

Optimalizace měření a zpracování HRTF

T. Lindner

Katedra radioelektroniky, Fakulta elektrotechnická,
České vysoké učení technické v Praze, Česká republika

Abstrakt

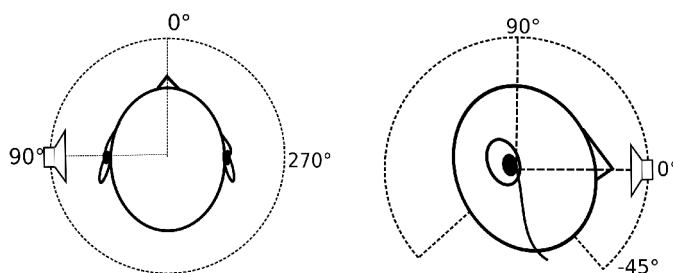
Článek se zabývá možnostmi omezení počtu měření HRIR. Záznamů je v tomto případě naměřeno menší množství a chybějící vzorky jsou ve frekvenční rovině (Head Related Transfer Function – HRTF) dopočteny interpolací. Zabývá se především určením měřicí sítě, která bude použitelná pro následnou interpolaci při maximálním snížení počtu měřicích bodů (z 1550 na 10 až 100 bodů).

1 Head Related Impulse Response

Problematika prostorového slyšení je v dnešní době populární téma. Mechanismy slyšení umožňují člověku určit přesně směr příchodu akustické vlny a určit tím polohu zdroje. Vytvoření tohoto vjemu umělou cestou (skrz elektroakustické převodníky jako například reproduktor či sluchátka) nabízí velký rozsah použití, ať už se jedná o spotřební elektroniku či asistenční pomůcky.

Během let se objevilo mnoho způsobů jak vytvořit dojem prostorového zvuku. Dolby 5.1, WaveField syntéza ad. Jedním ze zkoumaných přístupů je využití HRIR (Head-Related Impulse Response). Tato metoda, na rozdíl od jiných, potřebuje pro svou funkci stereofoních sluchátek [6]. Přenos zvuku na vstup zvukovodu je možné popsat impulsní odezvou. Výhodou tohoto přístupu je možnost věrné reprodukce směru příchodu pomocí konvoluce. Nevýhodou pak to, že vytvořený záznam je platný pouze pro určité sférické souřadnice vzhledem k subjektu a každý subjekt má vlastní specifické HRIR odpovídající tvaru jeho hlavy, tvaru boltce a dalších parametrů [9].

HRIR lze získat mnoha způsoby. Jedním ze způsobů je například fyzikální model. Na základě vstupních parametrů, jako je například průměr zvukovodu, velikost boltce a



Obr 1: Schéma měření HRIR

další, je možné vytvořit HRIR záznam z kterékoli sférické souřadnice [9]. Takovéto HRIR mají však jen omezenou přesnost a nemusí vytvořit vhodný psychoakustický vjem. Lepší variantou je tedy měření HRIR, kdy je získána přesná sada impulsových odezev subjektu.

HRIR se liší jak pro subjekt, tak pro různé prostorové úhly. Naším cílem je vytvořit akustickou pomůcku, která má navigovat nevidomé pomocí sluchátek a směrových signálů využívajících právě HRIR záznamy. Pro potřeby navigace je však potřeba, aby bylo směřování velmi přesné. Chybná lokalizace může vést k ohrožení až smrti subjektu (například vstupem do vozovky a následnou kolizí s vozidlem). Proto je potřeba velkého množství HRIR záznamů pro přesné určení změru. Databáze ARI [3] například obsahuje až 1550 záznamů pro každý subjekt (s krokem přibližně 5° v elevaci a 2° v azimutu). Takovéto množství měření by bylo neúnosné, pokud by se muselo provádět pro každou osobu zvlášť.

Interpolace HRIR v čase se ukázala při řešení projektu velmi obtížnou. Další možností je interpolace ve frekvenční oblasti [1]. Převodní funkci HRIR se říká Head Related Transfer Function neboli HRTF. Frekvenční pásmo, potřebné pro správné vyhodnocení směru, se pohybuje od 200Hz (dáno vzdáleností obou boltců od sebe).

2 Interpolace HRTF

Předchozí výzkum zabývající se interpolací HRTF je popsán v [2]. Odtud je patrné, že pro větší počet měření je vhodnější rovnoměrné rozložení v kombinaci s Hermitovou kubickou interpolací. Pro menší počet bodů však vychází lépe rozložení „Best Choice“. [1] uvádí, že „Best Choice“ rozložení by mělo daleko lepší efekt, kdyby byly body vybrány na základě statistiky od mnoha subjektů. Jako metodu srovnání doporučuje korelační koeficienty.

