

Diplomová práce

Optimalizace měření a zpracování HRTF

Bc. Tomáš Lindner



květen 2013

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

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, katedra radioelektroniky

Poděkování

Tato práce byla vedena Ing. Františkem Rundem, Ph.D. a podpořena granty Studentské grantové soutěže SGS11/159/OHK3/3T/13 a SGS14/204/OHK3/3T/13.

Zvláštní poděkování patří panu Zdeňku Lindnerovi, Mgr. Janě Lindnerové a Mgr. Kateřině Mudroňové za zprostředkování materiální i psychické podpory při řešení projektu.

Čestné prohlášení

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

Podpis

Dne 9.5.2014 v Praze.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá optimalizací měření a zpracování HRTF. Pro zjednodušení měření se využívá interpolace. Tento dokument v rešerši probírá problematiku měření HRTF a dále problematiku interpolace. V praktické části se zabývá srovnáváním lineární a Hermitovy kubické interpolace a stanovuje síť měřících bodů na základě korelačních koeficientů.

Klíčová slova

HRTF, HRIR, interpolace, optimalizace, měření

Abstract

This Master thesis deals with optimization of measurement and post-processing of HRTF. For simplifying of measurement, interpolation methods are used. The research part discusses problematics of HRTF measurement and interpolation. In the experimental part it deals with comparison of linear and Hermit Cubic interpolation and sets a measuring grid based on correlation coefficient experiments.

Keywords

HRTF, HRIR, interpolation, optimization, measurement

Obsah

1. Úvod	1
2. Prostorové slyšení	2
2.0.1. Vnější zvukovod a bubínek	2
2.0.2. Boltec	2
2.1. Principy prostorového slyšení	3
2.1.1. ILD	3
2.1.2. ITD	3
2.1.3. Psychoakustický vztah mezi ITD a ILD	4
2.1.4. Kužel neurčitosti	4
2.1.5. Vliv boltce na směrové slyšení	5
2.1.6. Směrové slyšení mimo volné pole	6
2.2. Přesnost lokalizace	6
3. Head Related Impulse Response	7
3.1. Popis HRIR a HRTF	7
3.1.1. Způsob zpracování HRIR a HRTF	8
3.1.2. Vztah mezi HRTF, ILD a ITD	9
3.2. Měření HRIR	10
3.2.1. Princip měření	10
3.2.2. Prostředí měření	10
3.2.3. Zdroj zvuku	11
3.2.4. Měřicí mikrofon	12
3.2.5. Používané měřicí signály	13
4. Interpolace	14
4.1. Úvod do interpolace	14
4.1.1. Polynomiální interpolace	14
4.1.2. Hermitova polynomiální interpolace	15
4.1.3. Interpolování po částech	16
4.1.4. Aplikace lineární a Hermitovy kubické interpolace v HRTF	17
4.2. Specializované interpolace pro HRTF	18
4.2.1. Čtyřstěnná interpolace	18
4.2.2. Sférický Fourierův rozvoj	19
4.2.3. Principiální analýza komponentů	19
4.3. Způsoby posuzování interpolovaných HRTF	20
5. Srovnání interpolací a návrh měřicí sítě	22
5.1. Srovnání interpolací	22
5.2. Určení měřicí sítě	23
5.2.1. Výpočet rozložení na základě korelačních koeficientů bodů se stejnou elevací	23
5.2.2. Korelační mapy	24
5.2.3. Kritéria	25

5.2.4.	Výsledky zpracování korelačních map	25
5.2.5.	Výsledná měřicí síť	27
6.	Skript na zpracování výsledků	28
6.1.	Požadavky na skript	28
6.2.	Graphic User Interface	29
6.3.	Vstupní formát	29
6.4.	Výstupní formát	30
6.5.	Postup	30
6.5.1.	Shrnutí připravených skriptů	32
7.	Měření HRTF pomocí navržené sítě	33
7.0.2.	Vlastnosti použité sestavy	33
7.1.	Uspořádání měření	33
7.1.1.	Použité vybavení	34
7.1.2.	Zdroj zvuku	34
7.2.	Vliv prostředí na měřené výsledky	34
7.3.	Postup měření	35
7.4.	Zhodnocení potenciálních chyb měření	36
7.4.1.	Poloha hlavy vůči souřadnicovému systému	36
8.	Ověření platnosti měřicí sítě	38
8.1.	Rozvržení testování	38
8.2.	Objektivní měření MSE	38
8.2.1.	Mean Square Error Ratio	39
8.2.2.	Výsledky objektivního srovnání MSE	40
8.3.	Objektivní test LSD	42
8.3.1.	Popis testu	42
8.3.2.	Výsledky	42
8.4.	Subjektivní testování	45
8.4.1.	Subjektivní test	45
8.4.2.	Výsledky subjektivního testu	46
8.5.	Posouzení vlivu na ITD	47
8.6.	Diskuze výsledků	48
8.6.1.	Závislost na elevaci	48
8.6.2.	Vliv rozložení v zadní rovině	48
8.6.3.	Předozadní zmatení	48
8.6.4.	Závislost průběhu ITD na pozici bodů	48
8.6.5.	Optimalizace navržené mřížky	48
8.6.6.	Srovnání modifikace navržené mřížky	49
8.6.7.	Hustota bodů azimutu v závislosti na elevaci	52
9.	Závěr a zhodnocení	53
9.1.	Měřicí mřížka	53
9.1.1.	Objektivní srovnání	53
9.1.2.	Subjektivní srovnání	53

9.2. Modifikace	54
9.3. Interpolační skript	54
9.4. Závěr	54
Použitá literatura	55
Přílohy	
A. Parametry HRTF database ARI	61
B. Objektivní měření - Výsledky MSER	62
C. Informace o subjektech	64
C.1. Subjekt 1 - Bc. Martin Ládyš	64
C.1.1. Popis subjektu	64
C.1.2. Audiogram	64
C.1.3. Podmínky měření	64
C.2. Subjekt 2 - Bc. Tomáš Lindner	65
C.2.1. Popis subjektu	65
C.2.2. Audiogram	65
C.2.3. Podmínky měření	65
C.3. Subjekt 3 - Jan Zmatlík	66
C.3.1. Popis subjektu	66
C.3.2. Audiogram	66
C.3.3. Podmínky měření	66
C.4. Subjekt 4 - Mgr. Kateřina Mudroňová	67
C.4.1. Popis subjektu	67
C.4.2. Audiogram	67
C.4.3. Podmínky měření	67
D. Subjektivní test - výsledky	68
E. Měření audiogramu - Obrazová příloha	69
F. Měření HRTF - Obrazová příloha	70

Zkratky

ARI	Acoustic Research Institute in Vienna
DFT	Discrete Fourier Transformation
FFT	Fast Fourier Transformation
FT	Fourier Transformation
GUI	Graphic User Interface
HRIR	Head-Related Impulse Response
HRTF	Head-Related Transfer Function
ILD	Interaural Level Difference
ISD	Itakura-Saito Distance
ITD	Interaural Time Difference
LSD	Log-Spectral Distance
MAA	Minimum Audible Angle
MIT	Michigan Institute of Technology
MLSSA	Maximum Length Sequence Signal Analysis
MSE	Mean Square Error
MSER	Mean Square Error Ratio
PCA	Principal Component Analysis
PE	Probability of Existence
SFE	Spherical Fourier Expantion

Symboly

δ	Diracův impuls
θ	azimut
ξ	elevace
π	Ludolfovo číslo
τ	zpoždění
ψ	báze funkcí
ω	úhlová frekvence
a	poloměr kružnice aproximující hlavu
A_k	váhovací koeficient
c	rychlost zvuku ve vakuu
g_i	zesílení
h	impulsová odezva
l_i	fundamentální polynom
p	akustický tlak
P_N	znterpolační polynom řádu N
P_n^m	Legendrova funkce
t	zpoždění
R_{max}	maximální korelační koeficient

1. Úvod

Prostorové slyšení je mechanismem lidského sluchu, který je důležitý pro orientaci člověka. Podobně jako lidský zrak umožňuje přesnou lokalizaci směru příchodu potenciální hrozby. V dnešní době se prostorového slyšení využívá v různých aplikacích jako například v multimediální technice, v asistenčních technologiích pro nevidomé nebo jako navigace v letových systémech.

Jedna z používaných metod využívá frekvenční závislost příjmu signálu na směru příchodu signálu. Tato charakteristika se nazývá Head-Related Transfer Function (HRTF). Použití záznamů HRTF vytváří velmi realistický dojem směrovosti signálu a ke svému provozu nepotřebuje komplikovanou soustavu reproduktorů či specializovaných sluchátek, nýbrž standardní stereofonická sluchátka.

HRTF záznamy se však velmi liší dle subjektu a dle směru, ze kterého jsou měřeny. Každý subjekt tudíž potřebuje vlastní sadu měření s poměrně vysokým počtem měřených bodů. Pro měření s krokem 2,5 stupňů je například potřeba zhruba 1550 měřených poloh. Menší počet měřených bodů by tudíž měření značně urychlil.

Řešením by se mohla zdát interpolace (doplnění chybějících dat) bodů nacházejících se v okolí skupiny bodů měření. Samozřejmě existují jiné způsoby, jak získat HRTF záznam (fyzikální model či personalizace dříve naměřených dat). Tato práce se však zabývá problémem interpolace získaných dat a automatizace některých procesů s ní spojených.

Práce má za cíl urychlení měření HRTF pomocí interpolace se zaměřením na prostorové úhly, které jsou potřebné ke správné interpolaci. Samotná práce se skládá ze tří částí. První část je rešeršní a zabývá se základy prostorového slyšení, jeho vazbou na HRTF a základy interpolace. V druhé části je navržena mřížka specifikující prostorové úhly, ve kterých je potřeba měřit. Dále je pak vybrána interpolace se kterou je mřížka nadále testována a je popsán skript v prostředí MATLAB, který výsledky interpoluje. V poslední části je mřížka testována pomocí objektivních parametrů. Dále je s její pomocí měřeno HRTF u vybraných subjektů a na těchto subjektech byl následně proveden subjektivní test pomocí HRTF záznamů interpolovaných vytvořeným skriptem. Na základě výsledků testů byla mřížka modifikována a znovu testována.

2. Prostorové slyšení

Prostorové slyšení je jednou ze základních vlastností sluchu. Jedná se o úspěšný systém včasného varování a lokalizace v živočišné říši i když ho mnoho druhů, jako například někteří plazi a hmyz, postrádá. Existuje mnoho metod, jak lokalizovat zdroj hluku, například pomocí změny polohy boltců (například u koní).

Lidský sluch je schopen i přes fyziologická omezení úspěšně lokalizovat zdroj zvuku s vysokou přesností. Použité mechanismy jsou popsány níže. Vliv na prostorové vnímání zvuku má především vnější ucho (lat. auris externa). Vnější ucho se skládá z

- vnějšího zvukovodu (lat. meatus acusticus externus),
- ušního boltce (lat. auricula),
- bubínku (lat. membrana tympani).

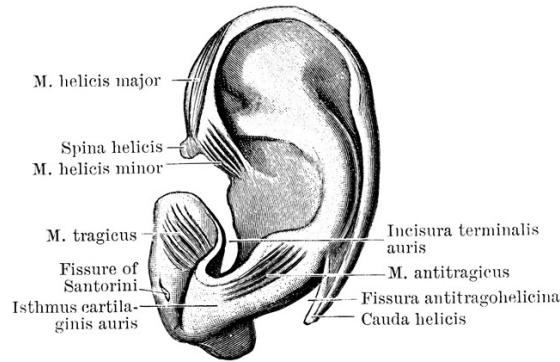
2.0.1. Vnější zvukovod a bubínek

Vnější zvukovod se skládá z mírně zahnutého kanálku pokrytého kůží a vytváří spojnicí mezi boltcem a ušním bubínkem. S boltcem je spojen centrálním otvorem (lat. cavum conchae) [14]. V průměru má 25 milimetrů délku a 7 až 8 milimetrů průměr. V centrální části se zužuje. Dle [14] je dána přenosová charakteristika zvukovodu zakončením (bubínkem) a tvarem zvukovodu. Podílí se na vjemu zvuku svou frekvenční charakteristikou. Práce, které se zabývají touto prostorových sluchem, mu však nepřikládají velký význam, na obě uši totiž působí stejným účinkem.

2.0.2. Boltce

Boltce se nachází na vstupu do zvukovodu a skládá se z chrupavčité sítě pokryté tkání. Na dolním konci je zakončen ušním lalůčkem (lat. lobulus auriculare), který již nemá podporu chrupavky. Demonstrační obrázek boltce je zobrazen na obrázku 1. Boltce odstává od povrchu hlavy pod úhelem 25 až 45 stupňů dle [14].

Význam boltce při lokalizaci zdroje zvuku byl dříve podceňován a podle dřívějších teorií působil pouze jako ochrana zvukovodu. Jeho vliv na lokalizaci byl však později prokázán [14].



Obr. 1. Popis boltce. Převzato z [12].

2.1. Principy prostorového slyšení

2.1.1. ILD

Princip ILD neboli Interaural Level Difference využívá rozdíl hlasitosti přichozího zvuku dle

$$ILD = L_{pP} - L_{pL}, \quad (1)$$

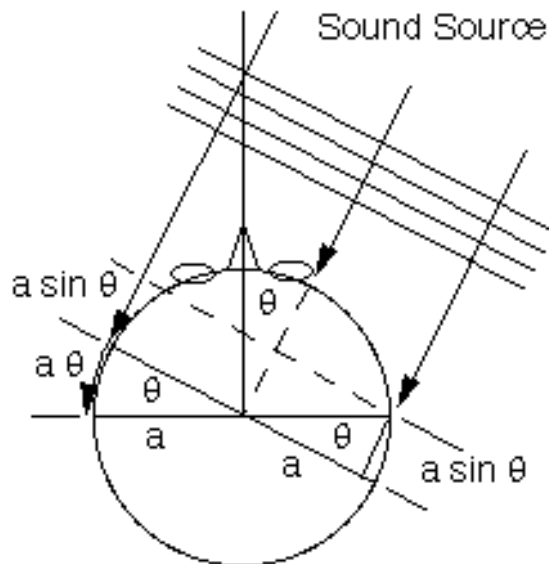
kde L_{pP} a L_{pL} jsou hladiny akustického tlaku ve zvukovodu pravého a levého ucha. Změna vjemu směru příchodu je pro rozsah -90 až 90 stupňů přibližně lineárně závislá na ILD.

ILD je také silně frekvenčně závislý. Využíván je především na vyšších frekvencích zhruba nad 1600 Hz [14] v závislosti na tvaru hlavy a velikosti akustického stínu. Při experimentech se stimuly o jedné frekvenci je pozorována dle [14] výrazná změna v přesnosti lokalizace. Vjem se také může měnit vlivem adaptace sluchu, kdy se snižuje citlivost ucha při dlouhodobém působení signálu o vysoké hladině akustického tlaku. Jelikož jedno ucho je vystaveno vyšší hladině, přizpůsobuje se a vjem směru příchodu se mění. Přejít do výchozího stavu, neboli readaptace může trvat i několik hodin. ILD tedy není časově nezávislý [14].

2.1.2. ITD

Princip ITD neboli Interaural Time Difference využívá odlišných dob příchodu signálu a uplatňuje se na nižších frekvencích do 1600 Hz [14]. Úroveň ITD v závislosti na směru příchodu odpovídá obr. 2 a vztahu 2

$$ITD = \frac{a}{c}(\theta + \sin \theta), \quad (2)$$



Obr. 2. Princip ITD. Převzato z [12].

kde θ je azimut, a poloměr kružnice aproximující hlavu a c rychlost zvuku ve vzduchu. Poloměr kružnice bývá určen na 21 cm (Hornbostel-Wertheimerova konstanta) a odpovídá časovému zpoždění přibližně $630 \mu\text{s}$ [17]. Toto je pak maximální možná hodnota, které může ITD dosáhnout s ohledem na tvar hlavy.

2.1.3. Psychoakustický vztah mezi ITD a ILD

Psychoakustický vztah ITD a ILD je podrobně popsán v [18]. Řada experimentů v šedesátých letech dvacátého století dokázala, že mechanismy ILD a ITD se doplňují, nahrazují a jsou přenositelné z jednoho mechanismu do druhého. Proto existovala teorie, že se ve skutečnosti jedná pouze o jeden mechanismus, který funguje na principu ITD, a dojem druhého principu je způsoben nižší latencí přenosu neuronů, jež klesá s rostoucí intenzitou zvuku. Následné subjektivní experimenty však dokázaly chybnost tohoto přesvědčení. Obecně se předpokládá, že existuje jistá míra konverze mezi oběma mechanismy a že mechanismus ILD je citlivý pouze pro střední a vysoké frekvence.

2.1.4. Kužel neurčitosti

Z geometrické podstaty je zřejmé, že existují místa, kde může docházet k chybné lokalizaci zdroje, jelikož hodnoty ITD či ILD jsou identické. Jedná se o rozdělení hornodolní a předozadní roviny. V oblasti zvané „kužel neurčitosti“ (ang. cone of confusion) nabývají ITD i ILD stejných hodnot pro více míst příchodu a proto nelze s jistotou určit směr příchodu. [17]

2.1.5. Vliv boltce na směrové slyšení

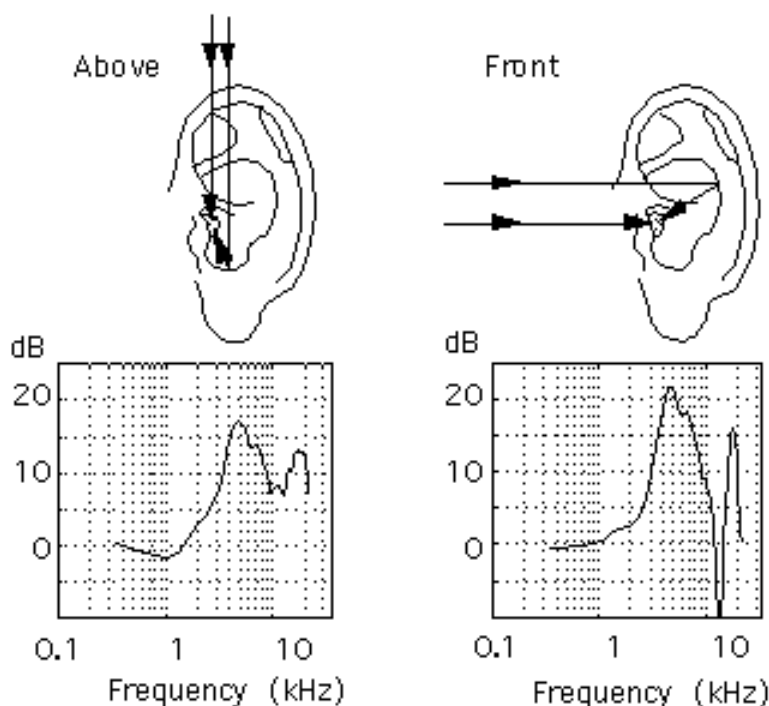
V teorii prostorového slyšení si lze představit boltce jako lineární filtr, jehož přenosová charakteristika je závislá na směru příchodu zvuku a vzdálenosti od zdroje [14]. Jeho hlavní prací je ochrana zvukovodu a převod prostorových vlastností zvuku na vlastnosti časové [14]. To zařizuje pomocí mnoha různých fyzikálních jevů, především pak pomocí odrazu, stínění, disperze, difrakce, interference a rezonance.[14].

Klasickým příkladem je odraz na záhybu. Při šíření rovinná vlna dopadá na různé části ucha. Vlivem různých jevů, jako je například difrakce, přichází do zvukovodu s různým zpožděním. U zjednodušeného modelu s jedním odrazem a jednou přímou vlnou při zanedbání ostatních vlastností lze přenos popsat impulsovou odezvou dle [14]

$$h(t) = \delta(t - \tau_1) + \delta(t - \tau_2) \quad (3a)$$

$$H(\omega) = 1 + a_1 e^{-j\omega\tau_1} + a_2 e^{-j\omega\tau_2} \quad (3b)$$

Kde $\delta(t)$ je Diracův puls a τ_1 a τ_2 zpoždění příchodu přímé a odražené vlny.



Obr. 3. Princip odrazu a skládání vln na boltci. Převzato z [4].

Výzkum zveřejněný v článku [3] uvádí, že význam této filtrace je daleko důležitější v případě rozpoznávání ve vertikální rovině, zatímco v horizontální rovině má význam menší, jak je možné vidět na obrázku 3. Zároveň však uvádí, že filtrace má dopad na obě roviny a úprava signálu (během testu byla prováděna pásmová filtrace přes hřebenové filtry) má vliv na přesné určení polohy zdroje.

2.1.6. Směrové slyšení mimo volné pole

Všechny výše popisované principy byly vztaženy ke slyšení ve volném poli tj. že akustické vlny se šíří přímo od zdroje. V reálném prostředí se však zvukové vlny odrazí od mnoha překážek a do ucha dochází se zpožděním. Tento problém řeší tzv. zákon první vlny.

Zákon první vlny dle [14] byl prvně studován Wallachem v roce 1949. Studoval způsob, jakým se člověk vypořádá s příchodem ozvěn [17]. Lidský mozek přijímá více odrazů signálu kvalitativně podobného. Pro určení směru příchodu využívá však jen prvního signálu u kterého se předpokládá, že urazil nejkratší vzdálenost tj. že putoval přímo od zdroje bez dalších odrazů. Efekt však nepotlačuje slyšitelnost odrazů či ozvěn [17]. Efekt působí na odrazy výrazně delších časů v řádu milisekund. Nepůsobí tedy na odrazy na boltci, které se podílí na filtraci signálu.

2.2. Přesnost lokalizace

Ke schopnosti určení směru příchodu se váže samozřejmě i odchylka, s jakou lze zdroj lokalizovat. Při zjišťování rozlišovací schopnosti člověka bylo použito mnoho metod a výsledky se pohybují od 0.5 do zhruba 15 stupňů dle [14]. Výsledky se liší především dle použitého stimulu a popisují závislost prostorového slyšení na úhlu příchodu (azimutu a elevaci). Citlivost prostorového slyšení je možno zkoumat tzv. Minimálním slyšitelným úhlem, což je minimální změna úhlu polohy zdroje (ang. Minimum Audible Angle neboli MAA), kterou je člověk schopen postřehnout. Dle [14] je také v angličtině nazývána jako Localization Blur. V tabulkách 2.2 a 2 jsou uvedeny příklady hodnot MAA. Jako referenční údaje pro azimut jsou vzaty údaje měřené Hausteinem a Schirmerem v roce 1970 testovaných na devítistech necvičených dobrovolnících. Pro elevaci se čerpá z hodnot získaných z roku 1969 Damaskem a Wagenerem, jak je uveřejňuje [14].

