

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH  
KATEDRA KYBERNETIKY A UMELEJ INTELIGENCIE

Spracovanie ILD a kortikálna lokalizácia kontextuálnej plasticity pri  
priestorovom počúvaní

Branislav Pangrác

DIPLOMOVÁ PRÁCA

2009

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie

Spracovanie ILD a kortikálna lokalizácia kontextuálnej  
plasticity pri priestorovom počúvaní

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Branislav Pangrác

Vedúci diplomovej práce

Ing. Norbert Kopčo, PhD

Konzultant diplomovej práce:

Ing. Beáta Tomoriová

Košice 2009

# Analytický list

---

Autor:	Branislav Pangrác
Názov práce:	Spracovanie ILD a kortikálna lokalizácia kontextuálnej plasticity pri priestorovom počúvaní
Podnázov práce:	
Jazyk práce:	slovenský
Typ práce:	Diplomová práca
Počet strán:	59
Akademický titul:	Inžinier
Univerzita:	Technická univerzita v Košiciach
Fakulta:	Fakulta elektrotechniky a informatiky (FEI)
Katedra:	Katedra kybernetiky a umelej inteligencie (KKUI)
Študijný odbor:	Umelá Inteligencia
Študijný program:	Umelá inteligencia
Mesto:	Košice
Vedúci práce:	Ing. Norbert Kopčo, PhD
Konzultanti práce:	Ing. Beáta Tomoriová
Dátum odovzdania:	7. máj 2009
Dátum obhajoby:	28. 6. 2009
Kľúčové slová:	Plasticita, priestrové počúvanie, spracovanie ILD
Kategória konspekt:	Technika, technológia, inžinierstvo; Elektrotechnika
Citovanie práce:	Pangrác, Branislav: Spracovanie ILD a kortikálna lokalizácia kontextuálnej plasticity pri priestorovom počúvaní. Diplomová práca Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky 2009. 59 s.
Názov práce v AJ:	ILD processing and cortical localization of contextual plasticity in spatial auditory perception
Podnázov práce v AJ:	
Kľúčové slová v AJ:	auditory perception, plasticity, ITD processing

### **Abstrakt v SJ**

Predmetom tejto práce bol experimentálny výskum kontextuálnej plasticity. Cieľom bolo zistiť na akej úrovni spracovania v sluchovom systéme dochádza k plastickým zmenám, pozorovaných v predošlých experimentoch. Plastické zmeny, ktoré sme sledovali, môžu prebiehať na rôznych úrovniach spracovania sluchového podnetu. V tejto práci bola plasticita vytváraná priestorovým zvukom simulovaným len za pomoci ILD a následne bola testovaná lokalizácia na zvukoch simulovaných len za pomoci ITD. Takouto metódou sa plastická zmena vyvolala a pretrvala. Týmto bolo dokazané, že plastické zmeny musia prebiehať niekde na vyššej úrovni spracovania, čiže niekde v kortexe

### **Abstrakt v AJ**

Purpose of this study was to research contextual plasticity. Goal of this research was to find out on which level of sound processing in auditory system plasticity occurs, which was observed in previous studies. Plastic changes, which were observed, may occur on different stages of sound processing. In this work, plasticity was build up by spatial sound with no ITD component in presented sound and consequently was tested on presented sound with no ILD component. Results show, that this build up plasticity occur and outlast. This result proved, that plastic changes must occur somewhere higher level of audithory processing.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

Fakulta elektrotechniky a informatiky Katedra kybernetiky a umelej inteligencie

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študent: **Branislav Pangrác**

Študijný odbor: **Umelá inteligencia**

Akademický rok: 2008/2009

Názov práce v slovenskom a anglickom jazyku:

**Spracovanie ILD a kortikálna lokalizácia kontextuálnej plasticity pri priestorovom počúvaní**  
**ILD processing and cortical localization of contextual plasticity in spatial auditory perception**

Pokyny na vypracovanie:

1. Vypracovať prehľad problematiky spracovania priestorovej informácie v sluchovej dráhe s dôrazom na spracovanie interaurálnych hlasitostných rozdielov (ILD).
2. Implementovať experimentálnu štúdiu vychádzajúcu zo štúdie N Kopčo, V Best, and BG Shinn-Cunningham (2007). Sound localization with a preceding distractor, Journal of the Acoustical Society of America, 121, 420-432.
3. Upraviť experimentálnu procedúru v prostredí MATLAB tak, aby bolo možné určiť, či sa kontextuálna plasticita prejavuje na úrovni spracovania ILD alebo na vyššej úrovni v sluchovej dráhe.
4. Vykonať experimentálne meranie na minimálne 8 dobrovoľných ľudských subjektoch.
5. Analyzovať a vyhodnotiť experimentálne dáta.
6. Navrhnuť konceptuálny model popisujúci kontextuálnu plasticitu na rôznych úrovniach spracovania v sluchovej dráhe.
7. Vypracovať dokumentáciu podľa pokynov vedúceho diplomovej práce.

Vedúci diplomovej práce:


Ing. Norbert Kopčo, PhD.

Konzultant diplomovej práce:


Ing. Beáta Tomoriová

Dátum odovzdania diplomovej práce:

7.5.2009

  
.....  
prof. Ing. Ján Sarnovský, CSc

**vedúci zadávajúceho  
vedecko-pedagogického pracoviska**

  
.....  
prof. Ing. Liberios Vokorokos, PhD.

**dekan**

V Košiciach, dňa 31.10.2008

## **Čestné vyhlásenie**

Vyhlasujem, že som celú diplomovú prácu vypracoval samostatne s použitím uvedenej odbornej literatúry.

Košice, 7. máj 2009

.....

*vlastnoručný podpis*

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu mojej diplomovej práce Ing. Norbertovi Kopčovi, PhD, mojej konzultantke Ing. Beáte Tomoriovej za usmernenia a odbornú pomoc pri vypracovaní diplomovej práce a ďakujem tiež všetkým, ktorí sa zúčastnili na experimentoch.

## Predhovor

Sluchovému spracovaniu je venovaná minimálna pozornosť, čo je veľká škoda, pretože sluchové prostredie zohráva zásadnú úlohu v každodennom živote. V tejto diplomovej práci sa venujem štúdiu priestorovému sluchovému vnímaniu, s ktorým úzko súvisí aj kontextuálna plasticita. Plasticita predstavuje zmenu v mozgovej mape, v ktorej sa reprezentuje priestorová sluchová informácia. Pod kontextuálnou plasticitou mám na mysli, spôsob, akým bola zmena vyvolaná, teda že bola vyvolaná kontextom, kde kontext je definovaný sluchovým prostredím, v ktorom sa poslucháč nachádza. Zámerom tohto výskumu je zistiť ako tieto rušivé vnemy vplývajú na danú sluchovú scénu a na ktorej úrovni v mozgu tieto deje nastávajú.



# Obsah

<b>Zoznam obrázkov .....</b>	<b>10</b>
<b>Zoznam tabuliek .....</b>	<b>11</b>
<b>Zoznam symbolov a skratiek .....</b>	<b>12</b>
<b>Slovník termínov .....</b>	<b>13</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>14</b>
<b>1 Formulácia úlohy .....</b>	<b>15</b>
<b>2 Základné charakteristiky zvuku.....</b>	<b>16</b>
2.1 Periférny sluchový systém.....	17
2.2 Centrálny sluchový systém.....	19
2.2.1 Cochlear nucleus (CN).....	20
2.2.2 Superior olivary complex (SOC).....	20
2.2.3 Inferior colliculus (IC) .....	21
2.2.4 Colliculus Superior (SC).....	21
2.2.5 Medial geniculate body – bočné kolienkovité teleso(corpus geniculatum laterale) .....	22
2.2.6 Sluchový kortex (AC) .....	22
<b>3 Priestorové sluchové vnímanie.....</b>	<b>23</b>
3.1 Lokalizácia zvukov.....	24
3.2 Smerová prenosová funkcia, tzv. Head-related transfer function (HRTF) .....	25
3.2.1 Lokalizácia zvukov v horizontálnej rovine ITD a ILD.....	26
3.2.2 Duplexná teória.....	28
3.2.3 Kužeľ nejednoznačnosti.....	29
3.3 Simulácia sluchového priestoru a lateralizácia.....	30
<b>4 Plasticita v priestorovom sluchovom vnímaní.....</b>	<b>32</b>
4.1 Príčiny plasticity .....	32
4.2 Sluchová priestorová mapa.....	33
4.3 Vyvolanie plasticity .....	34
4.4 Časové škály plasticity .....	35
<b>5 Experimentálna časť .....</b>	<b>36</b>
5.1 Cieľ.....	36
5.2 Hypotézy.....	36

5.3	Motivácia experimentu .....	36
5.4	Návrh experimentu .....	37
5.4.1	Stimuly .....	37
5.4.2	Popis a organizácia blokov .....	39
5.4.3	Metódy .....	41
5.5	Analýza dát.....	44
5.5.1	Analýza všetkých subjektov – nedistraktorové merania.....	45
<b>6</b>	<b>Záver.....</b>	<b>57</b>
	<b>Zoznam použitej literatúry .....</b>	<b>58</b>

## Zoznam obrázkov

Obr. 1	Sluchové pole človeka .....	16
Obr. 2	Sluchový systém .....	18
Obr. 3	Schéma prepojení hlavných jadier centrálného sluchového systému .....	19
Obr. 4	Multimodálne vnímanie priestoru .....	23
Obr. 5	Systém súradníc použitý pri sluchových experimentoch .....	24
Obr. 6	HRTF pre ľavé a pravé ucho .....	25
Obr. 7	Časové oneskorenie signálu vzhľadom na polohu zdroja a hlavy .....	26
Obr. 8	Graf ITD vzhľadom na uhol zdroja signálu .....	27
Obr. 9	ILD rozdiel pri určovaní pozície pri nízkofrekvenčnom a vysokofrekvenčnom tóne .....	27
Obr. 10	ILD v závislosti od frekvencie zvuku pre rôzne polohy zdroja zvuku .....	28
Obr. 11	Kužeľ nejednoznačnosti. Body na jeho povrchu majú rovnaké ITD a ILD ....	30
Obr. 12	Schémetická reprezentácia lokalizačnej cesty v strednom mozgu sovy .....	34
Obr. 13	Vykreslené HRTF pre obe uši, odstránené ILD .....	38
Obr. 14	Vykreslené HRTF pre obe uši, odstránené ILD .....	39
Obr. 15	Spôsob odpovedania v experimente .....	43
Obr. 16	Graf znázorňujúci posun voči skutočnej polohe pre ľavé a pravé otočenie ....	46
Obr. 17	Graf znázorňujúci posun voči skutočnej polohe, preklopené dáta .....	47
Obr. 18	Graf znázorňujúci posun voči nedistraktorovému kolu(plná simulácia) .....	48
Obr. 19	Graf znázorňujúci časový priebeh kola .....	49
Obr. 20	Graf znázorňujúci časový priebeh kola, spriemernené cez azimuty .....	50
Obr. 21	Graf znázorňujúci posun voči skutočnej polohe pre ľavé a pravé otočenie ....	51
Obr. 22	Graf znázorňujúci posun voči skutočnej polohe, preklopené dáta .....	52
Obr. 23	Graf znázorňujúci posun voči nedistraktorovému kolu(plná simulácia) .....	53
Obr. 24	Graf znázorňujúci časový priebeh kola .....	54
Obr. 25	Posun voči nedistraktorovému kolu ITD simulácie, spriemernené cez azimuty .....	55
Obr. 26	Priame porovnanie nedistraktorových kôl všetkých typov .....	56

## Zoznam tabuliek

Tab. 1	Typy simulácií všetkých kôl.....	40
--------	----------------------------------	----

## Zoznam symbolov a skratiek

- ILD**    **I**nteraural **L**evel **D**ifference, rozdiel v intenzite, v akej je vnímaný zvuk v jednom a v druhom uchu, spôsobený akustickým tieňom hlavy.
- ITD**    **I**nteraural **T**ime **D**ifference, časový rozdiel medzi tým, kedy dorazí ten istý zvuk k jednému a k druhému uchu.
- HRTF**   **H**ead **R**elated **T**ransfer **F**unction, funkcia popisujúca transformáciu, ktorou prejde zvukový signál od zdroja po ucho. Je veľmi individuálna, keďže závisí od tvaru hlavy, uší a ramien, pretože na nich sa zvuk rôznymi odrazmi transformuje.
- SOA**    **S**timulus **O**nset **A**synchrony, opozdenie cieľového stimulu voči podnetu

## Slovník termínov

**Bias** je posun

**Binaurálny** týkajúci sa oboch uší

**Distraktor** je rušivý zvuk, prichádzajúci z fixnej pozície, je identický pre všetky subjekty v celom experimente s dĺžkou 2ms

**Distraktor target** je cieľový zvuk v distraktorovom meraní

**Frontálny** je nachádzajúci sa priamo pred

**Interaurálny** je to rozdiel medzi tým, ako vnímame zvuk v ľavom a pravom uchu

**Mediálna rovina** pomyselná rovina vedená prostredkom hlavy a rozdeľujúca priestor na dve časti, ľavú a pravú.

**Meranie** pozostáva z prezentácie cieľového zvuku (alebo distraktora a cieľového zvuku) a odpovede subjektu

**Multimodálne vnímanie** znamená, ak je udalosť alebo objekt vnímaná viacerými zmyslami.

**Plasticita** je prispôsobenie sa okoliu alebo vplyvu okolia

**Subjekt** je človek, ktorý sa dobrovoľne zúčastnil experimentov

## Úvod

Priestorové sluchové vnímanie nám niekedy poskytuje dôležitejšiu informatívnu hodnotu z priestoru ako vizuálne. Napr. v zábavnom priemysle je význam zvuku dôležitý na vytvorenie atmosféry a emócií, tieto aspekty často chýbajú vo virtuálnom prostredí. Na základe štúdie sluchového vnímania by sme mohli navrhnúť realistickejšie virtuálne prostredia a simulácie. So sluchovou pozornosťou je úzko spätá aj kontextuálna plasticita kedy priestorový sluchový systém adaptuje na zmenu prostredia a lokalizovania zvuku. Plasticita predstavuje zmenu v mozgovej mape, v ktorej sa reprezentuje priestorová sluchová informácia. Kontextuálnou plasticita znamená, spôsob, akým bola zmena vyvolaná, teda že bola vyvolaná kontextom, kde kontext je definovaný sluchovým prostredím, v ktorom sa poslucháč nachádza.

Plasticita je predmetom mnohých štúdií, ale nie je objasnené na akej úrovni spracovania sa to deje, preto som sa v tejto práci zaoberal tým, ako plasticita vybudovaná za použitia plnej a ILD simulácie zvukov vplýva na lokalizáciu zvukov. Cieľom bolo určiť, kde v mozgu sa dejú plastické zmeny, ktoré sledujeme pri kontextuálnej plasticite.

Na začiatku je stručný opis spracovania a šírenia zvuku a následne je popísaná cesta spracovania zvuku v periférnom a centrálnom sluchovom systéme človeka. Ďalšia kapitola je venovaná lokalizácii zvuku a v závere teoretickej časti je popísaná plasticita. V experimentálnej časti je popísaný samotný návrh experimentu, úprava stimulov a popis zberu dát. Výsledky som vyhodnotil a vykreslil do jednotlivých grafov

## 1 Formulácia úlohy

Teoretickou časťou tejto práce bolo naštudovať a vypracovať prehľad problematiky spracovania priestorovej informácie v sluchovej dráhe s dôrazom na spracovanie interaurálnych hlasitostných rozdielov. Vychádzal som zo štúdie N. Kopco, V. Best and BG Shinn-Cunningham[2] Zameral som sa aj na štúdie ako lokalizácia zvukov v priestore a kontextuálna plasticita a jej charakteristiky.

Praktickou časťou bolo upraviť experimentálnu procedúru v prostredí MATLAB tak aby bolo možné určiť, či sa kontextuálna plasticita prejavuje na úrovni spracovania interaurálnych hlasitostných rozdielov alebo na vyššej úrovni v sluchovej dráhe. V tejto časti je dôkladný opis celej experimentálnej procedúry, ktorá bola vykonaná na štyroch dobrovoľných subjektoch.

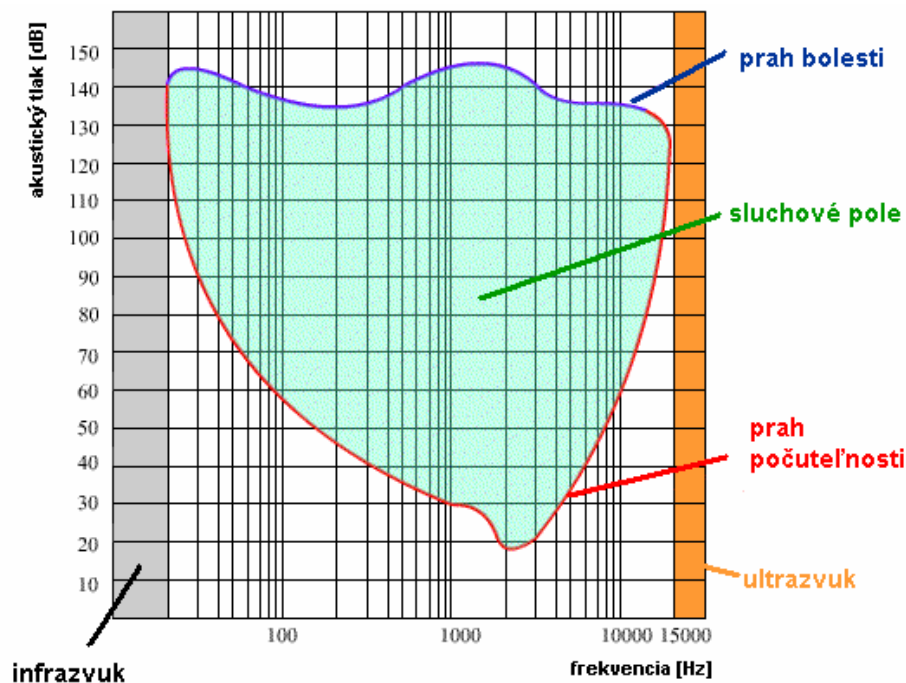
Nazberané dáta som spracoval, graficky vykreslil a na základe týchto analýz vyvodil predpoklady a závery, ktoré by mali priblížiť a objasniť štúdie danej problematiky.



