



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Modelovani HRTF

HRTF modeling

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Ing. František Rund, Ph.D.

Saniya Dyussekenova

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Saniya Dyussekenova**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Modelování HRTF**

Pokyny pro vypracování:

HRTF (Head Related Transfer Function) se často využívá pro polohování virtuálního zdroje zvuku (3D zvuk). Získání této funkce měřením je poměrně časově náročné. Zabývejte se metodami, jak stanovit HRTF bez jejího měření (strukturální model, personalizace HRTF z databáze, interpolace...). Sestavte potřebný algoritmus pro ilustraci zvolené metody. Porovnejte HRTF získané jednotlivými přístupy a ověřte je pomocí poslechových testů.

Seznam odborné literatury:

- [1] V. R. Algazi, R. O. Duda, R. Duraiswami, N. A. Gumerov and Z. Tang, "Approximating the head-related transfer function using simple geometric models of the head and torso," J. Acoust. Soc. Am., Vol.112, pp. 2053-2064 (Nov. 2002).
- [2] V. R. Algazi, R. O. Duda and D. M. Thompson, "The use of head-and-torso models for improved spatial sound synthesis," Paper 5712, 113th AES Convention, Los Angeles, CA (Oct. 2002).
- [3] M. Geronazzo, S. Spagnol, F. Avanzini, "A Modular Framework for the Analysis and Synthesis of Head-Related Transfer Functions," Paper 8882, 134th AES Convention, Rome, Italy (May 2013).

Vedoucí: Ing. František Rund, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 19. 2. 2016

Poděkování

Chci srdečně poděkovat Ing. F. Rundovi, Ph.D. za odborné vedení nejen mé diplomové práce, ale i za jeho nekonečnou trpělivost a podporu během všech 4 let co jsem studovala pod jeho vedením.

Ráda bych taky poděkovala Bc. O. Šupkovi za spolupráci, poskytnutá data a za cenné rady.

Dále bych chtěla ještě poděkovat V. Vencovskému, J. Boušovi, P. Tothovi, D. Štorkovi - všem, kdo se zúčastnil mých experimentů za jejich čas a zpětnou vazbu.

A na závěr chci poděkovat svým rodičům za jejich neochvějnou podporu.

Táto práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT No.SGS14/204/OHK3/3T/13.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne _____

Abstrakt

Cílem této práce je získávání HRTF metodami, které nevyžadují její přímé měření, a jejich porovnání z hlediska úspěšnosti lokalizace ve virtuálním akustickém prostoru. Teoretická část se věnuje popisu základních vlastností HRTF, způsobům jejího modelování, a lokalizačnímu testu, který používáme pro porovnání vybraných metod, kterými se zabýváme v této práci - personalizace, strukturální syntéza - s měřenými HRTF. Implementace těchto metod v Matlabu, výsledky porovnání a návrhy pro další práci tvoří praktickou část.

Klíčová slova

HRTF, HRIR, lokalizace zvuku, personalizace, strukturální syntéza.

Abstract

The aim of this thesis is to obtain HRTF with methods that do not require its direct measurement, and their comparison with respect to success rate of localization in virtual acoustic space. The theoretical part is devoted to the description of basic properties of HRTF, its modeling methods, and localization test, that is used to compare chosen methods - personalization and structural synthesis - with measured HRTF. Implementation of these methods in Matlab, the test results and suggestions for future work form the practical part of the thesis.

Key Words

HRTF, HRIR, sound localization, personalization, structural synthesis.

Obsah

1 Úvod	7
2 Teoretická část	8
2.1 HRIR, HRTF	8
2.1.1 Antropometrie.....	9
2.2 Způsoby modelování HRTF	11
2.2.1 Měření.....	11
2.2.2 Personalizace	12
2.2.3 Syntéza.....	14
2.3 Subjektivní lokalizační testy	21
3 Praktická část.....	23
3.1 Audiobáze.....	23
3.2 Modelování HRTF 3 způsoby	24
3.3 Porovnání HRTF pomocí testů.....	26
3.3.1 Výsledky testu	29
3.4 Návrhy pro další práce	35
4 Závěr	36
Seznam použité literatury	37
Přílohy	i
A. Grafy výsledků lokalizačních testů	i
B. Přílohy na CD	vii
B.1 data.....	vii
B.2 personalization	vii
B.3 synthesis.....	vii
B.4 test	vii
B.5.....	viii

1 Úvod

Sluch je jedním ze základních pěti smyslů člověka. Je na druhém místě po zraku z hlediska množství neustále zpracované informace a daleko předhání tři ostatní. Je zřejmé, že přesná lokalizace podle zvuku v prostoru je velmi důležitá pro náš každodenní život.

Nejdůležitější charakteristikou jakéhokoli systému pro zpracování signálu je jeho impulsní odezva, nebo její Fourierova transformace - přenosová funkce. Když se zabýváme sluchem a zpracováním zvukových signálů před tím než se dostanou do sluchového nervu, mluvíme o HRIR (impulsní odezva, vztažená k hlavě), resp. HRTF (přenosová funkce, vztažená k hlavě). Je to docela složitá funkce, a existují různé způsoby jak ji získat.

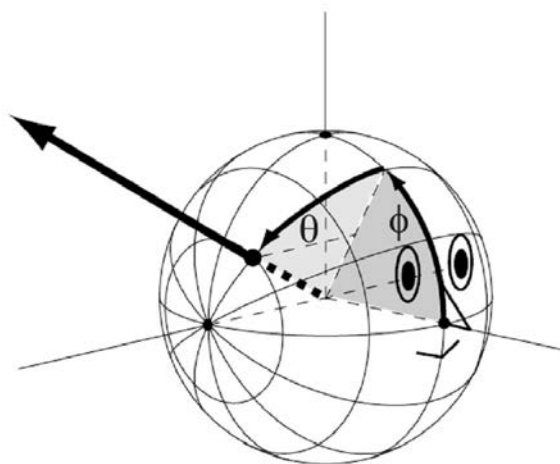
Cílem této diplomové práce je seznámení a implementace dvou metod, nevyžadujících přímé měření HRIR, a jejich porovnání subjektivními testy.

Následující kapitola zahrnuje teoretické podklady tohoto problému - HRIR a její vlastnosti [2.1]; vybrané metody modelování [2.2]; popis subjektivního testu [2.3]. V další části popíšeme implementaci v Matlabu [3.1]; sestavenou na základě provedených měření databázi [3.2] a výsledky porovnání pomocí testů [3.3]. Dále následují návrhy pro další práci v této oblasti [3.4] a shrnutí vší informací v závěru.

2 Teoretická část

2.1 HRIR, HRTF

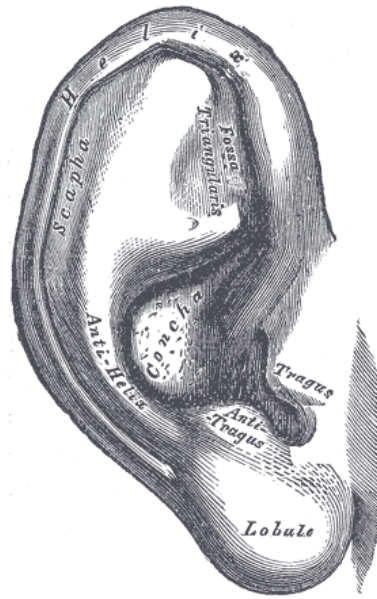
HRTF (Head Related Transfer Function) je funkcí frekvenci, vzdálenosti mezi zdrojem zvuku a posluchačem, a polohy zdroje, která je daná dvěma úhly, azimutem a elevací (Obr.1). Popisuje, jakým změnám se vystavuje signál na své cestě k sluchovému nervu. Ty změny jsou způsobené odrazy od torosa, hlavy, akustickým stíněním, zpracováním v boltci (který je v podstatě frekvenční filtr) aj. [1, 2].



Obr. 2.1 – Azimut θ a elevace φ [5]

Vliv torosa a hlavy se týká zejména ITD (Interaural Time Difference, časové zpoždění signálu v jednom uchu vůči druhému) a ILD (Interaural Level Difference, rozdíl v úrovni signálů v uších) které pomáhají rozlišovat polohy signálů v horizontální rovině, tj. azimut. Z rozměrů torosa a hlavy je zřejmé že tyto vlivy jsou omezené na nízké frekvence, cca do 3,5 kHz. Na vyšších frekvencích, kde vlnová délka signálu se stane srovnatelná s rozměry ušního boltce, hlavní role hraje zpracování v boltci. To vnese rozdíly ve spektrech signálů v levém a pravém uchu. Tyto efekty ukazují elevací, tj. polohu ve vertikální rovině.

Na těchto frekvencích vidíme takové charakteristické rysy HRTF, jako tzv. "pinna notch", což je zářez na frekvenci mezi cca 6 kHz a 12 kHz (typicky na 10 kHz, ale u každého člověka umístění je individuální). Důvodem vzniku tohoto rysu je interference přímého signálu a signálu, odráženého od helixe/antihelixe, conchy (Obr.2), který je v protifázi na vysokých frekvencích. [18, 9].

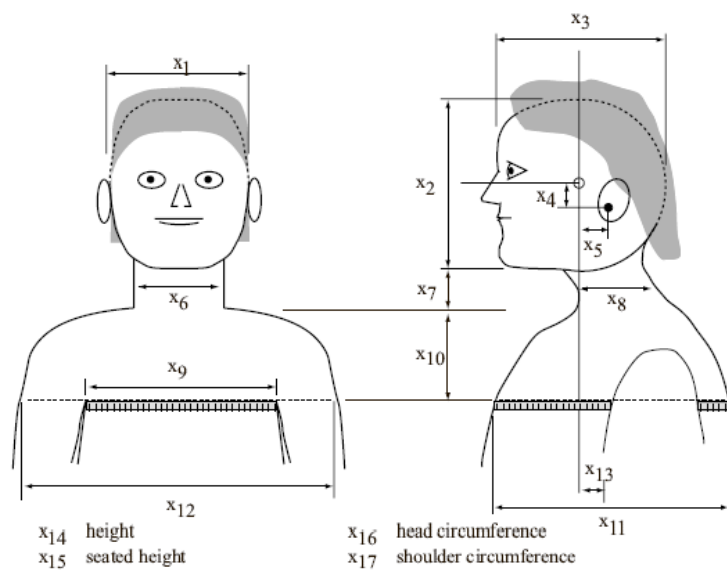


Obr. 2.2 – Ušní boltec [28]

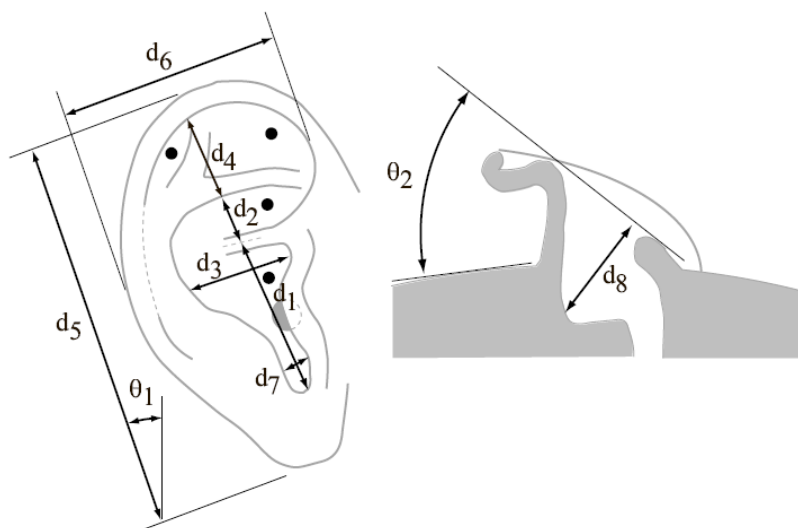
2.1.1 Antropometrie

Dalšími parametry, na kterých taky závisí HRTF, jsou postava člověka, jeho antropometrické parametry. Existují různé sady parametrů, popisujících části těla člověka, které mají vliv na tvar HRTF. Nejčastěji se používá sada 17 parametrů torza a hlavy, a 8 parametrů ušního boltečů (Obr. 2.3). [24]

Podrobněji o tom, jak tyto parametry byly změřeny viz [3.1].