Azimut [stupně]	0	90	180	270
Rozptyl [stupně]	3,6	10	5,5	9,2

Tab. 1. Lokalizační rozlišení pro azimut v horizontální rovině

Elevace [stupně]	0	30	90
Rozptyl [stupně]	9	12	17

Tab. 2. Lokalizační rozlišení pro elevaci v mediánní rovině

3. Head Related Impulse Response

3.1. Popis HRIR a HRTF

Při velkém zjednodušení je možno dráhu od zdroje zvuku k vnějšímu uchu považovat za lineární časově-invariantní soustavu (Linear Time-Invariant System neboli LTI). Základní nástroj popisu LTI se nazývá impulsní odezva. Impulsní odezvou nazýváme výstupní signál, který získáme, pokud je na vstup soustavy přiveden jednotkový (u spojitých signálů Diracův) impuls [23]. Možno vidět na

$$y(t) = x(t) * h(t), \quad (4a)$$

$$h(t) = \delta(t) * h(t). \quad (4b)$$

Impulsní odezva popisující soustavu tvořenou dráhou k uchu od zdroje a vlastnostmi vnějšího ucha (dále například hlavovým stínem) je nazývána Head-Related Impulse Response neboli HRIR. Popis soustavy ovšem platí vždy pouze pro jeden bod měření, který je závislý na směru příchodu vstupního signálu. Frekvenční obraz HRIR je nazýván Head-Related Transfer Function neboli HRTF [6]. Jedná se o komplexní veličinu, jejíž prvky jsou popsány amplitudou a fází. Příklady HRIR a HRTF je možné vidět na obrázku 4.

Počítána je pomocí Fourierovy transformace (FT)

$$HRTF(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} hrir(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (5)$$

V diskretních systémech se pak používá Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

$$HRTF[k] = \sum_{n=0}^{N-1} hrir[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}. \quad (6)$$

Další možností je srovnání frekvenčního spektra signálu v poloze u zdroje a u vstupu do zvukovodu [6]

$$HRTF = \frac{FT(p)}{FT(p_0)}, \quad (7)$$

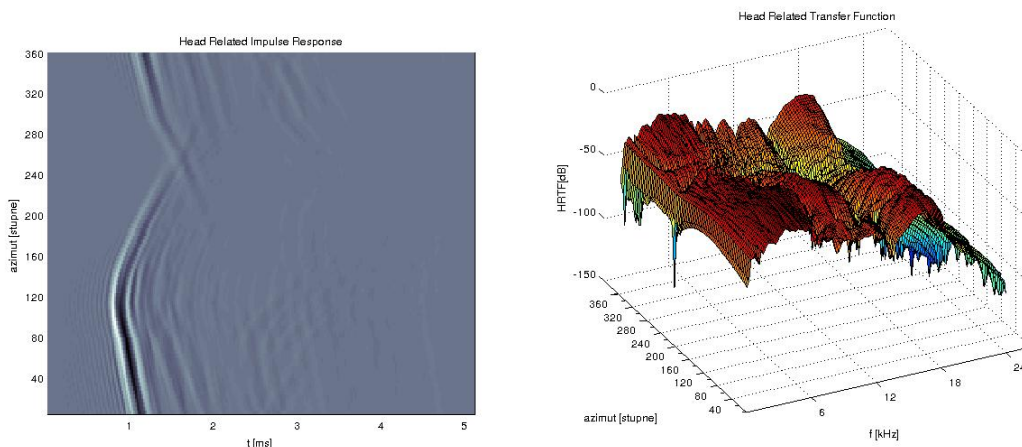
kde p je akustický tlak ve zvukovodu a p_0 akustický tlak v poloze zdroje.

3. Head Related Impulse Response

Dle [7] lze odvodit, HRTF je závislá na parametrech

$$HRTF = HRTF(\omega, \theta, \xi, r, s), \quad (8)$$

kde ω je úhlová frekvence, θ a ξ zastupují azimut a elevaci v polární soustavě s hlavou subjektu v jejím středu. Pak r je vzdálenost zdroje od cíle a s jsou parametry určující geometrii hlavy a uší subjektu [6].



Obr. 4. Příklad HRIR (vlevo) a modulu HRTF (vpravo) pro 0 stupňů elevace a 0-360 stupňů azimutu. Data pro tvorbu grafiky převzata z [26]

3.1.1. Způsob zpracování HRIR a HRTF

V případě HRIR se jedná o záznam HRTF v časové doméně. Tato doména na první pohled nese informaci o celkovém zpoždění signálu a o útlumu signálu jako celku. Abychom byli schopni sledovat chování soustavy pro jednotlivé frekvence či pásma, je třeba získat HRTF. V případě diskrétního signálu pak Diskrétní Fourierovy Transformace (DFT) dle vzorce 6. Pokroky ve vývoji algoritmů umožnily rychlé využití DFT pomocí algoritmu Fast Fourier Transformation (FFT) [16]. Získané záznamy HRIR a HRTF mohou být zpětně využity ve stereosluchátkách pro využití pseudoakustického prostoru pomocí konvoluce [32]. Upravovaný signál může být konvolován oběma typy záznamu pomocí přímé konvoluce - počítána pomocí HRIR

$$y(t) = x(t) * hrir(t), \quad (9)$$

a Kruhové konvoluce. Ta je počítána ze záznamu HRTF dle

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)HRTF(\omega)e^{j\omega t}d\omega. \quad (10)$$

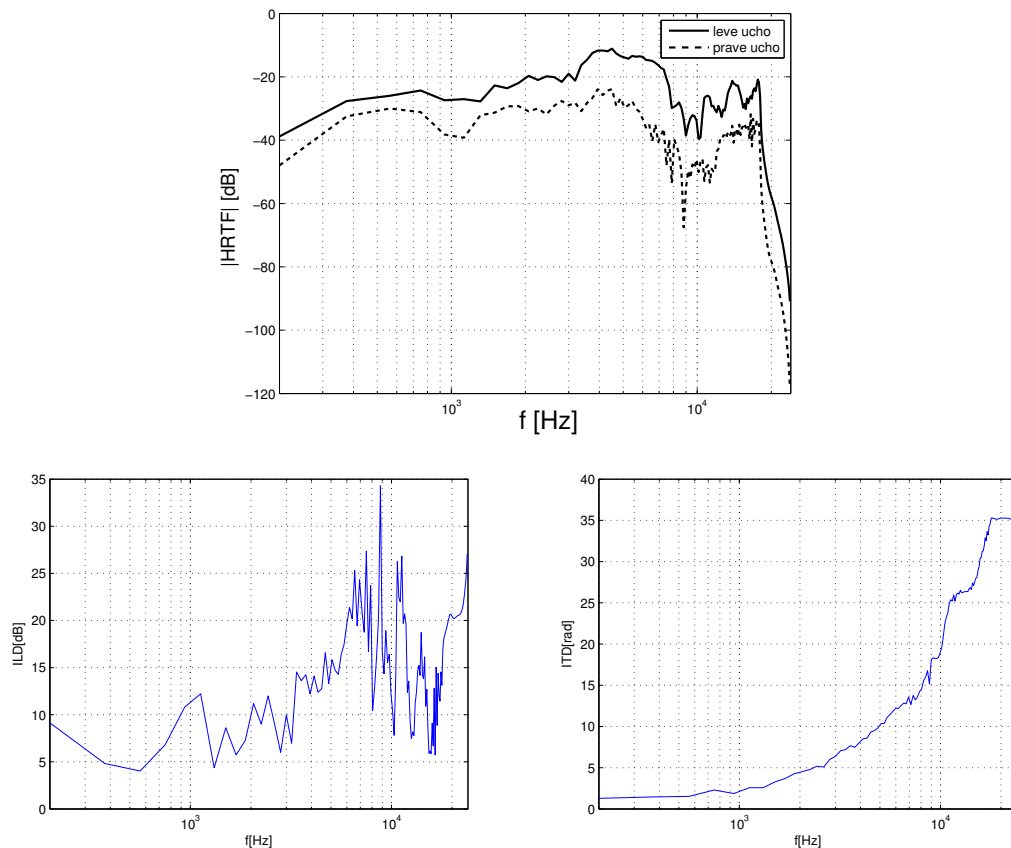
Srovnání efektivnosti kruhové a přímé konvoluce vzhledem k HRTF je popsáno v [32].

3.1.2. Vztah mezi HRTF, ILD a ITD

Záznam HRTF v sobě nese informaci o fázi i o intenzitě signálu. Tyto informace se získávají jak z pravého tak z levého ucha. Článek [6] popisuje vazbu mezi nástroji slyšení (tj. ILD a ITD) a záznamy HRTF. Parametr řešící vztahy mezi pravým a levým uchem se nazývá DHRTF neboli Differential Head-Related Transfer Function

$$DHRTF = \frac{\|HRTF_L(\omega)\|}{\|HRTF_P(\omega)\|} e^{(\psi_L(\omega) - \psi_P(\omega))} = ILD(\omega) e^{ITD(\omega)}, \quad (11)$$

kde $\|HRTF\|$ je modul HRTF pro levé a pravé ucho a ψ je jejich fáze. Příklad zpracování ILD a ITD pro naměřené HRTF je zobrazeno v obrázku 5

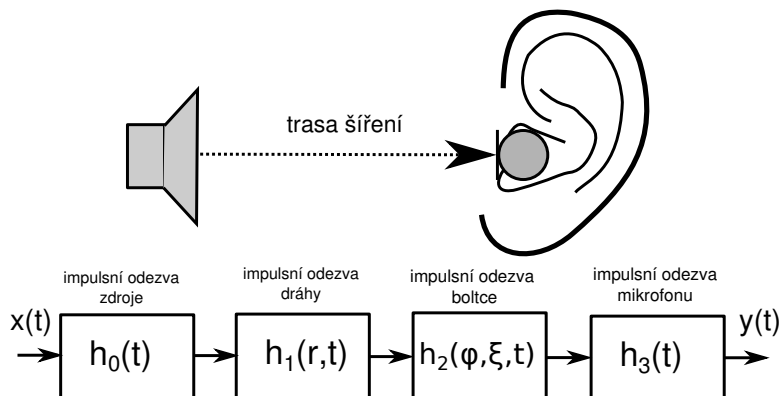


Obr. 5. Příklad HRTF pro obě uši (nahore) a z něho vypočtené ILD (vlevo dole) a ITD (vpravo dole) pro elevaci 15° a azimut 42,5°

3.2. Měření HRIR

3.2.1. Princip měření

Měření HRTF spočívá v určení v impulzní odezvy soustavy složené z několika částí.



Obr. 6. Přenos od zdroje k boltci.

- **Přímé měření** - Zdroj signálu je umístěn vně sluchového ústrojí a příjem je prováděn ve vstupu do zvukovodu. Zobrazeno na obrázku 6.
- **Reciproké měření** - Zdroj je umístěn ve zvukovodu a je přijímán vně.

3.2.2. Prostředí měření

Měření HRTF je prováděno v řízených podmínkách akusticky definované místnosti. Měřený subjekt je posazen na židli a je požádán, aby se během experimentu nehýbal. Je třeba zajistit, aby pracoviště mělo co nejnižší dobu dozvuku.

Ideální se proto jeví takzvané bezdozvukové komory, které jsou pokryty kužely či jehlany z vysoce akusticky pohltivé hmoty. V případě, že takováto místnost není k dispozici, uzpůsobíme užívanou místnost tak, aby odrazy od stěn co nejméně ovlivňovaly měření. Například je potřeba zvolit dostatečně velkou místnost, odstranit z oblasti měření všechny velké předměty s vysokou odrazivostí a velkou plochou jako například stoly a zakrýt velké plochy (podlaha, stěny) Minimální vzdálenost od subjektu byla vzata z výsledků z databáze [26], kde v průměru HRIR odezní do 128 vzorků při vzorkovací kmitočtu 48 kHz. Největší možná velikost ITD činí $600 \mu s$ z toho lze vyvodit

$$t_0 = \frac{n}{f_s} = \frac{128}{48000} = 0,0027s \quad (12a)$$

$$l = (t_0 + t_{itd})c_0 = (2,7 + 0,6)10^{-3}346,3 = 1,14m \quad (12b)$$

kde f_s je vzorkovací frekvence, n počet vzorků HRIR záznamu, t_{itd} vzdálenost mezi

oběma ušima a c_0 je rychlost zvuku v suchém vzduchu o teplotě 25 °C. Minimální vzdálenost jednotlivých předmětů je určena na 1.14 m.



Obr. 7. Sestava měření HRTF pro ČVUT. Převzato z [29].

3.2.3. Zdroj zvuku

Jako zdroj zvuku se využívá širokopásmový reproduktor. Je třeba zajistit, aby byl zdroj zvuku polohovatelný (např. pracoviště ČVUT katedry radioelektroniky) nebo aby se v prostoru nacházelo více rozmístěných zdrojů okolo subjektu v případě přímé metody (Takeda labs Univerzity v Nagoye, projekt KEMAR na MIT, ARI ad.).

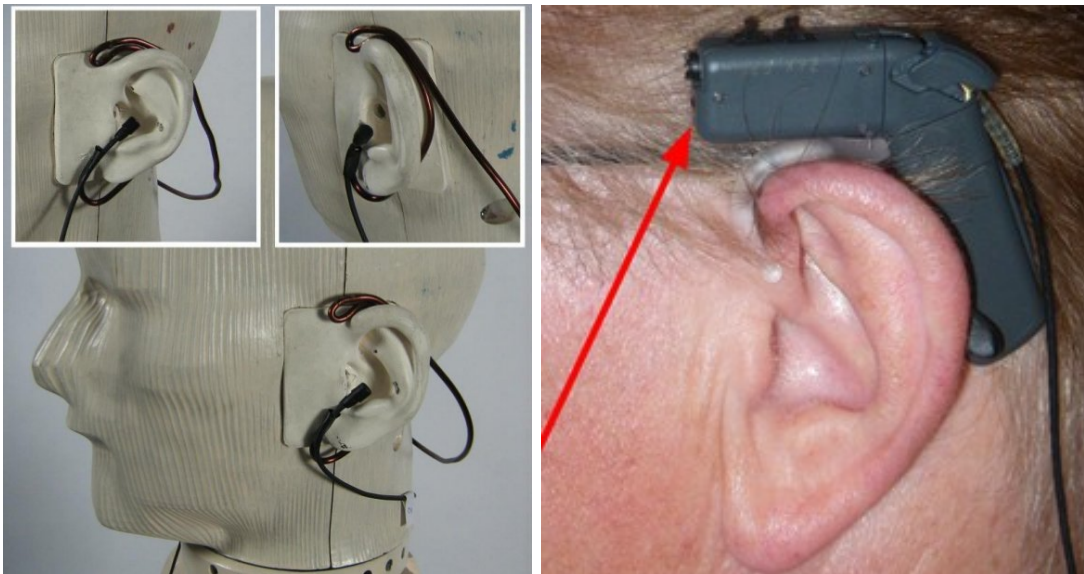
Zdroj zvuku musí mít následující parametry:

- Zdroj musí mít pouze jednu akustickou osu, aby bylo možno jednoznačně určit směr příchodu. Proto je potřeba, aby byl tvořen pouze jedním širokopásmovým reproduktorem.
- Zdroj musí mít co možná nejvíce plochý modul frekvenční charakteristiky v rozsahu 100 až 16 000 Hz, neboť toto pásmo je dle [14] významné.

3.2.4. Měřicí mikrofon

Při přímé měřicí metodě se pracuje s dvěma identickými měřicími mikrofony. Pro vysokou citlivost je nejlepší použít mikrofony kapacitní všesměrové, aby směrová charakteristika mikrofonu nezkreslovala výsledky dle [13]. Na uchycení mikrofonů pak závisí další ovlivnění výsledků. Nejvíce jsou používány mikrofony pro vnitřní použití ve zvukovodu a také mikrofony pro měření za uchem.

Rozdíl mezi těmito dvěma přístupy spočívá v tom, že vnitřní mikrofon ucpává zvukovod, zatímco mikrofon za uchem jej neucpává, ale nachází se dále od oblasti. Různé umístění mikrofonů je možné vidět na obrázku 8.



Obr. 8. Příklady polohy mikrofonu. Převzato z [29] a [26].

Touto problematikou se zabývá článek [31], z kterého je zřejmé, že odlišné umístění mikrofonu může vést k odlišným výsledkům a následné špatné orientační schopnosti subjektu. Umístění mikrofonu ovlivňuje především vyšší frekvence nad 1400 Hz. Umístění mikrofonu dovnitř zvukovodu se jeví jako nejlepší možnost. Vliv přítomnosti měřicího mikrofonu na výsledek je prakticky zanedbatelný a projevuje se jen relativně malým zkreslením.

3.2.5. Používané měřicí signály

K měření je možno využít hned několika měřicích signálů. Jedná se o metody používané k měření impulzové odezvy v akustice.

- **Maximum Length Sequence Signal Analysis** - neboli MLSSA. Jedná se o pseudonáhodný signál tvořený řadou $x_i \in \{-1, 1\}_{i=1}^N$. Zpracování výsledků je založeno na korelaci a je odolné vůči nekorelovanému šumu. Není příliš odolné vůči nelinearitě měření.
- **Signál s přeladovanou frekvencí** - v anglicky psané literatuře označován jako sweep či chirp. Jedná se o signál, který je tvořen periodickým signálem, jehož frekvence se během času mění. Existuje několik druhů dle rychlosti přeladování. Typickým příkladem je lineární či logaritmický sweep, kdy se frekvence mění rovnoměrně nebo dle logaritmu času. Podobně jako se rozlišuje několik druhů šumu (bílý šum, růžový šum), tak se rozdělují i druhy dle změny amplitudy signálu v čase.

Dle [31] Jsou obě tyto metody stejně účinné a neposkytují odlišné výsledky při správném použití.

4. Interpolace

4.1. Úvod do interpolace

Interpolací rozumíme skupinu aproximací. Aproximace je náhrada či přiblížení původní funkce. Interpolační aproximace je takový druh aproximací, kdy pro třídu funkcí jedné proměnné (dále možno rozšířit na problém více proměnných) platí následující vztahy pro body $\{x_i\}_{i=0}^n$ dle [9]

$$\psi(x_i, a_0, \dots, a_n) = f(x_i), \quad (13)$$

kde $\psi(x, a_0, \dots, a_n)$ je třída funkcí jedné proměnné x a a_0 až a_n jsou parametry této třídy. Funkci $f(x)$ máme za úkol aproximovat. Vztah 13 uvádí, že funkční hodnoty obou funkcí pro uzavřený výčet izolovaných bodů jsou si rovny. Jak interpolovaná tak interpolující funkce prochází stejnou sadou předdefinovaných bodů. Základním přístupem je lineární interpolační aproximace, která je popsána podle [9]

$$\psi(x, a_0, \dots, a_n) = \sum_{i=0}^n a_i \psi_i(x). \quad (14)$$

4.1.1. Polynomiální interpolace

Do skupiny lineárních aproximací patří polynomiální interpolace, které jsou popsány následujícím vztahem

$$P_N(x) = \sum_{n=0}^N a_n x^n, \quad (15)$$

kde N je řád aproximace pro alespoň $N + 1$ bodů. Obecný výpočet polynomiální interpolace dle [9] odpovídá

$$P_N(x) = \sum_{i=0}^N l_i(x) f(x_i), \quad (16a)$$

kde $f(x_i)$ je funkční hodnota bodu, podle kterého je prováděna interpolace a l_i je fundamentální polynom, který je tvořen polynomy ω_{N+1} a ω'_{N+1} ve vztahu

$$l_i(x) = \frac{\omega_{N+1}(x)}{(x - x_i)\omega'_{N+1}(x)}. \quad (16b)$$

ω_{N+1} a ω'_{N+1} odpovídají pronásobení všech možných kombinací posunů

$$\omega_{N+1}(x) = \prod_{j=0}^N (x - x_j) \quad (16c)$$

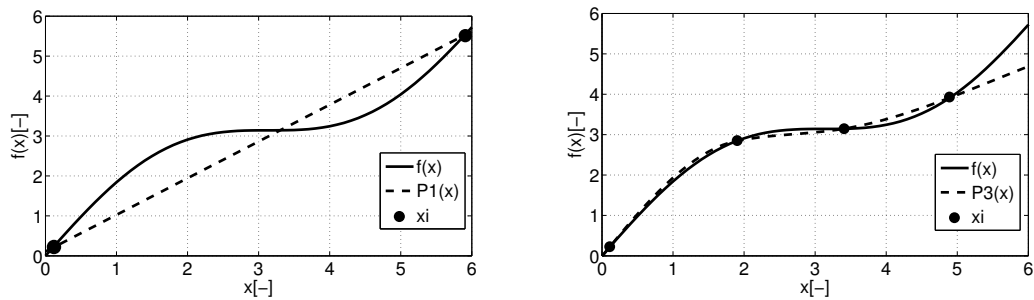
a vzájemných rozdílů mezi jednotlivými body interpolace dle

$$\omega'_{N+1}(x_i) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^N (x_i - x_k), \quad (16d)$$

Pro příklad je uvedena lineární funkce, která má řád $N = 1$ aplikací vzorců (16) získáme

$$P_1(x) = \frac{f(x_1) - f(x_2)}{x_1 - x_2} + f(x_2) \quad (17)$$

Příklady dvou interpolací pro funkci $f(x) = x + \sin(x)$ jsou uvedeny v grafu 9



Obr. 9. Příklad lineární interpolace P1 (vpravo) a kubické interpolace P3 (vlevo).