## 2 Základné charakteristiky zvuku

Podnetom sluchového analyzátora, ktorým je napr. ľudské ucho je kmitavé chvenie vzduchu, čiže zvuková vlna. Ľudský sluchový systém zachytáva zvukové vlny od 16 do 20 000 kmitov. V oblasti okolo 1 000 kmitov za sekundu je sluch človeka najcitlivejší. Kmitanie nad tieto hodnoty sa nazýva ultrazvuk, ľudské ucho ho však nevníma. Infrazvuk je zvuk s frekvenciou nižšou ako je ľudské ucho schopné vnímať, teda pod 16 či 20 Hz[1]. Takúto frekvenciu majú napr. seizmické vlny pri zemetrasení či nízkofrekvenčné vibrácie strojov. Dlhotrvajúce pôsobenie infrazvuku na ľudský organizmus je škodlivé. Zvuky rozlišujeme na periodické (tóny) a neperiodické (šumy). Periodické kmity majú určitú frekvenciu, t.j. počet kmitov za sekundu, ktoré vyjadrujeme v hertzoch (Hz). Každý tón má určité dimenzie – výšku, závislú na počte kmitov, dĺžku, závislú na amplitúde znejúceho telesa, farbu. Jednotkou hlasitosti pre meranie zvuku je decibel (dB). Zvuky, ktoré u poslucháča vyvolajú sluchový vnem predstavujú tzv. sluchového pole. Pre každého jedinca je sluchové pole individuálne.

Každý zvuk sa dá popísať jeho charakteristickými vlastnosťami. Intenzita zvuku, čo je vlastne amplitúda, frekvencia zvuku, ktorá určuje výšku tónu a priebeh kmitania.



Obr. 1 Sluchové pole človeka[1]

## 2.1 Periférny sluchový systém

Sluchový systém je dôležitým podsystemom našej nervovej sústavy, pomocou ktorého vieme komunikovať, lokalizovať a identifikovať zdroje akustických signálov, čím sa v mozgu vytvárajú jednotlivé modely prostredia. Vizuálny aj sluchový systém nás informujú v akom prostredí sa práve nachádzame. Na rozdiel od obrazu, ktorý dokážeme vnímať len za určitých podmienok, zvuk vieme rozpoznať aj keď sa nachádza mimo nášho zorného poľa. Zvukový stimul je zmena tlaku častíc vzduchu prípadne iného prenosového média akým je napríklad voda. Tieto častice nasledovne narážajú do svojich susedov a takto sa zvuk šíri v priestore.

Zmyslovým orgánom sluchu je ucho. Delí sa na tri časti:

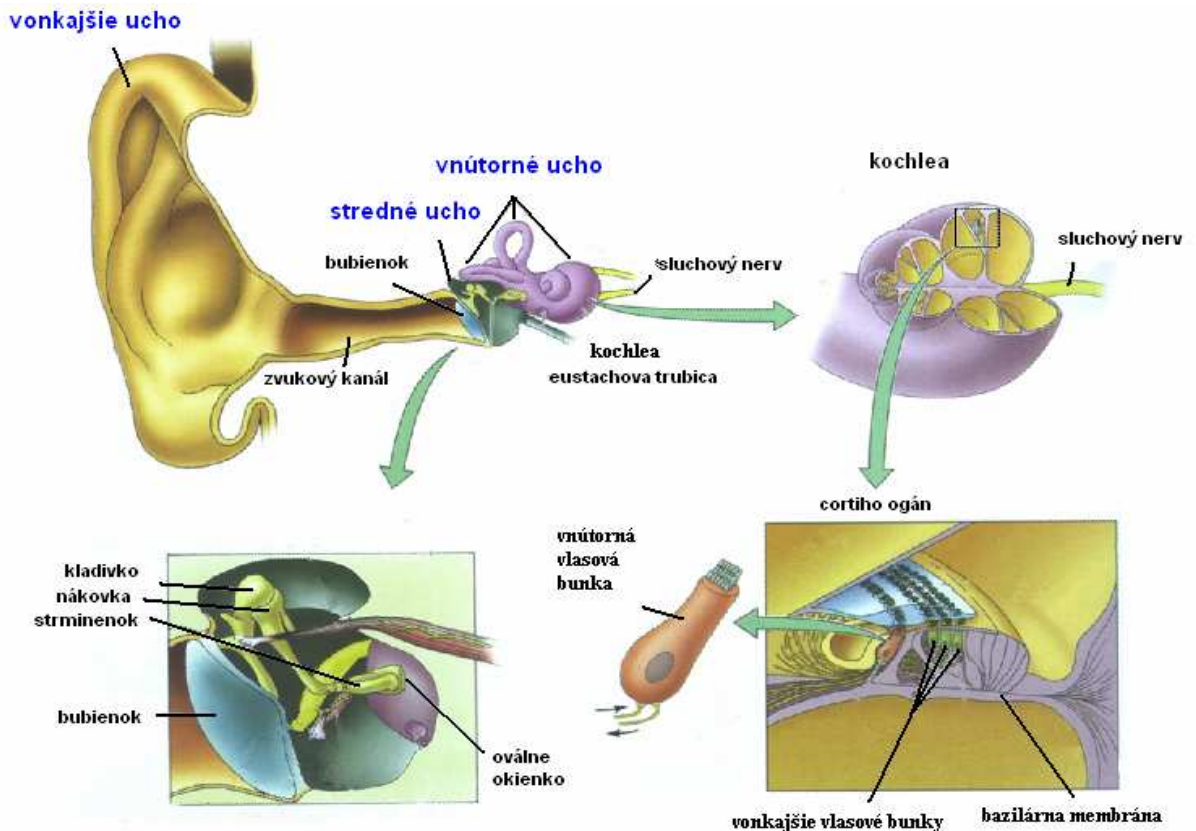
Vonkajšie ucho - zachytáva zvuk ako radar. Tvorí ho časť ucha, ktorá sa nazýva ušnica. Ušnica je chrupka, ktorá má veľký význam pri vnímaní smeru prichádzajúceho zvuku. Jej pokračovaním je chrupkovitá rúra – vonkajší zvukovod, ktorý prechádza do kostnej časti spánkových kostí a vedie zvukové podnety k bubienku. V strede ušnice je kostný kanálik vedúci k ušnej bubienkovej blane.

Stredné ucho - prevodovým usporiadaním kostí zosilňuje zvuky prichádzajúce do ucha. Prevodový systém pozostáva z troch kostičiek. Sú to kladivko, ktoré je pripojené k ušnej bubienkovej blane; strmienok, ktorý sa pripája k oválnemu okienku vnútorného ucha a nákovka – malá kostička spájajúca dve predchádzajúce. Zo stredného ucha vedie úzka trubica (Eustachova trubica), ktorá ústi za mandľami v hrdle a vyrovnáva tlak vzduchu na obidvoch stranách ušného bubienka.

Vnútrotné ucho - premieňa zvukové vibrácie na elektrické impulzy a vníma polohu hlavy. V tejto časti ucha sa nachádza vlastný sluchový ústroj. Tvorí ho blanitý slimák. Vnútri slimáka je umiestnený Cortiho orgán so sluchovými receptormi. Sluchový a rovnovážny mechanizmus tvoria spoločnú komoru, vyplnenú tekutinou nazývanou endolymfa. Tlakové vlny sú vysielané cez túto tekutinu zo stredného ucha k strmienku.

Aferentná dráha začína zvukovým kanálom, ktorým sa k bubienku šíri akustická vlna a následne narazí na bubienok. Rozkmitaným bubienkom sa v strednom uchu

vzruch postupne prenesie cez kostičky do kochlei. V kochlei sa nachádza bazilárna membrána, ktorá obsahuje vlasové bunky. Tieto bunky sú receptormi zmien v kvapalnom prostredí, ktoré zachytávajú vlnenie a transformujú tento signál na akčný potenciál. Následne tento potenciál vysielajú cez sluchový nerv smerom do mozgu. Informácia sa šíri po dráhe, ktorá je rozdelená na tonotopické mapy. Sú to usporiadané skupiny nervov citlivé na určité frekvencie tónov.



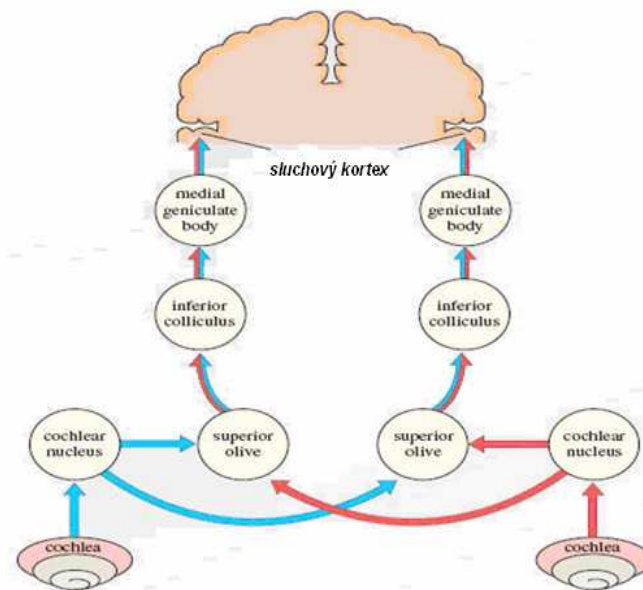
Obr. 2 Sluchový systém[3]

Prvé takéto rozdelenie sa nachádza už v samotnom slimákovi vnútorného ucha, ktorého keby sme rozvinuli tak by sme videli, že vysoké tóny sa spracúvajú na začiatku a nízke tóny až na konci[3]. Podráždením týchto buniek citlivých na jednotlivé frekvencie dochádza k premene akustickej na bioelektrickú energiu – nervový vzruch. Takejto činnosti sú z celého organizmu schopné len sluchové bunky. Vzniknuté bioelektrické impulzy sú následne vedené smerom k centru. Najprv prechádzajú sluchovým nervom, následne sluchovými dráhami. Tie sa v štruktúrach predĺženej miechy krížia, takže impulz mieri do opačnej hemisféry mozgu. Ďalšie spracovanie zvuku ako bioelektrického impulzu prechádza následne centrálnemu sluchovému systému.

## 2.2 Centrálny sluchový systém

Centrálny sluchový systém môžeme považovať za nejaký akustický analyzátor, ktorý pozostáva z centra sluchu, zložitého systému nervových zväzkov a mozgových centier. Tento analyzátor zachytáva zvukové vlny, frekvenčné spektrum čistých a rušivých tónov. Identifikuje zvuky rôznej frekvencie a intenzity, diferencuje zvukové podnety a určuje smer zvuku a vzdialenosť zdroja. Centrálny sluchový systém pozostáva z nasledujúcich častí[3]:

- CN - Cochlear nucleus
  - DCN - dorsal cochlear nucleus
  - AVCN - anteroventral cochlear nucleus
- SOC - superior olivary complexes
  - MSO - medial superior olive
  - LSO - lateral superior olive
  - MNTB - medial nuclues of trapezoid body
- LL - lateral lemniscus
- IC - inferior colliculus
- MGB - medial geniculate body
- SC - superior colliculus
- AC - sluchový kortex



Obr. 3 Schéma prepojení hlavných jadier centrálného sluchového systému[3]

### 2.2.1 Cochlear nucleus (CN)

Vzťah kochleárneho jadra (anglický názov cochlear nucleus - CN) s vyššími úrovňami sluchového centra je znázornený na obrázku 27. Táto schéma je zjednodušená a zobrazuje len hlavné jadrá centrálného sluchového systému.

Cochlear nucleus je prvá zastávka zvukového podnetu v centrálnom sluchovom systéme. Informácia je prenášaná prostredníctvom kochleárneho nervu, tiež nazývaný kraniálny nerv. CN sa delí na dve oblasti – dorsal cochlear nucleus (DCN) a ventral cochlear nucleus (VCN). VCN ďalej delí na prednú (anterior ventral cochlear nucleus - AVCN) a zadnú časť (posterior ventral cochlear nucleus - PVCN), ktoré sú od seba oddelené prechádzajúcimi sluchovými nervovými vláknami.

Na úrovni CN, vstupy z oboch uší ostávajú z väčšej časti aj naďalej oddelené. Existujú dôkazy, že značný počet neurónov v CN prijíma vstupy z kontralaterálneho CN. To znamená, že väčšina zvukových informácií spracovávaných každou polovicou mozgu pochádza z ucha na druhej strane hlavy. To je v protiklade s vizuálnym systémom. Po komplexnom zvukovom spracovaní a prenose informácií sa signál prenáša na ďalšiu časť sluchovej dráhy – superior olivary complex (SOC).

### 2.2.2 Superior olivary complex (SOC)

Superior olivary nucleus zohráva niekoľko dôležitých úloh v priestorovom počúvaní. SOC pozostáva z troch hlavných častí – medial superior olive (MSO), lateral superior olive (LSO), medial nucleus of trapezoid body (MNTB).

Medial superior olive je špecializované centrum, ktoré má za úlohu merať časové rozdiely zvukov prichádzajúcich do oboch uší (interaурálny časový rozdiel alebo ITD). ITD je hlavná funkcia na určovanie azimutu nízko-frekvenčných zvukov, teda lokalizácia v hrizontálnej rovine. MSO je najväčšie jadro v ľudskom mozgu a obsahuje viac ako 15 500 neurónov[2]. MSO prijíma signály z ipsilaterálnej a contralaterálnej časti AVCN, a výstupy má v lateral lemniscus(LL)[3].

Lateral superior olive je, má za úlohu merať rozdiel intenzity zvukov prichádzajúcich do oboch uší (interaурálny rozdiel úrovni alebo ILD). ILD je dôležitým aspektom pri určovaní azimutu vysoko-frekvenčných zvukov. Signály sem vstupujú z ipsilateralnej a contralateralnej časti AVCN.

Medial nucleus of trapezoid body je najmešia časť SOC, ktorá sa v ľudskom mozgovom kmeni možno nenachádza, jeho prítomnosť sa zatiaľ potvrdila len u zvierat. Okrem týchto troch hlavných častí obsahuje SOC ešte niekoľko menších jadier, ktoré prispievajú k lepšej funkčnosti sluchového systému.

### 2.2.3 Inferior colliculus (IC)

Inferior colliculus je hlavným jadrom stredného mozgu sluchovej dráhy a prijíma vstupy z niekoľkých okrajových mozgových centier, rovnako ako vstupy zo sluchového kortexu. Inferior colliculus stredného mozgu je umiestnený hneď pod centrom vizuálneho spracovania, známeho ako superior colliculus. Funkciu IC môžeme prirovnať k počítaču ako komplexné prepojenie vo vnútornej organizácii. IC sú veľké sluchové centrá na pravej a ľavej strane stredného mozgu. Je rozdelený do troch častí, centrálné jadro IC (CNIC), dorzálny a laterálny kortex. Schádzajú sa tu vstupy z viacerých neurónov v perifernejších častiach dráhy. Podľa frekvenčnej závislosti sa tu nachádzajú tri typy neurónov[3] :

- Neurón typu V – má excitačnú oblasť v tvare V, rozširuje sa s hlasitosťou
- Neurón typu I – má silnú frekvenčnú selektivitu nezávislú od hlasitosti
- Neurón typu O – excitácia v blízkosti prahu, inhibícia pre vyššie hlasitosti

### 2.2.4 Colliculus Superior (SC)

Ďalšou fázou zvukového signálu je štruktúra colliculus superior, nazývaný aj optické tektum, kde sa k nej pridáva vizuálna a ďalšie senzorické mapy, pričom tieto mapy sú vzájomne zarovnané a vytvárajú tak jednotnú multimodálnu reprezentáciu priestoru[4].

V optickom tekte sú neuróny, ktoré reagujú ako na vizuálne, tak aj na sluchové stimuly, a ich vizuálne a sluchové polia sú navzájom zarovnané a prepojené, čo v praxi znamená napríklad to, že sa pozrieme približne na miesto, odkiaľ zaznel zvuk

---

### 2.2.5 Medial geniculate body

Medial Geniculate Body (MGB) predstavuje prenos medzi inferior colliculus (IC) a sluchovým kortexom (AC). Skladá sa z niekoľkých sub-jadier, ktoré sa vyznačujú neurónovou morfológiou a hustotou ich aferentných a eferentných prepojení a zakódovaných charakteristík svojich neurónov. Predpokladá sa, že MGB ovplyvňuje smer a udržiavanie pozornosti. MGB má tri hlavné kategórie, ventrálnu (VMGB), dorzálnu (DMGB) and mediálnu (MMGB). VMGB je špecifické pre zvukové spracovanie informácií, DMGB a MMGB získavajú iné informácie ako zvukové. Funkcia VMGB sa primárne považuje za prekladanie frekvencie, intenzity a binaurálnej informácie sluchovému kortexu.