(a)



(b)

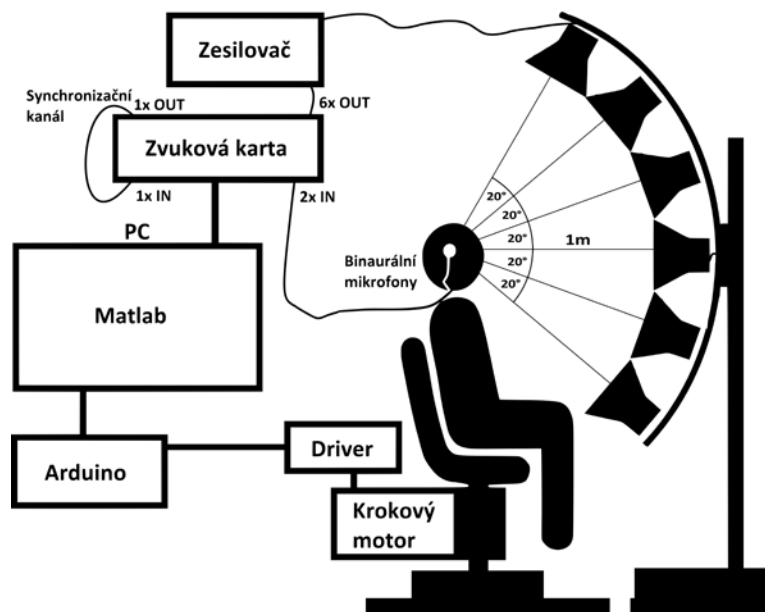
Obr. 2.3 – Antropometrické parametry [24, 17]. (a) Hlava a torso. (b) Ušní boltec

2.2 Způsoby modelování HRTF

2.2.1 Měření

Klasickým způsobem jak získat HRTF je její přímé měření individuálně pro každý subjekt. Bohužel, tato metoda je docela složitá, jak z hlediska vyžadovaného vybavení, tak s hlediska stráveného času a energie. Měření velkého počtu, třeba v řadu 1000, lidí by trvalo obrovské množství času.

V našem případě pro další porovnání byly změřené HRTF 6 lidí. Data jsou převzata z [6]. HRIR se měřila metodou Sine Sweep, pomocí 6 reproduktorů umístěných na zadaných elevacích, a automaticky točícího židle. Schéma měření je znázorněna na obr. 2.4.



Obr. 2.4 – Schéma měření HRIR.



Obr. 2.5 Uspořádání měření HRTF [6]

2.2.2 Personalizace

Kvůli složitosti měření HRIR se dávno vyvíjejí jiné metody získávání této funkce, které nevyžadují tolik úsilí. Jednou z takových metod je personalizace HRTF. Je to v podstatě přizpůsobení cizí změřené HRTF pro jiného člověka.

Nejjednodušším způsobem by bylo prostě najít člověka s podobnou postavou jako u subjektu a považovat jeho HRTF za subjektovou. Ale existují i přesnější způsoby, které vyžadují úpravu takovým způsobem nalezené HRTF. V [16] se navrhuje algoritmus, který bere v úvahu informaci o struktuře HRTF, zejména o tom, že hlava a torso ovlivňují především nízké kmitočty, zatímco boltce ovlivňují vysoké kmitočty.

Prvním krokem je nalezení dvou lidí – jednoho se shodnými parametry hlavy a torosa, a jednoho se shodnými parametry ušního boltce (zde a dále popisujeme postup pouze pro jedno ucho, je zřejmé, že pro druhé ucho budeme potřebovat třetího člověka,

jelikož parametry obou boltců se mohou lišit). Pro porovnání míry podobnosti se používá operátor E [17], který se počítá podle vztahu:

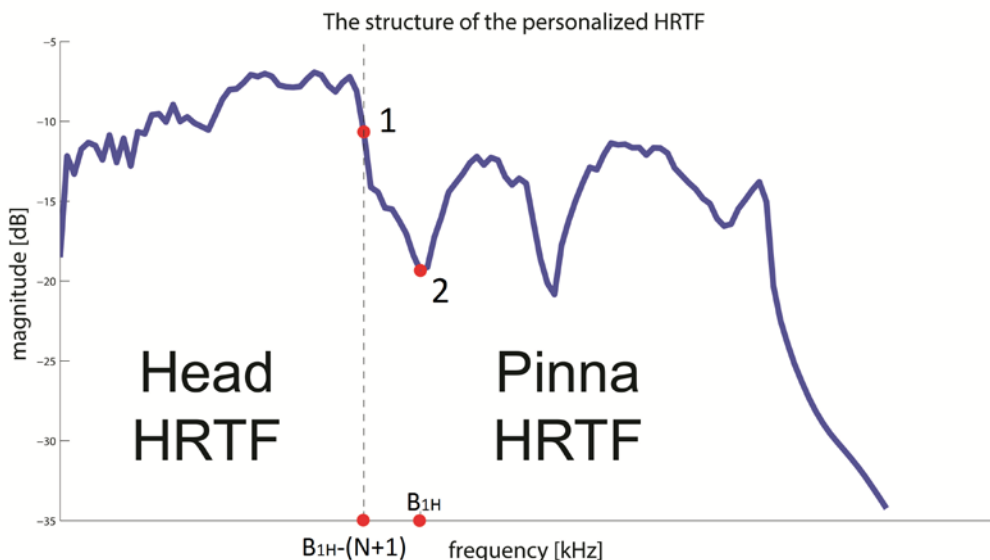
$$E^k = \sum_{i=1}^N \frac{(p_i - p_i^k)^2}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

kde N je počet použitých parametrů pro porovnání, p_i je vybraný parametr subjektů, p_i^k je vybraný parametr k -tého subjektu v databázi, σ_i je rozptyl parametru p_i u všech subjektů v databázi. Za nejlépe se hodící subjekt se považuje subjekt k_0 :

$$k_0 = \arg(\min_k E^k) \quad (2)$$

Dalším krokem je jejich spojení dvou vybraných HRTF. Pro správný výběr bodu spojení používáme 2 charakteristické rysy funkce. První je poloha minima funkce na intervalu mezi 2,8 kHz a 11 kHz, označený B_{IH} pro HRTF hlavy a B_{IP} pro HRTF boltce. Druhý je lokální maximum blízko před bodem B_{IP} u HRTF boltce.

Od bodu B_{IH} je výsledná HRTF stejná jako HRTF boltce od bodu B_{IP} (viz bod 2 na obr. 2.5). Pokud N je vzdálenost mezi body B_{IP} a B_{IH} , bod spojení se nachází o $N+1$ vzorků před bodem B_{IH} (viz bod 1 na obr. 2.5). V tomto bodě výsledná HRTF se rovná průměru HRTF hlavy a HRTF boltce, před tímto bodem – HRTF hlavy, poté – HRTF boltce.



Obr. 2.6 – Struktura personalizované HRTF

Táto metoda taky má své nevýhody. Na první pohled rychle dostáváme HRTF bohatou na detaily, které se vyskytují v měřených HRTF, ale z druhé strany, jsme omezení používanou databází. Tj. my nehledáme subjekt se zadanou mírou podobnosti parametrů, my prostě hledáme subjekt s nejvíce shodnými parametry z těch, které jsou

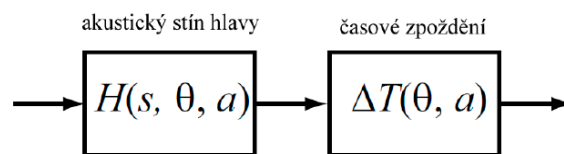
nám daný v databázi. To, že ze všech HRTF v databázi jedna je nejvíce shodná s naší, ještě neznamená, že bude hodně (nebo alespoň dostatečně) shodná.

2.2.3 Syntéza

Další způsob, kterým se zabýváme, je syntéza HRTF. Je to v poslední době docela populární způsob získávání HRTF. Podle [12] jsou tři hlavní typy syntézy: modelování pólů a nul, rozvoj v řádu, a strukturální syntéza. V této práci se zaměříme na poslední způsob.

Strukturální syntéza znamená, že vyjadřujeme vliv jednotlivých částí těla člověka pomocí soustavy filtrů, každý ze kterých odpovídá za nějaký fyzický jev.

Nejjednodušší model je sférický – představuje hlavu člověka jako sféru a zanedbává vliv torza a boltce. Vzhledem k tomu, že odraz od torza a filtrace boltcem odpovídají za vjem elevaci, je ten model málo použitelný, ale je základem pro další, složitější, modely [9, 8]. Fyzické jevy, které jsou zahrnuty v tomto modelu, jsou odraz a akustické stínění. První se vyjadřuje časovým zpožděním, druhý – frekvenčním filtrem (Obr 2.6).



Obr. 2.7 – Blokové schéma sférického modelu

Oba bloky závisí na θ – azimutu, a a – poloměru hlavy. Přenosová funkce filtru akustického stínu [9, 7]:

$$H(s, \theta, a) = \frac{\alpha \tau s + 1}{\tau s + 1} \quad (3)$$

kde τ je časová konstanta závislá na poloměru a a rychlosti zvuku c :

$$\tau = \frac{2a}{c} \quad (4)$$

a α je funkce azimutu:

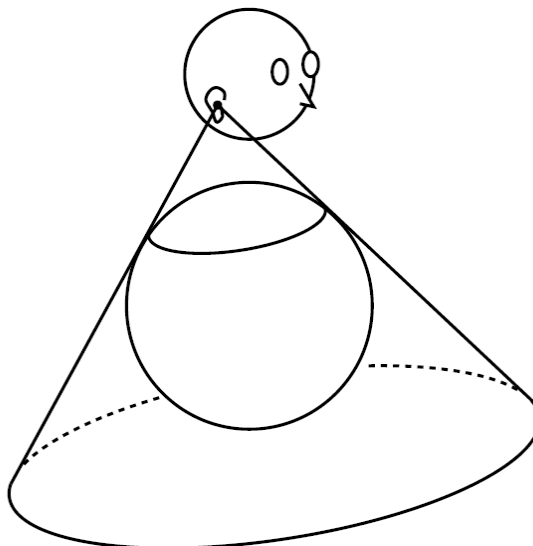
$$\alpha(\theta) = \left(1 + \frac{\alpha_{min}}{2}\right) + \left(1 - \frac{\alpha_{min}}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{\theta_{min}} \cdot 180^\circ\right) \quad (5)$$

kde $\alpha_{min} = 0,1$ a $\theta_{min} = 150^\circ$. Tyto hodnoty byly stanoveny tak, aby výsledná frekvenční odezva filtru odpovídala frekvenční odezvě ideálního kulového modelu [7].

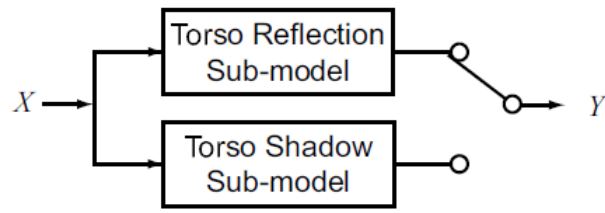
Časové zpoždění hlavy se vyjadřuje pomocí vztahů:

$$\Delta T(\theta, a) = \begin{cases} -\frac{a}{c} \cdot \cos \theta & \text{pro } 0 \leq |\theta| \leq \frac{\pi}{2}, \\ \frac{a}{c} \cdot \left(|\theta| - \frac{\pi}{2} \right) & \text{pro } \frac{\pi}{2} \leq |\theta| \leq \pi \end{cases} \quad (6)$$

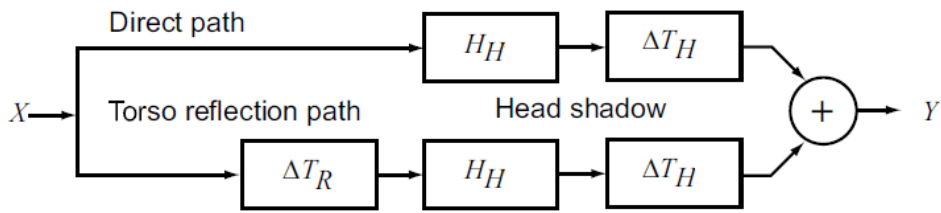
Později v [11] byl navržen navazující model, který navíc bere v úvahu i vliv torsa. Model se nazývá “sněhulák” a je to v podstatě dvě sféry umístěné jedna nad druhou na určité výšce. Zde navíc potřebujeme takové antropometrické parametry jako b – poloměr torsa a h – výška krku. Vliv torsa se taky popisuje pomocí filtru akustického stínu a časového zpoždění, rozdíl je v tom, že tyto dva bloky nebudou zpracovávat signál najednou. V závislosti na elevaci, signál buď odrazí od torsa, nebo bude v zóně akustického stínu (Obr. 2.7) a se filtruje (Obr. 2.8).



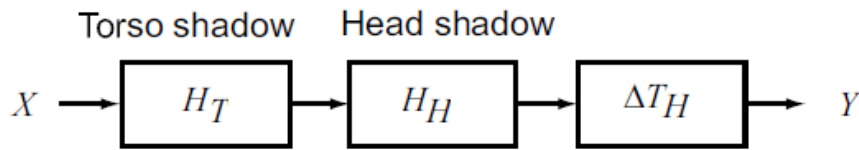
Obr. 2.8 – Akustický stín torsa [11]



(a)



(b)



(c)

Obr. 2.9 – Model „sněhulák“. (a) Základní větve. (b) Odraz od torosa. (c) Stín torosa [11].

Přenosová funkce akustického stínu torosa je stejná jako u hlavy, jenom místo a (poloměru hlavy) používáme b (poloměr torosa); a místo azimutu θ používáme elevací φ .