4.1.2. Hermitova polynomiální interpolace

Interpolační metody popsané v sekci 4.1 zohledňují pouze, že jak interpolovaná tak interpolující funkce se musí protínat v dané množině izolovaných bodů (viz. vzorec 13). Hermitova interpolace zohledňuje i to, aby ve stejných bodech měly shodné derivace dle [9]

$$P_N^{(k)}(x) = f(x_i)^{(k)}; i = 0, \dots, n; k = 0, \dots, N - 1. \quad (18)$$

Obecný předpis pro výpočet Hermitovy interpolace zní

$$P_{2m+1}(x) = \sum_{i=0}^m h_i(x) f(x_i) + \sum_{i=0}^m \bar{h}_i(x) f'(x_i) \quad (19a)$$

4. Interpolace

pro $m > 0$, kde $f(x_i)$ je funkční hodnota bodu ze kterého se interpoluje, $f'(x_i)$ je její derivace dle x a polynomy $h_i(x)$ a $\bar{h}_i(x)$, pro něž platí

$$h_i(x) = (1 - 2(x - x_i)l'_i(x_i))l_i^2(x) \quad (19b)$$

$$\bar{h}_i(x) = (x - x_i)l_i^2(x), \quad (19c)$$

jsou zkonstruovány na základě fundamentálního polynomu $l_i(x)$

$$l_i(x) = \frac{\omega_{m+1}(x)}{\omega'_{m+1}(x)}, \quad (19d)$$

kde $\omega_{m+1}(x)$ a $\omega'_{m+1}(x)$ odpovídají vzorcům 16). Jako příklad je uveden nejnižší Hermitův polynom P_3 pro $m = 1$

$$P_1(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0). \quad (20)$$

Nejpoužívanějším Hermitovým polynomem je polynom P_3 (Hermitova kubická interpolace)

4.1.3. Interpolování po částech

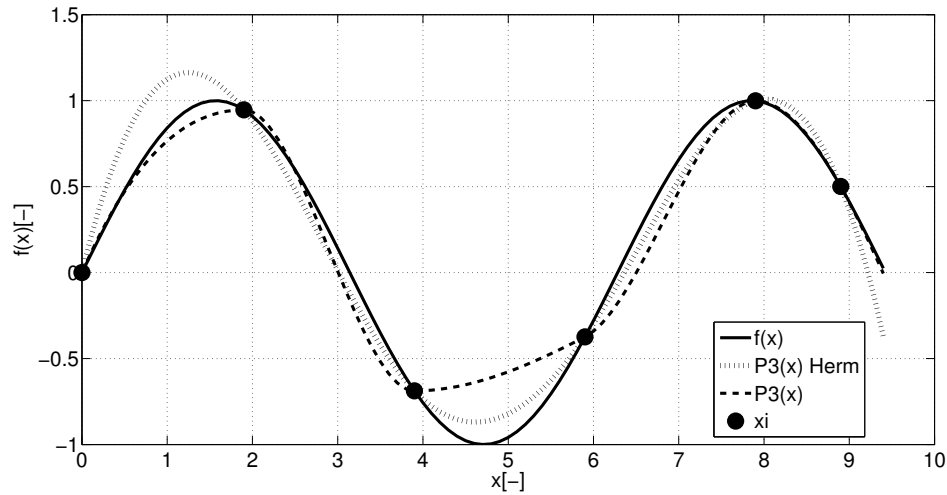
Nevýhodou interpolace je počet bodů, které je možné použít. U větších počtů vzorků je buď potřeba použít interpolace velmi vysokých řádů, což ovšem povede k výsledkům neodpovídajícím originálům, nebo rozdělit výčet použitých bodů na podmnožiny, které jsou interpolovány polynomy nižších řádů.

V případě klasické interpolace jsou důležité pouze výčty bodů. Výsledná křivka ovšem zpravidla nespĺňuje požadavky na hladkost funkce.

V případě Hermitových interpolací je potřeba vypočítat derivaci pro daný bod dle

$$\frac{\Delta f(x_i)}{\Delta x} = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i}. \quad (21)$$

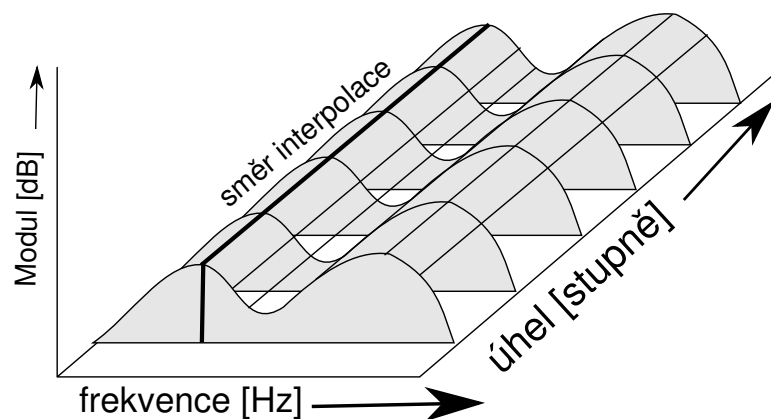
Polynomiální interpolace po částech s řádem $N > 1$ jsou nazývány splajnové (z anglického spline). Na grafu 10 je uveden příklad interpolace po částech splajnu a Hermitovy kubické interpolace.



Obr. 10. Ukázka interpolace po částech polynomy P3 (kubického splajnu a Hermitova polynomu).

4.1.4. Aplikace lineární a Hermitovy kubické interpolace v HRTF

Jako základní se považuje interpolace lineární a kubická, které jsou popsány v sekci 4.1. Tyto metody jsou nejjednodušší na aplikaci. Samotná interpolace probíhá ve frekvenční doméně, t.j. v HRTF. Samotná interpolace je řešena interpolací všech HRTF přes jednu frekvenci, jak je popsáno v [19] a zobrazeno na obrázku 11. Je však nutné v tomto případě extrahovat informaci o zpoždění signálu z HRIR před převedením na HRTF a informaci o zpoždění samostatně interpolovat. Tento problém je více rozveden v sekci 6.1.



Obr. 11. Směr lineární a Hermitovy kubické interpolace

4.2. Specializované interpolace pro HRTF

V sekci 4.1 byly popsány obecné interpolační metody, které se užívají v různých aplikacích, nejen HRTF. O metodách interpolace specializujících se na HRTF. Tyto interpolace se především zabývají interpolací funkce, jež používá sférický souřadnicový systém.

4.2.1. Čtyřstěnná interpolace

Tetrahedronová neboli čtyřstěnná interpolace umožňuje interpolovat jakýkoli bod $X(\varphi, \xi, r)$, který je sférickou souřadnicí polohy $HRTF_x$. Odhad bodu probíhá pomocí čtyř měřených bodů vytvářejících čtyřstěn s vrcholy A, B, C a D ve kterém je hledaný bod uzavřen. Poloha bodu X se následně hledá jako

$$X = g_1A + g_2B + g_3C + g_4D. \quad (22)$$

Obdobný vztah platí pro výpočet $HRTF_x$

$$HRTF_X = g_1HRTF_A + g_2HRTF_B + g_3HRTF_C + g_4HRTF_D, \quad (23)$$

kde koeficienty g_1 až g_4 popisují poměrnou vzdálenost bodu X od jednotlivých měřených bodů A až D a platí pro ně

$$\sum_{i=1}^4 g_i = 1. \quad (24)$$

Pro výpočet je nutné zvolit referenci. V tomto rozvedení je zvolen jako referenční bod D vůči němuž budou počítány rozdíly vzdálenosti dle [7]

$$[g_1 \ g_2 \ g_3] = [X - D] \begin{bmatrix} X - A \\ X - B \\ X - C \end{bmatrix}^{-1}. \quad (25)$$

Pro výpočet posledního koeficientu g_4 využijeme lineární závislost koeficientů popsanou ve vzorci 24 dle

$$g_4 = 1 - g_1 - g_2 - g_3. \quad (26)$$

Důležitým problémem je také výběr správného meshe (rozdělení na jednotlivé čtyřstěny). Touto problematikou se zabývá článek [7]. Vzorce uvedené výše lze po úpravách aplikovat i na interpolaci s konstantní vzdáleností. Použitým obrazcem je pak trojúhelník. Je pouze potřeba přizpůsobit počet bodů počtu proměnných bodu. V extrémním případě tato metoda vede až na klasickou lineární interpolaci.

4.2.2. Sférický Fourierův rozvoj

Sférický Fourierův rozvoj (Spherical Fourier's Expansion neboli SFE) je metoda založená na superpozici dílčích signálů v obecném tvaru

$$s(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k \phi_k(x, a_0, \dots, a_n), \quad (27)$$

kde ϕ_k je obecná bazová funkce, a_0 až a_n jsou parametry funkce a A_k je koeficient příslušící k dané funkci. Příkladem bazové funkce je například komplexní funkce používaná pro komplexní Fourierův rozvoj

$$\phi_k(x) = e^{\frac{2\pi}{N}kft}. \quad (28)$$

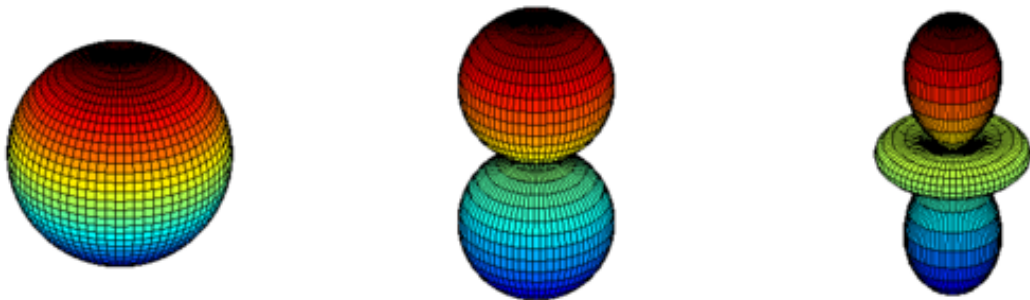
Báze SFE je odlišná od vztahu (28) a odpovídá dle [10]

$$\phi_n^m(\theta, \xi) = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos(\theta)) e^{jm\xi}. \quad (29)$$

Plná forma superpozice pro frekvenční doménu má tvar

$$H(\theta, \xi, f) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n A_{mn}(f) \phi_n^m(\theta, \xi), \quad (30)$$

kde θ je azimut v polárních souřadnicích, ξ je elevace, m a n jsou řády bazové funkce a P_n^m jsou standardní Legendrovy funkce. Příklady jednotlivých funkcí v bázi jsou zobrazeny v obrázku 12.



Obr. 12. Příklady reálných sférických harmonických. Převzato z [5].

4.2.3. Principiální analýza komponentů

Principiální analýza komponentů (Principal Component Analysis neboli PCA) slouží v moderních technikách zpracování signálu ke zmenšení řádu HRTF nebo

4. Interpolace

jiného frekvenčního záznamu [27]. Rozkládá hodnoty modulu spektra na váhované koeficienty příslušející k dané bázi.

$$HRTF(n) = \sum_{i=1}^K w_i \phi_i, \quad (31)$$

kde w_i je příslušný koeficient báze a ϕ_i je funkce příslušící bázi. Báze je generována na základě vstupní trénovací sady, která obsahuje velký počet HRTF záznamů a je tvořena sadou vzájemně neortogonálních funkcí. Interpolovány jsou následně pouze váhované koeficienty.

4.3. Způsoby posuzování interpolovaných HRTF

Slouží k objektivnímu posuzování naměřených dat. Patří mezi ně střední kvadratická odchylka (Mean Square Error neboli MSE), logaritmická spektrální vzdálenost (Log-spectral Distance neboli LSD) a Itakura-Saitova vzdálenost.

Střední kvadratická odchylka zkoumá průměrnou kvadratickou absolutní odchylku dvou signálů dle

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \|s_1[n] - s_2[n]\|^2. \quad (32)$$

Logaritmická spektrální vzdálenost - slouží k posouzení rozdílu výkonu spekter

$$D_{LS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [10 \log_{10} \frac{P_1(\omega)}{P_2(\omega)}] d\omega}, \quad (33)$$

kde P_1 a P_2 jsou výkonová spektra dvou signálů. V případě diskrétního spektra je tvar následující

$$D_{LS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [10 \log_{10} \frac{P_1[n]}{P_2[n]}]}. \quad (34)$$

S obdobou LSD přišel Fumitada Itakura a Shuzo Saito v sedmdesátých letech. Jejich variace je nazývána **Itakura-Saitova vzdálenost** (Itakura-Saitou distance neboli ISD) a je užívána v aproximačních úlohách, kdy je porovnáván původní záznam se záznamem vytvořeným aproximací. ISD se využívá především jako kritérium při aplikacích na zpracování řeči a je dokázáno, že ISD je silně spjata se subjektivním hodnocením kvality zvuku. Například publikace [13] uvádí nedávnou sadu subjektivních testů, kdy se porovnával původní a aproximovaný zvukový stimul. Při DIS menší než 0,5 bylo průměrné subjektivní hodnocení (při škále 1

až 5) lepší než 1,6. Při DIS menší než 0,1 pak nebyl rozdíl poznán vůbec. Itakura-Saitova vzdálenost je dána následujícím vztahem

$$D_{IS} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{P_1(\omega)}{P_2(\omega)} - \ln \frac{P_1(\omega)}{P_2(\omega)} - 1 \right] d\omega, \quad (35)$$

kde P_1 a P_2 v tomto případě odpovídají výkonovým spektrům signálů. Diskrétní varianta vzorce odpovídá

$$D_{IS} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{P_1[n]}{P_2[n]} - \ln \frac{P_1[n]}{P_2[n]} - 1 \right]. \quad (36)$$

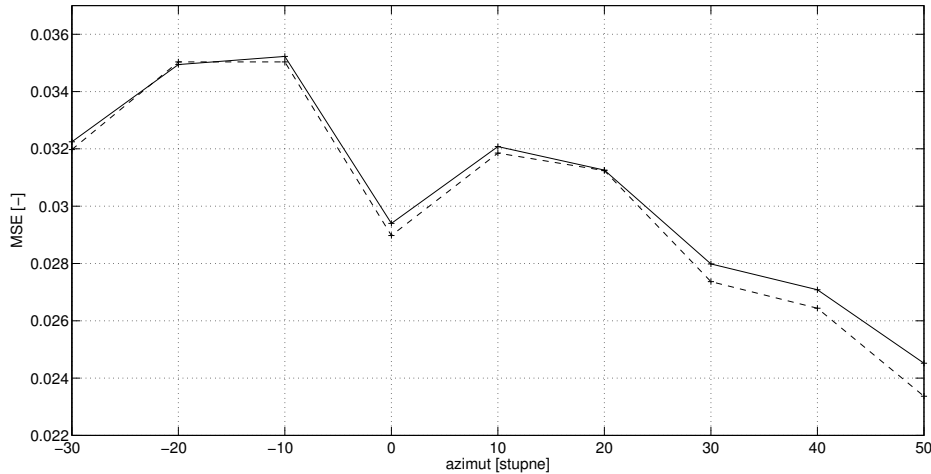
Nejedná se o symetrický vzorec a proto se nejedná o regulérní metriku. Pro zpracování řeči však vyhovuje a je používán i v této aplikaci [13].

5. Srovnání interpolací a návrh měřicí sítě

5.1. Srovnání interpolací

Pro testování byly vybrány dva druhy interpolací, lineární interpolace a Hermitova kubická interpolace. Byly posouzeny i další interpolace jako různé případy splajnových funkcí, které se však neblížily požadovaným výsledkům.

PCA interpolace vyžaduje vytvoření báze funkcí, která je vypočtena na základě známé databáze HRTF záznamů. Spherical Fourier Transformation dosahuje velmi dobrých výsledků dle [10], kde je uvedeno výrazné snížení MSE podobně jako v případě PCA. Problém je v jejich implementační náročnosti, kdy je třeba stanovit bázi funkcí v případě PCA a výpočet sofistikované báze v případě SFE. Práce se především soustředí na výběr správného rozložení měřicích bodů a proto byly pro další postup nakonec k další práci vybrány lineární interpolace a Hermitova kubická interpolace. Obě tyto interpolace jsou již v programu MATLAB implementovány, jsou návrhově jednoduché a skripty založené na tomto typu interpolací jsou snadno modifikovatelné pro jiné případy klasických interpolací. Proto byly lineární a Hermitova kubická interpolace zvoleny zvoleny pro srovnávání rozložení oproti sofistikovanějším PCA a SFE, kterým se výsledky blíží. Jako parametr pro srovnání Lineární a Hermitovy kubické interpolace bylo vybráno MSE. Interpolace byly posuzovány podle svého výkonu při interpolaci vybrané sady měřicích bodů (rovnoměrné rozložení s krokem 30°) na databázi [26]. Na grafu 13 je vidět, že hodnoty MSE Hermitovy kubické interpolace mají nižší hodnoty. Proto byla Hermitova kubická interpolace vybrána pro další hodnocení rozložení měřicích bodů.



Obr. 13. MSE srovnání dvou interpolací. Lineární interpolace (plná křivka) a Hermite kubická interpolace (přerušovaná).

5.2. Určení měřicí sítě

Rozložení měřicí sítě může mít pro potřeby interpolace zásadní vliv. Jelikož problematika vhodných bodů je velmi rozsáhlá, rozhodl se autor pro zjednodušení problému a určení rozložení fixního počtu bodů na horizontální rovině. Hlavní část práce bude soustředěna na optimalizaci rozložení stanovených bodů především v horizontální rovině.

5.2.1. Výpočet rozložení na základě korelačních koeficientů bodů se stejnou elevací

Podle [19] je dobrým způsobem hledání vhodných bodů měření dle korelačních koeficientů. Korelační koeficient popisuje míru podobnosti dvou signálů. Od koeficientu velikosti 1, která značí úplnou shodu, po velikost -1, která značí, že popisovaný průběh je opačný k prvnímu měřenému. V případě, že je koeficient velikosti 0, nejsou dva průběhy korelované. Body, které mají společný koeficient blízký jedné, jsou si velmi podobné. Předpokládá se, že body, které jsou podobné největšímu množství okolních bodů budou vhodnější pro potřebu interpolace než jiné. Korelační koeficient se vypočte

$$R(x(t), y(t), t) = \frac{C(x(t), y(t))}{\sqrt{C(x(t), x(t))C(y(t), y(t))}}, \quad (37)$$

kde C je kovarianční funkce

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} (x(t) - \bar{x})(y(t + \tau) - \bar{y}). \quad (38)$$

Parametry \bar{x} a \bar{y} jsou aritmetické průměry.

5.2.2. Korelační mapy

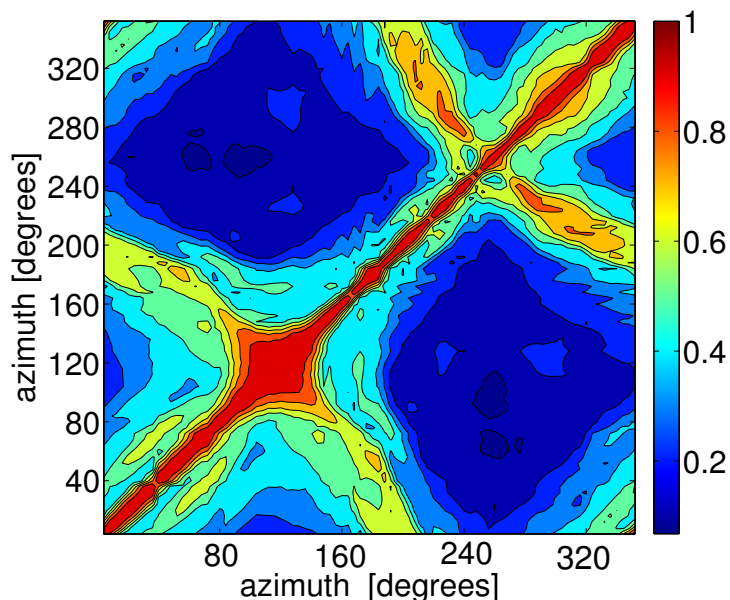
Autor práce na základě doporučení článku [19] využívá pro výběr vhodných míst korelačních koeficientů. Všechny informace jsou rozděleny do jednotlivých sad měření, kde mají všechny body měření společnou elevaci. Všechny záznamy HRTF se společnou elevací jsou vůči sobě srovnávány pomocí vztahu 39. Výsledkem je diagonálně zrcadlená matice, kdy každý bod popisuje vztah jednoho (řádek) a druhého měřicího bodu. Příklad takové matice neboli korelační mapy je zobrazen na obrázku 14. Na diagonále se pak samozřejmě nacházejí hodnoty 1, jelikož je daný bod korelován sám se sebou. Hodnoty map jsou vypočteny vztahem pro výpočet korelačního koeficientu

$$R_{max}(H_1, H_2) = \max\left(\frac{C(H_1, H_2)}{\sqrt{C(H_1, H_1)C(H_2, H_2)}}\right), \quad (39a)$$

kde H_1 a H_2 jsou záznamy HRTF

$$H_i = \text{HRTF}(\theta_i, \xi_0), \quad (39b)$$

kde θ_i a jsou testované azimuty měřicích bodů HRTF a ξ_0 je konstantní elevace.

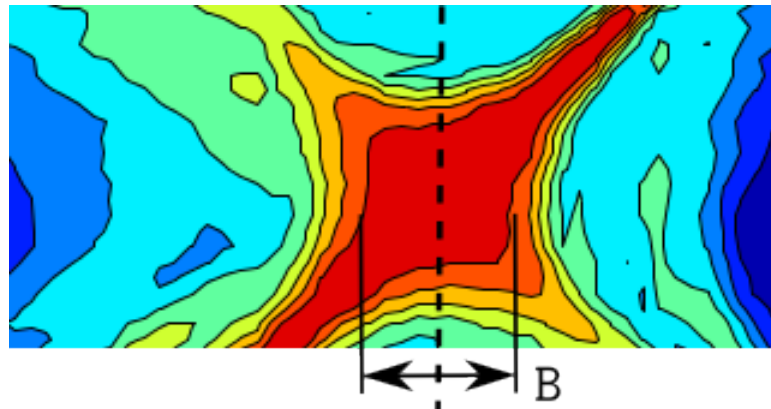


Obr. 14. Příklad korelační mapy pro řez 0° elevace a 0-360° azimutu

5.2.3. Kritéria

Byly vytvořeny dva druhy kritérií, podle kterých byly ohodnoceny jednotlivé body.

- **Šířka svazku** - Je obdobná šířce pásma. Bod je ohodnocen podle dvou krajních bodů, které jsou vyšší než hranice stanovená na 0,95. Tato hranice byla stanovena experimentálně. Výsledkem je pak šířka svazku bodů, které jsou určenému bodu blízké. Situaci znázorňuje obrázek 15. Výhodou je dobrý odhad nejbližšího okolí bodu. Nevýhodou pak, že toto kritérium nepostihuje body, které neleží v přímé blízkosti vyhodnocovaného bodu, a přesto jsou mu dost podobné.