### 2.2.6 Sluchový kortex (AC)

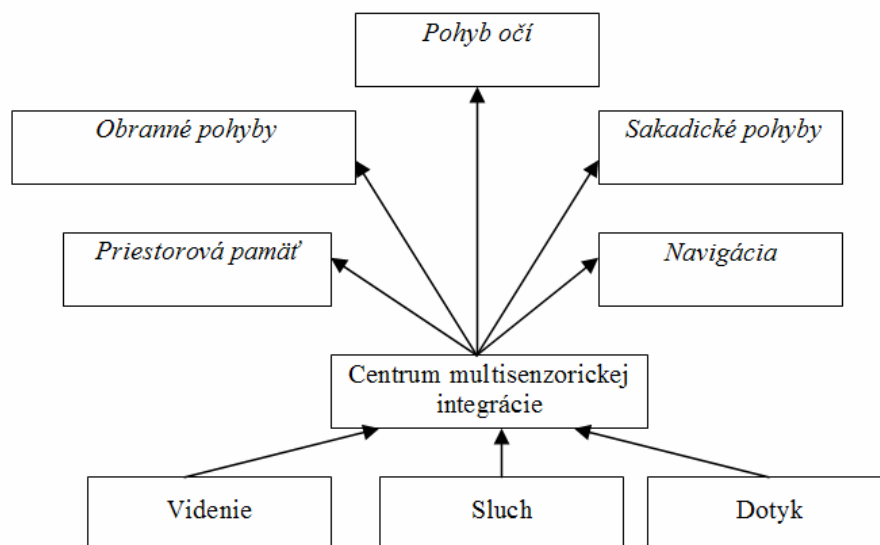
Sluchový kortex je najviac organizovaná procesná jednotka zvuku v mozgu. Neuróny v sluchovom kortexe sú organizované v závislosti od frekvencie zvuku, na ktoré reagujú najlepšie. Neuróny na jednom konci sluchového kortexu najlepšie reagujú na nízke frekvencie, neuróny na druhej strane najlepšie reagujú na vysoké frekvencie. Sluchový kortex tvoria tri štruktúry – primárna, sekundárna a terciálna. Primárny sluchový kortex je tonologický organizovaný, čo znamená, že niektoré bunky v sluchovom kortexe sú citlivé na určitú frekvenciu. Úlohou tejto časti primárneho kortexu je zistiť základné tóny zvuku, jej hlasitosť. Sekundárny sluchový kortex už spracúvava harmonické, rytmické a melodické tóny. V terciálnej časti sa spracúvajú všetky poznatky o prijímanom tóne. Sluchový kortex sa podieľa na úlohách, ako je identifikácia a segregácia zvukových "objektov".

### 3 Priestorové sluchové vnímanie

Vnímanie a reprezentácia priestoru sú dôležitými kognitívnymi schopnosťami živých ale aj umelých organizmov. Človek používa na orientáciu v priestore primárne zrak, ale k priestorovému vnímaniu prispievajú aj ostatné zmysly, sluch, hmat atď.

Takémuto vnímaniu priestoru hovoríme multimodálne vnímanie priestoru[5]

Aj keď sa to nezdá, sluchové priestorové vnímanie je podstatne zložitejšie ako vizuálne[5]. Obraz, ktorý vidíme sa premieta na sietnicu a táto informácia sa prenáša do mozgu. Avšak, pri sluchovom vnímaní neexistuje žiadna presná mapa, na ktorú by sa mohla premietnuť sluchová informácia. Pozícia zdroja zvuku je vypočítaná na základe informácií o amplitúde a frekvencii, ktoré nám dáva bazilárna membrána. Tento výpočet sa deje na rôznych úrovniach aferentnej dráhy a zároveň aj na vyšších úrovniach kognitívneho procesu. Z toho môžeme vyvodit' záver, že analýza vnímaného zvuku závisí na prostredí, v ktorom sa pohybujeme, na samotných vlastnostiach zvukového stimulu a konkrétneho fyzického a psychického stavu poslucháča.



Obr. 4 Multimodálne vnímanie priestoru. Neurálna syntéza multisenzorických vnemov zlepšuje pravdepodobnosť detekcie signálu (podnetu)[5]



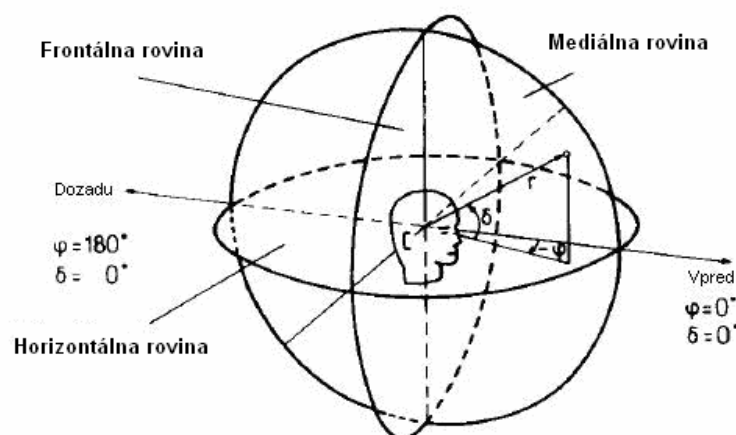
### 3.1 Lokalizácia zvukov

Lokalizácia zvukov je pravdepodobne najdôležitejšia funkcia sluchu. Pomáha nám sa orientovať a reagovať na jednotlivé podnety v priestore.

Poloha zdroja zvuku sa určuje pomocou troch hlavných koordinátov[14] :

- Azimut – je to relatívna poloha zdroja zvuku v horizontálnej rovine vzhľadom na určitú referenciu. Obvykle touto referenciou je tvár poslucháča.
- Elevácia – je to relatívna poloha zdroja zvuku vo vertikálnej rovine vzhľadom na určitú referenciu. Obvykle touto referenciou je tvár poslucháča.
- Vzdialenosť – tento parameter určuje vzdialenosť poslucháča od zdroja zvuku.

Priestor vo všeobecnosti je definovaný troma rovinami[3]: horizontálnou, vertikálnou a mediálnou. Na určovanie polohy v jednotlivých rovinách využíva človek rozdielne systémy. Napríklad na detekciu zvuku vo vertikálnej rovine nám postačí informácia z jedného ucha ale v horizontálnej rovine potrebujeme informáciu z oboch. Na určenie azimutu používame dve hlavné metódy ITD (Interaural time difference – rozdiel v čase jednotlivých zvukov kedy sú zachytené sluchovými orgánmi) a ILD (Interaural level difference – rozdiel v hlasitosti zvukov pri zachytení sluchovými orgánmi).



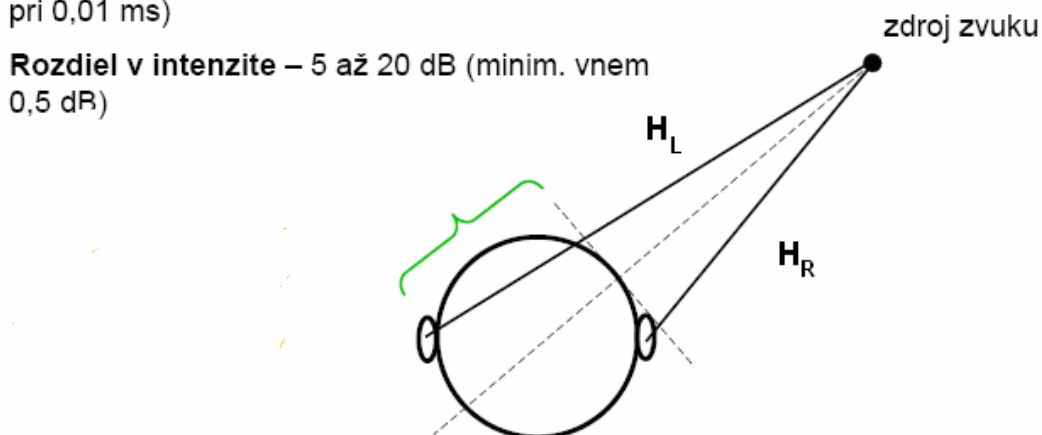
Obr. 5 Systém súradníc použitý pri sluchových experimentoch,  $r$  je vzdialenosť,  $\varphi$  je azimut a  $\delta$  je elevácia zdroja zvuku [3]

### 3.2 Smerová prenosová funkcia, tzv. Head-related transfer function (HRTF)

Aby bolo možné simulovať akýkoľvek zdroj niekde v priestore pomocou slúchadiel, musí sa jednoducho prehrať stereo signál, ktorý spôsobí v ušných bubienkoch presnú akustickú vlnu, ktorá by mala prichádzať z požadovaného zdroja. To je všeobecne uskutočnené empirickým meraním prenosových funkcií, ktoré popisujú, ako sa akustický signál na určitom mieste v priestore transformuje, ako cestuje a zasahuje hlavu a uši poslucháčov. Teda, aby bolo možné simulovať ľubovoľný zdroj zvuku v konkrétnom mieste, je vhodné použiť prenosové funkcie pre filtrovanie požadovaného zdroja signálu. Výsledný stereo signál je potom korektný pre nahradenie prenosových vlastností a prezentovaný poslucháčovi. Táto dvojica priestorových filtrov, ktoré popisujú ako je zvuk transformovaný a ako zasahuje poslucháča je známa ako Head-Related Transfer Functions (HRTF) [6]. HRTF popisuje ako simulovať priamy zvuk dosahujúci poslucháča z určitej pozície, ale vo všeobecnosti nezahŕňa akúkoľvek odrazovú zvukovú energiu. Je v nej zahrnuté ITD, ILD a zmeny v spektre spôsobené odrazmi zvukov. Pre zdroje vzdialené viac ako 1m od hlavy HRTF závisí od azimutu a elevácie, pre bližšie zdroje závisí aj od vzdialenosti. Každému bodu v priestore zodpovedá dvojica HRTF, jedna pre pravé, druhá pre ľavé ucho. Keďže HRTF závisí od tvaru hlavy a uší, je individuálna. Ak sa potom pri simulácii používa HRTF nameraná na inom človeku, vnem nemusí byť taký, ako sa očakáva.

**Časový rozdiel** – až 0,6 ms (človek vníma rozdiel už pri 0,01 ms)

**Rozdiel v intenzite** – 5 až 20 dB (minim. vnem 0,5 dB)

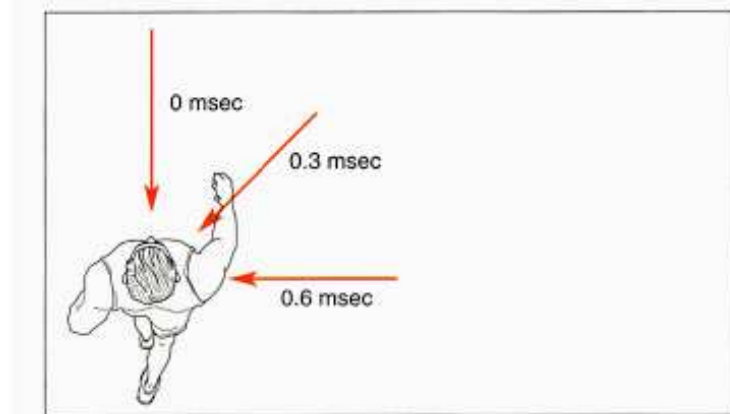


Obr.6 HRTF pre ľavé a pravé ucho[6]

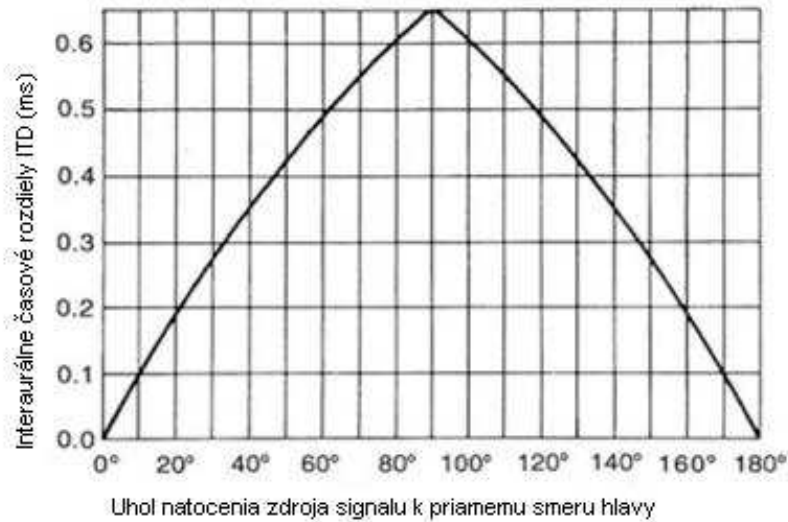
### 3.2.1 Lokalizácia zvukov v horizontálnej rovine ITD a ILD

#### 3.2.1.1 ITD - Interaurálny časový rozdiel

Tak isto ako na lokalizáciu vo vizuálnom systéme využívame obe oči, využívajú sa na lokalizáciu zdroja signálu obe naše uši. Pri interaurálnom časovom rozdieli sa skúma, ako sa líši čas dorazenia zvuku v horizontálnej rovine[3] do jednotlivých uší vzhľadom na umiestnenie zdroja zvuku voči hlave. Keďže zvuk, v závislosti na prostredí, sa šíri rýchlosťou 340m/s vznikajú rozdiely v čase kedy dorazia do oboch uší. Rozdiel je nulový ak sa zdroj zvukového signálu nachádza priamo pred alebo za poslucháčom. Rozdiely však vznikajú pri iných uhloch, tým že zvuk musí prejsť dlhšiu dráhu k jednému z uší ako ku druhému. Tieto rozdiely sú v milisekundách ale sú postačujúce na to aby mozog dokázal určiť smer odkiaľ daný zvuk pochádza[5]. V mozgovom kmeni sú špecializované neuróny citlivé na rôzne ITD a pomocou nich dokážeme určiť, kde bol zdroj daného zvuku. ITD je pre danú polohu zdroja zvuku rovnaký, nezávisí od výšky tónu (frekvencie). V prípade, že nepočujeme nástup zvuku, je určenie ITD zložitejším problémom, pretože tento zvuk počujeme naraz v oboch ušiach. Môžeme však porovnávať rozdiel v tom, kedy rovnaká fáza zvukovej vlny dôjde do ktorého ucha. V prípade nízkofrekvenčných zvukov, ktoré majú väčšiu vlnovú dĺžku ako je šírka hlavy, je to relatívne jednoduché, keď sa však jedná o vysokofrekvenčné zvuky, situácia je zložitejšia.



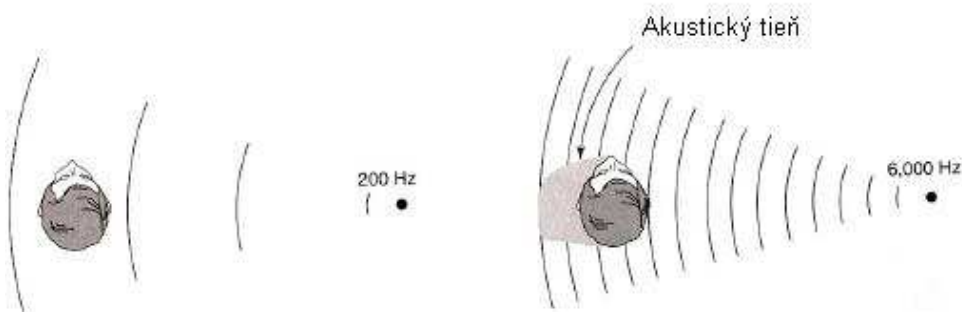
Obr. 7 Časové oneskorenie signálu vzhľadom na polohu zdroja a hlavy[3]



Obr. 8 Graf ITD vzhľadom na uhol zdroja signálu[3]

### 3.2.1.2 ILD – Interaurálny rozdiel v intenzitách

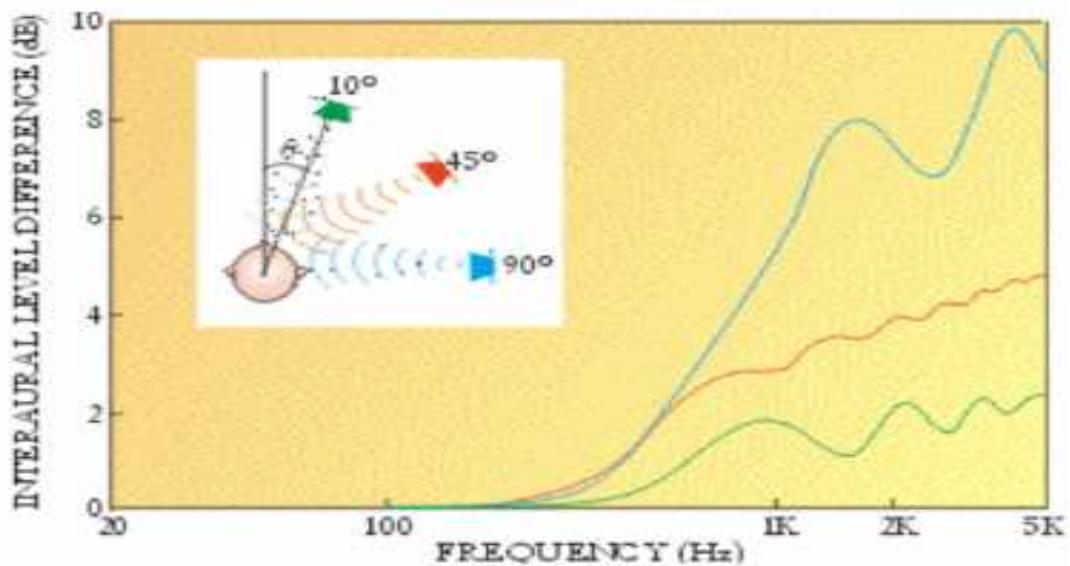
Interaurálne rozdiely úrovně sú omnoho menej zreteľné, ak zvukový zdroj vytvára nízke frekvencie. To znamená, že interaurálny rozdiel úrovní je menej závažný jav pre zvuky s nízkou frekvenciou než pre zvuky s vysokou frekvenciou. Pri nízkofrekvenčných zvukoch je dĺžka zvukovej vlny väčšia ako priemer hlavy, ktorý je okolo 20 cm. Inými slovami, hlava je príliš malá než aby stála v ceste nízkofrekvenčným zvukom. Pretože nie sú prerušované hlavou, strácajú len veľmi málo zo svojej intenzity pri ceste z jednej strany hlavy na druhú.