Časové zpoždění při odrazu od torosa se počítá podle vztahu:

$$\Delta T_R = \frac{f}{c} \cdot (1 + \cos 2\psi) \quad (7)$$

kde c je rychlost zvuku a f je vzdálenost mezi bodem odrazu a uchem:

$$f = \sqrt{b^2 + d^2 - 2bd \cos \alpha} \quad (8)$$

d je vzdálenost mezi centrem sféry torosa a uchem [11, 7]:

$$d = \sqrt{a^2 + (a + b + h)^2} \quad (9)$$

ψ je úhel mezi vektorem poloměru b a odraženou vlnou:

$$\psi = \alpha + \beta \quad (10)$$

kde α je úhel mezi vektory b a d , β je úhel mezi odraženým paprskem a vektorem d :

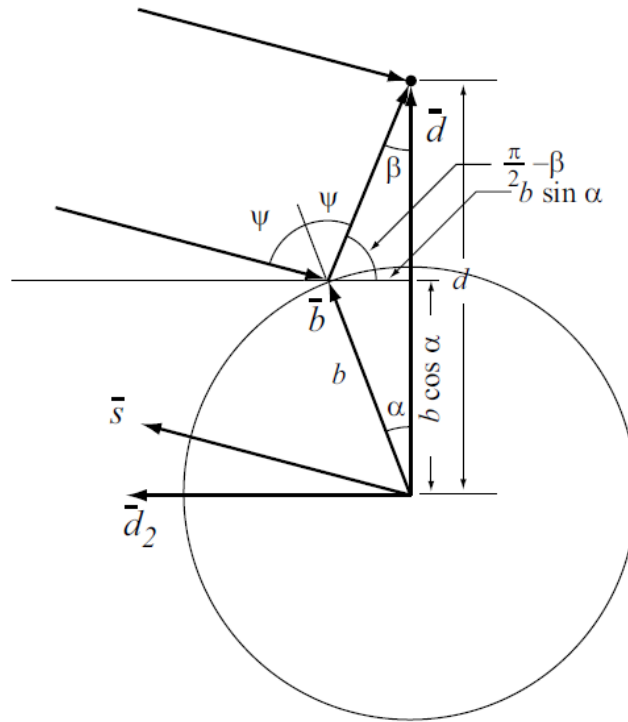
$$\beta = \tan^{-1} \frac{\sin \alpha}{\frac{d}{b} - \cos \alpha} \quad (11)$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0 - \left(1 - \frac{\alpha_0}{\alpha_{max}}\right) & \text{pro } -\alpha_{max} \leq \varphi \leq 0 \\ \alpha_0 - \left(1 - \frac{\varphi}{\frac{\pi}{2}}\right) & \text{pro } 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha_{max} = \cos^{-1} \frac{b}{d} \quad (13)$$

$$\alpha_0 = \frac{\frac{d}{b} - 1}{2\frac{d}{b} - 1} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

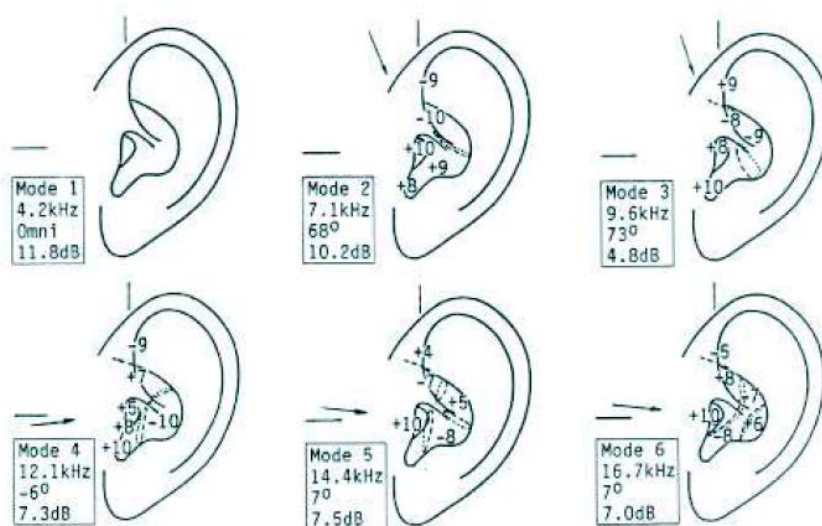
Obecně úhel α závisí na elevaci nelineárně. Na úseku hodnot elevaci od 90° do 0° tato závislost mírně stoupá. Pro elevaci nabývající hodnot od $-\alpha_{max}$ do 0° je růst ztelnější. Výslednou závislost se dá aproximovat dvěma lineárními úseky. Hodnota α při krajní elevaci 90° je 0° , pro elevaci 0° je poté α_0 . Úhel α_{max} je poté úhel, při kterém je odražený paprsek kolmý na vektor b (Obr. 2.9).



Obr. 2.10 – Sledované paprsky při odrazu od torosa [11]

Dále je signál filtrován dolní propustí, která omezuje vliv torsa a hlavy na kmitočty pod f_{max} odpovídající vlnové délce rovnou průměru torsa.

V [13, 7] na tu model se navíc ještě navazuje model ušního boltce na vysokých kmitočtech. Při dopadu zvuku z různých směrů se vytváří četné příčné a podélné rezonanční módy, jejichž fázová interakce tvoří hluboké pásmové zádrže. Vybrané rezonanční módy v závislosti na elevaci jsou znázorněny na obr. 2.10.



Obr. 2.11 – Rezananční módy boltce [13]

Pro model používáme pouze dva módy ve slyšitelném pásmu, protože vyšší módy nejsou z hlediska lokalizace tolik důležité a lze je zanedbat. Zpracování signálu tímto modelem pak lze zapsat vztahem:

$$H(s) = [H_{pp1}(s) + H_{pp2}(s)] \cdot H_h(s) \quad (15)$$

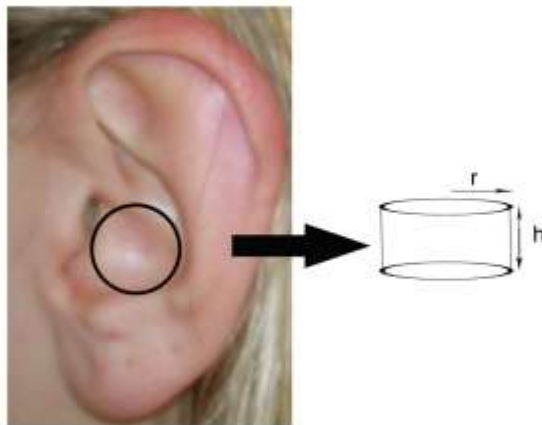
kde $H_{pp1}(s)$ je přenosová funkce 1. rezonančního módu, $H_{pp2}(s)$ je přenosová funkce 2. rezonančního módu a $H_h(s)$ je přenosová funkce hřebenového filtru, pomocí kterého se simulují úzké pásmové zádrže mezi rezonancemi.

Přenosová funkce rezonančního módu je pásmová propust:

$$H_{ppN}(s) = \frac{K_1(s+K_2)}{s^2 + \sigma s + \left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \omega_N^2} \quad (16)$$

kde K_1 je zisk rezonance a K_2 koriguje průběh funkce na nízkých frekvencích, σ je šířka pásma a ω_N je frekvence dané rezonance. Všechny parametry (K_1 , K_2 , σ) byly nastaveny tak, aby byl přenos na nízkých frekvencích 0 dB. Pro získání výsledného tvaru přenosových funkcí musíme ještě vědět hodnoty f_{rez1} a f_{rez2} . K tomu potřebujeme pouze 2 parametry ušního boltce.

Ten model se zaměřuje na odraz zvuku v dutině conchy, a nahrazuje celý ušní boltce jedním válcem (Obr. 2.11). Proto jedinými parametry, které potřebujeme, jsou šířka conchy a její hloubka (tj. průměr a výška válce).



Obr. 2.12 – Aproximace ušního boltce válcem [7]



Obr.2.13 – Velikost odraženého paprsku v závislosti na elevaci [7]

V [7] se ještě navíc bere v úvahu to, že pokud přirovnáme d (průměr válce) velikosti paprsku odraženého od ústí zvukovodu, uvidíme, že jeho velikost se snižuje se zvyšující se elevací (Obr. 2.12). Pro záporné hodnoty elevace, pokud bereme ohled na odraz od nejvzdálenější hrany conchy do ústí zvukovodu, bude se měnit také výška h . Proto byly experimentálně odvozeny vztahy, umožňující používat ten model na všech elevacích:

$$d = d_0 - \frac{3d_0}{4} \cdot \frac{\varphi}{90^\circ} \quad (17)$$

$$h = h_0 - \frac{3h_0}{4} \cdot \frac{\varphi}{90^\circ} \quad (18)$$

kde h_0 a d_0 jsou parametry při nulové elevaci (tj. změřené antropometrické parametry), φ je elevace.

S těmi dvěma parametry můžeme spočítat frekvence rezonancí hloubky a šířky:

$$f_{rez1} = \frac{c}{4(h+0,822r)} \Rightarrow \omega_1 = 2\pi f_{rez1} \quad (19)$$

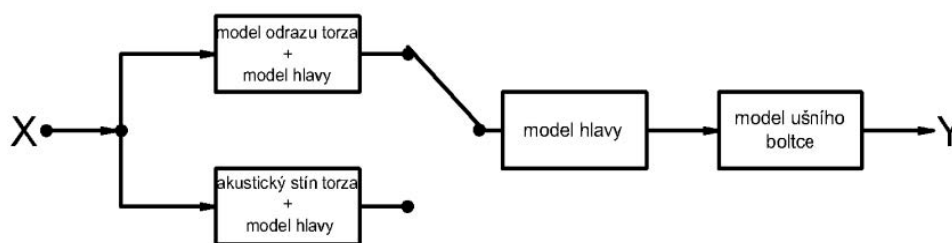
$$f_{rez2} = \frac{2}{t_d} = \frac{2}{2d/c} \Rightarrow \omega_2 = 2\pi f_{rez2} \quad (20)$$

kde c je rychlost zvuku, $r = d/2$ je poloměr válce.

A zbývá jen přenosová funkce hřebenového filtru:

$$H_h(s) = 1 + \rho e^{-st_d} \quad (21)$$

kde $t_d = 2d/c$ je časové zpoždění závislé na průměru válce, a ρ je koeficient udávající strmost jednotlivých pásmových zádrží hřebenového filtru.



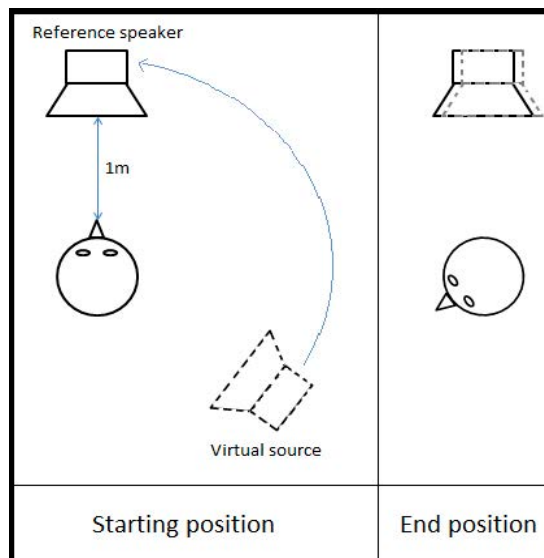
Obr. 2.14 – Celkový model syntézy HRTF [7]

Výsledkem syntézy je funkce, která docela přesně odhadne umístění zářezu (pinna notch), ale chybí jí detaily, které se vyskytují v měřené a personalizované HRTF. Ale otázkou je, jestli ty detaily jsou vůbec tak důležité pro správnou lokalizaci. [13] říká že HRTF na vysokých frekvencích může být vyhlazená bez toho, aniž bychom značně snížili přesnost lokalizace. Přesnější výsledky se budou vidět po porovnání subjektivními testy.

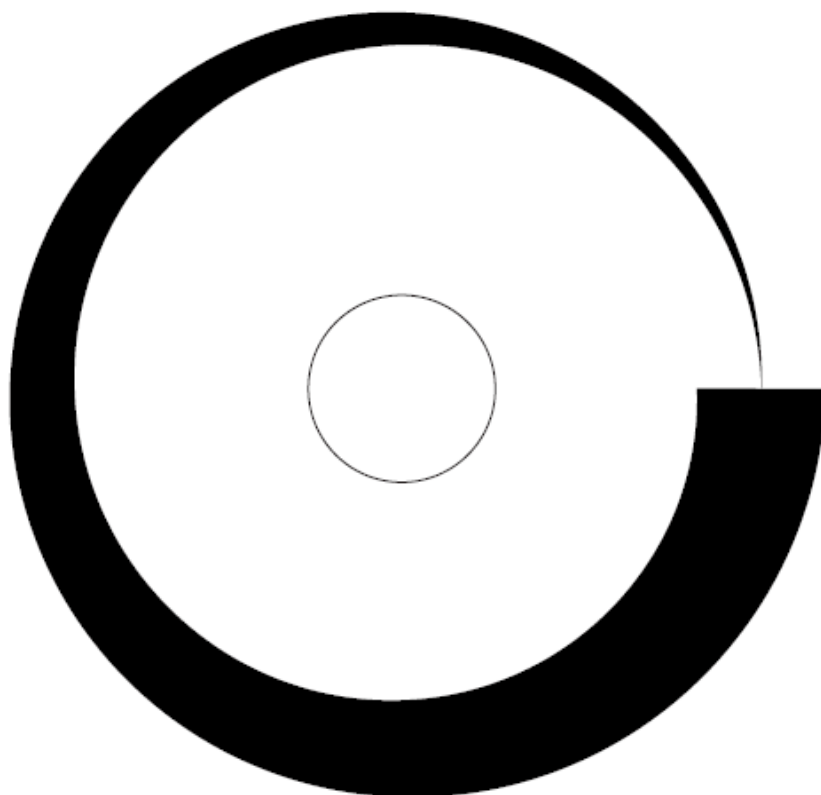
2.3 Subjektivní lokalizační testy

Ve své bakalářské práci [27] jsem se zabývala ověřením a doplněním metody subjektivního testování lokalizace v horizontální rovině, navržené v [26]. Tato metoda byla inspirována metodami měření HRTF a používá skoro stejné vybavení.