Obr. 15. Princip kritéria šířky pásma

- **Četnost výskytu** - Jedná se o poměr množství bodů, které mají s odhadovaným bodem korelační koeficient vyšší než 0,95 vůči všem bodům, se kterými byl daný bod srovnáván dle

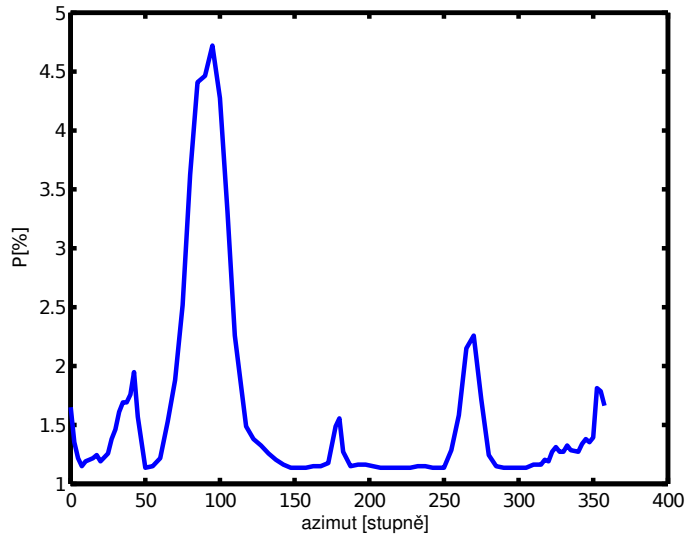
$$PE = \frac{N}{M}100. \quad (40)$$

Toto kritérium bere v úvahu i body, které neleží v přímém okolí odhadovaného bodu. Tato dvě kritéria jsou počítána pro každý subjekt z databáze ARI a pro každou elevaci je uložen aritmetický průměr průběhu kritérií. Typický průběh hodnot je znázorněn na grafu 16.

5.2.4. Výsledky zpracování korelačních map

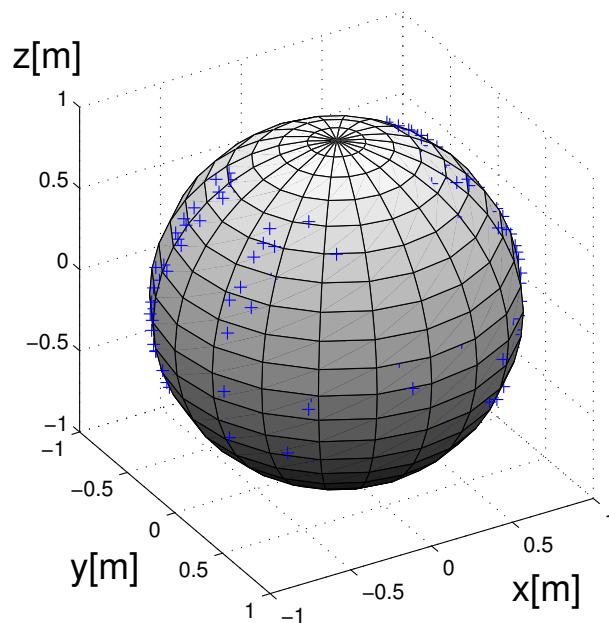
Do výčtu vhodných bodů pro každou elevaci jsou zapsány body, které jsou lokálním maximem svého okolí. Ohodnocení jednoho bodu je možno vidět na grafu 16. Uvádějí se pouze špičkové hodnoty. Přesnost interpolace se samozřejmě zlepšuje s každým přidáním bodem. Výpočet byl prováděn v rozsahu elevace -25° až 50° . Díky velkému počtu použitých subjektů byla pravolevá nesymetrie (posunutí slyšení pro subjekt) zanedbána. Body, které se nacházely od sebe v úhlu menším

5. Srovnání interpolací a návrh měřicí sítě



Obr. 16. Příklad četnosti výskytu pro elevaci 10° .

než 5° azimutu byly sloučeny, jelikož se převážně jedná o ty samé body z druhého ucha, které byly překlopeny. Výsledná mapa je zobrazena na obrázku 17.

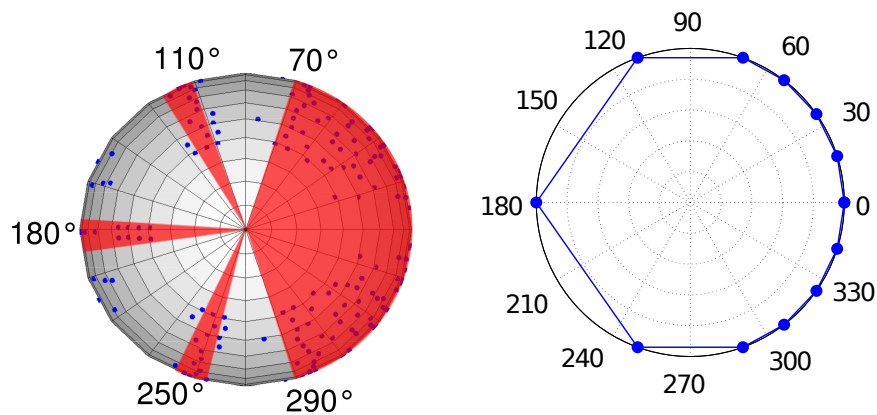


Obr. 17. Výsledné rozložení lokálních maxim pro kritérium četnosti bodů

5.2.5. Výsledná měřicí síť

Výsledky průměrných lokálních maxim jsou pro ukázkou zobrazeny na povrchu koule na obrázku 17. Pro lepší představu o naměřených výsledcích je k dispozici na grafu 18 průmět horizontální rovinou. Jedná se o data získaná pomocí kritéria četnosti výskytu. Kritérium šířky svazku poskytuje výsledky velmi podobné a dochází ke stejným závěrům. Je zřejmé, že v některých hodnotách azimutu mají kritéria maxima podobná pro všechny měřené elevace. Jedná se o azimuty 110° , 180° a 250° . V oblasti 290° až 70° se vyskytuje velké množství individuálních bodů.

Z výše získaných poznatků byla zkonstruována síť bodů pro libovolnou elevaci. Tato síť je zobrazena na pravé straně obrázku 18 a využívá získaných bodů individuálních (tj. 110° , 180° a 250° azimutu) a široce rozptýlené oblasti v rozsahu 290° až 70° . V tomto pásmu byla navržena rovnoměrně rozptýlená mřížka se středem v 0° azimutu a krokem $17,5^\circ$. Výsledná mřížka má poměr bodů na přední části a zadní části hlavy 9:3. Skutečnost vyšší hustoty v přední polovině také zvyšuje přesnost interpolace v této části. Prostorový sluch přední části horizontální roviny má výrazně vyšší rozlišovací schopnost dle [14]. Výsledná mřížka je uvedena v tabulce 3



Obr. 18. (vlevo) Průmět horizontální osou souboru maxim. Pásma s největší pravděpodobností výskytu lokálních maxim jsou vyznačeny červeně. (vpravo) Navržená měřicí síť pro obecnou konstantní elevaci.

Tab. 3. Schéma měřicí sítě pro konstantní elevaci

Azimut [$^\circ$]	0	17	35	52	70	110	180	250	290	307	325	342
---------------------	---	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

6. Skript na zpracování výsledků

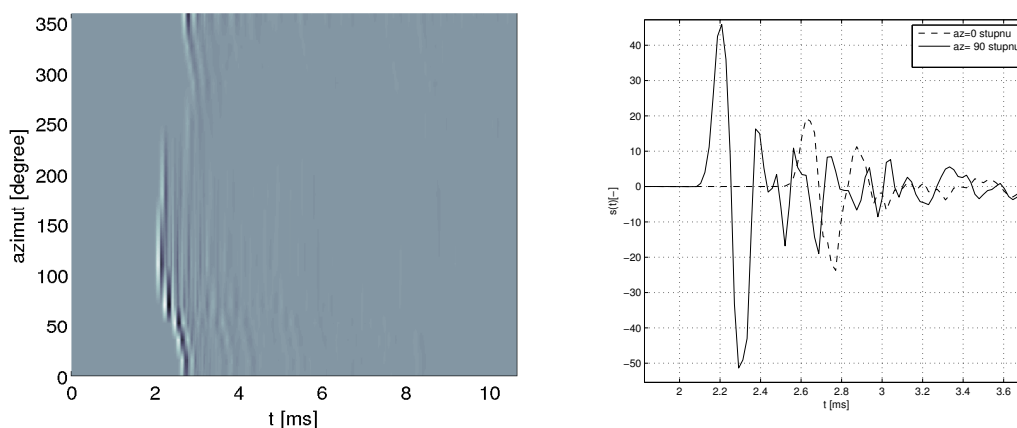
Pro potřeby interpolace byl navržen skript v prostředí MATLAB, který má za úkol interpolovat naměřená data a uložit do formátu mat.

6.1. Požadavky na skript

Skript, který je popsán v této kapitole má za úkol zpracovávat výsledky měření impulsových odezev, interpolovat naměřená data a výsledky patřičně archivovat. Skript by měl být schopen:

- Načítat impulsové odezvy naměřené pomocí programu EASERA ve formátu ETX.
- Spravovat uložené záznamy a rozčlenit je dle subjektu a elevace.
- Proložit naměřené záznamy interpolováním o nastavitelném kroku v azimutu s minimem jednoho stupně (interpolace pouze v azimutu).
- Uložit strukturovaný záznam včetně doplňkových informací o subjektu do souboru ve formátu MAT.

Skript musí také vzít v potaz zpoždění každé impulzní odezvy, které se spojitě mění. Interpolací přes pevný řez dochází k narušení této spojitosti, jak je možné si povšimnout na obrázku 19.

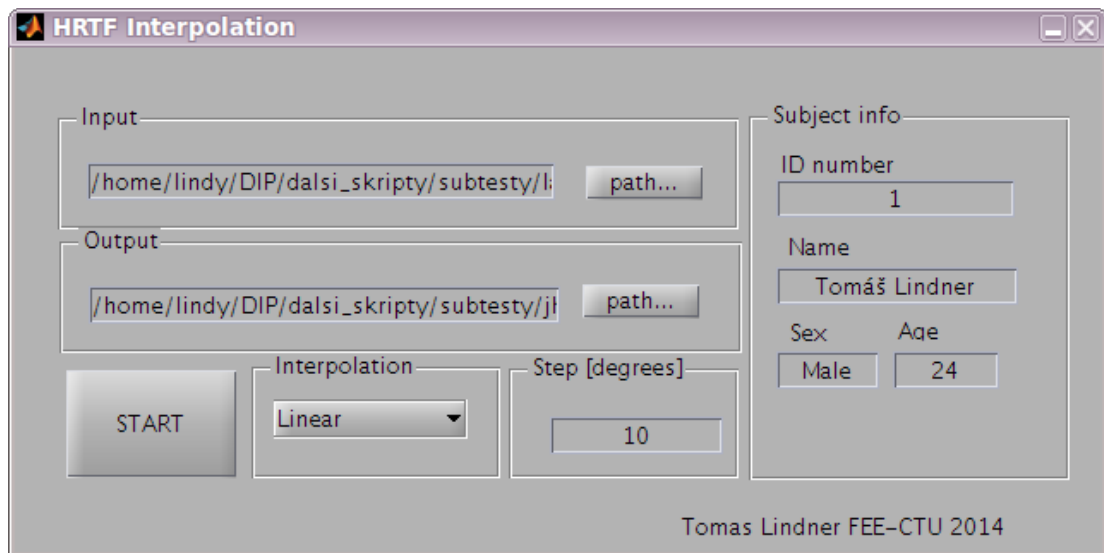


Obr. 19. Záznamy HRIR interpolované přes azimut se společnou elevací bez zachování spojitosti zpoždění (vlevo). Příklad rozdílnosti HRIR levého ucha v azimutu 0 a 90° (vpravo)

6.2. Graphic User Interface

GUI se skládá z několika částí a je zobrazeno na obrázku 20.

- **Input** - Název vstupní složky, ze které se získávají data.
- **Output** - Název výstupního souboru ve formátu .mat
- **Interpolation** - Výběr interpolace. Na výběr je lineární a Hermitova kubická interpolace.
- **Subject info** - Informace o subjektu, ID číslo (potřebné pro třídění dat), jméno, pohlaví, věk, datum měření.
- **Start** - zahajuje zpracovávání výsledků.



Obr. 20. GUI skriptu HRTF interpolation

6.3. Vstupní formát

Vstupní data jsou získána z programu EASERA ve formátu etx a název souboru se předpokládá ve tvaru

SXXEXXAXXX.etx

kde SXX označuje identifikační číslo subjektu (0 až 99), EXX elevaci (-30 až 60) a AXXX označuje azimut (0 až 360).

6.4. Výstupní formát

Jako výstup byl vybrán mat-file. Tento formát byl vybrán, jelikož program MATLAB je populární v akademické sféře a uložení dat v tomto formátu umožňuje strukturovaný přístup bez dalších potřebných úprav. Struktura dat je provedena následovně:

- **settings** - informace o nastavení
 - subjectInfo** - informace o subjektu (name, sex, age, ID)
 - measurementInfo** - informace o měření (fs, program, rozložení bodů)
 - interpolationInfo** - informace o interpolaci (druh interpolace, interpolační krok).
- **HRIR** - HRIR záznam vypočtený z interpolovaného HRTF
- **HRTF** - Interpolovaný záznam HRTF

6.5. Postup

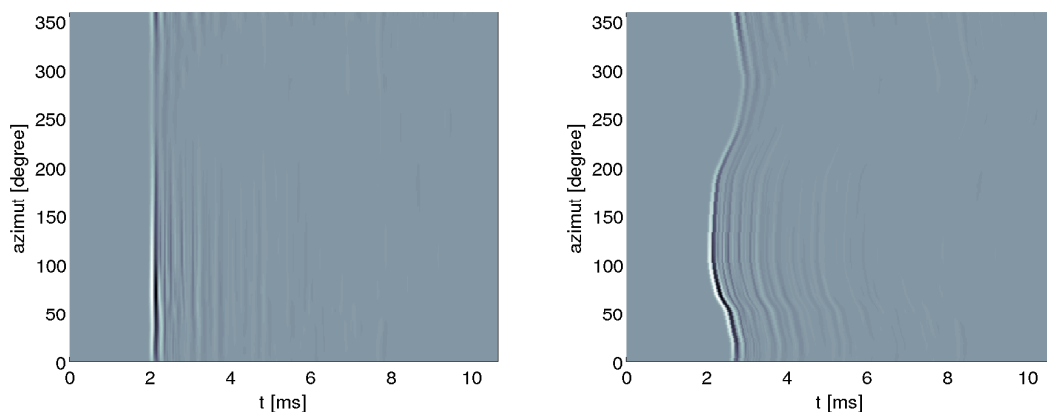
Po spuštění m-filu *INDEX.m* se aktivuje GUI prostředí *GUI_INDEX.m*. Následuje vyplnění složky se vstupními daty, uvedení názvu výstupního m-filu, základní informace o subjektu a informace o požadované interpolaci. V nabídce je možno vybrat mezi Hermitovu kubickou a lineární interpolací s krokem do jednoho supně azimutu. Informace o subjektu jsou pouze informativní a jsou uloženy v proměnné *settings* pro budoucí potřebu uživatelů. Samotná zpráva vstupu je řízena pomocí názvů souborů popsanych v části 6.3. Po stisknutí tlačítka START se zahájí zpracování výsledků pomocí skriptu *START.m*.

Nejprve jsou nahrány a uloženy soubory ETX ze vstupní složky a pomocí výše uvedeného klíče pro název souboru jsou rozděleny do skupin tvořených třemi podskupinami

Skript *ETXREAD.m* byl napsán Alanem Štolcem v rámci řešení grantu SGS11/159/OHK3/3T/13. Převádí vstupní soubor .etx na vektor a data vybírá a rozděljuje. Pro potřeby této aplikace bylo potřeba skript modifikovat na *ETXREAD_MOD_LINDNER.m*. Některé informace byly zanedbány (celková délka signálu) a jiné bylo potřeba přemapovat, jelikož se odečítání dat neshodovalo se strukturou souborů. Počet načtených vzorků na záznam bylo omezeno na 512. Toto číslo bylo zvoleno proto, že pokrývá celou užitečnou délku impulzní odezvy, a jelikož se jedná o mocninu čísla dvě, tak usnadňuje zpracování pomocí algoritmu *fft*. Takto modifikovaný skript je řízen skriptem *LIST.m*, který má za úkol správu nahrávání souborů. Vytváří seznam všech souborů ve složce odpovídajících souborům s příponou ETX. Na základě názvů souborů vytváří příslušné struktury se členěním subjekt, elevace, azimut a pravé nebo levé ucho (left/right).

Takovýto přístup umožňuje ukládat údaje z více elevací. Následně jsou jednotlivé azimuty sjednoceny do matice pomocí skriptu *STRUC2MAC.m*, která následně generuje vektor *azimuth* ve kterém jsou zaznamenány azimuty příslušící jednotlivým měřením. Hlavní problém skriptu, který byl nalezen během

práce, je zaviněn zpožděním. Zpoždění HRIR se spojitě mění napříč celým rozsahem. Samotná interpolace probíhá ve frekvenční doméně, kdy jsou komplexní hodnoty pro jednotlivé frekvence interpolovány řezem skrz všechny hodnoty azimutu. Bez korekce zpoždění dochází po zpětné *fft* k jevu zobrazeném v grafu 21 (první obrázek nahoře), kdy jednotlivé přechody nejsou spojené. Proto byl soubor skriptů doplněn o funkci *ITD_CORRECTION.m*, která před aplikací *fft* vyhodnocuje zpoždění jednotlivých HRIR záznamům vůči sobě, ukládá tyto hodnoty a zarovnáává záznamy HRIR na konstantní zpoždění. Nejdříve je určeno HRIR s nejmenším zpožděním. K tomu byl využit empirický poznatek, že HRIR je tvarem blízka impulzní odezvě tvořené rovnicí druhého řádu. Ubývá tedy exponenciálně a první lokální maximum má největší hodnotu. Za referenční HRIR je tedy vybrán ten záznam, jehož první lokální maximum nastane nejdříve. Poté je určeno zpoždění ostatních HRIR záznamů pomocí korelace s referenčním záznamem. Hodnoty zpoždění v počtu vzorků jsou uloženy do proměnné *ITD* a následně je záznam oříznut na začátku o danou míru. na konci je záznam doplněn nulami tak, aby byly zachovány rozměry matice. Následně jsou HRIR záznamy převedeny na HRTF pomocí funkce *fft*. Uložená data jsou interpolována dle kroku a typu interpolace nastaveného uživatelem. K interpolaci se používá funkce *interp1*. Reálná a imaginární složka frekvenčního obrazu jsou interpolovány samostatně a následně sloučeny. Záznamy zpoždění jsou také interpolovány Hermitovou kubickou interpolací a uloženy ve vektoru *ITDint*. Interpolován je kompletní záznam HRTF v plném rozsahu. Po interpolaci jsou HRTF data opět převedena na HRIR a jsou zpožděny o počet vzorků popsany ve vektoru *ITDint* za pomoci funkce *ITD_RECCOR.m*. Nuly na konci, které sloužily k doplnění na matici, jsou odstraněny. Výsledný záznam je uložen do formátu popsáném v sekci 6.4.



Obr. 21. Příklady interpolace se zarovnáním zpoždění před korekcí (vlevo) a po korekci (vpravo). Na obrázku 19 je zobrazena interpolace stejných dat bez korekce.

6.5.1. Shrnutí připravených skriptů

- **INDEX.m** - Úvodní skript. Aktivuje GUI-INDEX.fig, které slouží jako grafické rozhraní a definuje některé základní proměnné.
- **GUI_INDEX.m** - ovládání GUI_INDEX.fig. řídí činnost jednotlivých segmentů GUI.
- **START.m** - zahájí zpracování výsledků a jedná se o hlavní tělo převodu. Aktivuje dílčí skripty a ukládá výsledky a nastavení. Je aktivován tlačítkem START na GUI-INDEX.m
- **LIST.m** - řídicí skript, který extrahuje data ze vstupních souborů .etx pomocí funkce ETX_MOD_LINDNER.m. Následně získaná data třídí dle názvu vstupního souboru.
- **ETX_MOD_LINDNER.m** - modifikovaný skript ETXREAD.m navržený Alane Štolcem. Byl upraven pro zjednodušení a zrychlení práce.
- **STR2MAC.m** - skript na převod strukturového třídění záznamů do maticového pro konstantní elevaci. Ukládá také záznam o azimutech do proměnné *azimuth*. Dále pomocí funkce ITD_correction.m zarovnáva impulsní odezvy a pomocí fft generuje HRTF záznamy.
- **ITD_CORRECTION.m** - skript, který uloží zpoždění jednotlivých odezev a následně všechna měření pro jednu elevaci uloží do paměti pro pozdější využití.
- **INTHRTF.m** - tento skript přebírá upravené HRTF záznamy, ořezává jejich počátek dle údajů získaných z ITD_CORRECTION.M a interpoluje je ve frekvenční rovině. Reálná složka a imaginární složka se interpolují odděleně. Následně pomocí ifft převádí HRTF zpět na HRIR a jednotlivé záznamy opožďuje pomocí funkce ITD_RECCOR.m o zpoždění získané z ITD_CORRECTION.m.
- **ITD_RECCOR.m** - funkce, která posunuje HRIR záznam o specifické zpoždění.