Obr. 8 ILD rozdiel pri určovaní pozície pri nízkofrekvenčnom a vysokofrekvenčnom tóne[5]

Naopak, vysokofrekvenčné zvuky sú hlavou blokové, pretože zvuková vlna ju musí obísť aby sa dostala od jedného ucha k druhému, vzniká tzv. akustický tieň[5], ktorý ovplyvňuje amplitúdu týchto zvukov. Ak zvuk znie priamo z predu, rozdiel v intenzitách je nulový, ak kolmo z boku, tak maximálny. ). ILD je teda na rozdiel od ITD frekvenčne závislé, rastie s rastúcou frekvenciou, čo môžeme vidieť na Obr.11.

Môžeme zhrnúť, že zvuky v rozsahu približne 20-2000 Hz lokalizujeme pomocou časových rozdielov (ITD) a zvuky z intervalu 2000-20 000 Hz pomocou rozdielov v intenzite (ILD).[7]



Obr. 9 ILD v závislosti od frekvencie zvuku pre rôzne polohy zdroja zvuku[5]

### 3.2.2 Duplexná teória

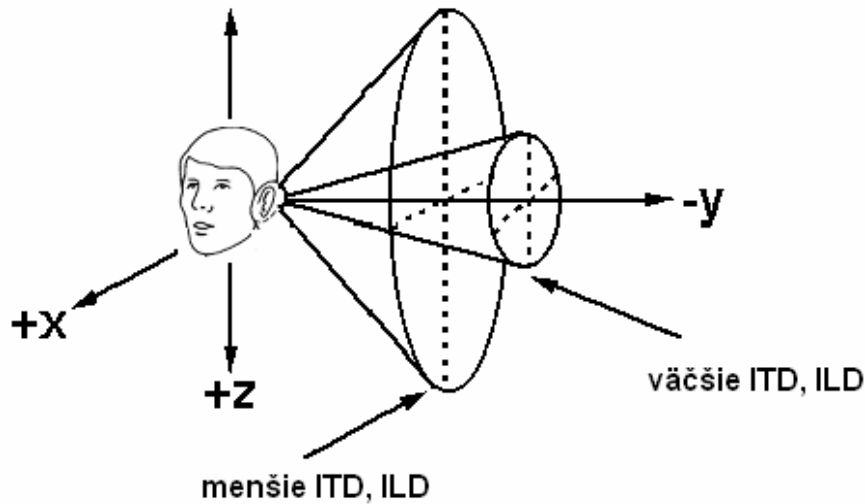
Duplexná teória vysvetľuje schopnosť ľudí lokalizovať zvuky pomocou časových rozdielov medzi príchodom zvuku do oboch uší (ITD) a pomocou rozdielu v úrovni hlasitosti zvuku vstupujúcom do oboch uší (ILD)[6]. Táto teória tvrdí, že ITD je používané na lokalizovanie nízko frekvenčných zvukov, zatiaľ čo ILD je používané pri lokalizácii vysokofrekvenčných zvukov. Limita duplexnej teórie je to, že neúplne vysvetľuje smerové pocity, ako nevysvetľuje schopnosť rozlíšiť zdroj zvuku priamo pred a za poslucháčom. Taktiež teória sa týka iba lokalizácie zvuku v horizontálnej rovine okolo hlavy. Táto teória taktiež neberie do úvahy použitie ušnice pri lokalizácii.

Duplexnú teóriu testovali na experimentoch pomocou trojrozsmernej gule na modelovanie hlavy a meranie ITD ako funkciu azimutu pre odlišné frekvencie. Použitý model mal vzdialenosť medzi 2 ušami približne 22-23 cm. Počiatočné merania zistili, že maximálny časový rozdiel, približne 660 us bol keď zdroj zvuku bol umiestnený priamo na 90 stupňoch k jednému uchu. Tento časový rozdiel koreluje na zvukový vstup o frekvencii 1500 Hz. Výsledky ukázali, že ak prehraný zvuk mal frekvenciu menšiu ako 1500 Hz vlnová dĺžka zvuku je väčšia ako časový rozdiel medzi ušami. Teda je tu fázový rozdiel medzi zvukovými vlnami vstupujúcimi do uši poskytujúci lokalizačnú napovedá. Ak mal zvukový vstup frekvenciu blízku 1500 Hz, vlnová dĺžka zvuku je podobná skutočnému časovému oneskoreniu. Teda kvôli veľkosti hlavy a vzdialenosti medzi ušami je tu redukovaný fázový rozdiel, takže sa začína vytvárať lokalizačná chyba. Keď je použitý vysokofrekvenčný zvukový vstup o frekvencii vyššej ako 1500 Hz, vlnová dĺžka je kratšia ako vzdialenosť medzi dvoma ušami, tieň hlavy je vytvorený a ILD poskytuje napovedu pre lokalizáciu tohto zvuku. Viedli sa aj experimenty merajúce to, ako sa mení ITD s meniacim sa azimutom reproduktorov okolo hlavy pri rozdielnych frekvenciách, ale na rozdiel experimentov s trojrozmernou guľou sa používali ľudské subjekty oproti modelu hlavy. Výsledok experimentu súhlasil so záverom o ITD. Experimenty taktiež potvrdili, že nieže žiadny rozdiel v ITD vtedy ak je zvuk prezentovaný priamo pred alebo za poslucháčom (na 0 a 180 stupňoch). Vysvetlenie pre toto je, že zvuk je zachováva vzdialenosť pre obe uši. Interaurálny časový rozdiel sa zmenil ako sa reproduktory menili okolo hlavy. Maximálne ITD (660 us) nastalo ak zdroj zvuku bol na pozícii 90 stupňoch ku jednému uchu.

### 3.2.3 Kužel' nejednoznačnosti

Detekcia širokospektrálnych zvukov v horizontálnej rovine nám nerobí žiadny problém. Avšak, v situácií keď sa nemení len azimut(mení sa pozícia v smere hore/dole alebo vpred/vzad), ITD a ILD nám neudávajú polohu zvuku úplne presne. Problémom je, že jednej hodnote ITD a ILD zodpovedá viacero bodov v priestore, ktoré geometricky vytvárajú kužel'. Tento kužel' sa nazýva „kužel' nejednoznačnosti“[6]. Na povrchu tohto kužela sa nemení ani ITD ani ILD. V skutočnosti je tento kužel' trochu zdeformovaný, čo je spôsobené nepravidelným tvarom hlavy. Znamená to, že aj keď poznáme uhol odkiaľ znie zvuk, nevieme uhádnuť, či prichádza spredu alebo zozadu, zhora alebo zdola. Aby sme vedeli lokalizovať takéto zvuky, pomáhame si malým

pootočením alebo nakonením hlavy, čím sa zmení uhol doliehajúceho zvuku a eliminuje sa tým vzniknutá nejednoznačnosť.



Obr. 10 Kužeľ nejednoznačnosti. Body na jeho povrchu majú rovnaké ITD a ILD[6]

### 3.3 Simulácia sluchového priestoru a lateralizácia

Simuláciu sluchového priestoru môžeme z technického hľadiska popísať ako digitálnu počítačovú simuláciu trojrozmerného priestoru zvuku pomocou ktorej sa imituje reálny svet. Teda trojrozmerné prostredie, ktoré je vymodelované počítačom. V tejto práci, ktorou sa sledovala lokalizácia zvukov bol sluchový priestor vytvorený pomocou slúchadiel. Štúdie zaoberajúce sa touto problematikou často využívajú takéto virtuálny sluchový priestor namiesto skutočného. Výhoda využitia takejto simulácie spočíva v tom, že je možné generovať a prezentovať zvuky s rôznymi ITD a ILD. To znamená, že môžeme jednoducho sledovať vplyv týchto lokalizačných parametrov samostatne. V reálnom svete takúto možnosť nemáme, pri zmene jedného parametra sa automaticky zmemí aj druhý parameter.

Ďalším faktorom, ktorý sa podstatne líši od reality je „kontrola“, v reálnom svete je množstvo rušivých zvukov, ktoré nieje možné ovplyvniť alebo eliminovať, virtuálne prostredie nám takúto možnosť poskytuje. Simuláciou zvuku sa snažíme imitovať zvuk ktorý by znel rovnako aj v skutočnosti, ale napriek mnohým výhodám virtuálneho priestoru vznikajú deje ktoré tomu nenasvečujú. Aj keď sa pomocou slúchadiel veľmi

---

jednoducho simuluje zvuk z jednotlivých smerov, stále ho počujeme niekde uprostred havy, čiže na spojnici oboch uší. Subjekty musia „externalizovať“ počutý zvuk – prestaviť v priestore vôkol nich. Tento jav má veľký vplyv pri lokalizácii zvuku. V takýchto experimentálnych štúdiách skúmajúcich lokalizáciu zvukov sa skôr vníma posun do strany ako samotný azimut. Preto sa v tomto prípade namiesto pojmu lokalizácia používa pojem lateralizácia[6].

Pri simulácii zvukov, v ktorých sa menia interaurálne rozdiely sa zvuková scéna pohybuje akoby v hlave.[6] Zmenou ITD s obraz posunie do strany ale pomocou zmeny v ILD ho vieme presunúť späť do východzej pozície. Tento jav sa anglicky nazýva „time=intensity trading“(zameniteľnosť času a intenzity.)

Dosiahnuť aby simulované zvuky zneli čo najskutočnejšie k tým reálnym je veľmi náročné, preto sa často virtuálne prostredie neprispôbuje konkrétnej osobe. Potom ITD a ILD vo virtuálnom priestore nezodpovedajú skutočnej pozícii v reálnom priestore, ktoré sú pre človeka prirodzené. Avšak človek sa takýmto zmenám dokáže pôsobením dlhodobého alebo krátkodobého pôsobeniu prispôbiť a tým eliminovať nepresnosti, čo poukazuje na plasticitu priestorového sluchového vnímania.



## 4 Plasticita v priestorovom sluchovom vnímaní

Schopnosť pretvárať, meniť, prispôbovať sa zahŕňa jeden pojem a tým je „plasticita“. V tejto práci je skúmaná plasticita priestorového sluchového vnímania a tá sa prejavuje v zmene mozgovej mapy, v ktorej sa reprezentuje priestorová sluchová informácia. Kontextuálnou plasticitou máme na mysli, spôsob, akým bola zmena vyvolaná, teda, že bola vyvolaná kontextom, kde kontext je definovaný sluchovým prostredím, v ktorom sa poslucháč nachádza a úlohou, ktorú má ten poslucháč v danom prostredí robiť. Z viacerých štúdií sa zistilo, že na základe nových skúseností sa priestorové sluchové vnímanie dokáže meniť, prispôbovať sa. Z týchto zistení možno jednoznačne povedať, že priestorové sluchové vnímanie nieje statické. V tejto časti bude vysvetlené prečo vznikajú takéto plastické zmeny a ako tomu podliehajú zmeny v sluchovej dráhe.

### 4.1 Príčiny plasticity

Ak zvuk dorazí do nášho sluchového systému, mozog pomocou interaurálnych rozdielov časov, intenzít a amplitúdového spektra vypočíta danú polohu zdroja zvuku. Hodnoty týchto sluchových lokalizačných parametrov by mali asociovať s odpovedajúcim miestom v priestore.

Ak je lokalizácia správna, tak naučené asociácie by sa nemali meniť. Avšak môže nastať situácia, že už naučená asociácia bude nesprávna a v takomto prípade by sa mal sluchový systém prispôbiť. To znamená lokalizačným parametrom priradiť nové odpovedajúce hodnoty.

Príklad plasticity, adaptácie je napríklad vo vývojovom štádiu človeka. S rastom človeka sa menia jeho proporcie a dochádza k anatomickým zmenám. Rastom hlavy sa uši dostávajú ďalej od seba a nastáva zmena v ITD, zvyšuje sa oneskorenie, s akým zvuk dorazí do druhého ucha. Zmenou vonkajšieho tvaru ucha nastávajú zmeny v ILD, čo vplyva na spektrálne charakteristiky[8].

Jednoduchým príkladom existencie binaurálnej plasticity je v zmene akustického prostredia, v ktorom sa pohybujeme a podvedome počúvame a lokalizujeme zvuky. Na rozdiel od otvoreného priestranstva vo vnútorných priestoroch dochádza k odrazu zvukov od stien, čo teoreticky komplikuje lokalizáciu zvukov. Napriek tomu dokážeme

zvuky veľmi dobre lokalizovať, čo znamená, že náš sluchový systém sa vie adaptovať a s takýmito zmenami ľahko vysporiadať. Ďalším príkladom môže byť poškodený sluch, konkrétne poškodenie sluchu jedného ucha alebo poškodenie vo vyššej vrstve sluchovej dráhy, čo by malo za následok, že konkrétne hodnoty sluchových parametrov by zodpovedali inému miestu v priestore. Ak by sa mozog dokázal týmto zmenám prispôbiť, mohlo by to mať veľký význam v živote človeka. Plasticitu môžeme definovať ako zmenu vo funkcii sluchového systému spôsobenú zmenenými vstupmi, vstupmi spôsobenými klinicky alebo vstupmi vyvolanými experimentálne.

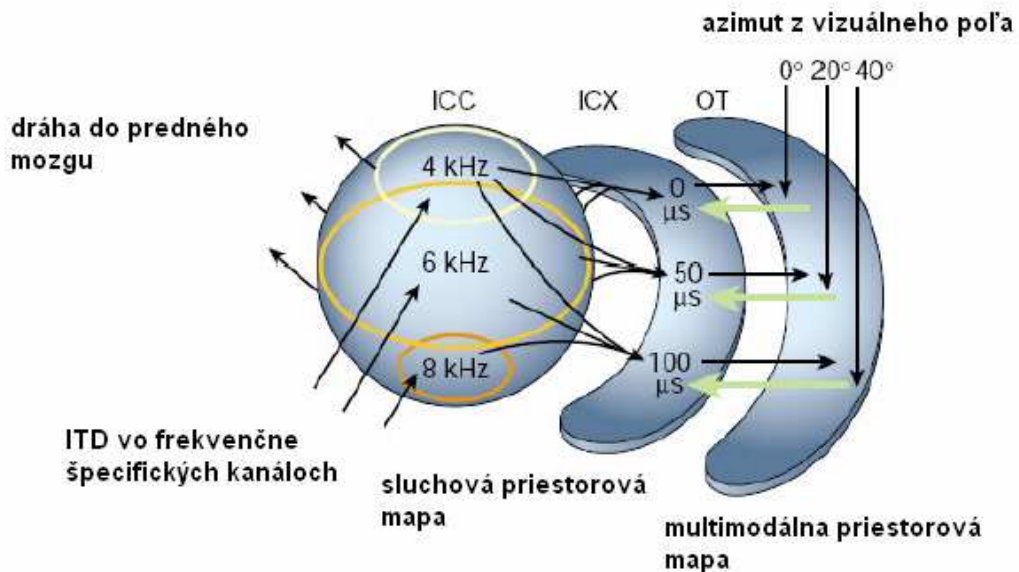
## 4.2 Sluchová priestorová mapa

Aj keď vieme, že plasticita v priestorovom sluchovom vnímaní určite existuje, nevieme však s určitosťou povedať na akej úrovni spracovania sa prejavuje. Najčastejšie sa plasticita skúma v sluchovej priestorovej mape a v mozgovej štruktúre nazývanej stredný mozog. Plasticita sa skúmala na ľudských subjektoch ale aj na zvieratách. Jedným z najzaujímavejších živočíšnych druhov pre tento typ výskumu sú sovy. Pre sovy ako nočné predátory je lokalizácia zvukov životne dôležitá. Sovy takmer nedokážu pohybovať očami a preto ak chcú zamerať zdroj zvuku (napr. nejakú korisť), musia otočiť hlavu daným smerom, čo je relatívne ľahko merateľný spôsob odpovedania. Presnosť lokalizácie sa následne vyhodnocuje z pootočenia hlavy sovy. Oblasti lokalizačnej dráhy mozgu sovy a človeka sa bezprostredne líšia ale pochopenie plasticity sovy môže pomôcť pochopiť plasticitu u človeka.