Subjekt má na sobě sluchátka a sedí na otočné židli před reproduktorem. Poslouchá na binaurální záznam testovacího signálu z virtuálního zdroje přes sluchátka a referenční signál z reproduktoru. Jeho úkolem je porovnávat dva signály a otáčet se, dokud nebude jistý, že signály ze sluchátek a z referenčního reproduktoru zní jako by ze stejného směru. Tj. metoda je založena na shodě poloh virtuálního a reálného zdroje zvuku (Obr. 2.13). Úhel otáčení, azimut, se určí pomocí web-kamery instalované pod sedadlem a speciálního obrázku (Obr. 2.14), který se později zpracovává v Matlabu. [26, 27]



Obr. 2.15 – Princip lokalizačního testu [26]



Obr. 2.16 – Testovací obrázek pro měření azimutu [26]

3 Praktická část

3.1 Audiobáze

Jedním z plánovaných výsledků této práce bylo uložení různých HRTF do databázi. Spolu se změřenými antropometrickými parametry (Obr. 2.3) všechna data jsou uložena v souborech [viz Přílohy na CD]. Celkem jsem změřila parametry u 7 subjektů.

Většinu parametrů jsem měřila v programu Adobe Photoshop CC (Obr.3.1). Tedy potřebovala jsem 4 obrázky pro každý subjekt – profil, en face, a fotky levého a pravého ucha. Ale některé parametry jsem musela měřit ručně: výšku, výšku v sezení, obvod hlavy, obvod ramen a hloubku cavum conchy.



Obr. 3.1 – Ukázka měření parametru v Adobe Photoshop CC

Antropometrie všech subjektů byla uložena do jednoho souboru *fel_anthro.mat*. Parametry torosa a hlavy – do matici X o rozměrech 7×17 uvnitř souboru, parametry obou boltců – do matici D o rozměrech 7×16 . V souboru taky uloženy ID subjektů (v této chvíli to jsou prostě čísla od 1 do 7, ale dá se ji změnit, kdyby se to potřebovalo).

Další části databázi jsou samozřejmě vytvořené HRTF. Jejich vytvoření a to, v jakém formátu jsou uložené, je popsáno v [3.2].

3.2 Modelování HRTF 3 způsoby

Když jsem probírala skripta z [16, 7], prvním problémem, na který jsem se narazila, bylo to, že oni byly velmi těžko čitelné. Proto v obou případech jsem opravovala nebo kompletně přepisovala skripta s implementací algoritmů popsanych v [2.2].

U syntézu jsem většinou nechala strukturu skriptu stejnou, jejich problém byl hlavně v tom, že se vyskytovalo několik chyb, jedna z hlavních se tykala odvození koeficientů b , a přenosové funkce rezonančních módů:

$$H_{pp}(s) = \frac{K_1(s+K_2)}{s^2+\sigma s+\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2+\omega_1^2} + \frac{K_1(s+K_2)}{s^2+\sigma s+\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2+\omega_2^2} = \dots =$$

$$= \frac{2K_1s^3 + (2K_1\sigma + 2K_1K_2)s^2 + \left(2K_1\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + K_1\omega_1^2 + K_1\omega_2^2 + 2K_1K_2\sigma\right)s + 2K_1K_2\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + K_1K_2\omega_1^2 + K_1K_2\omega_2^2}{s^4 + 2\sigma s^3 + \left(2\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \sigma^2 + \omega_1^2 + \omega_2^2\right)s^2 + \left(2\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2\sigma + \sigma\omega_1^2 + \sigma\omega_2^2\right)s + \left(\frac{\sigma}{2}\right)^4 + \left(\frac{\sigma}{2}\right)^2\omega_1^2 + \left(\frac{\sigma}{2}\right)^2\omega_2^2 + \omega_1^2\omega_2^2}$$

Druhou důležitou úpravou byl přepočítání poloměra hlavy. V [7] byl roven polovině šířky hlavy. Změnila jsem to na vztah z [14] který aproximuje poloměr hlavy ze všech třech dimenzí – výšky, šířky a délky – podle vztahu:

$$a = 0,51X_1 + 0,019X_2 + 0,18X_3 + 3,2 \text{ [cm]} \quad (23)$$

kde X_1 je polovina šířky hlavy, X_2 je polovina výšky a X_3 je polovina délky.

Dále jsem dělala jen drobné opravy a doplnila funkce popisem a komentáři, aby se s nimi snadněji pracovalo v budoucnu.

Na rozdíl od toho funkce pro personalizaci jsem psala znovu. Za prve, rozdělila jsem skript na jednotlivé funkce podle kroků personalizace [2.2.3] a zvýšila jsem tím efektivitu a rychlost výpočtu, za druhé, zde byly provedené významnější změny: na rozdíl od [16] operátor E se počítá podle 17 parametrů torsa a hlavy a 5 parametrů boltee (dřív 5 a 4 resp.). Kromě toho, dřív se jako zdroj HRTF se používala databáze CIPIC [24], teď je to ARI [25], která má flexibilní mřížku a větší rozlišení poloh. Pak jsem to doplnila funkcí, která umožňuje práci s antropometrií jak z CIPIC databázi, tak i z ARI databázi.

Aby se dalo všechny HRTF používat u testů měla jsem ji uložit ve stejném formátu, proto jsem ve skriptu taky měním konfigurací měřených HRTF. Všechny HRTF se uloží v Matlabu do jedné matice o rozměrech $L \times C \times N_a \times N_e$, kde L je délka HRTF ve vzorcích, C je počet kanálů (2, pro oba ucha), N_a je počet vybraných azimutů, N_e je počet vybraných elevací.

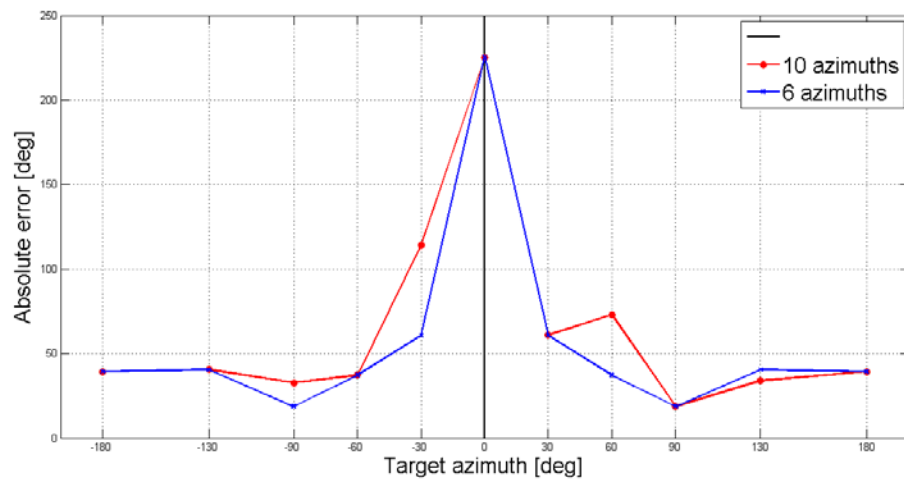
Na začátku jsem zvolila počet azimutů a elevací stejný jako u měřených HRTF:

- $N_a = 10$ (θ : 0° 30° 60° 90° 130° 180° -130° -90° -60° -30°)
- $N_e = 6$ (φ : -40° -20° 0° 20° 40° 60°)

Potom jsem to změnila – za prvé, polohy personalizovaných HRTF jsou pevně daný použitou databázi ARI, a v ní všechny azimuty, které potřebujeme, jsou naměřené pouze pro nulovou elevaci [25] – proto u personalizované HRTF budeme testovat jen v horizontální rovině. Za druhé, když jsme testovali 6 elevací a na každé 10 azimutů – celkem 60 poloh – test jedné HRTF mohl trvat více než hodinu. Proto jsem u 4 subjektů využila symetrií mezi levou a pravou stranou (je ji vidět na Obr. 3.2) a nové azimuty jsou:

- $N_a = 6$ (θ : 0° 30° 90° 180° -130° -60°)

Na grafech je vidět, že takový přepočít se liší od naměřených hodnot maximálně o 50° - ale takový rozdíl mohl být způsoben takže tím, že kvůli strašně dlouhému testu subjekt byl unavený a nemohl správně lokalizovat signál.



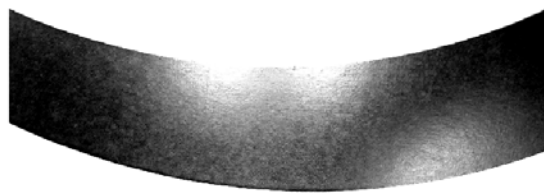
Obr. 3.2 – Rozdíl mezi chybami v lokalizaci azimutu u syntetizované HRTF pro N_a rovnou 10 a 6

Tedy výsledné matice HRTF, uložené v databázi, mají rozměry:

- Měřená $201 \times 2 \times 6 \times 6$
- Personalizovaná $256 \times 2 \times 10 \times 1$
- Syntézovaná $256 \times 2 \times 6 \times 6$

3.3 Porovnání HRTF pomocí testů

Skripta pro lokalizační test byly upraveny tak, aby se dalo testovat signály nejen v horizontální rovině, ale i ve vertikální. Kromě toho, jsem znova narazila na problém s přesvěcenými obrázky, ze kterých se nedá měřit azimut dostatečně přesně (Obr. 3.3). Řešila jsem to tak, že napsala jsem novou funkci pro ruční měření azimutu. Takové měření trvá déle než automatické (kdyby to šlo bez chyb), ale čas se šetří tím, že nemusíme dělat fotky z kamery několikrát, až do získávání měřitelného obrázku. Příklad ručního měření je znázorněn na Obr. 3.4.