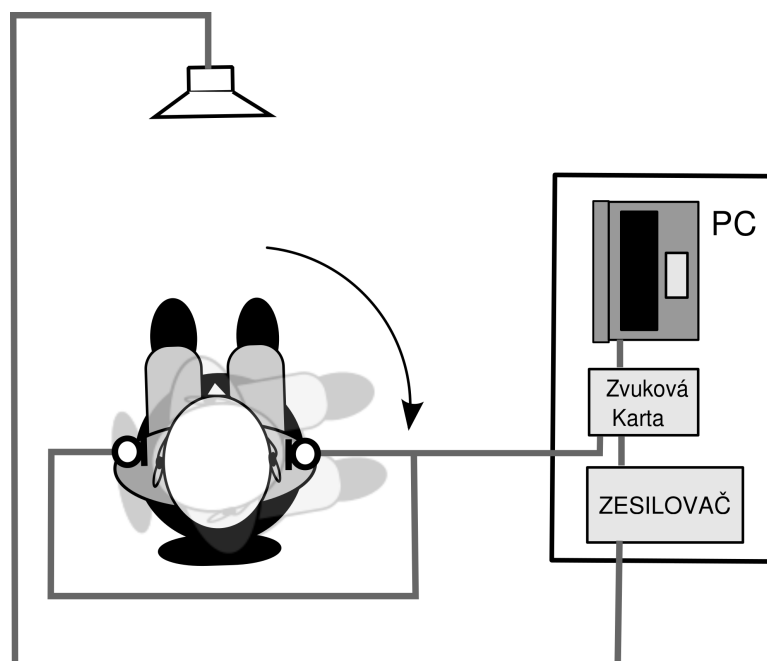
7. Měření HRTF pomocí navržené sítě

Po vyhodnocení měřicí sítě popsané v kapitole 5 bylo rozhodnuto, že tato síť bude otestována také pomocí měření HRTF a následných subjektivních testů. Sestava a postupy, které byly využity během měření byly dále podrobeny kritice v podsekcí 7.4 za cílem zdokonalení stávající metody při zachování jejích základních rysů.

7.0.2. Vlastnosti použité sestavy

Aktuální používaná sestava je využívána při řešení grantu Studentské grantové soutěže ČVUT SGS11/159/OHK3/3T/13 a SGS14/204/OHK3/3T/13. Na rozdíl od jiných soustav používaných na měření HRTF, které využívají více zdrojů zvuku, se tento systém vyznačuje jedním zdrojem zvuku a dvěma mikrofony.

7.1. Uspořádání měření



Obr. 22. Orientační schéma měření HRTF.

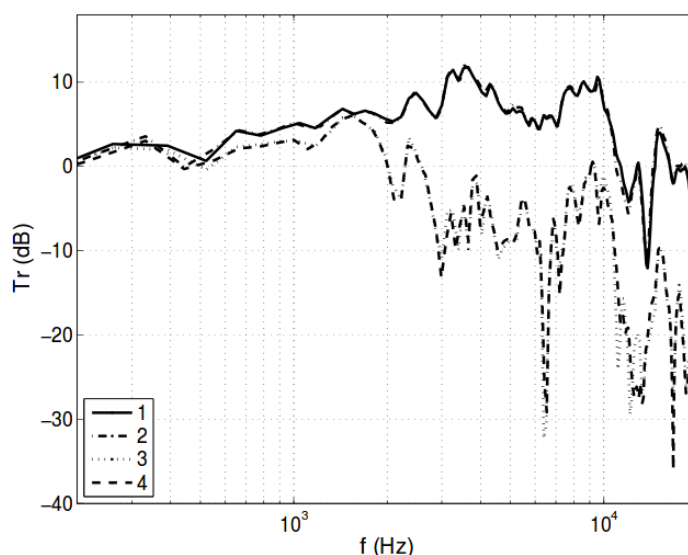
7.1.1. Použité vybavení

Počítač	Hewlet Packard ProBook 6550b
Softwarové vybavení	OS Windows 7, EASERA
Externí zvuková karta	RME Fireface 400
Stereo mikrofon	Audio-technica MicroPoint BP896c
Výkonový zesilovač	Behringer A500
Měřicí reproduktor	viz sekce 7.1.2

Tab. 4. Přístroje použité pro měření HRTF.

7.1.2. Zdroj zvuku

Reproduktor použitý jako zdroj zvuku byl navržen a zkonstruován Ing. Richardem Suchanem. Jedná se o reproduktor specializovaný na měření HRTF.



Obr. 23. Přenosová charakteristika reproduktoru pro měření v akustické ose a měření mimo jeho akustickou osu.

7.2. Vliv prostředí na měřené výsledky

Měření bylo provedeno v multimediální laboratoři Centra asistivních technologií ČVUT. Okolí měření bylo akusticky upraveno. Byly odstraněny předměty s velkou odraznou plochou a předměty potřebné pro měření byly přesunuty do vzdálenosti vyšší než 1.14 m. Celý prostor byl od okolí a od stěn oddělen sametovými závěsy.

7.3. Postup měření

1. **Změření audiogramu** - Pro kontrolu sluchové způsobilosti subjektu byl změřen audiogram. Měření bylo provedeno pomocí Matlab skriptu Pure Tone [25] v testovací komoře na katedře radielektroniky ČVUT. Jedná se o měření pomocí sinusového signálu na frekvencích 250, 500, 1000, 2000, 4000 a 8000Hz. Obrazová dokumentace je uvedena v příloze E.
2. **Příprava měření** - Byla připravena měřicí aparatura popsaná v tabulce 4 a schématu 22.
3. **Kalibrace** - Subjekt je usazen na otočnou židli. Tato židle je vybavena měřením úhlu natočení (úhломěr s ryskou). Je nastavena výchozí poloha 0° dle rozložení měření. Následně je provedeno orientační měření pro 0° elevace a 90° a 270° pro azimut. Toto orientační měření je provedeno proto, aby byla upravena citlivost mikrofonů popřípadě zesílení výstupního signálu v reproduktoru, aby nedocházelo ke zkreslení.
4. **Měření** - Měření probíhá bez přestávky, aby byly zaručeny podobné podmínky pro všechny body měření. K měření byl použit program EASERA byl použit logaritmický růžový sweep se vzorkovacím kmitočtem 48 kHz. Po zhodnocení časových možností bylo měření prováděno pro elevaci 0° a dvě sady azimutů.
 - Rovnoměrné rozložení
(0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330)
 - Navrhované rozložení
(0, 17, 35, 52, 70, 110, 180, 250, 290, 308, 325, 343)

Soubory jsou uloženy do formátu ETX s názvem popsáním v části 6.4.

7.4. Zhodnocení potenciálních chyb měření

Aktuální způsob měření neumožňuje z časových důvodů měřit v žádané přesnosti a i s využitím následné interpolace trvá měření jedné elevace o dvanácti bodech více než 30 minut. Na základě zkušeností z měření a porovnáním s jinými obdobnými konstrukcemi byly určeny fyzické oblasti měření, na které se autor zaměřuje.

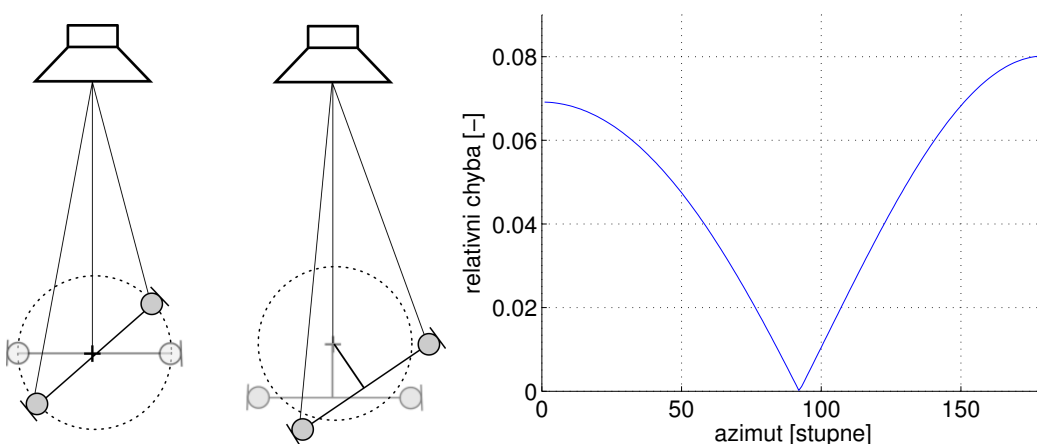
7.4.1. Poloha hlavy vůči souřadnicovému systému

Během měření je potřebné zaručit, aby subjekt nemohl měnit polohu hlavy během samotného měření a aby nemohl měnit polohu hlavy i mezi jednotlivými měřeními. Jedná se jak o volné pohyby subjektu tak o pohyby způsobené změnou polohy subjektu na novou pozici.

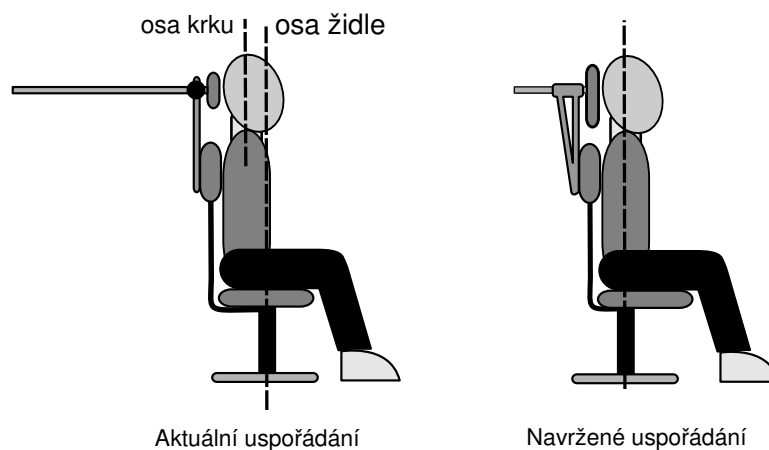
K řešení tohoto problému by mohla dopomoci vhodná konstrukce židle. Zabudování polohovatelné opěrky hlavy, která ovšem nesmí přesahovat její průměr ani zasahovat do prostoru uší. Je potřeba, aby výsledná opěrka měla minimálně dva body uchycení k židli, aby se tím zabránilo nechtěnému otáčení opěrky a následné změně polohy hlavy. Jednobodové uchycení se ukázalo při měření jako výrazný problém, jelikož tlak hlavy na opěrku během měření měnil její polohu a bylo nutné neustále upravovat opěrku do výchozí polohy.

Dalším problémem, který byl objeven během měření, je fakt, že osa otáčení nesouhlasí s osou, která se nachází uprostřed dráhy mezi ušima. V závislosti na tělesné konstituci se vzdálenost jednotlivých os pohybuje přibližně od 5 do 15 cm. Vezmeme-li v úvahu vzdálenost obou uší od sebe, což je zhruba 20 cm, jedná o nezanedbatelnou chybu.

V rámci výzkumu byl v prostředí MATLAB naprogramován model *vystrednost.m* založený na výstřednosti středu mikrofonů. Bylo zjištěno, že relativní chyba mikrofonů při výstřednosti 15 cm může být až 8% z hodnoty ITD.



Obr. 24. Princip navrženého modelu pro zkoumání vlivu výstřednosti na ITD (vlevo). Relativní odchylka ITD pro výstřednost 15 cm a rozsah 0° až 180° (vpravo).



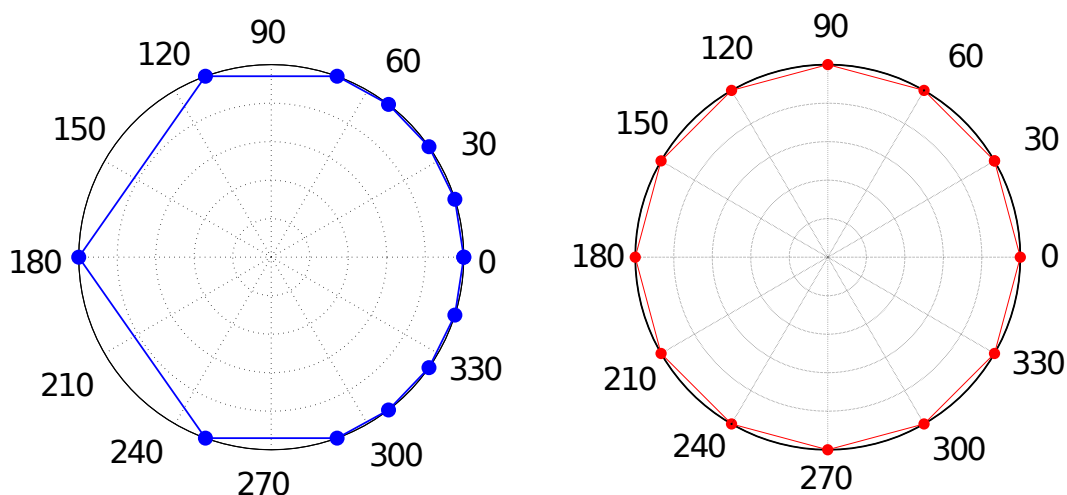
Obr. 25. Navrhované úpravy vzhledem k výchozímu stavu.

Řešením je sjednocení osy židle a osy otáčení mikrofonů. Je samozřejmé, že bude potřeba úprav, které zaručí pevnost konstrukce. Výsledné poznatky byly použity k návrhu úpravy křesla zobrazené na schématu 25. Výsledné návrhy však již nebylo možno z časových důvodů otestovat.

8. Ověření platnosti měřicí sítě

8.1. Rozvržení testování

Pro ověření účinnosti navrhovaného rozložení bylo potřeba určit referenční měřicí síť. Touto sítí byla vybrána rovnoměrně rozložená měřicí síť obsahující dvanáct bodů na elevaci (obdobně jako u navrhované sítě) s krokem v azimutu mezi jednotlivými body 30° . Obě dvě rozložení jsou zobrazena na obrázku 26.



Obr. 26. Navrhované rozložení pro obecnou elevaci (vlevo) a rovnoměrné rozložení s krokem 30° .

Na obou měřicích sítích byly provedeny dva druhy testování:

- Objektivní test MSE (velký počet subjektů) - Statistické měření provedené v prostředí Matlab na datech získaných z [26]. Jedná se o 84 subjektů.
- Objektivní test LSD (malá množina subjektů) - Statistické
- Subjektivní test - Subjektivní test na skutečných subjektech.

8.2. Objektivní měření MSE

V objektivní části testování byly obě měřicí sítě popsané v 8.1 otestovány na databázi [26]. K testování bylo využito 84 subjektů. Parametry databáze jsou po-

psány v příloze A. Z naměřených sad databáze [26] byly vyjmuty záznamy HRTF odpovídající testované mřížce. Podle těchto bodů byla celá sada interpolována Hermitovou kubickou interpolací a srovnávána s původní sadou z databáze pomocí průměrů MSE.

8.2.1. Mean Square Error Ratio

Jako objektívni deskriptor bylo vybráno kritérium Mean Square Error. Následující tvar byl upraven z původního vztahu 32

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=m_0}^M \sum_{j=n_0}^N \|HRTF_{orig}(i, j) - HRTF_{int}(i, j)\|^2, \quad (41)$$

kde ($HRTF_{orig}$ je původní kompletní sada zatímco $HRTF_{int}$ je sada interpolována z bodů vyjmutých z kompletní sady. M je počet HRTF záznamů a N je rozměr jednoho HRTF záznamu. V tomto případě platí, že $N = 512$ a $M = 360$.

Po posouzení lineární a Hermitovy kubické interpolace v sekci 5.1 byla zvolena Hermitova kubická interpolace. Ke srovnání obou druhů rozložení a různých druhů interpolace je využitý vztah Mean Square Error Ratio. Jedná se o poměr mezi dvěma MSE dle

$$MSER = 10 \log\left(\frac{MSE_{bc}}{MSE_{eq}}\right), \quad (42)$$

kde MSE_{bc} je MSE navržené sítě a MSE_{eq} je MSE sítě rovnoměrné. MSE samo o sobě nekoresponduje s lidským vnímáním, které nevnímá na všech frekvencích se stejnou citlivostí. Proto byla spektra před výpočtem váhována modulem spektra filtru typu A, který se využívá při akustických měřeních a blíží se frekvenční závislosti prahu slyšení člověka. Vztah je převzat z [15] a je dán kombinací vztahů

$$A(f) = \frac{RA(f)}{RA(1000)}, \quad (43a)$$

kde $RA(f)$ je kmitočtová charakteristika filtru

$$RA(f) = \frac{12200^2 f^4}{(f^2 + 20, 6^2)(f^2 + 12200^2)\sqrt{(f^2 + 107, 7^2)(f^2 + 737, 9^2)}}, \quad (43b)$$

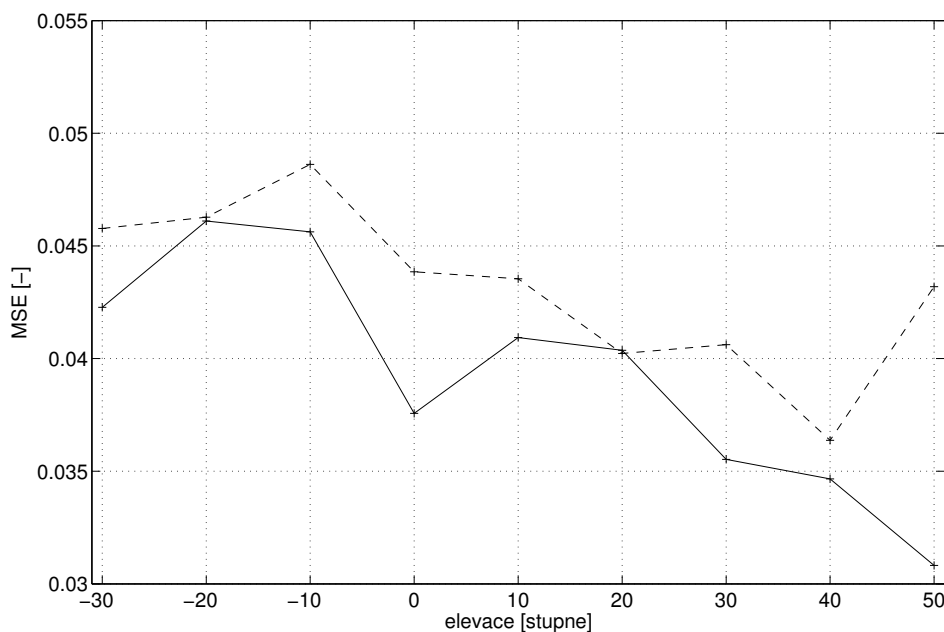
a $RA(1000)$ slouží k normování charakteristiky. MSER bylo určováno pro různé elevace s krokem 10° v rozsahu -30° až 50° a pro tři případy:

- Celkové MSER - pro konstantní elevaci v rozsahu 0° až 360° v azimutu.
- Ventrální MSER - pro konstantní elevaci v rozsahu -90° až 90° v azimutu.
- Dorzální MSER - pro konstantní elevaci v rozsahu 90° až 270° azimutu.

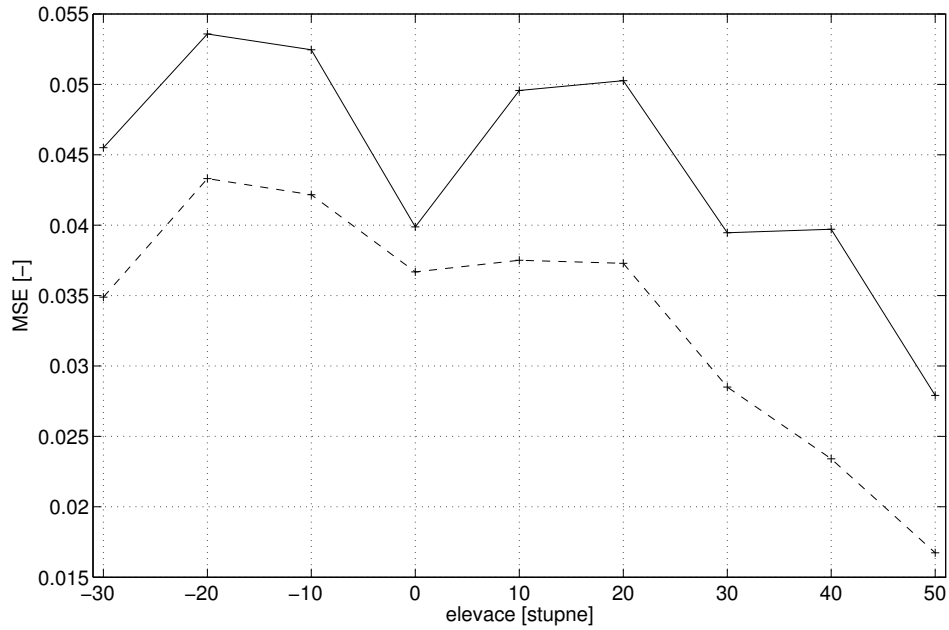
Terminologie převzata z [2]. Řízení zkoumané oblasti bylo prováděno změnou hodnot n_0 a N ve vzorci (41).

8.2.2. Výsledky objektivního srovnání MSE

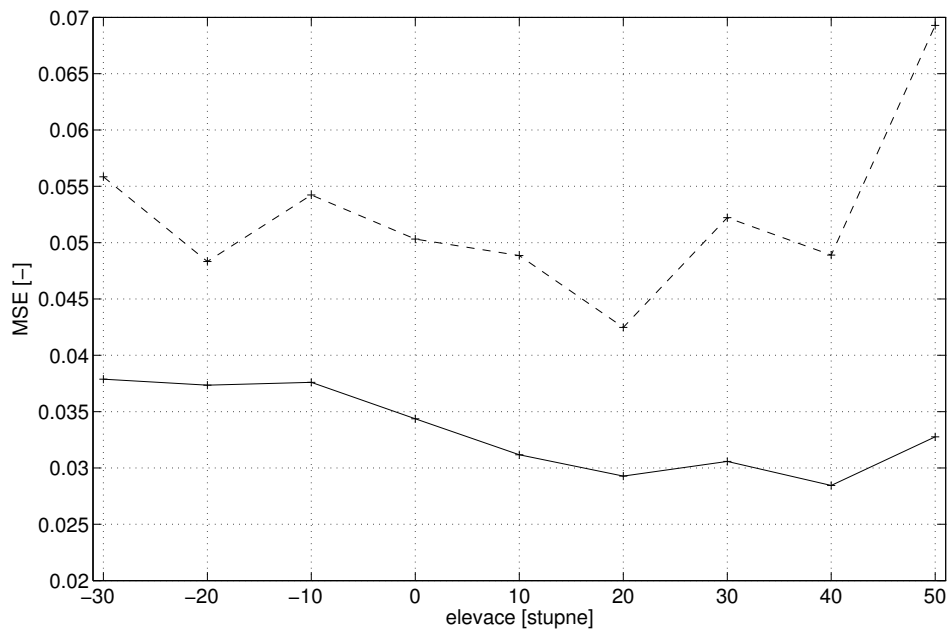
Z dat uvedených v prvním grafu 27 je patrné, že v případě celkového zhodnocení MSE jsou si obě interpolace poměrně blízké ovšem navržené rozložení ukazuje horší výsledky. Proto byly prozkoumány ventrální a dorsální části roviny samostatně, aby byl znám přínos obou polorovin. Toto je zobrazeno na grafech 28 a 29. Je patrné, že v dorsální části je upřednostněno rovnoměrné rozložení a ve ventrální je upřednostněno navržené rozložení. Tento fakt je spojen se skutečností, že v každé části má zvýhodněné rozložení více bodů ze kterých je možno interpolovat. Například pro ventrální rozložení je poměr použitých bodů pro navrhované a rovnoměrné rozložení 9:6 (1,5). V případě dorsální části se jedná o 3:6 (0,5). Na výsledcích popsanych v grafu 30 je opět patrné určení výhodnosti pro oba typy rozložení. Ovšem další zajímavou informací je ta, že s rostoucí elevací rozdíly mezi oběma typy narůstají ve prospěch toho rozložení, které má k dispozici více bodů. Testování s různými rozloženími stejných bodů přinesla pouze minimální změny. Proto je zřejmé, že hlavní váha na efektivnosti interpolace závisí na množství bodů, nikoliv na jejich poloze. Tento poznatek je důležitý především u principu ILD.