Od kochley až po sluchový kortex sú jednotlivé oblasti prevažne topologicky organizované. Frekvenčné kanály sa v strednom mozgu zbiehajú a vytvárajú topograficky organizovanú mapu sluchového priestoru. C tejto mape sa nachádzajú neuróny naladené na presné hodnoty lokalizačných parametrov, čiže na konkrétne pozície v priestore.

Táto mapa sa v lokalizačnej dráhe mozgu sovy[11] vytvára v jadre nazývanom Inferior colliculus[9], do ktorého dochádzajú z centrálného jadra (ICC), pre jednotlivé frekvencie. Táto sluchová mapa je potom premietnutá do ďalšej štruktúry, nazvanej optické tektum (OT)(u cicavcov tiež nazývanom aj Colliculus superior), kde sa k nej pridáva aj vizuálna mapa (a ďalšie senzorické mapy), pričom tieto mapy sú vzájomne zarovnané a vytvárajú tak jednotnú multimodálnu reprezentáciu priestoru[9]. Táto mapa

je zodpovedná napríklad za to, že sa pozrieme na to miesto, odkiaľ sme počuli zvuk[10]. Multimodálna reprezentácia priestoru sa prejavuje tak, že v tekte sa nachádzajú neuróny, ktoré reagujú na vizuálne stimuly a ich vizuálne a sluchové polia sú navzájom zarovnané. Ak by sme chceli zistiť na aké hodnoty lokalizačných sluchových parametrov by mal daný neurón normálne reagovať, musíme poznať polohu vizuálneho receptívneho poľa. Takto môžeme potom sledovať plasticitu, ktorá vznikne v ladení neurónov.



Obr. 11 Schématická reprezentácia lokalizačnej cesty v strednom mozgu sovy[9]

### 4.3 Vyvolanie plasticity

Ak zmeníme hodnoty parametrov ILD a ITD vyvolaných zvukom prichádzajúcich z konkrétnej pozície v priestore tak môžeme sledovať schopnosť sluchového systému adaptovať sa. Nejednoduchší spôsob je prekrytie jedného ucha. Podľa intenzity hlasitosti v jednom a druhom uchu vieme určiť polohu zvuku. Ak počujeme zvuk hlasnejšie v pravom ako v ľavom uchu tak zdroj zvuku by sa mal nachádzať na pravej strane. Predstavme si však tú istú modelovú situáciu so zakrytým pravým uchom[12]. Zvuk budeme počuť hlasnejšie v ľavom uchu ale vizuálna spätná väzba nám dáva informáciu, že zdroj zvuku sa nachádza vpravo a dôsledkom toho vzniká konflikt medzi sluchovo a vizuálne vnímanou polohou zdroja. Cieľom je sledovať, či sluchový systém dokáže naučené lokalizačné parametre upraviť tak, aby bola identifikácia smeru zvuku presná. Vizuálna informácia má podstatný vplyv na kalibráciu sluchovej priestorovej

mapy, sluchová mapa sa snaží zarovnať s vizuálnou a preto vznikajú plastické zmeny. Vizuálna mapa je v takýchto senzorických konfliktoch spoľahlivejšia pravdepodobne vďaka tomu, že je projekciou sietnicovej mapy, kým sluchová mapa sa musí vypočítať z hodnôt sluchových parametrov. Posun vizuálneho poľa môže byť preto ďalším zo spôsobov vyvolávania plasticity.

Vyvolanie plasticity môžeme rozdeliť na zdola-nahor a zhora-nadol (angl. bottom-up a top-down). Tieto faktory nám hovoria o vyvolaní plasticity v hierarchii spracovania sluchového podnetu od počiatočného až po zložitejšie spracovávanie. Ak počúvame dlhšie prehrávaný konštantný zvuk, vyvolanie plasticity v tejto hierarchii bude zdola-nahor. Pravdepodobne to súvisí s habituáciou priestorových reprezentácií, to znamená, že neuróny predstavujúce určitú polohu v priestore sa „unavia“. Píkladom na vyvolanie plasticity zhora-nadol je vizuálna alebo akákoľvek iná spätná väzba, ktorá nám hovorí kde sa nachádza zdroj zvuku a ovplyvní nižšiu úroveň čím dochádza k premapovaniu sluchovej mapy.

#### 4.4 Časové škály plasticity

Spôsobené plastické zmeny môžu prebiehať v mozgu na základe rôznych časových intervalov. Študujú sa dlhodobé zmeny (spomínaná adaptácia na posunuté vizuálne pole), ktoré vznikajú v priebehu niekoľkých týždňov ale aj krátkodobé (rýchla adaptácia na zmeny prostredia), ktoré vznikajú v priebehu niekoľkých minút. Predpokladá sa, že dlhodobé a krátkodobé adaptácie neprebiehajú v mozgu na tom istom mieste. Dlhodobá adaptácia ovplyvňuje sluchovú priestorovú mapu v optickom tekte, ako bolo ukázané aj na soviach, kde došlo ku premapovaniu mapy. Krátkodobá adaptácia sa však odohráva na vyššej úrovni lokalizačnej cesty spracovania sluchového podnetu, pravdepodobne až niekde v kortexe. Je pravdepodobné, že na lokalizačné hodnoty parametrov odpovedá ten istý neurón pred aj po adaptácii, čo v skutočnosti znamená, že sa nemení reprezentácia priestoru ale len mapovanie vnímanej polohy na to, čo subjekt odpovie [13].

## 5 Experimentálna časť

Experiment nadväzuje na štúdiu N Kopčo, V Best, and BG Shinn-Cunningham (2007). Sound localization with a preceding distractor, Journal of the Acoustical Society of America.

### 5.1 Cieľ

Cieľom tejto práce bolo určiť, na ktorej úrovni spracovania zvuku v mozgu sa dejú plastické zmeny, ktoré sledujeme pri kontextuálnej plasticite.

### 5.2 Hypotézy

Sluchová dráha má niekoľko centier špecializovaných pre spracovanie priestorovej informácie. Sluchová štruktúra mozgového kmeňa (superior olivary complex, inferior colliculus) reprezentuje sluchový priestor rozkódovaním odpovedajúceho binaurálneho podnetu, čiže interaurálneho rozdielu v hlasitosti a časového rozdielu kedy zvuk dorazí do oboch uší. Predpokladá sa, že kontextuálna plasticita nastáva na vyššom stupni spracovania zvuku v ktorom je sluchový priestor reprezentovaný exocentrickými priestorovými súradnicami a nie binaurálnymi podnetmi. Tento stupeň môže byť v primárnej sluchovej kôre alebo vo vyšších kortikálnych oblastiach, ako napríklad posteriorna parientálna kôra, v ktorej interaguje priestorová reprezentácia a priestorová pozornosť.

### 5.3 Motivácia experimentu

Kontextuálnu plasticitu, ktorú sme sledovali, môže prebiehať na rôznych úrovniach spracovávania sluchového podnetu. Lokalizácia zvuku je proces, ktorý prebieha niekoľkými štádiami. Zvuk dorazí do uší, hlasnejšie a skôr do toho ucha, ktoré je bližšie zdroju zvuku. Niekde v mozgovom kmeni sú neuróny, ktoré spracujú rozdiely v časoch (ITD) a intenzitách (ILD). Na tejto úrovni je sluchový priestor reprezentovaný len hodnotami ITD a ILD (môžeme si to predstaviť ako nejakú ITD a ILD mapu), plasticita ale možno vzniká niekde na vyššej úrovni spracovania, v mape, do ktorej vstupujú výstupy z ILD a ITD mapy, a v ktorej je sluchový priestor reprezentovaný

v exocentrických priestorových súradniciach a nazveme ju priestorová mapa. Vo virtuálnom sluchovom prostredí je možné zmeniť ITD nejakého zvuku nezávisle od jeho ILD. Plasticita sa bude budovať priestorovým zvukom simulovaným len za pomoci ITD (upravíme ho tak, aby ILD bolo rovnaké pre oba zvuky) a testovať lokalizáciu na zvukoch simulovaných za pomoci ILD. Plasticita by sa tak mala vybudovať na ceste z ITD mapy do priestorovej mapy. Ak sa zmeny prejavujú v ILD mape, znamená to, že zmena sa musela udiať niekde na vyššej úrovni spracovania, ak nie, tak len niekde na úrovni ITD mapy.

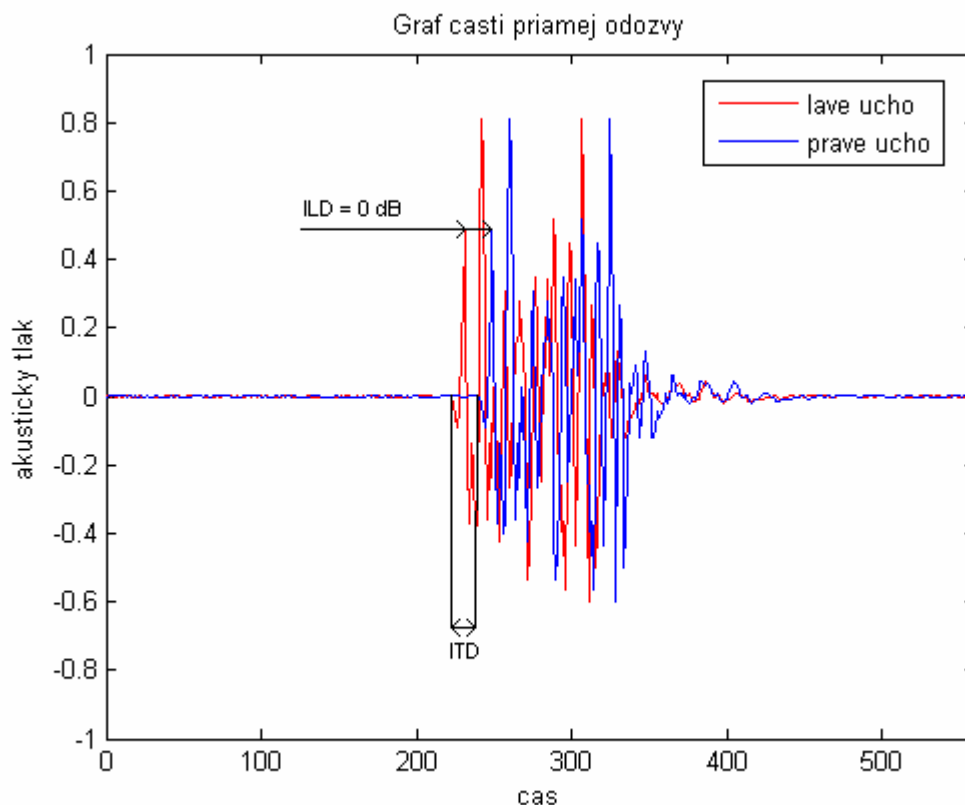
## 5.4 Návrh experimentu

### 5.4.1 Stimuly

V experimente sa používali rôzne typy simulácie stimulov. V tejto kapitole vysvetlím spôsob ich prípravy.

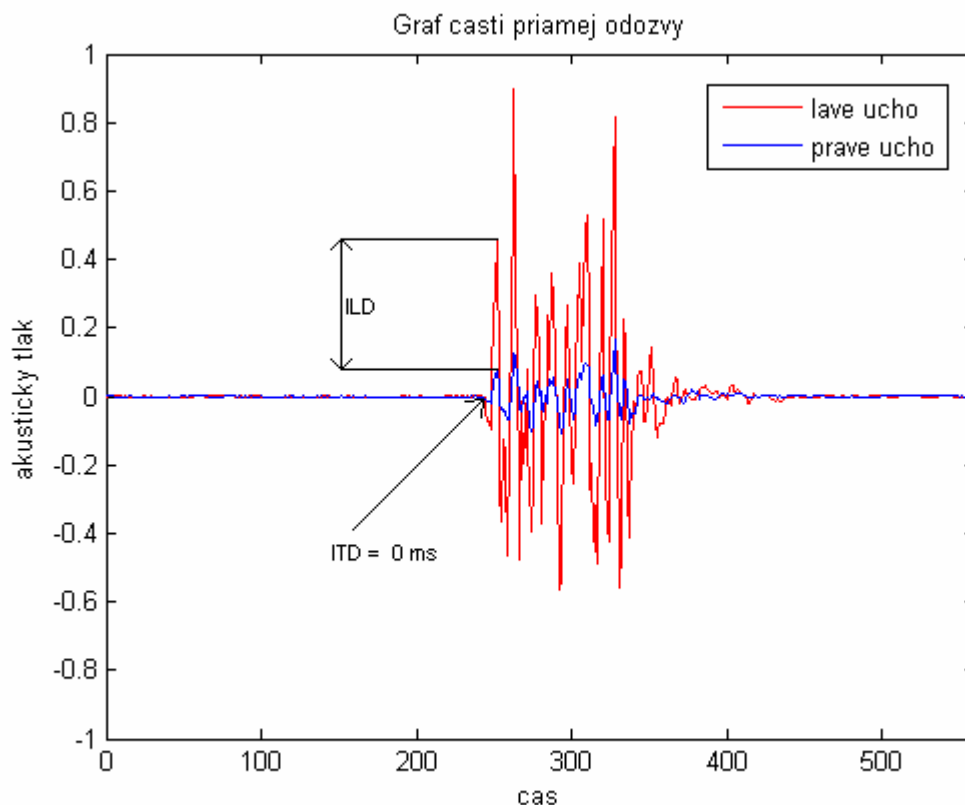
#### 5.4.1.1 ITD simulácia

Pre potreby experimentu bolo potrebné odstrániť ILD časť zvukov z HRTF. Pri tvorbe takýchto HRTF sa postupovalo cez niekoľko krokov. Najprv sa pre každú simuláciu zvuku (t.j. od -70 stupňov po 70 stupňov s krokom 10 stupňov) sa vypočítala kroskorelácia (časové opozdenie priebehu zvuku pre ľavé a pravé ucho, taktiež to vyjadruje ITD). Pre HRTF od -70 stupňov po 0 stupňov sme ponechali HRTF pre ľavé ucho a HRTF pre pravé ucho sme získali oneskorením HRTF ľavého ucha o hodnotu ITD. Pre HRTF od 10 stupňov po 70 stupňov sme postupovali rovnako, ale ponechali sme HRTF pre pravé ucho. Nasledovala konvolúcia so šumom, čo znamená, že sa za pomoci šumu a daného HRTF vytvorí nový šum, ktorý je simulovaný, aby prichádzal z toho azimutu, ktorý určuje HRTF.



#### 5.4.1.2 ILD simulácia

Pri tvorbe HRTF bez ITD sa postupovalo tak, že pre každú simuláciu zvuku (t.j. od -70 stupňov po 70 stupňov) sme vypočítali kroskoreláciu (časové opozdenie priebehu zvuku pre ľavé a pravé ucho, taktiež to vyjadruje ITD). Následne pre HRTF od -70 stupňov po 0 stupňov sme ponechali HRTF pre ľavé ucho, HRTF pre pravé ucho sme získali posunutím celého časového priebehu pravého ucha o hodnotu ITD. Pre HRTF od 10 stupňov po 70 stupňov sme postupovali rovnako, ale ponechali sme HRTF pre pravé ucho. Následne sa spravila konvolúcia so šumom.



Obr.16 Vykreslené HRTF pre obe uši, odstránené ILD

#### 5.4.2 Popis a organizácia blokov

Experiment pozostával z 8 kôl, v každom kole bola plasticita budovaná a testovaná rôznymi typmi simulácie (buď ITD, ILD alebo plná simulácia). V experimente boli 3 typy merania, pričom každé typ bol zafixovaný v jednom kole, v závislosti od simulácie distraktorových meraní:

- plná simulácia
- simulácia pomocou ITD
- simulácia pomocou ILD

Každé kolo má ako nedistraktorové testovacie meraní jeden z 3 typov:

- plná simulácia
- simulácia pomocou ITD
- simulácia pomocou ILD



Jednotlivé kolá teda vyzerali nasledovne:

ID kola	Typ kola
1	Distraktor -Plná sim, nD-plná sim
2	Distraktor-Plná sim, nD-sim ITD
3	Distraktor-sim ITD, nD-plná sim
4	Distraktor-sim ITD, nD-sim ITD
5	Distraktor-sim ITD, nD-sim ILD
6	bez Distraktora, plná simulácia
7	bez Distraktor, ITD simulácia
8	bez Distraktor, ILD simulácia

**Tab. 1 Typy kôl**

Pomer počtu nedistraktorových a distraktorových meraní v rámci jedného kola bol 25% ku 75 %. V kole bez distraktora, distraktorové merania neboli prezentované.