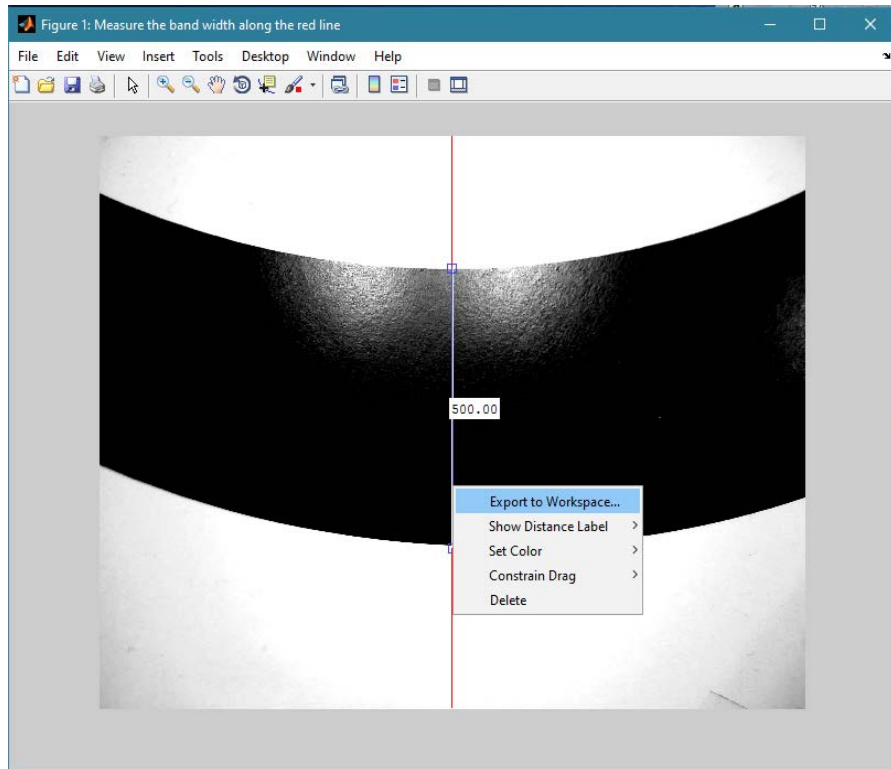


Obr. 3.3 – Příklad neměřitelného obrázku

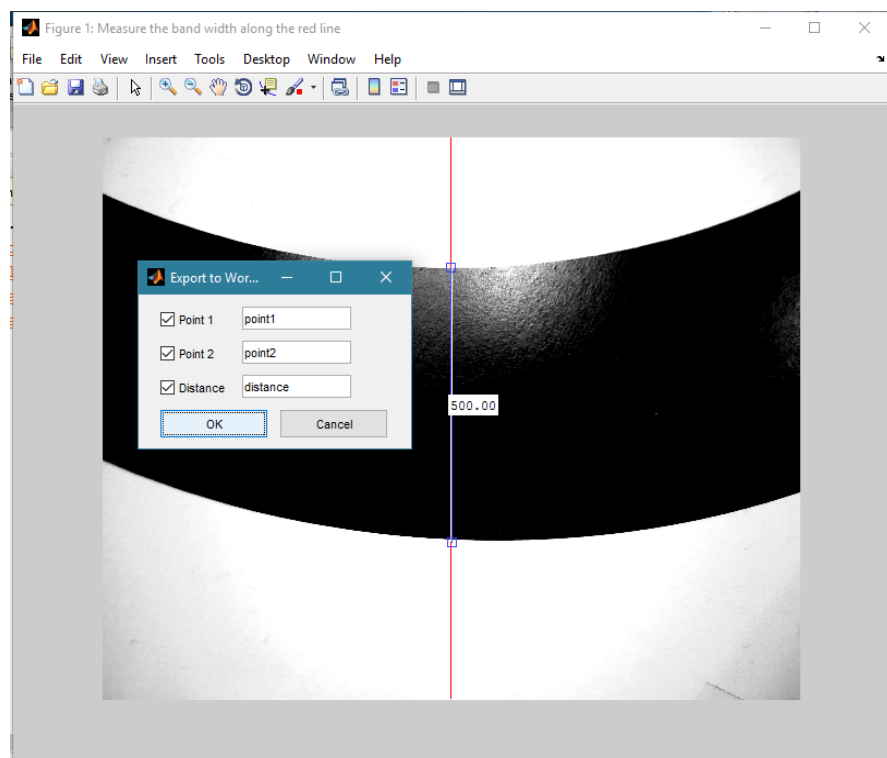
Test probíhal stejně jako bylo popsáno v [2.3], jenže když subjekt hledá polohu, při které virtuální a referenční signály znějí ze stejného směru, může nejen měnit azimut svým otáčením, ale i měnit elevaci tím, že vybírá, z jakého reproduktoru se bude hrát referenční signál. Na začátku testu se referenční signál hraje z reproduktoru odpovídajícího nulové elevaci (Obr. 2.4). Posluchač pak stisknutím příslušných tlačítek může měnit reproduktor, a vybrat buď reproduktor o 20° výše nebo o 20° níže.

Všechno se ovládá 6 tlačítky(Obr. 3.5):

- 4: Signál se hraje ze sluchátek
- 5: Signál se hraje ze zvoleného reproduktoru
- 8: Poloha zvoleného reproduktoru se posune o krok výše
- 2: Poloha zvoleného reproduktoru se posune o krok níže
- 6: Signály zní ze stejného směru, dělá se foto a zobrazí se na obrazovce
- Mezera: Operátor zkontroluje obrázek, pokud se z něho podaří změřit azimut, uloží ho, a přejde k následujícímu signálu.



(a)



(b)

Obr. 3.4 – Ruční měření šířky pásky



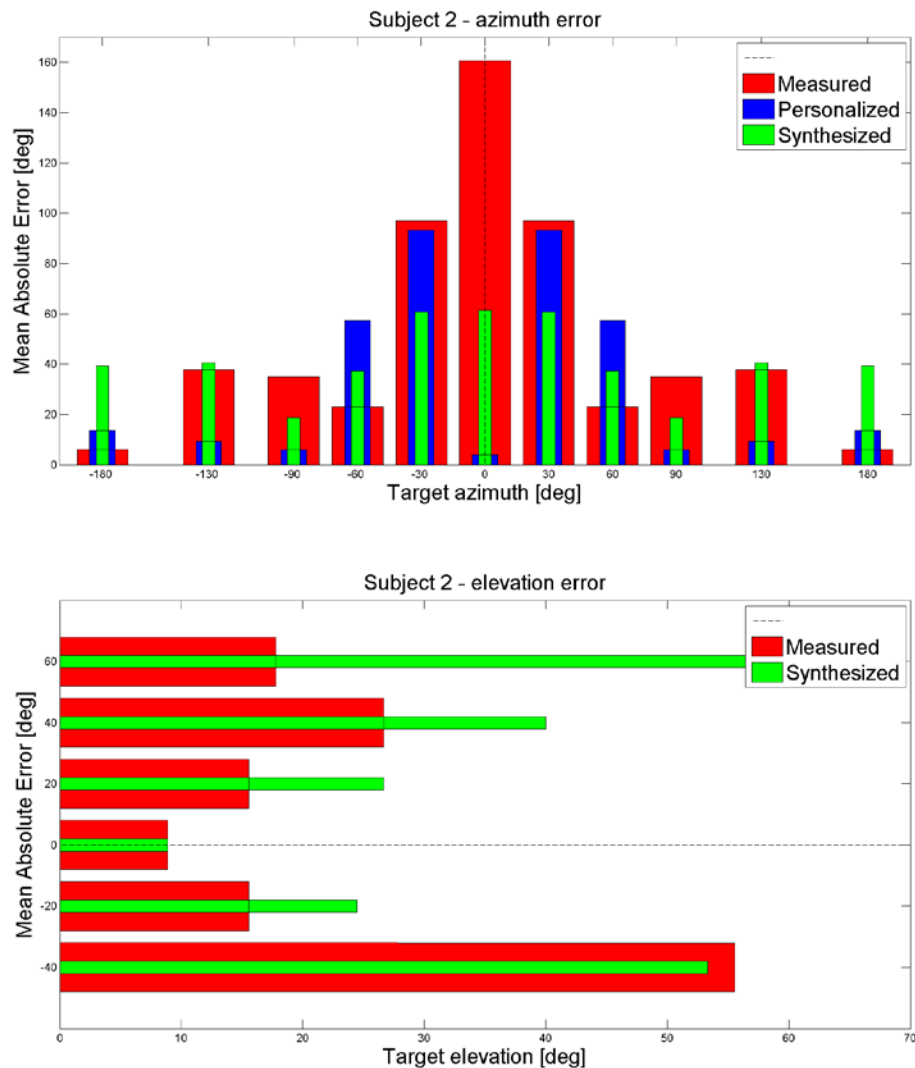
Obr. 3.5 – Tlačítka na ovládání testu posluchačem



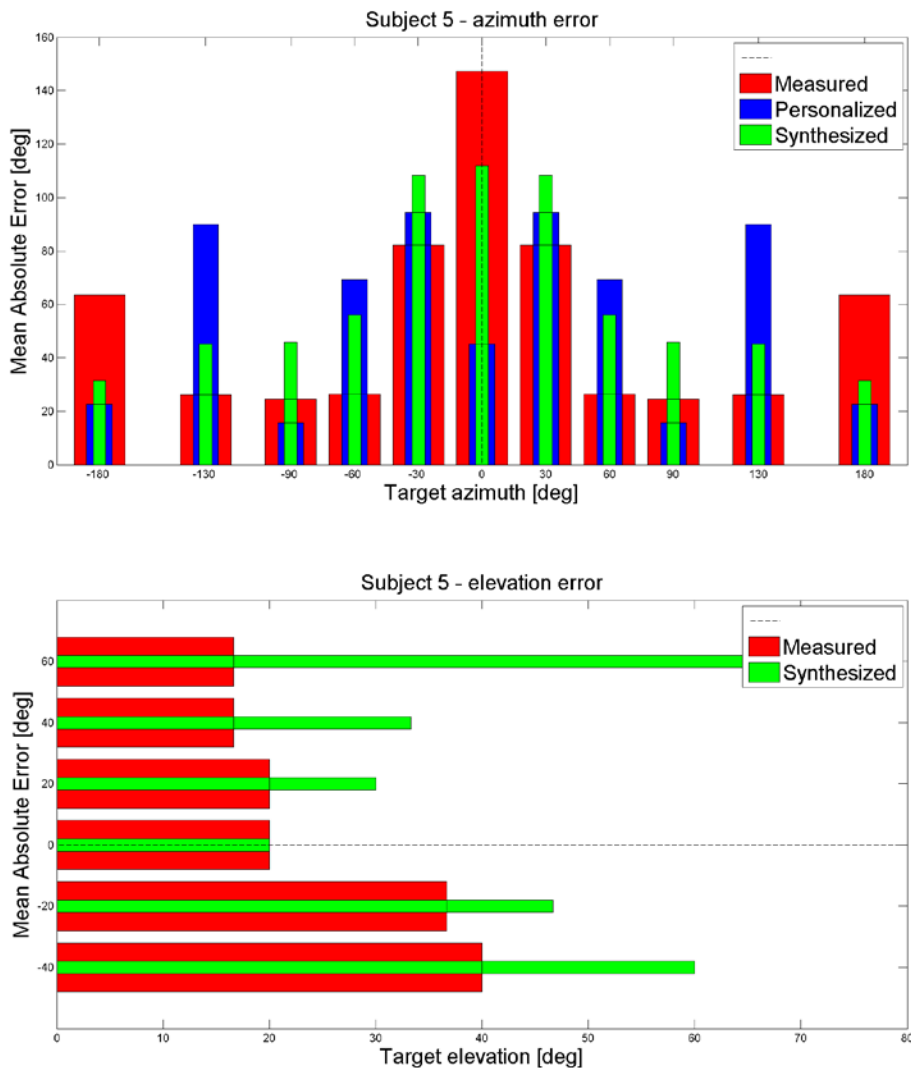
Obr. 3.6 – Během lokalizačního testu

3.3.1 Výsledky testu

Po skončení testu jsem počítala střední hodnoty chyby u azimutu a elevaci pro všechny subjekty. Jsou znázorněny na následujících grafech (ukázka pro dva subjekty, další grafy jsou v příloze). Očekáváme, že měřená HRTF bude mít nejlepší výsledky, protože je nejvíce individualizována; syntetizovaná bude na druhém místě, protože průběh HRTF je velmi podobný měřené, jenže nemá tolik detailů; a personalizovaná bude mít nejhorší výsledky, protože ze všech třech je nejméně individualizována.



Obr. 3.7 – Výsledky testu 2. subjektu



Obr. 3.8 – Výsledky testu 5. subjektu

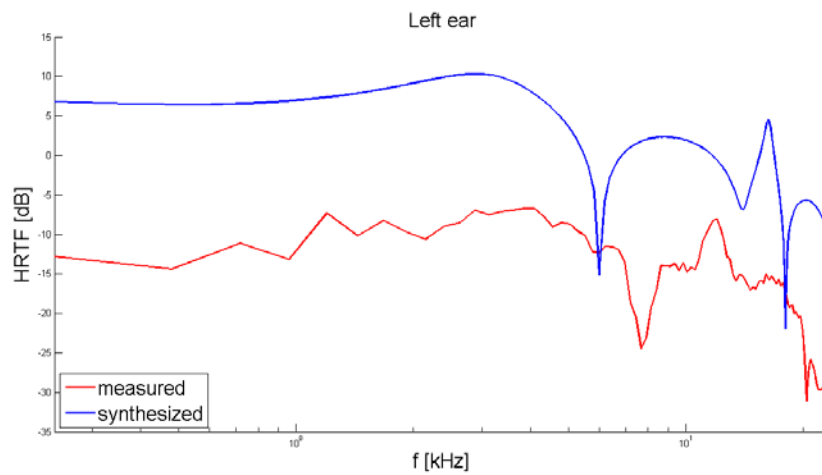
Vidíme, že všechny tři HRTF ukazují docela velké chyby na úseku od -60° do 60° . Hodnota chyb v nule je okolo 160° , a můžeme posuzovat, že je pravděpodobně způsobena předozadním zmatením. Při umístění virtuálního zdroje zezadu je chyba minimální ve většině případů, zejména u měřené HRTF, personalizovaná a syntetizovaná taky ukazují chyby do 180° u pár subjektů. Obecně dojem zvuku vpředu nebo vzadu je nám umožněn pohybem hlavou a způsobeným tím „posunutím“ zdroje zvuku vůči naší hlavě. Ale vzhledem k tomu, že virtuální zvuk se během testu nahrává do sluchátek, ten mechanismus použit nejde. Proto se ve výsledcích objeví předozadní zmatení. Stejný jev se objevoval i minule v [27].

Skoro všude nejmenší chybu azimutu nám dává syntetizovaná HRTF. Z toho můžeme posuzovat, že nedostatek detailů na nízkých kmitočtech nemá zásadní vliv na lokalizaci. Kupodivu, nejhorší výsledky převážně dává měřená HRTF. To mohlo být způsobeno nedokonalostmi při měření. U pár subjektů nejhorší výsledky dává

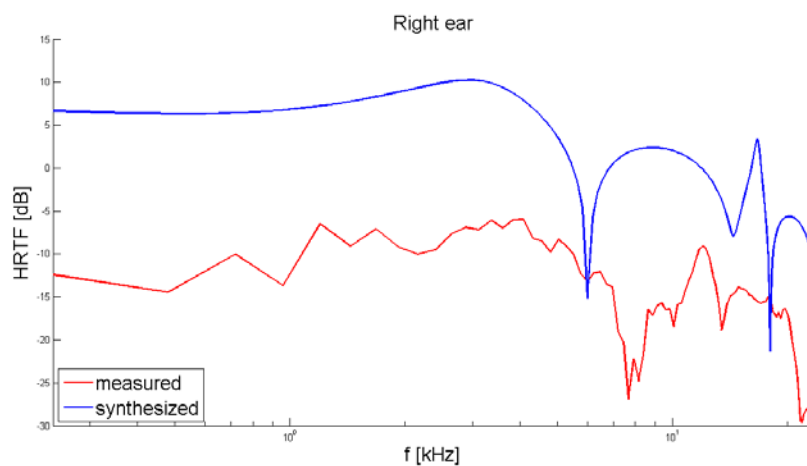
personalizovaná HRTF, což je pochopitelné, důvody k tomu jsem popsala na konci [2.2.2].

