v reálnom a virtuálnom prostredí ako napr. prítomnosť ozveny.

---

## Zoznam použitej literatúry

[1] Burk MH, Wiley TL. Continuous versus pulsed tones in audiometry. *Am J Audiol.* 2004 Jun;13(1):54-61. PubMed PMID: 15248804.

[2] Ferber M (2018) Plasticity of Spatial Processing in Normal Hearing: Reweighting of Binaural Cues. Unpublished MSc. Thesis. University of Vienna.

[3] Strutt, J.W.(1907) On our perception of sound direction, *Philosophical magazine* 13(6) 214-232

[4] Kopčo, N., Úvod do neurovied, prednášky k predmetu, dostupné na : <https://pcl.upjs.sk/unv/>

[5] Lang, Albert-Georg & Buchner, Axel. (2008). Relative influence of interaural time and intensity differences on lateralization is modulated by attention to one or the other cue. *The Journal of the Acoustical Society of America.* 124. 3120-31. 10.1121/1.2981041.

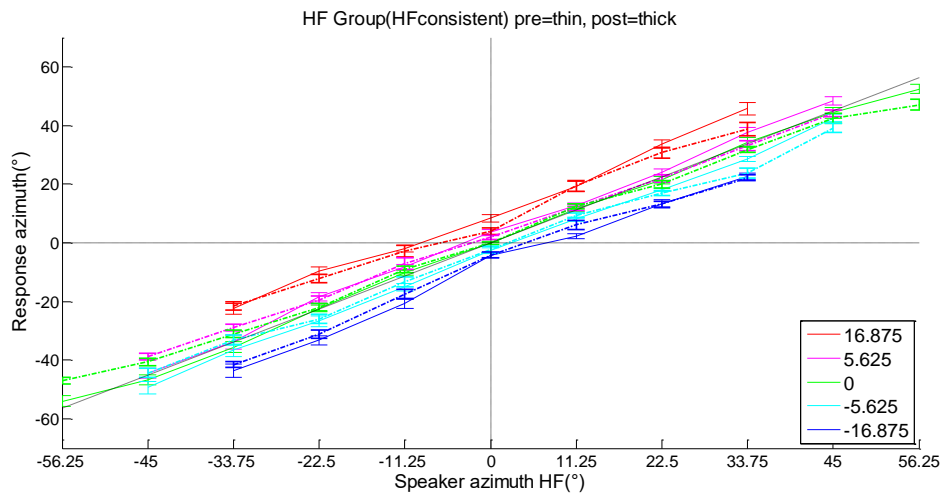
[6] Macpherson EA, Middlebrooks JC. Listener weighting of cues for lateral angle: the duplex theory of sound localization revisited. *J Acoust Soc Am.* 2002 May;111(5 Pt 1):2219-36. PubMed PMID: 12051442.

[7] Jeffress LA, & McFadden D (1971). Differences of interaural phase and level in detection and lateralization. *J Acoust Soc Am*, 49(4B), 1169-1179.

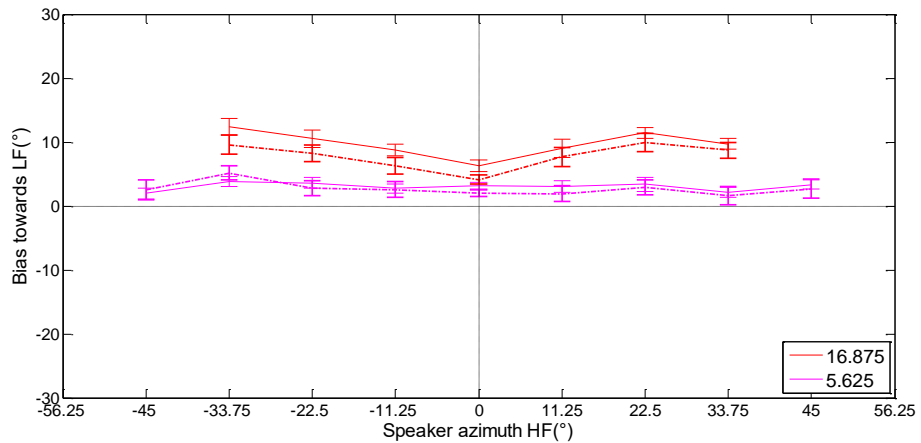
[8] SIBEL SOUND 400 – USER MANUAL, Dostupné na internete: <https://docplayer.net/33086732-Sibelsound-400-user-manual-audiometry-mu2-rev.html>