Jedno distraktorové kolo pozostávalo zo 182 meraní:

- 7 pozícií cieľového zvuku x 2 opakovania, to dávalo 14 meraní označovaných ako úvodné merania

- 7 pozícií x 4 opakovania, čo bolo 28 meraní označovaných ako koncové merania

- zo stredných 140 meraní, kde bola plasticita budovaná bolo 25% nedistraktorových a 75% distraktorových meraní, teda:

- 7 pozícií x 5 opakovaní bolo 35 nedistraktorových meraní

- 7 pozícií x 15 opakovaní bolo 105 distraktorových meraní

---

Jednotlivé typy meraní:

- distraktor klik plná simulácia (distraktor plná simulácia + 23 ms ticho + cieľový zvuk plná simulácia)
- nedistraktorový klik plna simulácia
- distraktor klik ILD simulácia (distraktor ILD simulácia + 23 ms ticho + cieľový zvuk ILD simulácia)
- nedistraktorový klik ILD simulácia
- distraktor klik ITD simulácia (distraktor ITD simulácia + 23 ms ticho + cieľový zvuk ITD simulácia)
- nedistraktorový klik ITD simulácia

Distraktor aj cieľový zvuk pozostávali z jedného kliku (2 ms dlhý šum) závislom na type simulácie. SOA medzi distraktorom a cieľovým zvukom bola nastavená na 25 ms. V každom sedení sa striedalo otočenie v ľavo a v pravo s tým, že pre celý experiment sa každý typ kola pomeral tri krát pri otočení vľavo, a tri krát pri otočení vpravo.

### 5.4.3 Metódy

Na tomto experimente sa zúčastnili 4 subjekty (všetci muži). Všetky subjekty mali normálny sluchový systém, potvrdený audiometrickým testom. Vek bol od 23 do 25 rokov. Všetci poslucháči už mali predchádzajúcu predošlú skúsenosť s podobným experimentom.

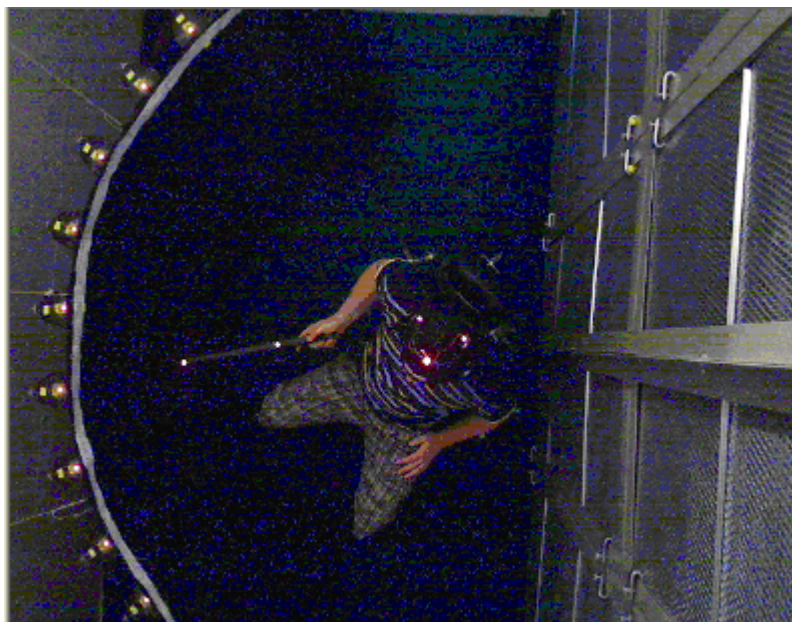
Experiment bol navrhnutý v prostredí MATLAB. Na meranie a generovanie stimulov sa použil štandardný osobný počítač s profesionálnou zvukovou kartou RME Fireface 400, zosilňovačom a prehrané pomocou slúchadiel ER-1 TUBEPHONE (výrobca Etymotic research) určených na odstránenie vonkajších rušivých zvukov.

Na určenie polohy hlavy bola použitá čiapka s tromi červenými LED diódami, diódy boli umiestnené tak, aby sa dala určiť orientácia hlavy. Poslucháči určovali vnímaný smer zdroja cieľového zvuku ukazovaním pomocou ukazovátka s dvomi

červenými LED diódami a stlačením pripevneného tlačidla. Poslucháči mali dovolené ukazovať do hocijakého smeru, aj mimo rozsahu možných cieľových zvukov. Takisto boli špecificky inštruovaní ukazovať na vnímaný smer zvuku. V miestnosti bolo aj deväť reproduktorov rovnomerne rozmiestnených po štvrti kruhu o priemere 1,2 m s poslucháčom v strede.

Poslucháči sedeli na stoličke, ktorá mohla byť otočená, takže smerovali buď na najľavejší alebo na najpravejší reproduktor. V experimente sa reproduktory na prezentáciu stimulov nepoužívali (všetky stimuly sa prehrávali v simulovanom prostredí za použitia slúchadiel), ale krajné reproduktory boli potrebné ako orientačné body, na ktoré sa mal subjekt otočiť. Počas experimentu boli prehrávané aj dodatočné inštrukcie o aktuálnom stave priebehu experimentu a informácie o natočení subjektu.

Experiment bol vedený v prázdnej, tichej pravouhlej anechoickej miestnosti a jej steny, podlaha a strop pokrývali hrubé penové obklady. Šum pozadia neovplyvňoval poslucháčovu pozornosť, pretože boli použité slúchadlá, ktoré zabraňovali nežiaducim zvukom, aby sa dostali do ucha. Na obrázku je zobrazená orientácia a pozícia poslucháča. Poslucháč tu čelí najľavejšiemu reproduktoru a cieľové zvuky sú prehrávané po jeho pravej strane. V polovici kôl bol poslucháč orientovaný na najpravejší reproduktor a cieľové zvuky boli prehrávané po jeho ľavej strane.



Experiment pozostával zo šiestich približne 80 minútových blokov oddelených prestávkami. V každom bloku poslucháči vykonali 12 kôl. Orientácia (subjekt čeliaci buď na najľavejší alebo najpravejší reproduktor) sa striedala medzi všetkými kolami, tak aby každé kolo bolo merané rovnaký počet krát pre oba otočenia. Každé kolo obsahovalo 182 meraní. Merania boli rôzneho typu simulácie v závislosti od typu kola. Jednotlivé merania sa dajú rozdeliť na dve skupiny. Jedna skupina obsahovala iba cieľový zvuk a druhá obsahovala distraktor + cieľový zvuk. Prvá skupina sa používala na testovanie, tá druhá na budovanie plasticity.

Na začiatku každého kola bol subjekt inštruovaný aby otočil stoličku tak aby čelila na vopred daný orientačný bod, sadol si na stoličku a dal hlavu do pokoja. Následne bol poslucháč inštruovaný aby zavrel oči a zostal v pokoji po zbytok kola. Poslucháčovi bol prezentovaný distraktor klik v distraktorových meraniach stále na 0 stupňoch pre oba otočenia.

Jedno meranie pozostávalo z jedného stimulu nasledovaného poslucháčovou odpoveďou, po ktorej nasledovala krátka pauza ešte predtým ako bol prezentovaný stimul pre ďalšie meranie. S týmto oneskorením subjekt nemal žiadne problémy v reorientácii z predchádzajúcej pozície na prípravu pre ďalší stimul. Nebol tu žiaden limit na to ako subjekt má odpovedať, takže rýchlosť experimentu bola kontrolovaná subjektom. V priemere jedno meranie trvalo 2-3 s a kolo trvalo 6-7 minút.

Každý stimul pozostával z cieľového zvuku prezentovaným z náhodne zvolenej pozície. Vo väčšine meraní bol distraktor prezentovaný pred cieľovým zvukom, vo zvyšku meraní nebol žiaden distraktor. Poslucháči vopred nevedeli či dané meranie bude obsahovať distraktor alebo nie, ale vždy mohli povedať či bol prezentovaný jeden alebo dva zdroje zvuku. Po každom stimule poslucháč ukázal na vnímaný smer cieľového zvuku a stlačil tlačidlo, ktoré spôsobilo, že odpoveď bola uložená a začalo ďalšie meranie.

V tomto experimente subjekty vykonali 1-3 bloky za deň. Medzi blokmi bola aspoň 10 minútová pauza. Na začiatku experimentu bola procedúra opísaná poslucháčom. Predovšetkým boli poslucháči inštruovaný pokúsiť sa ignorovať distraktor, pretože distraktorové a nedistraktorové merania sa striedali v rámci kola, a že by mali ukázať vnímanú pozíciu cieľového zvuku nedbajúc na to, čo vedľa o

experimente. Bolo taktiež zdôrazňované, že poslucháči nesmú pohnúť hlavou alebo otvoriť oči počas kola. čo by malo nepriaznivý vplyv.

## 5.5 Analýza dát

V tejto kapitole sa nachádza prehľad relevantných grafov, ktoré boli vykreslené z nazberaných dát experimentu vytvorenom v prostredí MATLAB.

Všetky dáta sa ukladali do šesťrozmernej matice, ktorej jednotlivé dimenzie sú : otočenie, typ kola, azimut cieľového zvuku, sedenie, subkolo, subjekt.

Kždé kolo pozostávalo zo 182 meraní. Pre prácu so zozbieranými dátami a lepšiu analýzu bolo každé kolo rozdelené na sub-kolá. Jedno sub-kolo je prehranie všetkých cieľových zvukov z každého azimutu. Po tomto rozdelení každé kolo vyzeralo nasledovne:

1. Pred-adaptačná časť – 2 sub-kolá ( 14 úvodných nedistraktorových meraní)
2. Adaptačná časť - 20 sub-kôl (140 stredným meraní)
3. Post-adaptačná časť - 4 sub-kolá (28 koncových nedistraktorových meraní)

Keďže adaptačná časť bola rozdelená na distraktorové a nedistraktorové merania v pomere 75% a 25% tak aj počet sub-kôl bol v tejto časti rozdelený tým istým pomerom:

- 5 sub-kôl nedistraktoorvých meraní
- 15 sub-kôl distraktorových meraní

V závislosti od vykresľovania grafov pre rôzne typy kôl som bral do úvahy aj rôzny počet sub-kôl. Pre nedistraktorové merania bolo 11 sub-kôl (2 pred-adaptačných, 5 adaptačných, 4 post-adaptačných), pre distraktorové merania bolo 15 sub-kôl.

V ďalšej časti sú grafy, v ktorých vykresľujeme a analyzujeme výsledky dát nameraných na všetkých subjektoch.

Základ analýzy pre všetky subjekty sú rozdelené na :

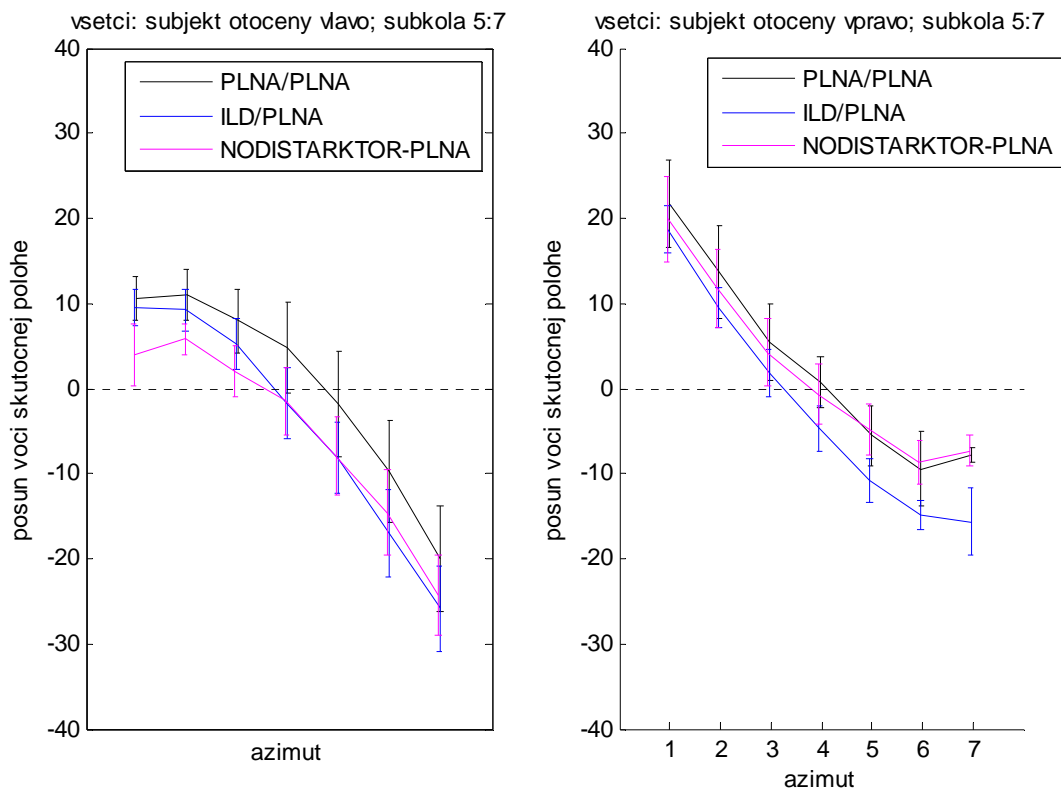
- Nedistraktorové merania - tieto merania sú vykreslené z nazberaných dát z výseku sub-kôl a to v rozsahu od 5 až 7. Tento rozsah sme si zvolili z toho dôvodu, že v pred-adaptačnej časti a prvých dvoch sub-kolách adaptačnej časti ešte nedochádza ku plastickým zmenám. Plasticita sa začína budovať až niekde nami definovanom rozsahu 5 až 8, ktoré sme si zvolili na základe grafu v ktorom je vykreslené budovanie plasticity cez všetky sub-kolá
- Distraktorové merania – tieto merania sú vykreslené z nazbieraných dát zo všetkých sub-kôl adaptačnej časti, čiže z výseku 3 až 15

### 5.5.1 Analýza všetkých subjektov – nedistraktorové merania

Subjekty sa od seba líšia svojimi fyzickými parametrami a preto každý subjekt môže to isté prostredie, aj keď je to zanedbateľné, vnímať predsa trochu inak. Z toho je možné tvrdiť, že každý subjekt vo virtuálnom sluchovom prostredí má jedinečné odpovedanie, preto údaje zo všetkých subjektov boli spriemerované aby sa dosiahla vyššia objektivnosť.

Na zbere dát sa podieľali štyri subjekty. Legenda k obrázkom zobrazuje aký typ simulácie sa používal na vyvolanie plasticity a následne na akom type simulácie bol testovaný (napr. budovanie plasticity vplyvom distraktora daného typu - NOILD/NOITD – testovanie vybudovanej plasticity). Okrem popisu v legende, kde je napísané “NODISTRAKTOR - daný typ simulácie”, to vyjadruje, že celé kolo pozostávalo z meraní daného typu. Všetky errorbary (čiary rovnobežné s osou Y) v nasledujúcich grafoch zobrazujú štandardnú chybu priemeru cez všetky subjekty ak nie je uvedené inak.

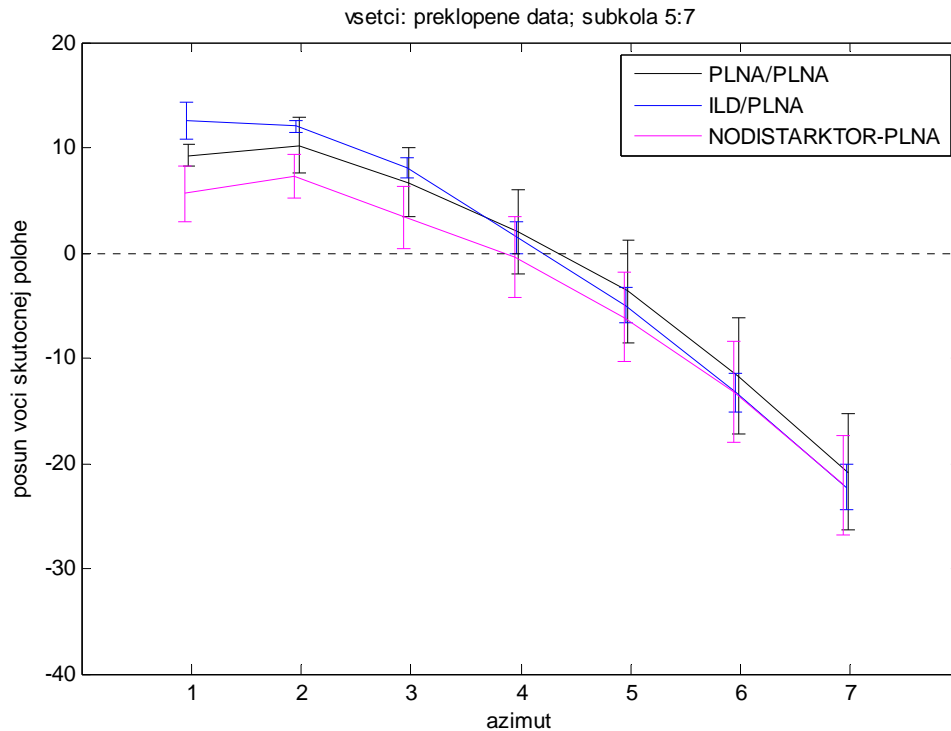
### 5.5.1.1 Vplyv rôznych typov simulácií na plnú simuláciu nedistraktorových meraní



**Obr. 18** Graf znázorňujúci posun voči skutočnej polohe pre ľavé a pravé otočenie

V tomto grafe je na osi Y posun voči skutočnému azimutu cieľového zvuku, na osi X prezentované cieľové zvuky. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a z výšky subkôl.

Prerušovaná čiara predstavuje (obr. 18) reálnu polohu cieľových zvukov. V grafe je vidieť, že v distraktorových aj nedistraktorových kolách nastal posun v odpovediach subjektov. Pre ľavé aj pre pravé otočenie bol posun pre bližšie prehrávané cieľové zvuky smerom od distraktora a pre vzdialenejšie cieľové zvuky nastal posun v smere ku distraktoru. Dáta sú približne rovnaké, preto sa tieto dáta následne preklopili aby sa získal väčší počet hodnôt pre jednotlivé typy kôl, čo je zobrazené v ďalšom grafe.