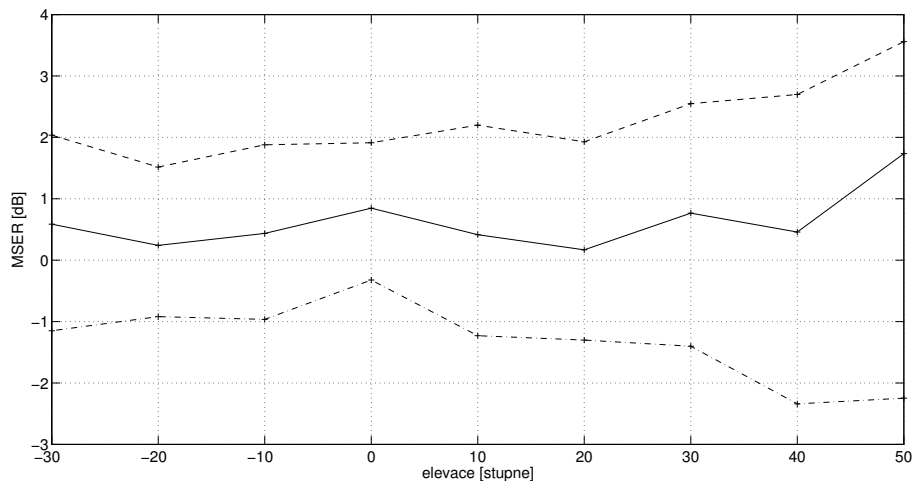
Obr. 27. Srovnání MSE rovnoměrného (plná křivka) a navrhovaného rozložení (přerušovaná křivka) v závislosti na elevaci. Pro rozsah 0° až 360° .



Obr. 28. Srovnání MSE rovnoměrného (plná křivka) a navrhovaného rozložení (přerušovaná křivka) v závislosti na elevaci, pro rozsah -90° až 90° .



Obr. 29. Srovnání MSE rovnoměrného (plná křivka) a navrhovaného rozložení (přerušovaná křivka) v závislosti na elevaci, pro rozsah 90° až 270° .



Obr. 30. MSER celkové roviny (plná křivka), dorsální části roviny (přerušovaná křivka) a ventrální části roviny (čerchovaná křivka).

8.3. Objektivní test LSD

8.3.1. Popis testu

Pro srovnání a popis možných nedokonalostí měřicí sítě byl kromě MSE testu vybrán ještě test LSD. Tento test je nazván dle parametru Logaritmické Spektrální vzdálenosti popsané v sekci 4.3. Tento test slouží také jako objektivní test skriptu popsaného v kapitole 6.

Byly náhodně vybrány čtyři subjekty z databáze [26]. Vstupní data každého subjektu obsahují 2x12 záznamů HRIR. Údaje jsou uvedeny pro elevaci 0° , a 12 azimutů, které jsou rozloženy rovnoměrnou a navrhovanou měřicí sítí.

Data z databáze byla upravena tak, aby bylo možno je načíst pomocí interpolačního skriptu. Načítání skriptu muselo být pro tuto potřebu také upraveno. Interpolace proběhla s krokem 5° . Následně byly výsledné záznamy porovnány s původní předlohou pomocí logaritmické spektrální vzdálenosti a Itakura-Saitouovy vzdálenosti, popsaných v sekci 4.3.

8.3.2. Výsledky

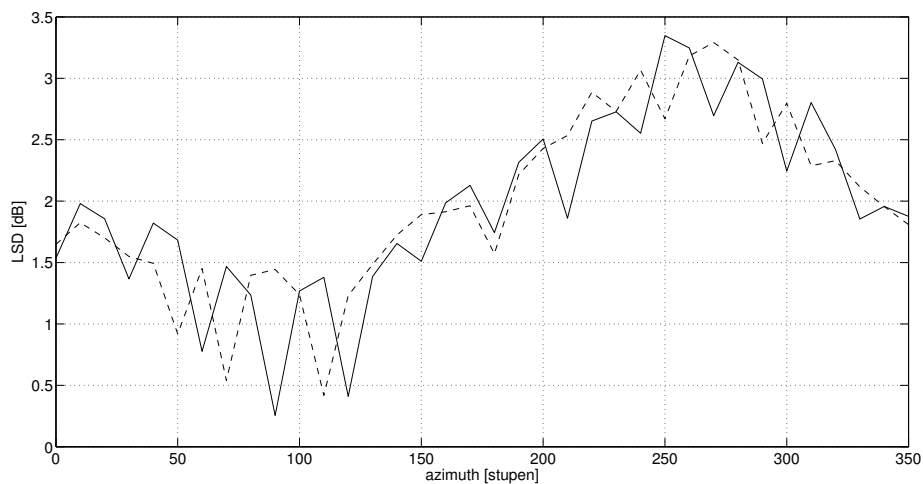
Na obrázku 31 jsou znázorněny výsledky měření logaritmické spektrální vzdálenosti pro 0° elevace pro levé ucho. Na obou grafech je zřejmé, že pro azimut 0° až 70° má navržená mřížka nižší hodnoty spektrálního rušení oproti rovnoměrné mřížce. Velmi význačným je také průběh LSD v dorzální části. Zde je navrhovaná mřížka v nevýhodě, jelikož jsou zde použity pouze tři body zatímco rovnoměrná mřížka obsahuje v dorsální části šest bodů. Nedochází zde však k výraznému nárůstu hodnot LSD oproti rovnoměrné mřížce. Prudké poklesy hodnot jsou způsobeny tím, že v daném místě (jako například 90° v případě rovnoměrného roz-

ložení) byly počítány hodnoty z originálních naměřených veličin, které se v testovaných vzorcích nachází a podle kterých byly dané sady interpolovány.

Itakurova-Saitova vzdálenost je používána k simulaci vjemu člověka vzhledem k rozdílům ve spektru. Vysoké hodnoty DIS signalizují velké rozdíly ve vjemu zvuku a nebezpečí špatného vyhodnocení směru příchodu. Na grafu 32 jsou vyznačeny všechny realizace. V rozsahu 150° až 300° může v obou případech dojít ke zhoršenému vjemu a tím i k špatnému vyhodnocení směru příchodu. Toto je způsobeno především tím, že levé ucho, kterému grafy náleží, je akusticky zastíněno hmotou hlavy člověka. Signál je v tomto případě nízký a zvyšuje se chybovost v lokalizaci. Tento fakt nezvyšuje ani velké množství bodů. Situaci v rozmezí 0° až 140° popisuje obrázek 33.

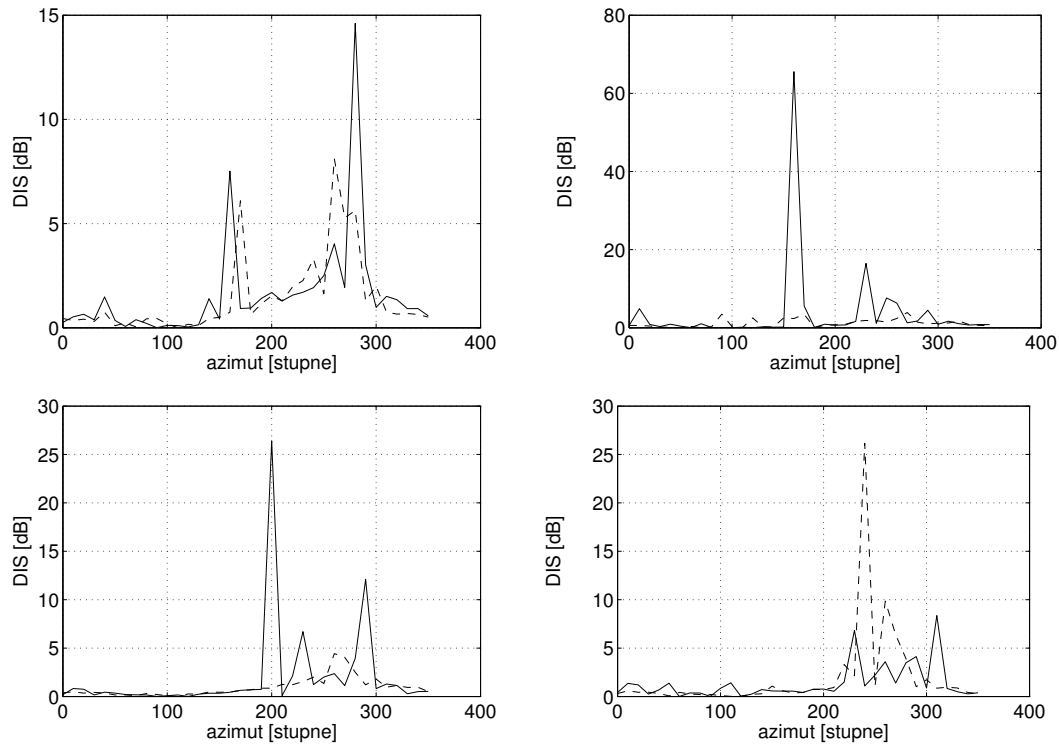
Zajímavým zjištěním je ovšem fakt, že v oblasti 90° až 180° nedochází k výraznějšímu zkreslení navrhovaného rozložení oproti rovnoměrnému rozložení. Toto podporuje myšlenku, že pro lokalizaci na základě frekvenční charakteristiky není dorsální část horizontální roviny citlivá, což podporují i data popsána v grafu 31. K tomuto závěru bylo přistoupeno po prozkoumání dalších doplňkových informací. Údaje pro levé ucho platí v průměru i pro ucho pravé kde je oblast citlivého sluchu samozřejmě v rozmezí 250° až 360° .

Jelikož oblast 0° až 140° azimutu vykazuje konstantní tendenci, byla tato oblast zkoumána a průměr dat je k dispozici v grafu 33. Je patrné, že zkreslení v rozsahu 0° až 110° je nízké nepočítaje 90° , kde dochází k velké chybě. Tato oblast ovlivňuje i další faktory, tento fakt je popsán v sekci 8.5.

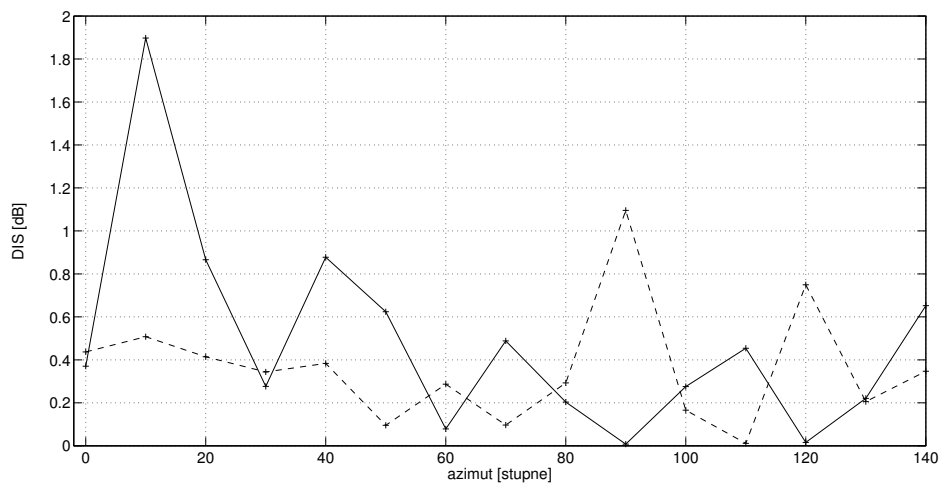


Obr. 31. Logaritmičká spektrální vzdálenosti pro rozsah 0° až 350° . Rovnoměrné rozložení je vyznačeno plnou čarou. Navrhované rozložení je vyznačeno přerušovaně.

8. Ověření platnosti měřicí sítě



Obr. 32. Příklad výsledků pro čtyři subjekty a pro rovnoměrné rozložení (plná křivka) a navrhované rozložení (přerušovaná křivka). Jako výsledek je uvedena Itakura-Saitova vzdálenost.

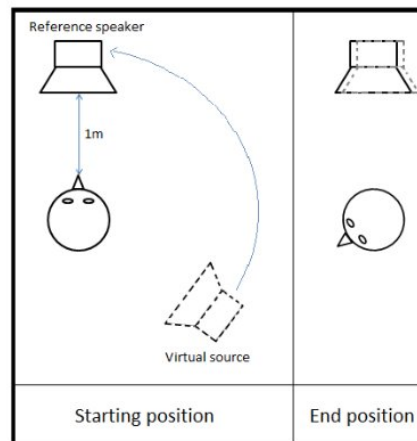


Obr. 33. Průměr všech realizací pro rozsah 0° až 140° pro rovnoměrné rozložení (plná křivka) a navrhované rozložení (přerušovaná křivka)

8.4. Subjektivní testování

8.4.1. Subjektivní test

Jako subjektivní test bylo využito měření navržené v [1]. Tato metoda využívá srovnávání virtuálního zdroje zvuku a reálného referenčního zdroje, jak je vidět na schématu 34. Samotné měření bylo provedeno v rámci bakalářské práce slečny Saniye Dyussekenové, která provedla subjektivní testy na subjektech měřených v rámci této diplomové práce. Data z měření byla poskytnuta slečnou Saniyou Dyussekenovou.



Obr. 34. Princip subjektivního testu. Převzato z [1].

Stimul:

Pro výběr stimulu byl proveden subjektivní test, kdy osm subjektů mělo za úkol ohodnotit rozlišitelnost téhož stimulu ve sluchátkách a z reproduktoru. Mezi možnými stimuly byl bílý, růžový, hnědý, modrý a šedý šum. Po vyhodnocení výsledků a diskuzi byl zvolen bílý šum, díky subjektivnímu hodnocení účastníků pokusu.

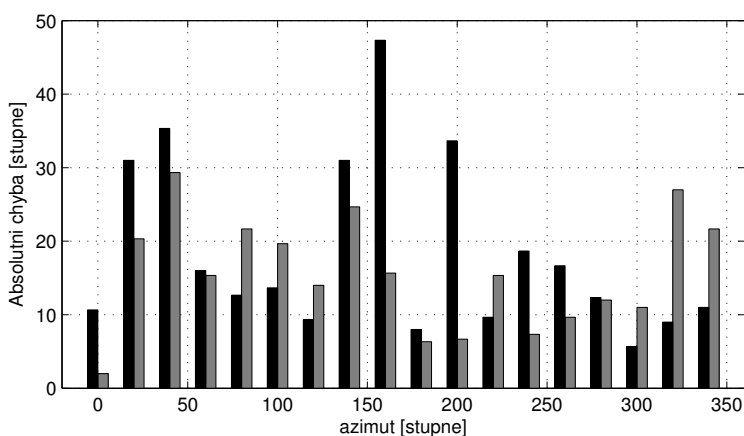
Stimul je tvořen třemi pulsy bílého šumu o délce 0.125 s z nichž každý je následovaný 0.025 s ticha.

Postup měření:

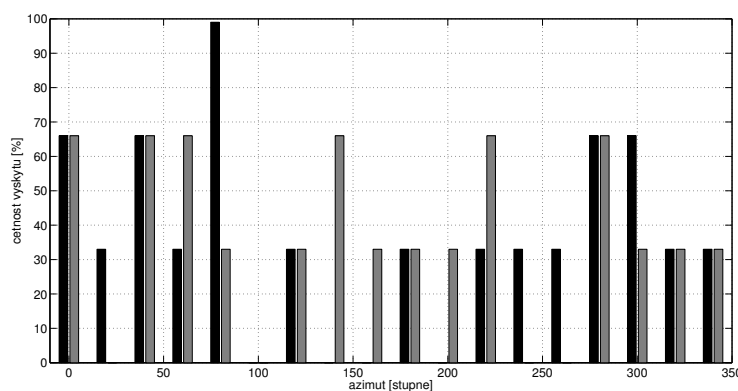
Subjekt byl umístěn na otočnou židli která se nacházela v akusticky upraveném prostoru. Ve vzdálenosti dvou metrů byl umístěn polohovatelný měřicí reproduktor. Subjekt byl vybaven sluchátky a upravenou klávesnicí. Reproduktor sloužil jako referenční zdroj zvuku. Subjektu byla poskytnuta sada akustických podnětů vytvořených pomocí konvoluce s interpolovanou sadou HRIR. Rovnoměrně byly zastoupeny záznamy interpolované nejdříve ze sítě rovnoměrné a později ze sítě navržené. Pořadí jednotlivých úhlů bylo znáhodněno, aby subjekt nebyl ovlivněn předchozími měřeními. Subjekt je následně vyzván, aby se otočil na otočné židli do pozice, která se překrývá s polohou zdroje.

8.4.2. Výsledky subjektivního testu

Výsledky měření jsou k dispozici v grafech 8.4.2 a 8.4.2 a jsou zatíženy velkou chybou. Problémem se ukázalo především určení předního a zadního směru. Z výsledných dat je patrné, že chyba lokalizace je úzce spjatá s určením ventrální či dorsální roviny. Jev s tímto spojený je nazývaný jako předozadní zmatení a je podrobněji rozepsán v diskuzi výsledků v sekci 8.6. Jelikož se jedná o odlišný typ chyby, byly veškeré výsledky přeneseny do přední části roviny. Průměrná absolutní chyba v přední polovině je vynesena v grafu 8.4.2 a četnost předozadního zmatení je zobrazena v grafu 8.4.2. Další výsledky budou popsány v práci slečny Dyussekenové.



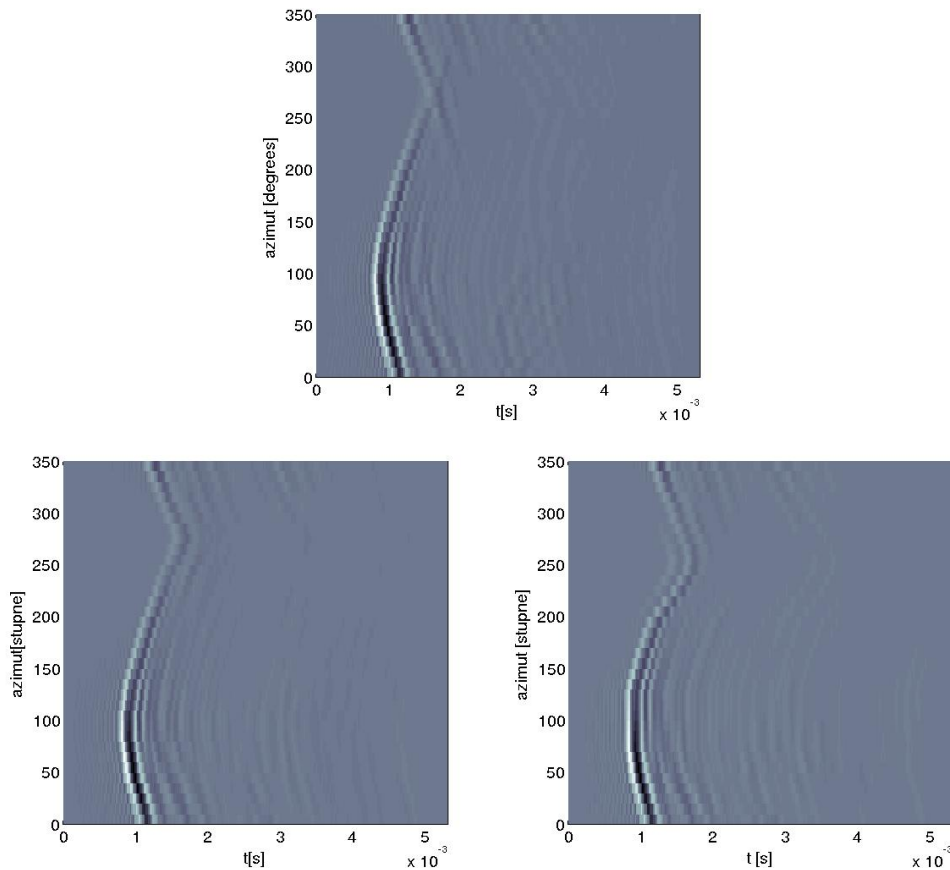
Obr. 35. Průměrná absolutní chyba lokalizace přenesená do přední polovině. Rovnoměrné rozložení je značeno černě. Navrhované rozložení je navrženo šedě.



Obr. 36. Četnost chyby předozadního zmatení. Rovnoměrné rozložení je značeno černě. Navrhované rozložení je navrženo šedě.

8.5. Posouzení vlivu na ITD

Kromě tří typů testů popsanych v oddílech 8.2 a 8.4 bylo provedeno i posouzení vzniklých interpolovaných HRIR záznamů a jejich srovnání s databází získanou z [26]. Po srovnání bylo zjištěno, že navrhovaná měřicí síť zkresluje tvar křivky zpoždění HRIR závislé na azimutu a to především nejbližší příchod (pro levé ucho 90°) a pro nejvzdálenější příchod (pro levé ucho 270°). Tím dochází ke zkreslení údajů o ITD, jak je vidět na obrázku 37. Rovnoměrná mřížka má v tomto bodě daleko lepší vlastnosti. Tyto poznatky byly použity k optimalizaci měřicí mřížky v sekci 8.6.5.



Obr. 37. Ukázka interpolace HRIR. Originální záznam HRTF (vlevo), Záznam interpolovaný pomocí rovnoměrné mřížky (uprostřed) a navržené mřížky (vpravo).