[9] Rakerd B, Hartmann WM. Localization of sound in rooms. V. Binaural coherence and human sensitivity to interaural time differences in noise. *J Acoust Soc Am.* 2010;128(5):3052–3063. doi:10.1121/1.3493447

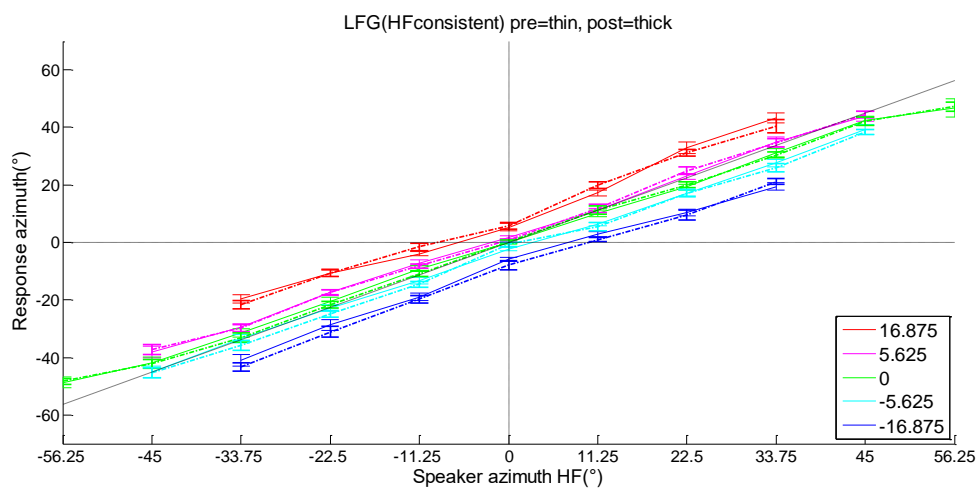
## Appendix



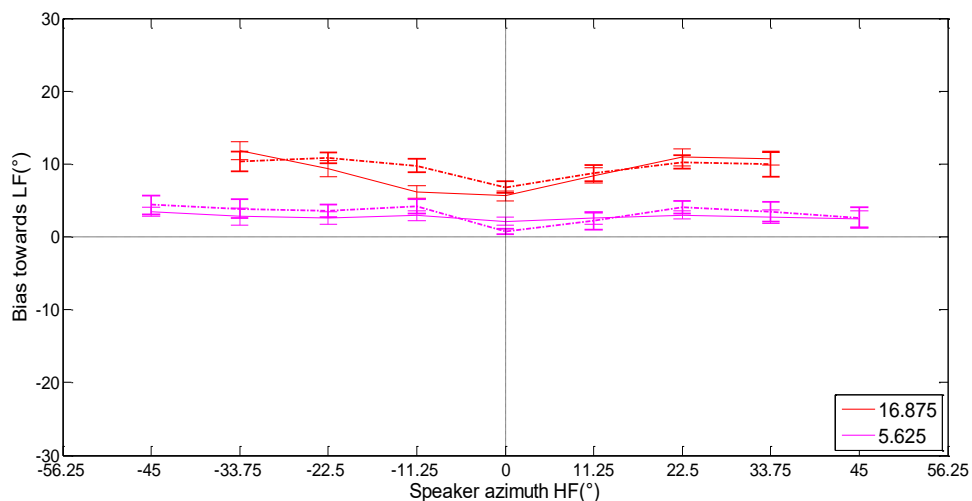
Obr. 18 : Analýza odpovedí 4-kanálových trialov s VF konzistentnou dvojicou ako funkcia pozície VF reproduktora pre HF skupinu. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.



Obr. 19 : Odchýlka ku NF komponentu pre jednotlivé rozostupy reproduktorov u 4-kanálových trialov s VF konzistentnou dvojicou ako funkcia pozície VF komponentu pre HF skupinu – preklopené dáta. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.



**Obr. 20 : Analýza odpovedí 4-kanálových trialov s VF konzistentnou dvojicou ako funkcia pozície VF reproduktora pre LF skupinu. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.**



**Obr. 21 : Odchýlka ku NF komponentu pre jednotlivé rozostupy reproduktorov u 4-kanálových trialov s VF konzistentnou dvojicou ako funkcia pozície VF komponentu pre HF skupinu – preklopené dáta. Errorbar znázorňuje štandardnú chybu priemeru.**

---

## **Prílohy**

Príloha A : CD nosič, bakalárska práca v elektronickej podobe, zdrojové kódy