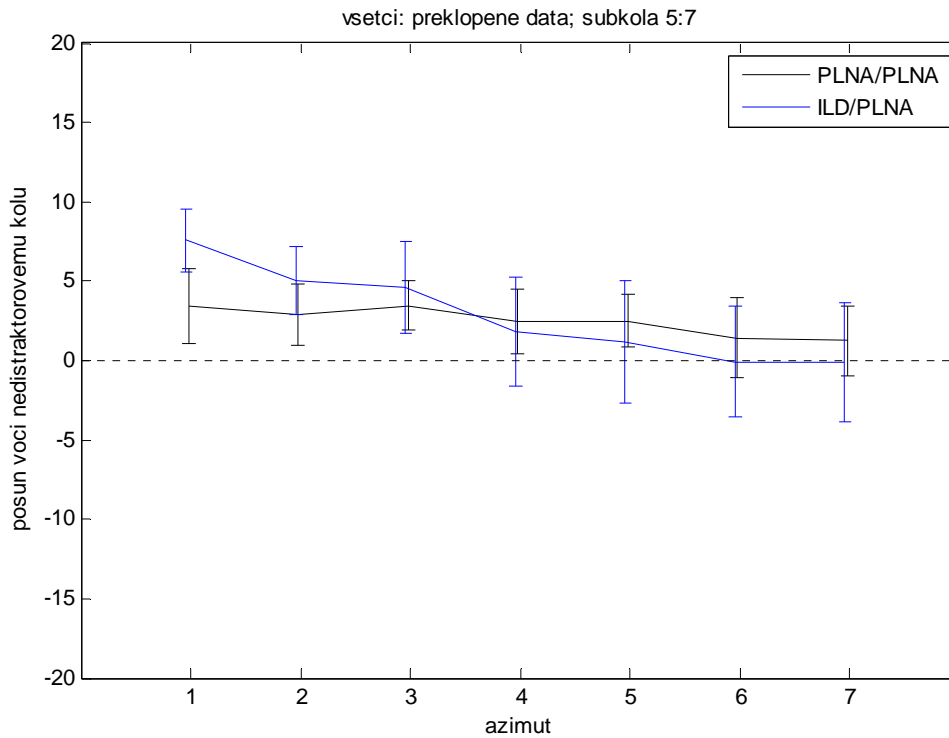


**Obr. 19 Graf znázorňujúci posun voči skutočnej polohe, preklopané dáta**

V tomto grafe je na osi Y posun voči skutočnému azimutu cieľového zvuku, na osi X prezentovné cieľové zvuky. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a z výseku subkôl. V týchto grafoch môžeme vidieť taktiež posuny, ktoré vyvolal distraktor.

Klesajúca tendencia tohto grafu poukazuje nato, že subjekty odpovedali na bližšie azimuty cieľových zvukov s posunom v smere od distraktora a pre azimuty cieľových zvukov z viac ako 40 stupňov smerom k distraktoru. Graf nedistraktorového merania(NODISTRAKTOR-PLNA) znázorňuje posun voči skutočným azimutom prehrávaných zvukov. Znamená to, že ak by subjekty odpovedali presne tým smerom odkiaľ počuli daný zvuk táto čiara by bola v ideálnom prípade blízka prerušovanej čiare. Avšak ako je vidno, subjekty takto cieľové zvuky neidentifikovali úplne presne. Kvôli lepšej prehľadnosti boli uvažované posuny voči tejto čiare, čo je znázornené na ďalšom obrázku.

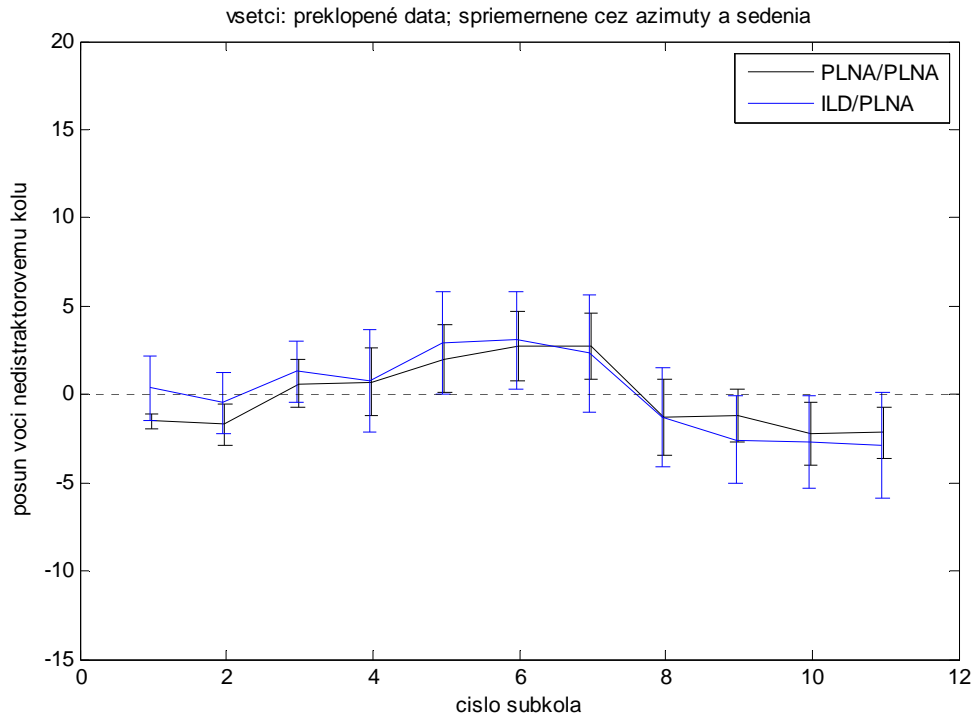




**Obr. 20 Graf znázorňujúci posun voči nedistraktorovému kolu(plná simulácia)**

V tomto grafe je na osi Y zobrazený posun voči odpovediam v nedistraktorovom kole, na osi X prezentovné cieľové zvuky. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a z výseku sub-kôl. V tomto grafe je priamo vidieť posun voči nedistraktorovému kolu.

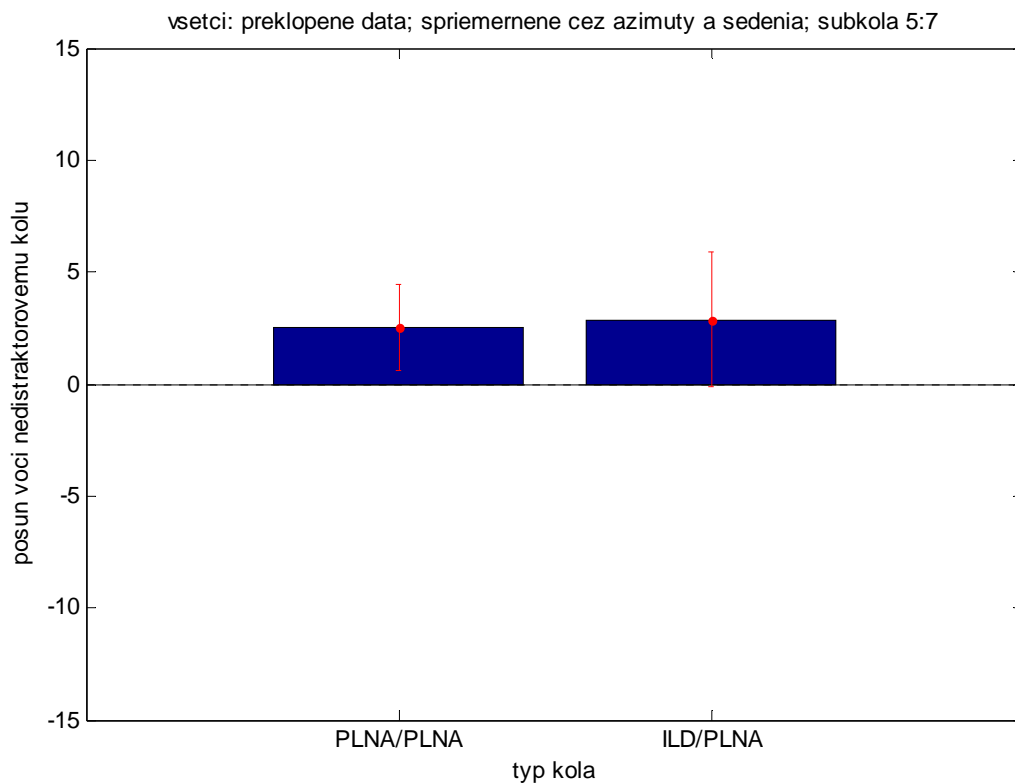
Pri vyvolávaní plasticity plnou simuláciou a testovaní taktiež plnou simuláciou nastal posun pre všetky azimuty cieľových zvukov cca približne o 3 až 4 stupne. Výrazný posun pri lokalizácii zvukov spôsobil aj typ ILD simulácie distraktorových meraní, ktorý mal postupne klesajúcu tendenciu a pre azimuty cieľových zvukov ďalej od distraktora bol posun ekvivalentný nule. Štandardná chyba priemeru presahuje hodnoty cez nulu, čo znamená, že pre viacej namraných subjektov by mohol nastať odklon kriviek ktorýmkoľvek smerom.



**Obr. 21 Graf znázorňujúci časový priebeh kola**

V tomto grafe je na osi Y posun voči odpovediam v nedistraktorovom kole, os X predstavuje sub-kola pre nedistraktorové merania. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a azimuty cieľových zvukov.

Graf znázorňuje priebeh jednotlivých sub-kôl, na ktorom pekne vidno kde nastali zmeny pri budovaní plasticity. Na grafe je vidno, že v pred-adaptačnej časti nenastal posun. Plasticita sa začala budovať od tretieho sub-kola, najväčší efekt mala od piateho po siedme sub-kolo, v post-adaptačnej časti zanikla. Práve preto bol použitý výsek sub-kôl 5 až 7.

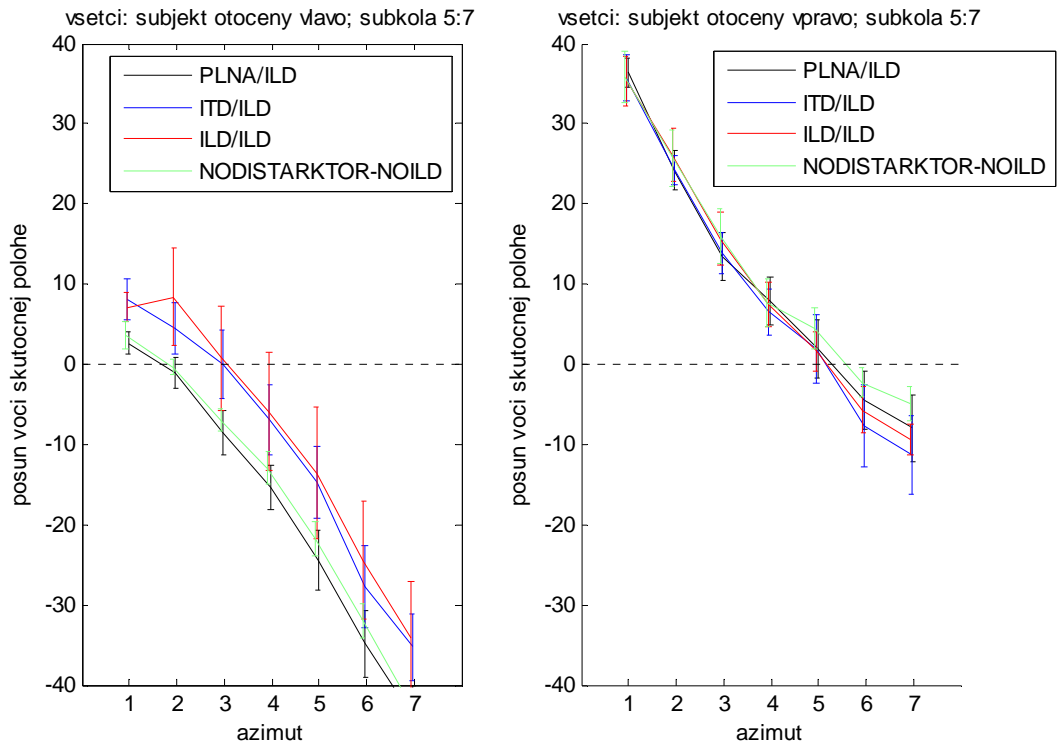


**Obr. 22 Graf znázorňujúci časový priebeh kola, spriemernené cez azimuty**

V tomto grafe je na osi Y posun voči odpovediam v nedistraktorovom kole, os X predstavuje jednotlivé typy kôl. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a azimuty cieľových zvukov a cez výsek sub-kôl.

Tieto výsledky naznačujú, že posun nastal vo všetkých typoch kôl, čiže všetky typy distraktorových meraní majú vplyv. Avšak konkrétne pri vyvolávaní plasticity ILD simuláciou sa to kvôli štandardnej chybe priemeru nedá s istotou potvrdiť.

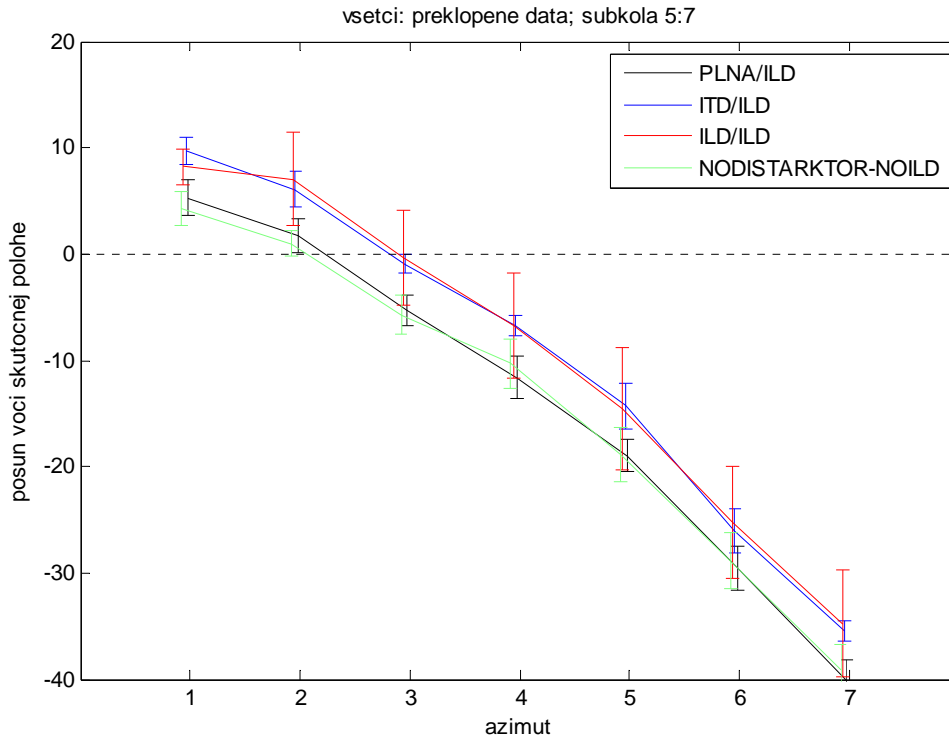
### 5.5.1.2 Vplyv rôznych typov simulácií na ILD simuláciu nedistraktorových meraní



**Obr. 23** Graf znázorňujúci posun voči skutočnej polohe pre ľavé a pravé otočenie

V tomto grafe je na osi Y posun voči skutočnému azimutu cieľového zvuku, na osi X sú prezentovné cieľové zvuky. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a z výseku sub-kôl.

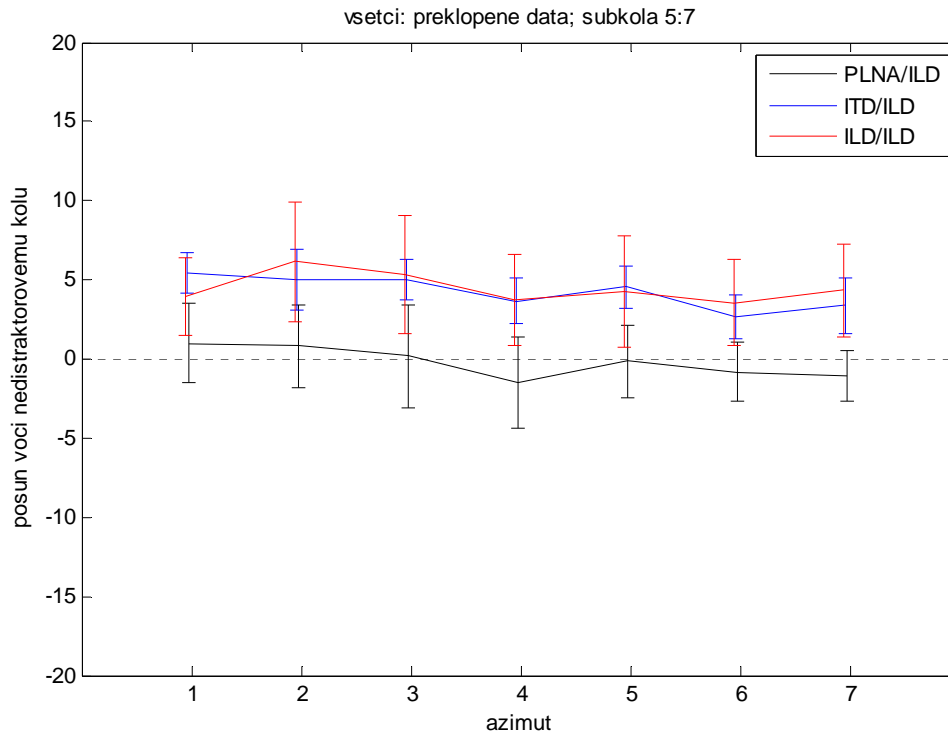
Reálnu polohu cieľových zvukov predstavuje prerušovaná čiara. Vplyv distraktora spôsobil posun v nedistraktorových odpovediach subjektov. Tak isto vidno, že dáta sú približne rovnaké, preto sa tieto dáta preklopili aby sa získal väčší počet hodnôt pre jednotlivé typy kôl, čo je zobrazené na ďalšom obrázku.