8.6. Diskuze výsledků

Z testů MSE, LSD, subjektivního testu a posudku vlivu na ITD byly vytvořeny následující závěry.

8.6.1. Závislost na elevaci

Z objektivního testu MSE je zřejmé, že efektivita interpolace ILD je závislá na počtu bodů a také na elevaci. Na obou částech roviny je zřejmé, že rozložení, které v příslušné části má více bodů také s rostoucí elevací zvyšuje mírně svou efektivitu (zkoumáno poměrem mezi MSE). Dále se ukázalo, že v elevaci nad 60° je již tato mřížka nepoužitelná z hlediska ITD a odchylka chyby prudce rostla.

8.6.2. Vliv rozložení v zadní rovině

Z výsledků LSD a Itakura-Saitovy vzdálenosti je zřejmé, že i přes dvojnásobný počet bodů v dorzální části se spektrální vzdálenost navržené mřížky příliš neodlišuje od rovnoměrné mřížky. Je tedy diskutabilní, zda jsou ony přidané body v této oblasti potřebné. Tento poznatek navíc koresponduje s vyšší hodnotou MAA v zadní rovině oproti přední rovině.

8.6.3. Předozadní zmatení

I když jsou výsledky subjektivního testu neprůkazné, ukazují na jeden společný fakt. Pro subjekty bylo velmi obtížné správně určit, zda se testovaný bod nachází v přední nebo zadní části horizontální roviny. Tento problém je pochopitelný, jelikož parametry ILD a ITD jsou pro 0° a 180° identické. Člověk se spoléhá pouze na filtračních vlastnostech boltece. Jelikož body 0° a 180° byly součástí měřicí sady, která byla subjektům měřena, interpolaci tudíž není možné považovat za zdroj nepřesnosti. Za tu lze považovat metodiku měření HRTF či subjektivního testu.

8.6.4. Závislost průběhu ITD na pozici bodů

Byl posouzen vliv bodů v horizontální rovině na zpoždění jednotlivých impulzních odezev a zároveň i na ITD. Zde bylo zjištěno, že nejdůležitějšími body pro správné tvarování křivky jsou body 90° a 270° v azimutu.

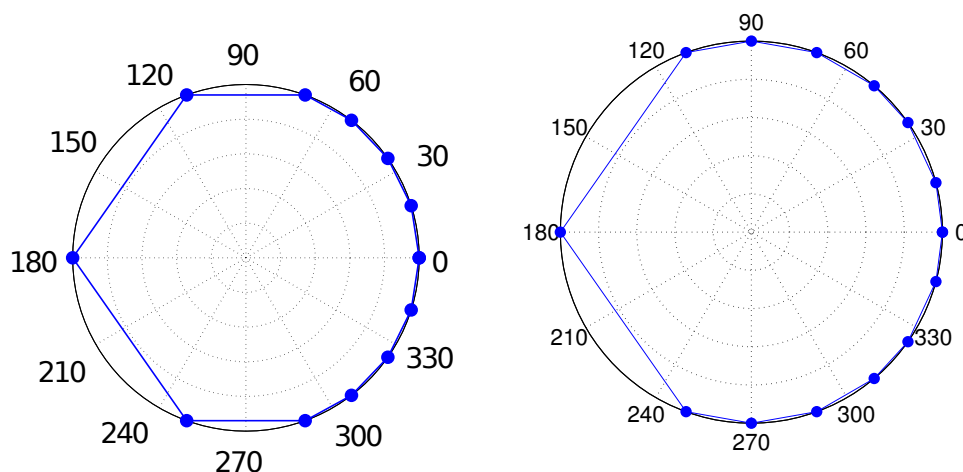
8.6.5. Optimalizace navržené mřížky

Na základě získaných poznatků z objektivních testů MSE, LSD a ze zkoumání vlivu na ITD byla navrhovaná mřížka modifikována. Modifikace navržené mřížky je zobrazena na obrázku 38.

Původní navrhovaná mřížka
(0° , 15, 35, 50, 70, 110, 180, 250, 290, 310, 325, 345)

Modifikovaná mřížka
(0, 15, 35, 50, 70, 90, 110, 180, 250, 270, 290, 305, 325, 345)

K modifikované mřížce byly přidány body 90° a 270° a to na základě výpočtů Itakurovy-Saitovy vzdálenosti v grafu 32, kde nabývá v těchto místech tato metrika velkých hodnot. Než byla stanovena tato nová mřížka, byla otestována jiná mřížka, která obsahovala 12 bodů. V této mřížce odpovídal úhlový krok v azimutu 23° z původních $17,5^\circ$. Kvůli nežádoucímu zhoršení výsledků ve ventrální části horizontální roviny byl však tento model opuštěn a k původní mřížce byly pouze přidány dva body uvedené výše v odstavci. Modifikované rozložení tedy obsahuje 14 bodů.



Obr. 38. Původní navrhovaná mřížka (vlevo) a modifikovaná mřížka na základě získaných poznatků (vpravo).

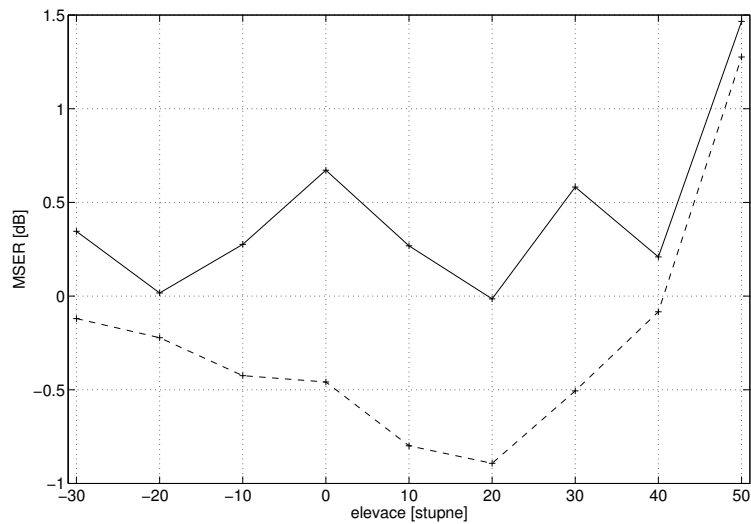
8.6.6. Srovnání modifikace navržené mřížky

Modifikace navržené mřížky byla podrobena stejné sérii testů jako původní navržená mřížka. Byl testován vliv na MSER a Itakura-Saitovu vzdálenost. Výsledky jsou zobrazeny na grafech 39, 40 a 39, kde je zobrazeno MSER původního navrženého rozvržení a jeho modifikace vůči rovnoměrné mřížce a 42, kde je zobrazena Itakura-Saitova vzdálenost rovnoměrné, původní navržené a modifikované navržené mřížky.

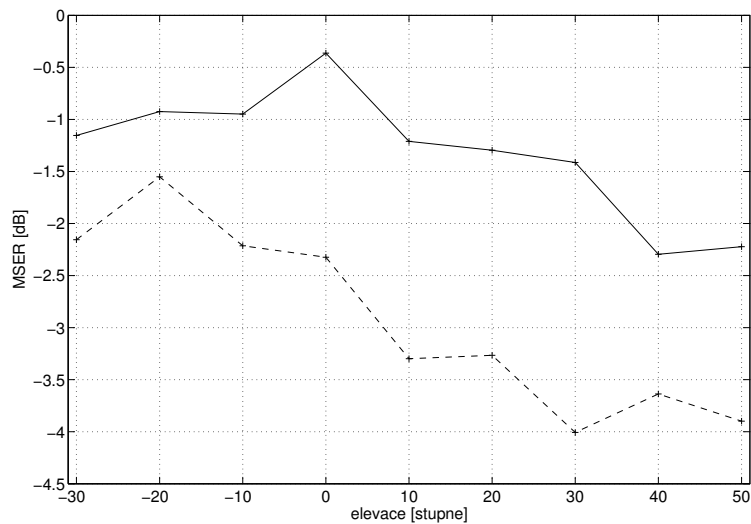
Jak je z výše zmíněných grafů zjevné, došlo k výraznému zlepšení ve všech parametrech, které byly zkoumány. Překvapivě došlo i k prudkému zlepšení ve ventrální rovině u testů MSER. Z toho je patrné, že neexistence měřicího bodu 90° zanašela do výpočtů výraznou chybu. Itakura-Saitova vzdálenost ukazuje, že doplnění 90°

8. Ověření platnosti měřicí sítě

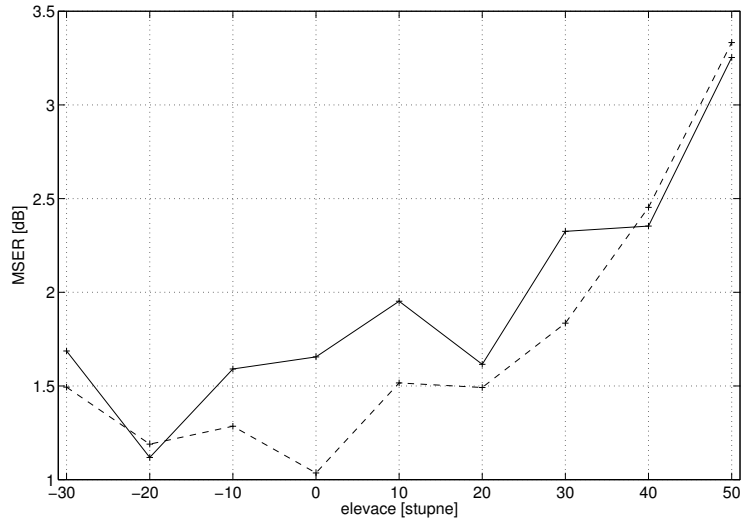
má dobrý vliv i na vlastnosti bodů, které se již nenachází v jeho blízkosti. Toto se týká Hermitovy kubické interpolace, kde je kladen důraz na spojitou první derivaci funkce.



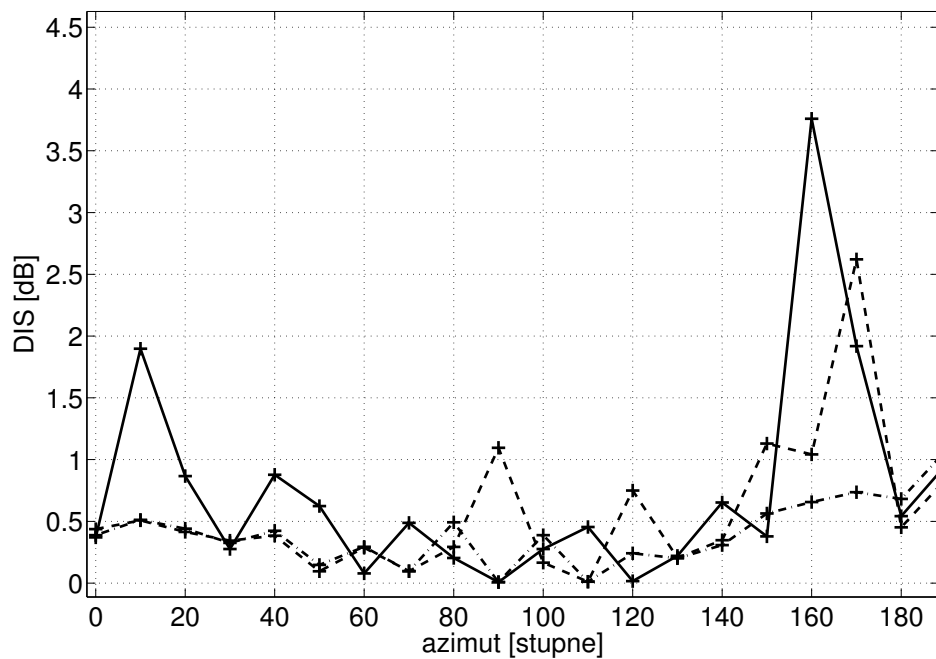
Obr. 39. Srovnání MSER pro původní navrhovanou mřížku (plná křivka) a modifikovanou křivku (přerušovaná křivka) pro plný rozsah azimutu.



Obr. 40. Srovnání MSER pro původní navrhovanou mřížku (plná křivka) a modifikovanou křivku (přerušovaná křivka) pro ventrální část roviny.



Obr. 41. Srovnání MSER pro původní navrhovanou mřížku (plná křivka) a modifikovanou křivku (přerušovaná křivka) pro dorsální část roviny.



Obr. 42. Itakura-Saitova vzdálenost pro rozsah 0 až 180° azimutu s využitím rovnoměrné mřížky (plná křivka), navržené mřížky (přerušovaná křivka) a její modifikace (čerchovaná křivka).

8.6.7. Hustota bodů azimutu v závislosti na elevaci

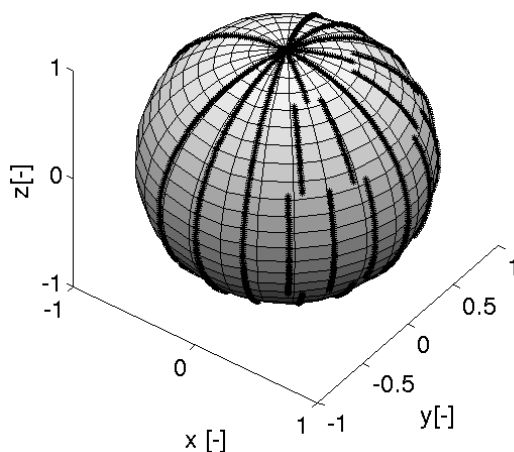
Z výsledků MSER pro ventrální část je patrné, že s rostoucí elevací roste účinnost interpolace vůči rovnoměrnému rozložení v obou případech navržené mřížky. Tato část se skládá z rovnoměrného rozložení, kde je specifikováno jen několik krizových bodů, a to 0° , 90° a 270° v azimutu. Aproximací MSER přímkou v závislosti na kmitočtu byl vytvořen návrh na četnost bodů, které se nachází v rozsahu -90° až 90° , který odpovídá

$$N \doteq M(1 - \alpha\|\xi\|) - 3, \quad (44)$$

kde N je množství bodů, které se rovnoměrně rozloží v rozmezí -90° až 90° , ξ je elevace, M je požadované množství bodů, které se mají rozložit na ventrální části horizontální roviny a α je sklon přímky aproximující úbytek množství bodů. Pro výše navrhované rozložení se čtrnácti body platí, že $\alpha = 0.25$ a $M = 11$. Rozložení pro maximum 14 bodů je zobrazeno na grafu 43 a tabulce 5.

Tab. 5. Navržená měřicí mřížka. Údaje jsou uvedeny ve stupních.

elevace	Azimut													
-50 až -30	0	25		50	70	90	110	180	250	270	290	315		340
-29 až 24	0	15	35	50	70	90	110	180	250	270	290	305	325	345
25 až 55	0	25		50	70	90	110	180	250	270	290	315		340
56 až 90	0		35		70	90	110	180	250	270	290		325	



Obr. 43. Ukázka pásem pro navržené rozložení.

9. Závěr a zhodnocení

9.1. Měřicí mřížka

S využitím korelačních koeficientů a kritérií byla navržena měřicí mřížka pro obecnou elevaci, která slouží k měření HRTF. Následně byla tato mřížka podrobena srovnání s referenční mřížkou, kterou byla rovnoměrná mřížka s krokem 30 stupňů. Objektivní srovnání podpořila především nezbytnost měření na 0, 90, 180 a 270 stupních pro určení základních parametrů všech HRTF záznamů na konstantní elevaci. Dále byly stanoveny čtyři doplňkové body na azimutech 70, 110, 250 a 290.

9.1.1. Objektivní srovnání

Objektivní testování bylo rozděleno do dvou nezávislých testů. Test pracovně nazvaný MSE a test LSD. Oba testy využívaly databáze HRTF ARI popsané na stránkách a využívaly dva způsoby rozložení měřicí mřížky. [26].

Test MSE využíval 84 subjektů a slouží k otestování měřicí mřížky na velkém vzorku pro různé elevace. Test dokázal význam počtu bodů, které se účastní interpolace je daleko vyšší než samotné přesné umístění bodů. Také ukázal zajímavý trend, kdy s rostoucí elevací rostla i účinnost rozložení, které mělo více bodů v dané části horizontální roviny (tj. že MSE oproti druhé mřížce klesalo s rostoucí elevací). To naznačuje, že s rostoucí elevací by se mohl zmenšovat počet použitých bodů při zachování účinnosti interpolace.

Test LSD se zaměřoval na zkreslení spektra interpolovaného přes navrhovanou mřížku Hermitovou kubickou interpolací a také na otestování interpolačního skriptu. Byl především testován vliv na azimut. Výsledky naznačují, že v rozsahu azimutu 90 až 270 stupňů nevede přítomnost dalších bodů k významné změně zkreslení spektra oproti zkreslení zaznamenanému u rovnoměrné mřížky. Proto je v této části třeba soustředit se na principy ITD a ILD. Zkreslení ILD je popisováno především při měření pomocí MSE, kde je chyba významnější s rostoucí elevací. Na zkreslení ITD se zaměřilo srovnání ITD, kde bylo zjištěno, že zpoždění impulzní odezvy, jenž je funkcí azimutu je v případě navržené mřížky značně zkreslena oproti rovnoměrnému rozložení. Toto bylo vzato na vědomí při modifikaci navržené mřížky.

9.1.2. Subjektivní srovnání

V rámci bakalářské práce slečny Saniyy Dyusekenové, která se zabývá měřením HRTF, byla provedena sada subjektivních testů na třech subjektech. Těm bylo

předtím změřeno HRTF pomocí rovnoměrné a navržené mřížky při elevaci 0 stupňů. Výsledky nebyly prokazatelné, neboť jak navržená tak rovnoměrná mřížka byly zatíženy velkou chybou.

9.2. Modifikace

Na základě výsledků objektivního testu byly provedeny úpravy na navržené mřížce. Do stávající navržené mřížky byly přidány dva body, které po novém testování zpřesňují vlastnosti ITD, průměrné hodnoty ILD a zlepšují spektrální vlastnosti v dorsální části horizontální roviny. Na základě výsledků MSER byla navržená mřížka modifikována a podrobena nové sadě objektivních testů. Výsledkem bylo výrazné zlepšení všech parametrů, především pak celkové MSER. Takováto navržená mřížka se zdá výhodnější než původní rovnoměrná mřížka.

9.3. Interpolační skript

Pro potřeby interpolace naměřených dat byl vytvořen interpolační skript HRTF interpolation, který umožňuje zpracovat naměřená data. Umožňuje výběr mezi Hermitovou kubickou interpolací a lineární interpolací. Dále umožňuje nastavit interpolační krok a umožňuje také zpracovávat základní informace o subjektu jako je jméno, číslo, pohlaví a věk. Samotný interpolační skript byl otestován později v objektivním srovnání. Zvláštní část byla věnována interpolaci zpoždění impulzní odezvy, která je potřebná k zachování spojitosti HRTF záznamů v azimutu.

9.4. Závěr

Práce se zaměřovala především na optimalizaci rozmístění měřicích bodů a jejich vliv na polohování v horizontální rovině. Interpolace se zaměřuje pouze na horizontální rovinu. Byly nalezeny body, které jsou důležité pro formování jednotlivých principů směrového slyšení a stanoveny některé základní předpoklady, na které lze navázat další práci. V tom případě by bylo vhodné rozšířit použité testy i na jiné druhy interpolování HRTF jako například sférického Fourierova rozvoje. Omezením se však pouze na lineární a Hermitovu kubickou interpolaci bylo možné vytvořit interpolační skript v programu MATLAB, který je možné v dalších fázích projektu snadno upravit a rozšiřovat.

Použitá literatura

- [1] Tomáš BARÁTH. *Localization Test in Virtual Acoustic Space*. 2013.
- [2] Martina BERNACÍKOVÁ. *Orientace na lidském těle*. web. 2010. URL: http://is.muni.cz/do/1451/e-learning/kineziologie/elportal/pages/orientace_na_tele.html.
- [3] Jason BURINJHAME and Robert BUTLER. “The effects of attenuation of frequency segments on binaural localization of sound”. English. In: *Perception Psychophysics* 60.8 (1998), pp. 1374–1383. ISSN: 0031-5117. DOI: 10.3758/BF03207999. URL: <http://dx.doi.org/10.3758/BF03207999>.
- [4] University of California Davis. *Psychoacoustics of Spatial Hearing*. 2011. URL: http://etc.usf.edu/clipart/56600/56610/56610_pinna.htm (visited on 03/15/2014).
- [5] Citizendium. *Spherical Harmonics*. URL: http://en.citizendium.org/wiki/Spherical_harmonics.
- [6] ŠTOREK Dominik and RUND František. “Differential Head Related Transfer Function as a new approach to virtual sound source positioning”. In: *Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2012 22nd International Conference*. 2012, pp. 1–4.
- [7] Hannes GAMPER. “Head-related transfer function interpolation in azimuth, elevation, and distance”. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 134.6 (2013), EL547–EL553. DOI: <http://dx.doi.org/10.1121/1.4828983>. URL: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/134/6/10.1121/1.4828983>.
- [8] Hannes GAMPER. “Selection and interpolation of Head-related Transfer Functions for Rendering Moving Virtual Sound Sources”. In: *DAFx-13* (2013).
- [9] Ivana HOROVÁ and Jiří ZELINKA. *Numerické metody*. cze. 2. Brno: Masarykova univerzita v Brně, 2008. ISBN: 971-80-210-3317-7.
- [10] Qinghua HUANG and Yong FANG. “Interpolation of head-related transfer functions using spherical fourier expansion”. English. In: *Journal of Electronics (China)* 26.4 (2009), pp. 571–576. ISSN: 0217-9822. DOI: 10.1007/s11767-009-0048-9. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11767-009-0048-9>.
- [11] Yiteng HUANG, Jacob BENESTY, and Jingdong CHEN. *Acoustic MIMO Signal Processing (Signals and Communication Technology)*. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2006. ISBN: 3540376305.