Pozorování elevací je zajímavější (zde porovnáváme jenom syntetizovanou a měřenou HRTF). Chyby jsou tím větší, čím dál je virtuální zdroj od nulové elevací. Nejhorší výsledky jsou u syntetizované HRTF. Z toho můžeme říci, že přemístění zářezů (pinna notch aj), jelikož oni nám umožňují vnímat elevaci, nelze zanedbat. Další možnou příčinou je to, že na rozdíl od měřené HRTF, syntetizovaná je velmi vyhlazená.

Nejlepší výsledky ve většině případů dává měřená HRTF. Je zajímavé, že např. u 5. subjektu se chyba elevací roste se snížením polohy virtuálního zdroje. To bylo pravděpodobně způsobeno tím že ten subjekt je citlivý na ty frekvence, kde se objevují zářezy odpovídající za vjem vysoce umístěných zdrojů zvuku.



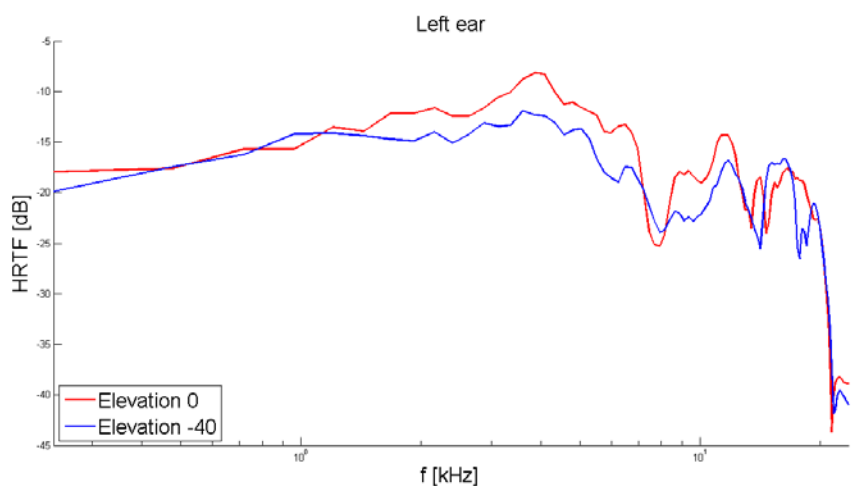
(a)



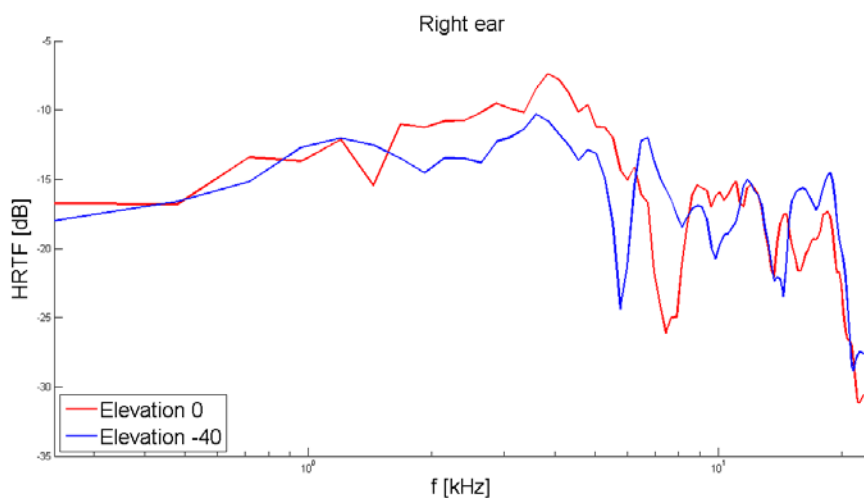
(b)

Obr. 3.9 – HRTF pro $\theta = 0^\circ$ a $\varphi = 60^\circ$. (a) Levé ucho. (b) Pravé ucho

Podíváme se na obr. 3.9, průběhy HRTF u nulového azimutu a elevaci 60° pro 2. subjekt. Z jeho výsledků vidíme, že při takové elevaci chyba syntetizované HRTF je mnohem větší než u měřené. Z grafu je jasně vidět, že hlavní rozdíl mezi nimi je v umístění zářezů - syntetizovaná HRTF má zářez na menší frekvenci než měřená.

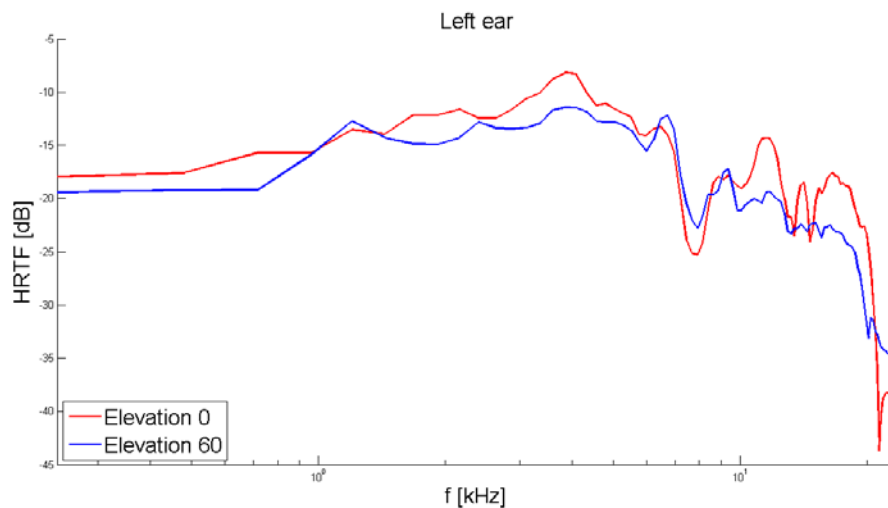


(a)

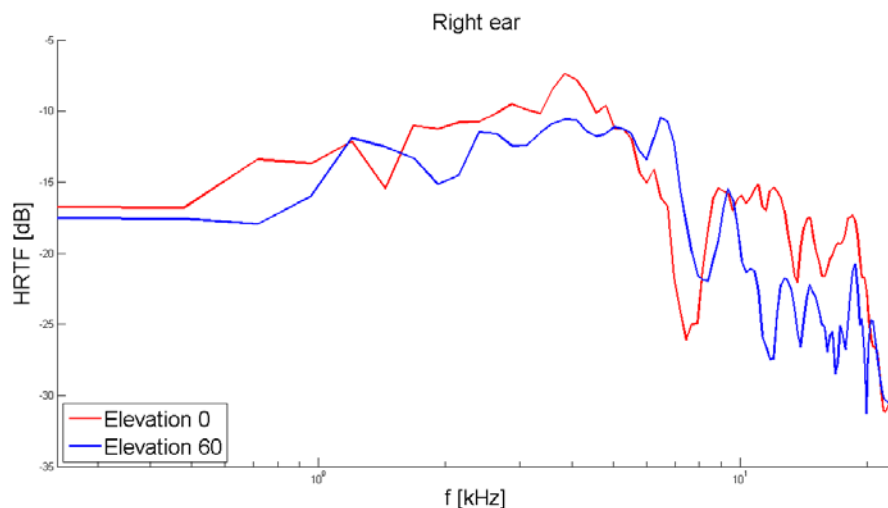


(b)

Obr. 3.10 – Měřené HRTF pro $\theta = 0^\circ$ a $\varphi = 0^\circ$ a -40° . (a) Levé ucho. (b) Pravé ucho



(a)



(b)

Obr. 3.11 – Měřené HRTF pro $\theta = 0^\circ$ a $\varphi = 0^\circ$ a 60° . (a) Levé ucho. (b) Pravé ucho

Dále porovnáme měřené HRTF 5. subjektu pro nulový azimut a elevací 0° a 40° nebo 60° (Obr. 3.10 a 3.11). Už víme, že chyby u syntetizované HRTF jsou pravděpodobně způsobené přemístěním zářezů na vysokých kmitočtech. Tedy zvětšení chyby se snížením polohy zdroje u měřené HRTF může být způsobeno individuálními lokalizačními schopnostmi subjektu. Z grafů je vidět, že v levém uchu je rozdíl minimální, ale v pravém zase je posun zářezu. Ale při $\varphi = 60^\circ$ zářez se posune o cca 0,96 kHz, zatímco při $\varphi = -40^\circ$ posun je 1,68 kHz. Možná subjekt je citlivý jen na posun zářezu do 1 kHz, a dále začíná se motat. Studium vlivu citlivosti subjektu na jednotlivé kmitočty na úspěšnost lokalizace je jedním z mých návrhů pro další práci v této oblasti.

Na shrnutí můžeme říci, že výběr vhodné HRTF bude záležet na tom, k čemu ji potřebujete. Pokud je důležitá lokalizace v horizontální rovině, a výšková elevace je pro Vás zanedbatelná, můžete použít syntetizovanou HRTF. Ale pokud je lokalizace ve vertikální rovině pro Vás podstatná, musíte použít měřenou HRTF, nebo použít složitější - ale přesnější - modelování ušního boltce.

3.4 Návrhy pro další práce

- Implementovat systém na externalizaci zvuku během testu. Několik subjektů cítili že signály které by mely znít ze zadu, se vnímaly uvnitř hlavy
- Prozkoumat citlivost subjektů na jednotlivá kmitočtová pásma a její vliv na přesnost lokalizaci
- Prozkoumat předozadní a boční zmatení při lokalizaci. Jak by se dalo jeho se zbavit?
- Sledovat během testu, kde mají subjekty více problémů – při nalezení spávného azimutu nebo elevací? V jaké rovině se nejprve lokalizuje zvuk? Jaký to má vliv na přesnost?
- Vyzkoušet jiné uspořádání testu: opakovat některé signály; míchat různé HRTF; měřit jednotlivé elevace v různé dny, aby se stíhalo více azimutů a zároveň se subjekty nebyli tak unavení ve druhé polovině testu.

4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo probrat metody stanovení HRTF bez jejího měření. Měla jsem za úkol implementovat zvolené metody, porovnávat jejich úspěšnost u lokalizačních testů a uložit všechny výsledky do databázi.

V teoretické části jsem zopakovala základní informaci o HRTF a popsala vybrané metody modelování HRTF. V praktické části jsem popsala provedená měření.

Vybrala jsem 2 způsoby modelování HRTF – personalizace a strukturální syntéza. Obě metody už byly někdy implementovány, zaměřila jsem se na opravu se vyskytujících chyb a na přizpůsobení skriptů pro další používání. Přepsala jsem část skriptů pro zvýšení jejich efektivity a výpočetní rychlosti, a hlavně pro snadnější práci s nimi u lidí, kteří budou s nimi pracovat poprvé.

Potom jsem provedla měření antropometrických parametrů několika subjektů a spolu s vytvořenými HRTF jsem všechno uložila do jediné databázi.

Poslední etapou bylo porovnání modelovaných a změřených [6] HRTF pomocí subjektivních lokalizačních testů. Jelikož na základě objektivních porovnání můžeme jenom odhadnout, jaká HRTF bude lepší pro lokalizaci, subjektivní porovnání je velmi důležité. Testovaly se sady z 6 elevací s 6 azimutů, tedy celkem 36 poloh (u syntetizované a měřené HRTF) a 1 elevace s 10 azimuty (u personalizované). Pro zkrácení čísla azimutu z původních 10 používáme boční zmatení subjektů.

Výsledkem jsou grafy střední hodnoty chyb u azimutů a u elevací pro každý subjekt. Myslela jsem, že nejlepší výsledky bude mít měřená HRTF, syntetizovaná bude na druhém místě, a personalizovaná bude mít nejhorší výsledky. Tyto očekávání se částečně splňují u elevací (ve vertikální rovině se testovaly pouze měřená a syntetizovaná HRTF). Důvodem k tomu je velký význam přesného umístění zářezů na vyšších kmitočtech, které odpovídají za vjem ve vertikální rovině. Azimut je na tom méně závislý, proto při lokalizaci v horizontální rovině nejlepší výsledky jsou ve většině případů u syntetizované. Personalizace HRTF se prokázala být nejméně přesným způsobem jejího modelování.

Další práce v této oblasti, kterou by se chtělo zabývat, zahrnuje zkoumání různých faktorů, ovlivňujících přesnost lokalizace ve virtuálním akustickém prostoru, jako např. citlivost subjektu na jednotlivé kmitočty, doba trvání testu, jeho uspořádání a další.