Výběr vhodných bodů pro interpolaci je uveden níže. Samotný skript v Matlabu je rozdělen na tři kroky. Zaprvé oddělení fáze a modulu HRTF. Tento krok byl zvolen kvůli jednodušší implementaci s využitím reálných čísel oproti komplexním. Jak modul, tak fáze jsou následně interpolovány Hermitovou kubickou interpolací pomocí funkce *interp1*. Interpolovaná fáze a modul jsou následně sloučeny zpět do komplexního tvaru, transformovány pomocí funkce *ifft* na HRIR a uloženy ve formátu LISTEN.

3 Postup hledání vhodných bodů k interpolaci

Body, ve kterých bude HRTF měřeno je třeba pečlivě zvolit. K tomuto úkolu je nutno provést statistické srovnání s využitím existující databáze. Pro svou rozsáhlost a velké množství údajů byla zvolena databáze ARI Acoustic Research Institute ve Vídni [3]. Úprava ve formátu ARI je nevhodná pro dělení dat do skupin podle stejné elevace a proto byla data přeformátována do formátu LISTEN pomocí funkce *ari2listen*. Tato funkce byla převzata z [8]. Převod do LISTEN byl vybrán kvůli zjednodušení. ARI

popisuje data v různých souřadnicových soustavách a je obtížnější v ní hledat. Formát LISTEN ukládá data do vektoru *content_m* a k nim má uloženy dva vektory se souřadnicemi *elev_m* a *azim_m* [8].

HRIR ve formátu LISTEN jsou následně převedeny na HRTF pomocí funkce *fft*. Výsledné předzpracované záznamy jsou dále analyzovány. Pro blok měřených záznamů se stejnou elevací je vytvořena podobnostní mapa založená na korelačních koeficientech mezi jednotlivými HRTF s různými azimuty. Tyto mapy jsou následně posuzovány dle sady kritérií. Přesný popis jednotlivých úkonů je rozsepsán v následujících částích článku.

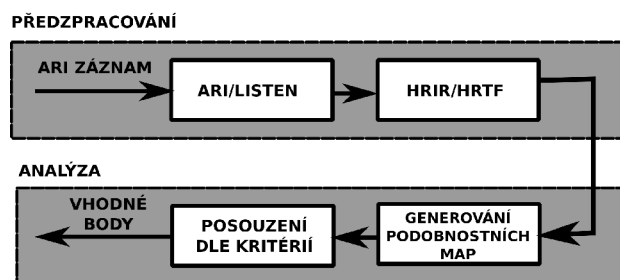
4 Použitá databáze a její předzpracování

Databáze použitá v tomto projektu byla vytvořena rakouským institutem ARI (Acoustical Research Institute) ve Vídni. Skládá se z 85 subjektů. HRTF záznamy jsou uloženy ve formátu mat popsáném v Tabulce 1. Záznamy jsou kompletní pro pravé i levé ucho.

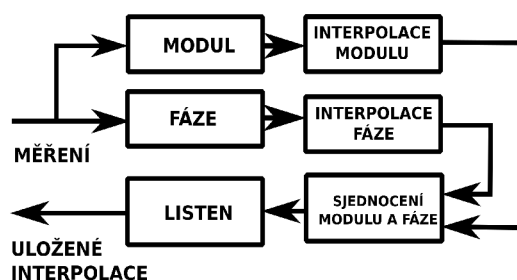
Uložený formát je velmi nepraktický pro další zpracování a proto je potřeba ho transformovat do formátu listen skrz funkci *ari2listen.m*. Jednotlivé záznamy jsou uloženy ve složkách s identifikačním číslem subjektu, např. NH3. Jelikož záznamy nejdou za sebou, a některá identifikační čísla chybí, je nutné kontrolovat, zda se příslušné složky v samotné složce vůbec nachází. Cesta k souboru je pomocí kontrolována pomocí funkce *exist*. Je vygenerován název souboru a pokud se příslušný soubor nachází v příslušné složce, je pomocí *ari2listen* převeden na formát LISTEN. V opačném případě generuje další název souboru v pořadí až do konce rozsahu *ii*.

```
file='hrtf_M_hrtf 256.mat';
for ii=1:140
    num=num2str(ii);
    filein=strcat('ARI/NH', num, '/', file);
    fileout=strcat('listen/', num);
    if (exist(filein, 'file')==2)
        ari2listen(filein, fileout, num);
    end
end
```

Takovéto procházení souborů a složek je použito ve více skriptech, jelikož práce byla prováděna na víc etap se zachováním identifikačního čísla, aby bylo možno přiřadit výsledky k původním ARI záznamům.