- [12] Florida Center for Instructional Technology. *ClipArt ETC*. 2014. URL: http://etc.usf.edu/clipart/56600/56610/56610_pinna.htm (visited on 03/15/2014).
- [13] Bernd ISER, Wolfgang MINKER, and Gerhard SCHMIDT. *Bandwidth extension of speech signals*. Vol. 13. Springer, 2008.
- [14] BLAUERT Jens. *Spatial Hearing: the psychophysics of human sound localization*. Edition 3. MIT, 1997. ISBN: 80-7302-049-1.
- [15] Ondřej JIŘÍČEK. *Úvod do akustiky*. Vydavatelství ČVUT, 2002.
- [16] Dimitris MANOLAKIS and Vinay INGLE. *Applied Signal Processing*. Cambridge University Press, 2011.
- [17] Brian MOORE. *An Introduction to the Psychology of Hearing, Fifth Edition*. Academic Press, 2003. ISBN: 0125056281.
- [18] Brian MOORE. *Hearing*. Edition 1. Academic press, 1995. ISBN: 01-250-5626-5.
- [19] Takanori NISHINO et al. “Interpolating head related transfer functions in the median plane”. In: *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 1999 IEEE Workshop on*. 1999, pp. 167–170. DOI: 10.1109/ASPAA.1999.810876.
- [20] Anthony RALSTON, Milan PRÁGER, and Emil VITÁSEK. *Základy numerické matematiky: příručka pro university ČSR*. Academia, 1973.
- [21] František RUND, Jaroslav BOUŠE, and Tomáš BARÁTH. “Comprehensive MATLAB Tool for HRTF Measurement and Virtual Auditory Space Testing”. In: *21st Annual Conference Proceedings Technical Computing Prague (2013)*.
- [22] Václav SYROVÝ. *Hudební akustika*. Akademie múzických umění, 2003.
- [23] Saeed VASEGHI. *Multimedia Signal Processing*. Wiley, 2007.
- [24] František VEJRAŽKA. *Signály a soustavy*. Edition 1. ČVUT, 1992. ISBN: 80-01-00450-3.
- [25] Václav VENCOVSKÝ. “Pure Tone Audiometer”. In: *20th Annual Conference Proceeding’s Technical Computing*. 2012. URL: http://www2.humusoft.cz/www/papers/matlab12/088_Vencovsky.pdf.
- [26] Acoustic Research Institute in Vienna. *ARI HRTF Database*. 2014. URL: http://www.kfs.oeaw.ac.at/index.php?option=com_content&view=article&id=608&Itemid=606&lang=en (visited on 03/12/2014).
- [27] Lin WANG, Fuliang YIN, and Zhe CHEN. “Head-related transfer function interpolation through multivariate polynomial fitting of principal component weights”. In: *Acoustical Science and Technology* 30.6 (2009), pp. 395–403.
- [28] Jie ZHANG and Zhenyang WU. “A piecewise interpolation method based on log-least square error criterion for HRTF”. In: *Multimedia Signal Processing, 2005 IEEE 7th Workshop on*. IEEE. 2005, pp. 1–4.

- [29] Dominik ŠTOREK. “Aspects of Influence of the Microphone Attachment in HRTF Measuring”. In: *Poster 2012*. 2012.
- [30] Dominik ŠTOREK. “Virtual Sound Source Positioning by Differential Head Related Transfer Function”. In: *Audio Engineering Society Conference: 49th International Conference: Audio for Games*. 2013. URL: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16656>.
- [31] Dominik ŠTOREK and Richard SUCHAN. “Analysis of the Problems in HRTF Measuring”. In: *Poster 2011*. 2011.
- [32] Martin ŠVEJDA. *Polohování virtuálního zdroje zvuku na signálovém procesoru*. 2012.

Seznam příloh na DVD

Zde se nachází výpis všech složek uložených na DVD.

DP

- **DP_lindner.pdf** - PDF verze diplomové práce.

SCRIPTS

Skripty používané při řešení projektu.

INTERP_SCRIPT

Skripty a funkce používané ve skriptu HRTF Interpolation pro program MATLAB. Více informací o skriptu v kapitole 6. Skript je aktivován spuštěním inicializačního skriptu **INDEX.m**.

KM_SCRIPT

Skripty použité při určování měřicí mřížky. Tato práce je popsána v kapitole 5.

- **lindy_kor3.m** - Slouží ke generování korelačních map. Ke své práci využívá skripty **lindy_kor2.m** a **lindy_kor2.m**.
- **kriteria_stat_elev.m** a ke své práci potřebuje databázi HRTF záznamů vygenerovaných pomocí **lindy_kor3.m** a dále skripty **kriteria_stat.m** a **kriteria.m**

MSE_SCRIPT

Skripty použité při určování měřicí mřížky. Tato práce je popsána v kapitole 5

- **MSE.m** - skript vstupuje do databáze ARI, vybírá vzorky na základě mapy uložené pro dva případy rozložení a pomocí vybrané interpolace interpoluje data v konstantní elevaci. Interpolovaná data nakonec srovná pomocí kritéria MSE a MSER. Pro svou práci potřebuje skript **nacitani_HRTF_ARI.m**.

FOTO

Fotografie ilustrující měření HRTF, audiogramu a průběh subjektivního testu.

- **AUDIO<ID>.JPG** - měření audiogramu.
- **MEASU<ID>.JPG** - měření HRTF.
- **SUBTEST<ID>.JPG** - subjektivní test.

DATA_MSE

Naměřené výsledky MSE a MSER pro původní rozdělení (BC1) a pro modifikované rozdělení (BC2).

DATA_HRIR_EXAMPLE

Příklad používaných záznamů HRIR.

DATA_KORMAP_EXAMPLE

Příklad generovaných korelačních map.

Seznam příloh

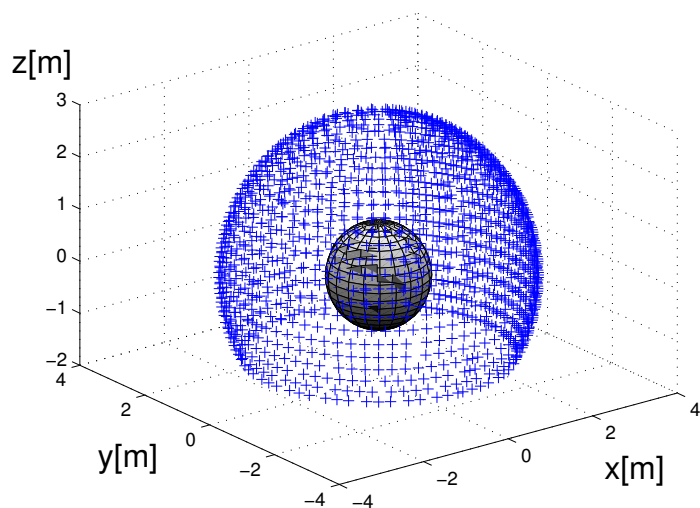
- **Příloha A:** Parametry HRTF databáze ARI
- **Příloha B:** Objektvní měření - výsledky MSER
- **Příloha C:** Informace o subjektech
- **Příloha D:** Subjektvní test - výsledky
- **Příloha E:** Měření audiogramu - obrazová příloha
- **Příloha F:** Měření HRTF - Obrazová příloha

Příloha A.

Parametry HRTF database ARI

Druh záznamu	HRIR
Počet subjektů	84
Počet záznamů na subjekt	2x1550
Rozsah měření v azimutu	0-359 stupňů
Rozsah měření v elevaci	-30 - 90 stupňů
Úhlový krok azimut/elevace	2.5 stupně / 5 stupňů
Vzorkovací frekvence	48kHz
Rozlišení	24bit
Počet vzorků na záznam	256

Tab. 6. Základní parametry databáze [26].



Obr. 44. Příklad rozložení měřených bodů v databázi [26]

Příloha B.

Objektivní měření - Výsledky MSER

Tab. 7.

Lineární interpolace (0° až 360°)												
Elevance [°]	MSE_eq			MSE_bc			MSER[dB]					
	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]		MSER[dB]	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]	MSER[dB]	
-30	0,032	0,014	0,038	0,015	0,038	0,015	0,66	0,032	0,014	0,038	0,015	0,66
-20	0,035	0,016	0,038	0,016	0,038	0,016	0,39	0,035	0,016	0,038	0,016	0,39
-10	0,035	0,014	0,040	0,014	0,040	0,014	0,53	0,035	0,014	0,040	0,014	0,53
0	0,029	0,015	0,036	0,015	0,036	0,014	0,90	0,029	0,015	0,036	0,014	0,90
10	0,032	0,014	0,036	0,014	0,036	0,012	0,53	0,032	0,014	0,036	0,012	0,53
20	0,031	0,015	0,034	0,015	0,034	0,012	0,39	0,031	0,015	0,034	0,012	0,39
30	0,028	0,014	0,034	0,014	0,034	0,012	0,90	0,028	0,014	0,034	0,012	0,90
40	0,027	0,014	0,031	0,014	0,031	0,011	0,52	0,027	0,014	0,031	0,011	0,52
50	0,025	0,012	0,036	0,012	0,036	0,011	1,63	0,025	0,012	0,036	0,011	1,63
Hermitova kubická interpolace (0° až 360°)												
Elevance [°]	MSE_eq			MSE_bc			MSER[dB]					
	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]		MSER[dB]	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]	MSER[dB]	
-30	0,032	0,015	0,037	0,015	0,037	0,015	0,59	0,032	0,015	0,037	0,015	0,59
-20	0,035	0,016	0,037	0,016	0,037	0,016	0,24	0,035	0,016	0,037	0,016	0,24
-10	0,035	0,014	0,039	0,014	0,039	0,014	0,44	0,035	0,014	0,039	0,014	0,44
0	0,029	0,015	0,035	0,015	0,035	0,014	0,85	0,029	0,015	0,035	0,014	0,85
10	0,032	0,014	0,035	0,014	0,035	0,012	0,42	0,032	0,014	0,035	0,012	0,42
20	0,031	0,015	0,032	0,015	0,032	0,012	0,17	0,031	0,015	0,032	0,012	0,17
30	0,027	0,014	0,033	0,014	0,033	0,012	0,77	0,027	0,014	0,033	0,012	0,77
40	0,026	0,014	0,029	0,014	0,029	0,011	0,46	0,026	0,014	0,029	0,011	0,46
50	0,023	0,012	0,035	0,012	0,035	0,011	1,74	0,023	0,012	0,035	0,011	1,74

Tab. 8.

Hermitova kubická interpolace (-90° až 90°)							
Elevace [°]	MSE_eq			MSE_bc			
	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]	MSE [-]	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]	MSE [-]	MSEER [dB]
-30	0,034	0,016	0,026	0,012	0,012	0,012	-1,15
-20	0,040	0,019	0,033	0,017	0,017	0,017	-0,92
-10	0,040	0,018	0,032	0,015	0,015	0,015	-0,96
0	0,030	0,018	0,028	0,015	0,015	0,015	-0,32
10	0,038	0,020	0,029	0,015	0,015	0,015	-1,23
20	0,039	0,022	0,029	0,017	0,017	0,017	-1,30
30	0,030	0,020	0,022	0,013	0,013	0,013	-1,40
40	0,030	0,021	0,017	0,014	0,014	0,014	-2,34
50	0,021	0,017	0,012	0,011	0,011	0,011	-2,25
Hermitova kubická interpolace (90° – 270°)							
Elevace [°]	MSE_eq			MSE_bc			
	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]	MSE [-]	Průměr MSE [-]	St. odchylka MSE [-]	MSE [-]	MSEER [dB]
-30	0,029	0,017	0,047	0,020	0,020	0,020	2,04
-20	0,029	0,015	0,041	0,017	0,017	0,017	1,52
-10	0,029	0,014	0,045	0,015	0,015	0,015	1,88
0	0,027	0,014	0,042	0,014	0,014	0,014	1,91
10	0,025	0,011	0,041	0,012	0,012	0,012	2,20
20	0,023	0,010	0,036	0,010	0,010	0,010	1,93
30	0,024	0,011	0,043	0,014	0,014	0,014	2,55
40	0,022	0,010	0,041	0,013	0,013	0,013	2,70
50	0,025	0,011	0,057	0,016	0,016	0,016	3,56

Příloha C.

Informace o subjektech

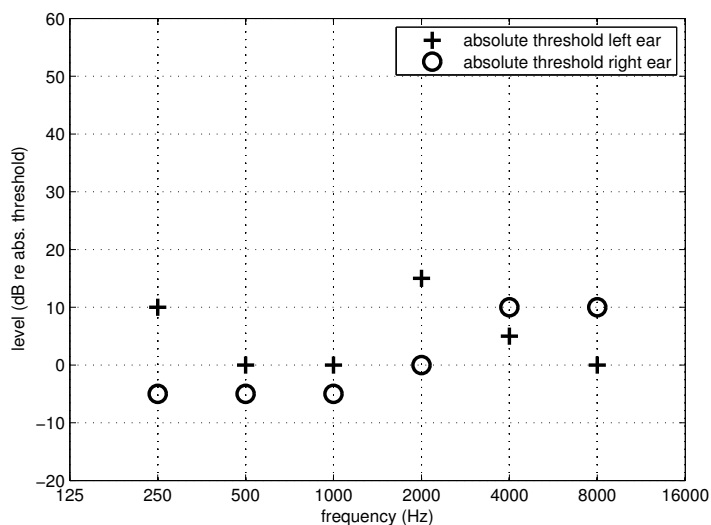
C.1. Subjekt 1 - Bc. Martin Ládyš

C.1.1. Popis subjektu

Pohlaví: Muž

Datum narození: 18.5.1988

C.1.2. Audiogram



C.1.3. Podmínky měření

Datum měření: 19.3.2013

Místo měření: Laboratoř CAT. A4:303 ČVUT-FEL Technická 2, Praha 6

Měřicí program: EASERA

Měřicí signál: Logaritmický Sweep Vzorkovací kmitočet 48kHz

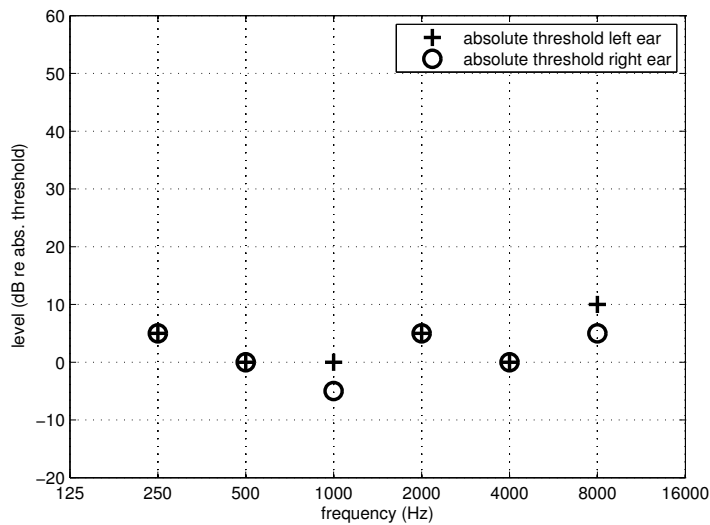
C.2. Subjekt 2 - Bc. Tomáš Lindner

C.2.1. Popis subjektu

Pohlaví: Muž

Datum narození: 25.8.1989

C.2.2. Audiogram



C.2.3. Podmínky měření

Datum: 9.4.2014

Místo: Laboratoř CAT. A4:303 ČVUT-FEL Technická 2, Praha 6

Měřicí program: EASERA

Měřicí signál: Logaritmický růžový sweep Vzorkovací kmitočet 48kHz

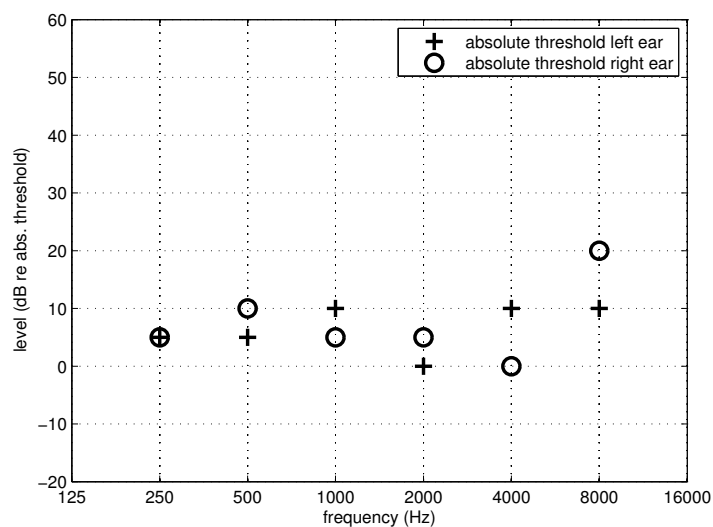
C.3. Subjekt 3 - Jan Zmatlík

C.3.1. Popis subjektu

Pohlaví: Muž

Datum narození: 19.1.1990

C.3.2. Audiogram



C.3.3. Podmínky měření

Datum: 9.4.2014

Místo: Laboratoř CAT. A4:303 ČVUT-FEL Technická 2, Praha 6

Měřicí program: EASERA

Měřicí signál: Logaritmický růžový sweep Vzorkovací kmitočet 48kHz

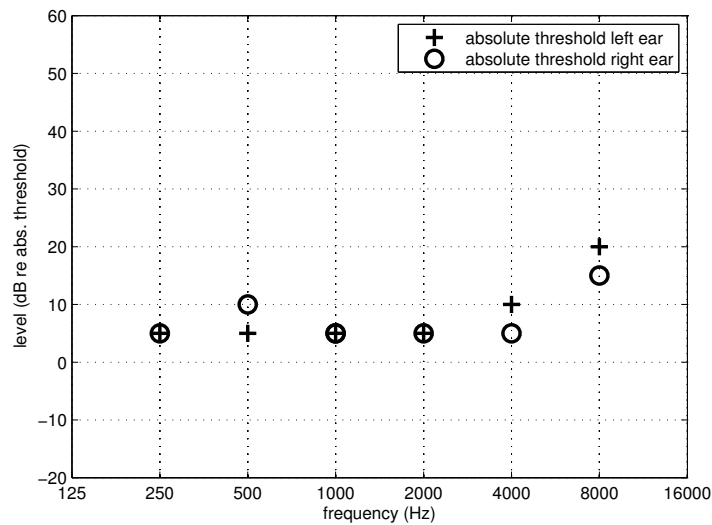
C.4. Subjekt 4 - Mgr. Kateřina Mudroňová

C.4.1. Popis subjektu

Pohlaví: Žena

Datum narození: 5.4.1988

C.4.2. Audiogram



C.4.3. Podmínky měření

Datum: 14.4.2014

Místo: Laboratoř CAT. A4:303 ČVUT-FEL Technická 2, Praha 6

Měřicí program: EASERA

Měřicí signál: Logaritmičtý ruřový sweep Vzorkovací kmitočet 48kHz

Příloha D.

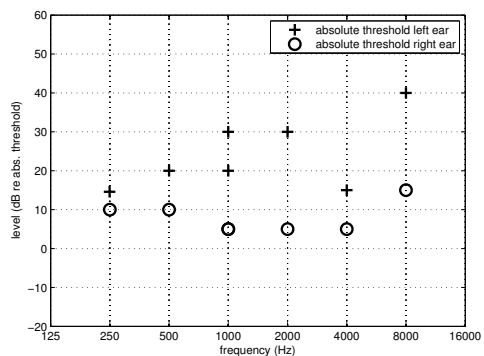
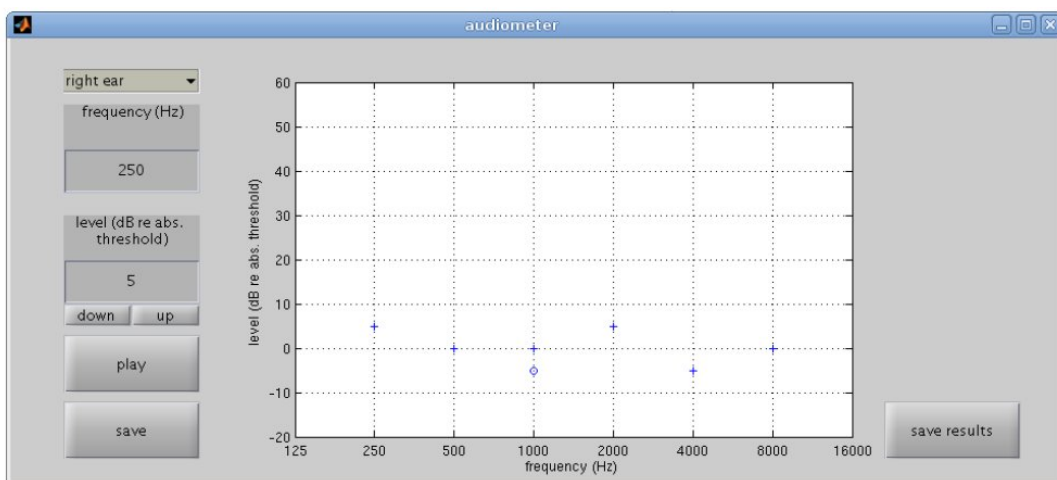
Subjektivní test - výsledky

Tab. 9.

Azimut [°]	0	20	40	60	80	100	120	140	160
Průměr EQ [°]	10,67	31,00	35,33	16,00	12,67	13,67	9,33	31,00	47,33
Odchylka EQ [°]	9,81	11,00	4,16	13,89	7,51	7,23	1,15	21,93	34,08
FBC EQ [%]	66,60	33,30	66,60	33,30	100,00	0,00	33,30	0,00	0,00
Průměr BC [°]	2,00	20,33	29,33	15,33	21,67	19,67	14,00	24,67	15,67
Odchylka BC [°]	1,73	6,03	17,21	7,51	17,56	17,47	11,53	20,53	6,03
FBC BC [%]	66,60	0,00	66,60	66,60	33,30	0,00	33,30	66,60	33,30
Azimut [°]	180	200	220	240	260	280	300	320	340
Průměr EQ [°]	8,00	33,67	9,67	18,67	16,67	12,33	5,67	9,00	11,00
Odchylka EQ [°]	7,94	30,02	12,50	8,08	20,43	12,10	2,08	7,81	10,15
FBC EQ [%]	33,30	0,00	33,30	33,30	33,30	66,60	66,60	33,30	33,30
Průměr BC [°]	6,33	6,67	15,33	7,33	9,67	12,00	11,00	27,00	21,67
odchylka BC [°]	5,86	4,16	8,74	2,52	10,69	17,44	7,94	7,00	18,77
FBC BC [%]	33,30	33,30	66,60	0,00	0,00	66,60	33,30	33,30	33,30

Příloha E.

Měření audiogramu - Obrazová příloha



Příloha F.

Měření HRTF - Obrazová příloha