Seznam použité literatury

- [1] Blauert, J.: The Technology of Binaural Listening (Modern Acoustics and Signal Processing). Springer; 2013 edition (June 7, 2013). ISBN: 978-3642377617
- [2] Xie, B.: Head-Related Transfer Function and Virtual Auditory Display. J Ross Publishing; 2 edition (July 30, 2013). ISBN: 978-1604270709
- [3] Syrový, V.: Hudební akustika. Akademie múzických umění, 2003.
- [4] Begault D. R.: 3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia. California, USA: Ames Research Center, 2000 . ISBN 0-12-084735-3.
- [5] Štorek, D.: Studium binaurální lokalizace zdroje zvuku. Praha: ČVUT v Praze. Elektrotechnická fakulta. Katedra radioelektroniky, 2010. Vedoucí diplomové práce Ing. František Rund, Ph.D.
- [6] Šupka, O.: Sestava pro měření HRTF. Praha: ČVUT v Praze. Elektrotechnická fakulta. Katedra radioelektroniky, 2016. Vedoucí diplomové práce Ing. František Rund, Ph.D.
- [7] Saturka, F.: Syntéza HRTF. Praha: ČVUT v Praze. Elektrotechnická fakulta. Katedra radioelektroniky, 2012. Vedoucí diplomové práce Ing. František Rund, Ph.D.
- [8] Brown C.P. , Duda R.O.: An efficient HRTF model for 3-D sound. Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. 1997. 1997 IEEE ASSP Workshop on. 1997(5862513), 4. DOI: 10.1109/ASPAA.1997.625596.
- [9] Brown C.P., Duda R.P.: A structural model for binaural sound synthesis. IEEE Trans. Speech Audio Process., September 1998.
- [10] Algazi, V. R., Duda, R. O., Duraiswami, R., Gumerov, N. A., and Tang, Z.: Approximating the head-related transfer function using simple geometric models of the head and torso. Technical Report CIL-2002-1, CIPIC Interface Laboratory, University of California, Davis, CA 95616 (April, 2002).
- [11] Algazi V. R., Duda R. O., Thompson D.M.: The Use of Head-and-Torso Models for Improved Spatial Sound Synthesis. In 113 AES Convention, Los Angeles, CA, USA, Oct. 5–8, 2002
- [12] Geronazzo M., Spagnol S., Avanzini F.: A modular framework for the analysis and synthesis of Head-Related Transfer Functions. In 134 AES Convention, Rome, Italy, May 4-7, 2013
- [13] Satarzadeh P., Algazi V. R., Duda R. O.: Physical and Filter Pinna Models Based on Anthropometry. In 122nd AES Convention, Vienna, Austria, May. 5–8, 2007, pp. 1–20.

- [14] Algazi V. R., Avendano C., Duda R. O.: Estimation of a spherical-head model from anthropometry. J. Audio Eng. Soc., June 2001.
- [16] Kotzot J.: Možnosti personalizace HRTF. Praha: ČVUT v Praze. Elektrotechnická fakulta. Katedra radioelektroniky, 2012. Vedoucí diplomové práce Ing. František Rund, Ph.D.
- [17] Zotkin D., Hwang J., Duraiswami R., Davis L.: HRTF Personalization using anthropometric measurements. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, October 2003
- [18] Algazi, V. R., Avendano, C., Duda, R. O.: Elevation Localization and Head-Related Transfer Function Analysis at Low Frequencies, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 109, No. 3, pp. 1110-1122, 2001
- [19] Algazi, V. R., Duda, R. O., Morrison, R. P., Thompson, D. M.: Structural Composition and Decomposition of HRTF, Proc. 2001 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, pp. 103-106, Mohonk Mountain House, New Paltz, New York, 2001
- [20] Middlebrooks, J. C.: Individual Differences in External-Ear Transfer Functions Reduced by Scaling in Frequency, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 106, pp. 1480-1492, 1999
- [21] Middlebrooks, J. C.: Virtual Localization Improved by Scaling Nonindividualized External-Ear Transfer Functions in Frequency. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 106, pp. 1493-1510, 1999
- [22] Dyussekenova S: Improving a HRTF personalization method by applying the ARI database and increasing the number of used parameters. POSTER 2015, Praha, ČVUT
- [23] Audiobase < audiobase.multimediatech.cz >
- [24] Algazi, V.R.; Duda, R.O.; Thompson, D.M.; Avendano, C. "The CIPIC HRTF database", Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2001 IEEE Workshop on the , vol., no., pp.99-102, 2001
- [25] The Acoustics Research Institute of the Austrian Academy of Sciences. The ARI HRTF database <<http://www.kfs.oeaw.ac.at/hrtf>>
- [26] Baráth, T.: Localization Test in Virtual Acoustic Space. Praha: ČVUT v Praze. Elektrotechnická fakulta. Katedra radioelektroniky, 2013. Vedoucí diplomové práce Ing. František Rund, Ph.D.

[27] Dyussekenova, S.: Ověření metody testování lokalizace ve virtuálním akustickém prostoru. Praha: ČVUT v Praze. Elektrotechnická fakulta. Katedra radioelektroniky, 2014. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Rund, Ph.D.

[28] Ušní boltec – Wikipedie

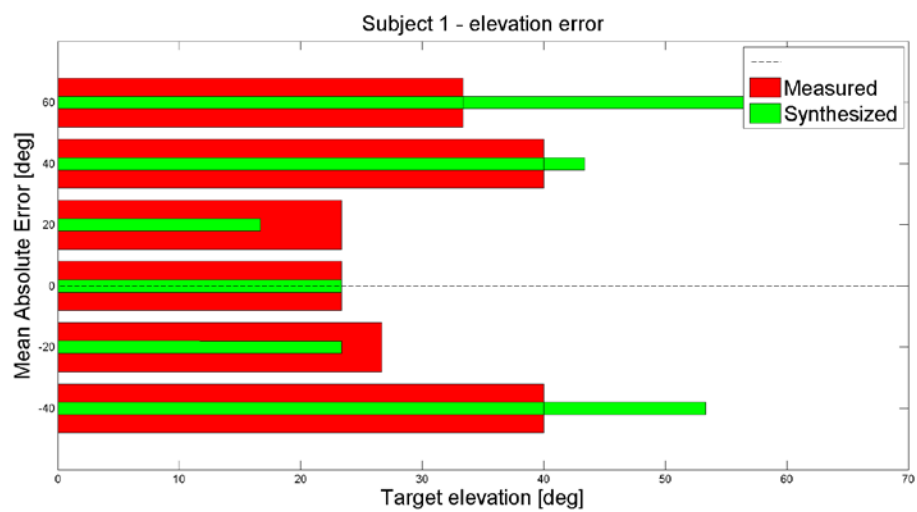
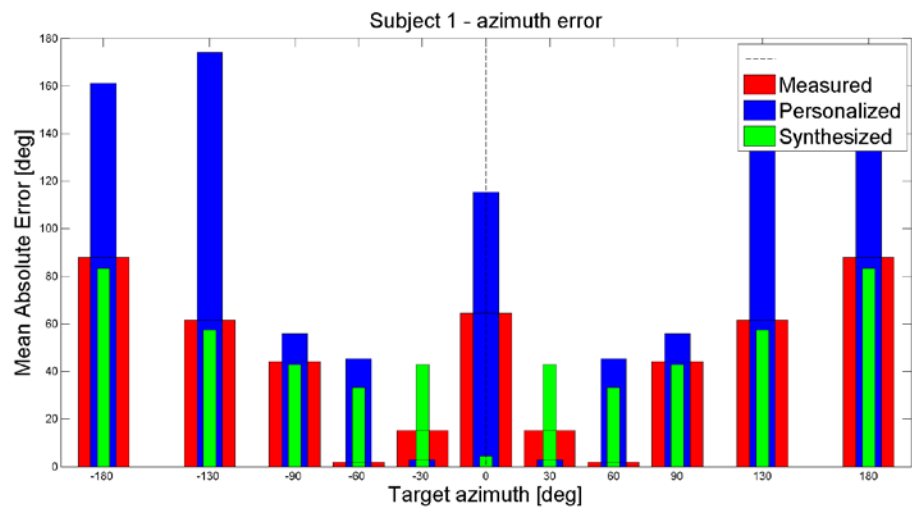
[29] Jos, "getkey", Matlab Central, File exchange, <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7465>>, Uploaded 18.4.2005, Updated 26.6.2012

[30] Burke, T.: Ultra-simple machine vision in C with RobotEyes, Uploaded 27 Nov. 2011, Last Updated 7 Mar. 2012 <<http://batchloaf.wordpress.com/2011/11/27/ultra-simple-machine-vision-in-c-with-roboteyes/>>

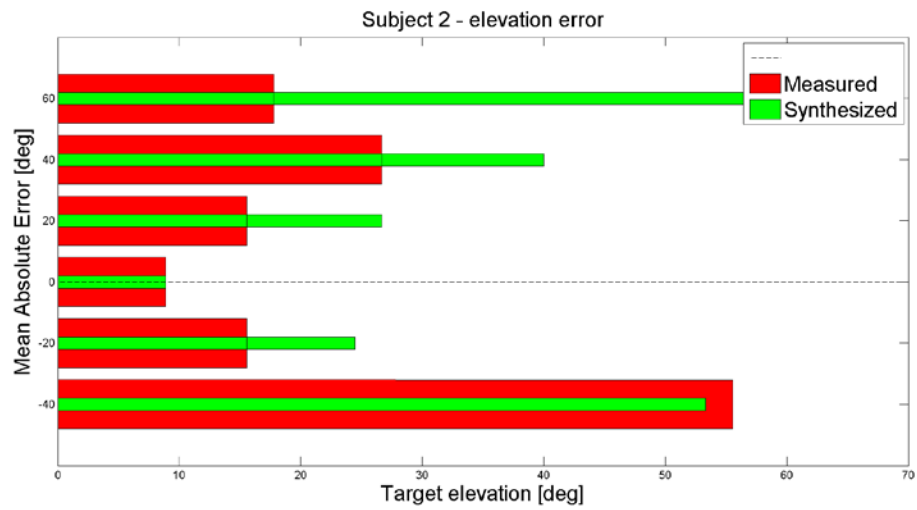
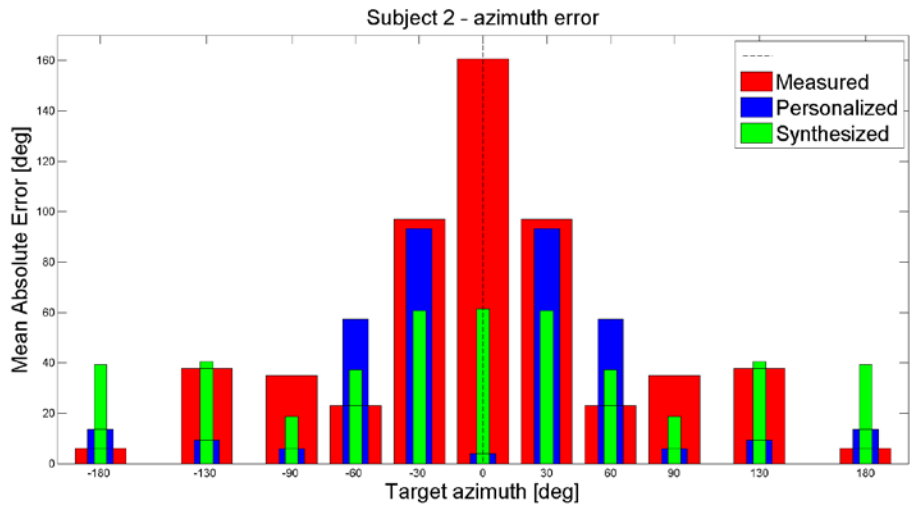
Přílohy