**Obr. 24** Graf znázorňujúci posun voči skutočnej polohe, preklopané dáta

V tomto grafe je na osi Y posun voči skutočnému azimutu cieľového zvuku, na osi X prezentované cieľové zvuky. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a z výseku subkôl.

V grafoch vidieť, že vplyv distraktora spôsobil posun v odpovediach subjektov. Krivka nedistraktorového merania (NODISTRAKTOR-ILD) predstavuje posun voči skutočným azimutom prehrávaných cieľových zvukov. Znamená to, že ak by subjekty odpovedali presne tým smerom odkiaľ počuli daný zvuk, táto čiara by bola v ideálnom prípade blízka prerušovanej čiare. Avšak ako je vidno, subjekty takto cieľové zvuky neidentifikovali úplne presne. Kvôli lepšej prehľadnosti boli uvažované posuny voči tejto čiare, čo je znázornené na ďalšom obrázku.



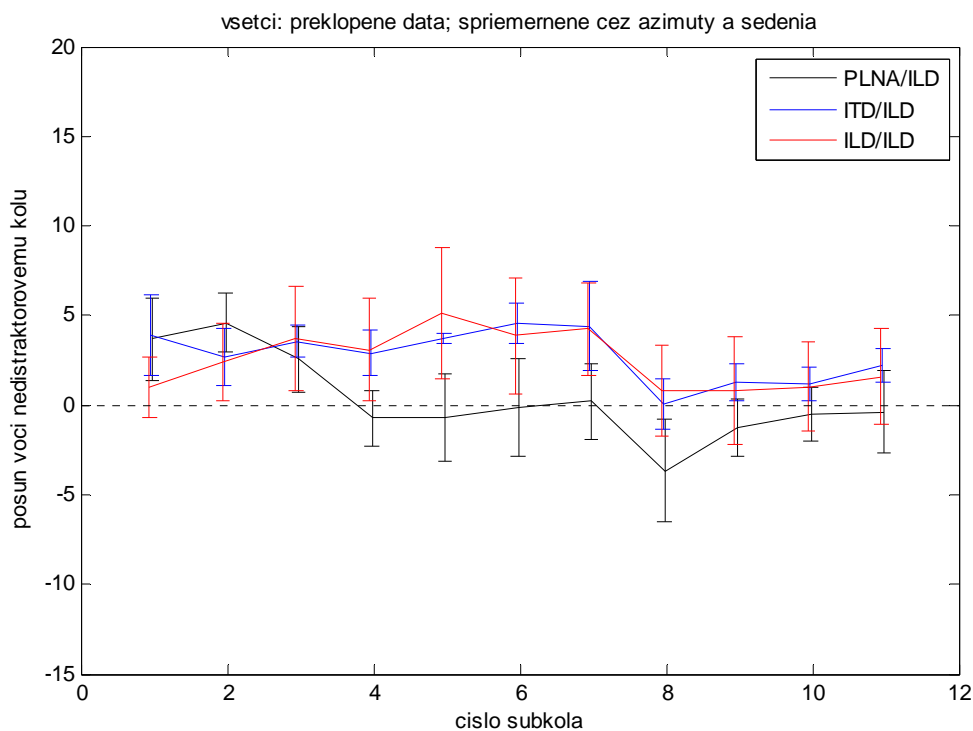
**Obr. 25 Graf znázorňujúci posun voči nedistraktorovému kolu(plná simulácia)**

V tomto grafe je na osi Y znázorený posun voči odpovediam v nedistraktorovom kole, na osi X prezentovné cieľové zvuky. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a z výseku sub-kôl. V tomto grafe je priamo vidieť posun voči nedistraktorovému kolu.

Pri vyvolaní plasticity plnou simuláciou a testovaní ILD simuláciou ako je vidieť v grafe, krivka takmer kopíruje nulovú hodnotu čo znamená, že nenastal žiadny posun. V tomto type simulácia sa očakával väčší posun v smere od distraktora, čiže v grafe posun v smere hore od nuly, čo sa však nepotvrdilo. Na tomto základe neviem potvrdiť na ktorej úrovni spracovania sa buduje plasticita.

Plasticita vybudovaná simuláciou distraktorových meraní typu ILD(červená čiara) vyvolala kladný posun v lokalizácii, ktorý sa očakával. Na tomto základe ale neviem určiť či sa plasticita deje na vyššej alebo na nižšej úrovni

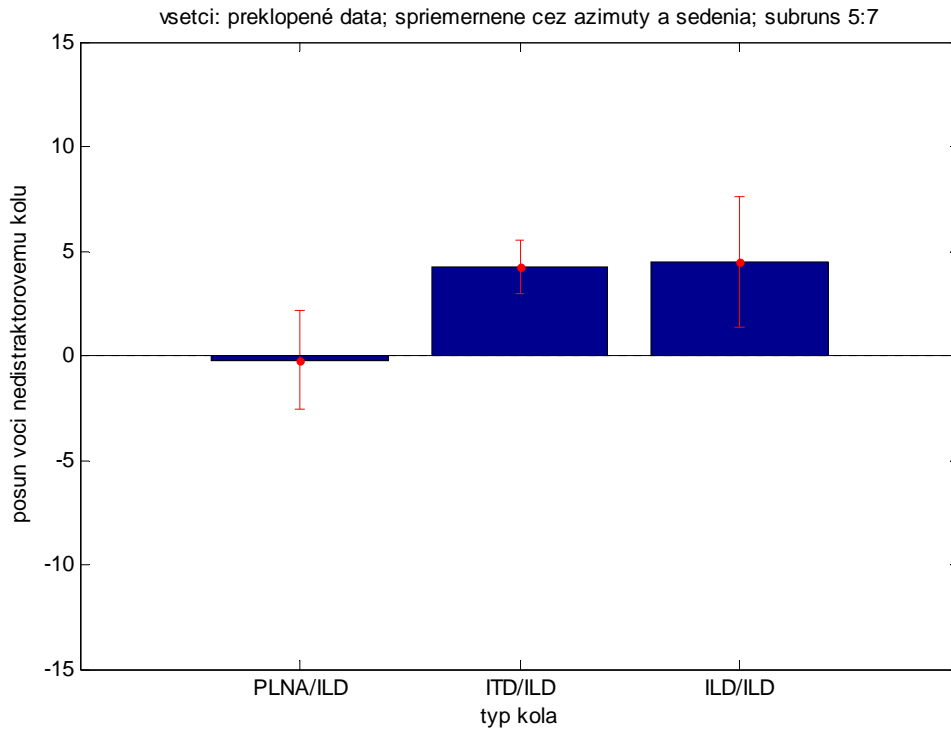
Plasticita vybudovaná simuláciou distraktorových meraní typu ITD(modrá čiara) vyvolala kladný posun, ktorý sa taktiež očakával. Errorbary sú malé a preto z tohto grafu sa dá tvrdiť, že k plastickým zmenám dochádza niekde na vyššej úrovni.



**Obr. 21 Graf znázorňujúci časový priebeh kola**

V tomto grafe je na osi Y posun voči odpovediam v nedistraktorovom kole, os X predstavuje sub-kola pre nedistraktorové merania. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a azimuty cieľových zvukov.

Na grafe je znázornené ako je budovaná plasticita v priebehu jednotlivých sub-kôl. Z grafu je vidno, že v pred-adaptačnej časti nenastal posun. Od tretieho sub-kola sa plasticita začala budovať, najväčší efekt mala od štvrtého po siedme sub-kolo, v post-adaptačnej časti zanikla. Práve preto bol použitý výsek 5-7.



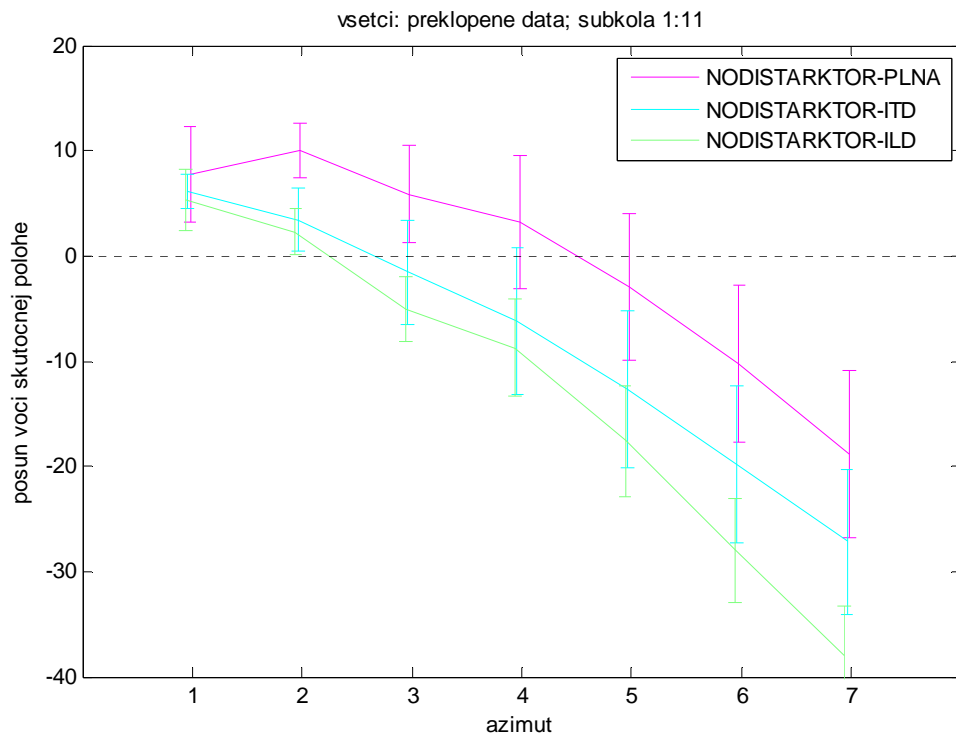
**Obr. 22 Graf znázorňujúci časový priebeh kola**

V tomto grafe je na osi Y posun voči odpovediam v nedistraktorovom kole, os X predstavuje jednotlivé typy kôl. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a azimuty cieľových zvukov a cez výsek sub-kôl.

Na základe týchto grafov je možné z určitou istotou tvrdiť, že plasticita bola najviac vybudovaná pri distraktorových meraniach simuláciou ITD. Plasticita sa prejavila aj pri simulácii, ktorá bola vyvolaná za pomoci ILD a prejavila pri testovaní na ILD, avšak v tomto prípade vznikla väčšia štandardná chyba, ale aj napriek tejto vzniknutej chybe je možné predpokladať, že plastické zmeny, ktoré sledujeme pri kontextuálnej plasticite by sa mohli diať na vyššej úrovni spracovania zvuku.



### 5.5.1.3 Priame porovnanie nedistraktorových kôl všetkých typov



Osi Y znázorňuje posun voči skutočnému azimutu cieľového zvuku, na osi X sú prezentované azimuty cieľových zvukov. Priemer sa robí cez sedenia, subjekty a pre všetky sub-kolá. Errorbary zobrazujú štandardnú chybu cez všetky subjekty.

Tento graf znázorňuje porovnanie jednotlivých typov kôl, z ktorého sa dá určiť presnosť lokalizácie prehrávaných cieľových zvukov. Štandardné chyby sú niekde vyššie ako desať stupňov, čo naznačuje odlišnosť odpovedí každého subjektu. V simulovaných prostrediach prostredníctvom slúchadiel vzniká efekt, ktorý sa nazýva „lateralizácia“. To znamená, že poslucháč neregistruje prezentovaný zvuk v priestore ale niekde uprostred hlavy, čo znižuje presnosť lokalizácie zvuku.

V samotnom experimente, pri zbere dát sa prehrávané stimuly vytvorené simuláciou ILD javily ťažšie lokalizovateľné. Tento dojem potvrdzujú aj jednotlivé krivky v grafe, ktoré poukazujú nato, že lokalizácia zvuku pri ILD simulácii je najhoršia a pri plnej simulácii najlepšia.

## 6 Záver

Predmetom skúmania v tejto experimentálnej práci bolo zistiť na akej úrovni v mogu sa dejú plastické zmeny vyvolané pri kontextuálnej plasticite. Predpokladom bolo, že sa tieto zmeny dejú ešte na úrovni ITD a ILD spracovania, ktorá sa nachádza v mozgovom kmeni alebo niekde na vyššej úrovni, kde je priestor reprezentovaný exocentrickými súradnicami, v ktorom na seba navzájom vplývajú priestorová reprezentácia a priestorová pozornosť.

Hypotéza bola, že ak sa plastické zmeny vyvolané na úrovni ILD prejavia na úrovni ITD tieto plastické zmeny sa nemôžu udiať na nižšej úrovni spracovania, ale naopak, prejavia sa na vyššej. Použitou experimentálnou procedúrou sa overovalo toto tvrdenie.

Z výsledkov nazberaných a spracovaných dát predpokladám, že k plasticlým zmenám dochádza niekde na vyššej úrovni. Potvrzuje to Obr. 25(modrá čiara), kde sa plasticita budovala za použitia ILD a testovala za použitia ITD. Vybudovaná plasticita mala vplyv na ITD simuláciu a je to priamy dôkaz, že sa tieto plastické zmeny dejú na vyššej úrovni spracovania. Prekvapivým výsledkom v týchto analýzach bolo, že sa neprejavila plasticita vybudovaná plnou simuláciou a testovaná na ILD simulácii (Obr. 25 čierna čiara).

Väčšie chyby v týchto analýzach mohli byť spôsobené malým počtom subjektov, na ktorých boli zberané dáta. Pre urýchlenie a zlepšenie výsledkov by bolo treba preformovať štruktúru experimentu, vyhodit' zbytočné kolá, čím by sa mohla zmenšiť chyba v meraniach a dosiahnuť lepšia efektivita experimentu.

## Zoznam použitej literatúry

- [1] Špelda, A.: Hudební akustika. SPN, Praha 1978, dostupné na internete: [http://www.unipo.sk/files/docs/ff\\_katedry/svk/akustika\\_a\\_rec.pdf](http://www.unipo.sk/files/docs/ff_katedry/svk/akustika_a_rec.pdf)
- [2] KOPČO, N. - BEST, V. – SHIN CUNNINGHAM, BG (2007). Sound localization with a preceding distractor, Journal of the Acoustical Society of America, 121, 420-432. Dostupné na internete: <http://cns.bu.edu/~kopco/k/06/clickpaper/clickpaper.pdf>
- [3] KOPČO, N., *Výpočtová a kognitívna neuroveda*, prednášky k predmetu, 2007, dostupné na internete: <http://neuron-ai.tuke.sk/~kopco/kui440/>
- [4] TOMORIOVÁ, B.: Neurálna plasticita a riadenie strategickej pozornosti pri priestorovom sluchovom vnímaní. Minimová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2008. 57 s.
- [5] FRANCIS, G., *Sensory and perceptual processes*, prednášky k predmetu, dostupné na <http://www2.psych.purdue.edu/~gfrancis/Classes/PSY310/>
- [6] YOST, W.A., (2000), Fundamentals of hearing: An introduction (4th ed.), New York: Academic Press
- [7] BEAR, M.F., CONNORS, B.W., PARADISO M.A., Neuroscience: exploring the brain (second edition), Lipincott Williams and Wilkins, Baltimore, 2001.
- [8] MOORE, D.R. & KING, A.J., Plasticity of binaural systems. In T.N.. Parks, E.W Rubel, R.R. Fay & A.N. Popper (eds.) Plasticity of the Auditory System, Springer, New York (2004)
- [9] SHAW, D., AND McEACHERN, J. (Eds), Toward a theory of neuroplasticity, Philadelphia, PA: Psychology Press, 2000.
- [10] CARR, C., Sounds, signals, and space maps. Nature, 415:29–31, 2002.
- [11] KNUDSEN, E. I., W. ZHENG, W. M. DEBELLO, Traces of learning in the auditory localization pathway. PNAS, October 24, 2000; 97(22): 11815 - 11820.
- [12] KING AJ, SCHNUPP JWH, DOUBELL TP (2001) The shape of ears to come:
- [13] SHINN-CUNNINGHAM, B.G., Adapting to remapped. auditory localization cues: A decision-theory model. Percept Psychophys, vol. 62, pp. 33-47, 20
- [14] KOPČO, N., *Úvod do neurovied*, prednášky k predmetu, 2007, dostupné na internete: <http://neuron-ai.tuke.sk/~kopco/kui342/>

## Prílohy

Príloha A: CD médium – diplomová práca v elektronickej podobe, prílohy v elektronickej podobe.

Príloha B: Používateľská príručka

Príloha C: Systémová príručka

Príloha D: Obrazová príloha