A. Grafy výsledků lokalizačních testů

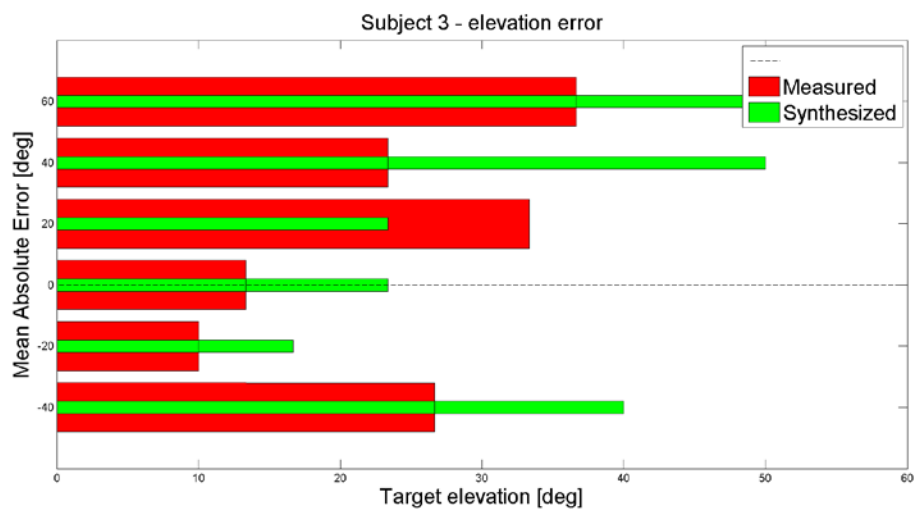
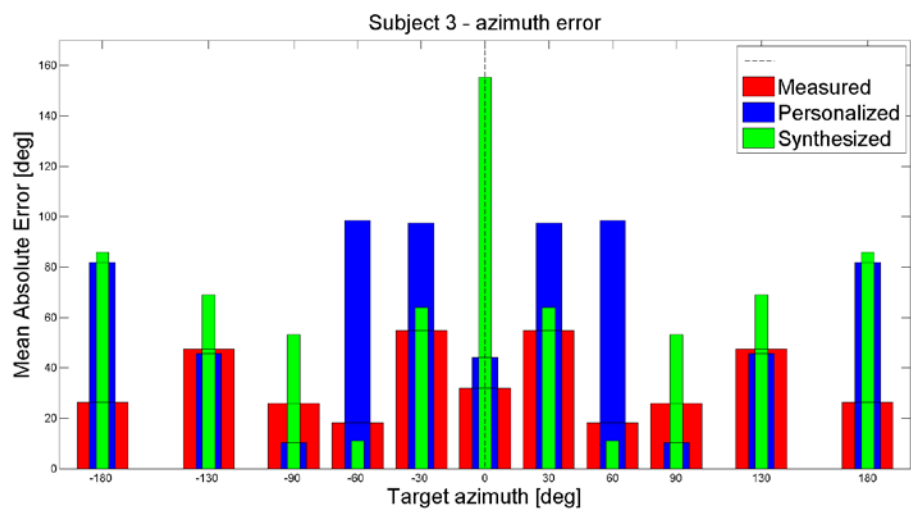
Subjekt 1 – František Rund



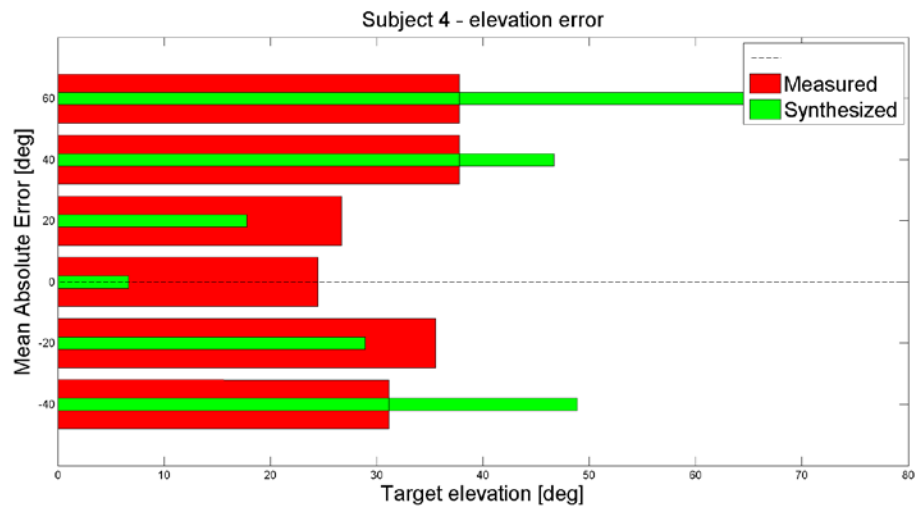
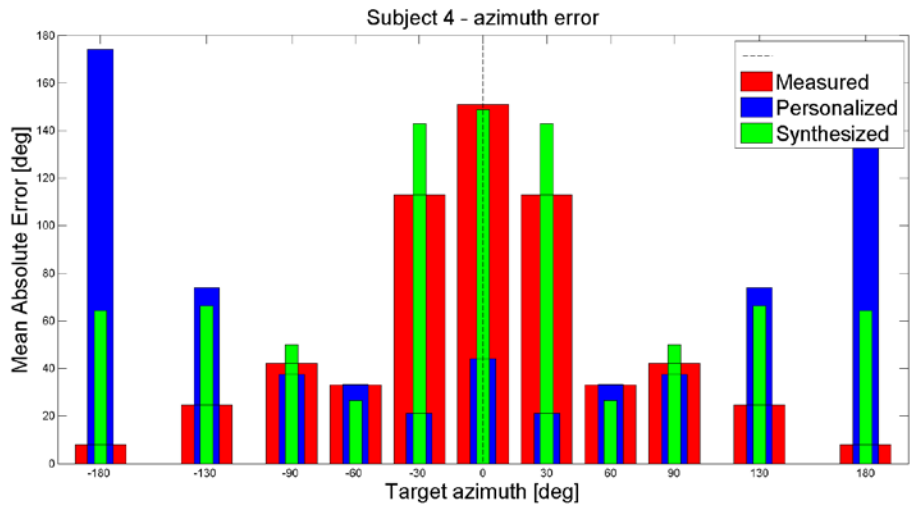
Subjekt 2 – Václav Vencovský



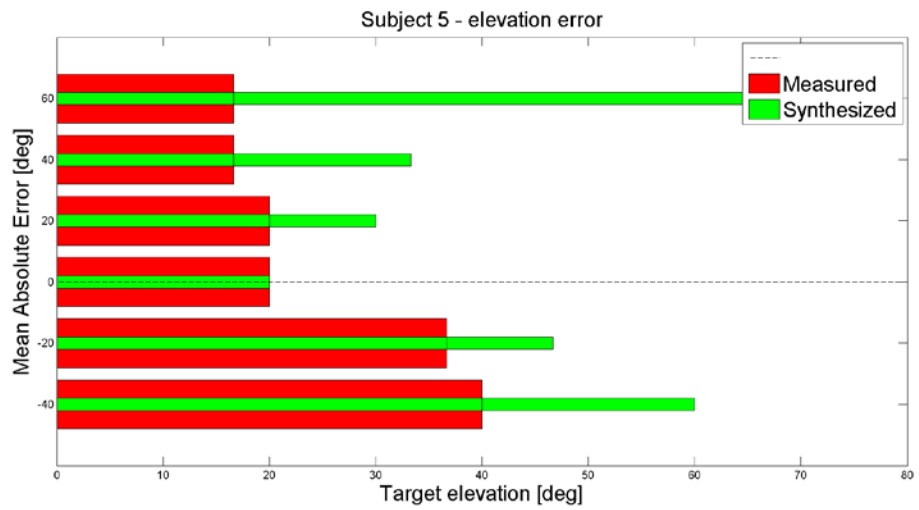
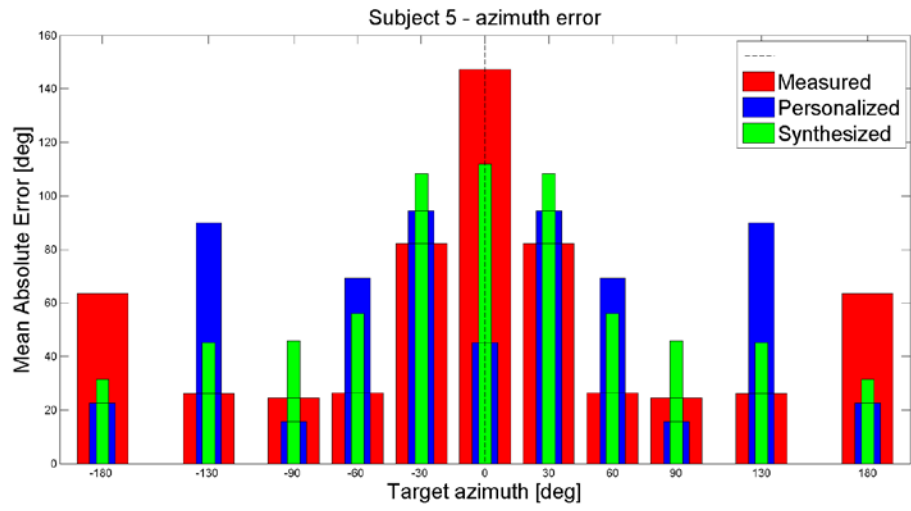
Subjekt 3 – Ondřej Šupka



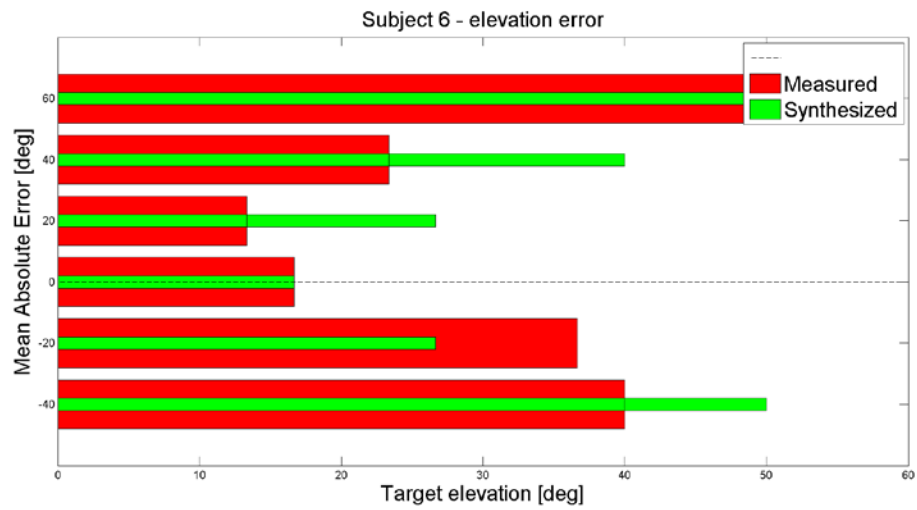
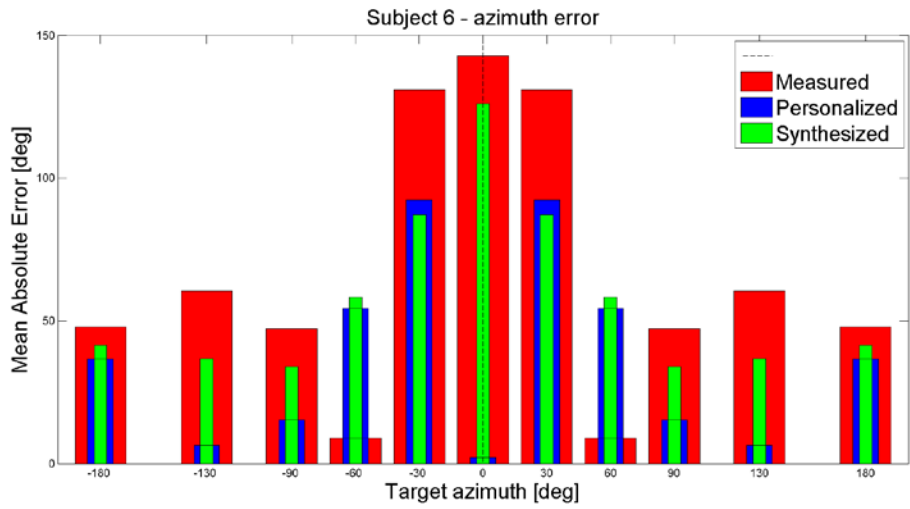
Subjekt 4 – Saniya Dyussekenova



Subjekt 5 – Peter Toth



Subjekt 6 – Jaroslav Bouše



B. Přílohy na CD

* - autor souboru je Ing. T. Baráth, jsem pouze upravovala text pro své testy.

** - autor souboru je Ing. J. Bouše

*** - autor souboru je Ing. F. Saturka, , jsem pouze upravovala text

B.1 data

Tady jsou uloženy databáze pro personalizaci (CIPIC, ARI), výsledky měření (FEL) a toolbox s funkcí pro práci s soubory z ARI databázi [25].

B.2 personalization

Složka zahrnuje funkce pro personalizaci HRTF

- **idealHRTF.m**
Skript na hledání subjektu z databázi s podobnými antropometrickými parametry
- **composeHRTF.m**
Skript na spojení HRTF hlavy a ušního boltce
- **person.m**
Skript na personalizaci HRTF v zadaných polohách

B.3 synthesis

Složka zahrnuje funkce pro syntézu HRTF

- **boltec.m*****
- **torso.m*****
- **hlava.m*****
- **synth.m**
Skript na syntézu HRTF v zadaných polohách

B.4 test

Tady jsou uloženy všechny skripta a soubory, použité při subjektivních lokalizačních testech.

- **LocalizationTestScript.m***
Skript, zahrnující postup lokalizačního testu, výstupem je MAT-soubor s hodnotami azimutů (změřených a očekávaných), a jednotlivé obrazy z kamery, pomocí kterých se počítal azimut.
- **HRTFfilter.m**
Funkce na vytvoření virtuálního akustického prostoru.

- **playDsp.m****
- **getkey.m**
- **bandsize.m**
- **DataProcessing.m**
Skript na zpracování výsledků testu. Vykresluje grafy.
- **RobotEyez.exe**

B.4.1 Results

Tady jsou uloženy výsledky testů.

B.5

Skripta na vytvoření různých HRTF a uložení výsledku do databázi

- **HRTFstart.m**
- **loadbase.m**
- **loadsub.m**
- **main.m**