Obr 3: Postup hledání optimálních bodů měření



Obr 2: Postup Interpolace HRTF

5 Korelace a podobnostní mapy

Výsledkem předchozích částí článku jsou v matici uložené hodnoty modulu HRTF. Nyní je na čase nalezení souřadnic, které budou nejhodnější pro následnou interpolaci. [1] doporučuje hledání pomocí korelačních koeficientů. Jsou tedy počítány korelace pomocí funkce `xcorr` s parametrem `'coeff'`. Maxima jednotlivých HRTF pro různé azimuty se vůči sobě nepohybují a proto autor využívá hledání maxima.

```
for ii=1:length(HRTF(:,1))
    for kk=1:length(HRTF(:,1))
        HRTFk(ii, kk)=max(xcorr(HRTF(ii,:), HRTF(kk,:), 'coeff'));
    end
end
```

Tabulka 1: Parametry použité databáze ARI

Vzorkovací frekvence	48kHz
Počet vzorků na záznam	256
Počet záznamů na subjekt	1550
Počet subjektů	85
Rozsah / krok měření (azimut)	<0;359°> / 2°
Rozsah / krok měření (azimut)	<-30;90°> / 5°

Tato korelace je prováděna na sérii vzorků se společnou elevací. Testovaný záznam je porovnáván jednotlivě proti všem ostatním záznamům a výsledkem je „podobnostní mapa“, která určuje, jak je jeden bod měření svázán se svým okolím (ostatními polohami měření se stejnou elevací). Mapy jsou po diagonále symetrické. Na diagonále se nachází hodnota 1, jelikož se jedná o autokorelaci. Následně vzniklé mapy jsou dále posuzovány kritérii popsány v další části.

6 Srovnávací kritéria

Výslednou mapu je nutné vyhodnotit. Nabízí se mnoho možných postupů. Patří mezi ně celkový součet, aritmetický i vážený průměr. Všechny tyto metody jsou jistě schopny vytyčit významné body měření, ale nejsou schopny určit další informace. Na jejich místa tedy byla vybrána dvě kritéria. První z nich je šířka svazku a druhou je pak četnost podobných bodů.

6.1 Šířka svazku

Jedním z použitých kritérií je šířka svazku. Je měřena šířka svazku pro definovaný pokles. Jedná se o analogii k šířce frekvenčního pásma používaného v telekomunikacích. Mapa je přeskupena tak, aby se začátek a konec pásma přesunul na opačné strany a autokorelace se ocitla v prvním řádku matice. následně je použita funkce `find`, aby určila hraniční body, určené koeficientem 0,95. Z těchto dvou údajů je spočtena šířka svazku.

```

for ii=1:length(HRTFk(1,:))
    if ii<length(HRTFk(1,:))
        HRTFk(ii,:)=[HRTFk(ii,(ii+1:length(HRTFk(1,:)))) HRTFk(ii,(1:ii))];
        X(1)=find((0.95>=HRTFk(ii,:)),1,'first');
    end
    X(2)=find((0.95>=HRTFk(ii,:)),1,'last');
    B=[B 360/length(HRTFk(1,:))*(length(HRTFk(1,:))-X(2)+X(1))];
end

```

Toto kritérium se soustředí na nejbližší okolí bodu. Lze od něj dobře odvodit rozsah hodnot, které budou podle tohoto bodu interpolovány. Neposuzuje však místa, která jsou bodu také velmi podobná, ale nenachází se v hlavním svazku.

6.2 Četnost podobných bodů

Jak bylo popsáno v předchozí části, kritérium šířky svazku nebere v úvahu oblasti, které se nenacházejí v blízkosti měřeného bodu. Kritérium četnosti bodů počítá body, jejichž korelační koeficient nespádl pod definovanou mez 0,95. Výsledkem je procentuální odhad těchto bodů ku celkovému počtu měření. Toto kritérium daleko lépe popisuje podobnost specifického bodu, ale nelze z něho určit specifický svazek, který by byl daným bodem nahrazen.

```

for ii=1:length(prace(1,:))
    citac=0;
    for kk=1:length(prace(1,:))
        if prace(ii,kk)>0.95
            citac=citac+1;
        end
    end
    P=[P citac/length(prace(1,:))*100];
end

```

7 Výsledky

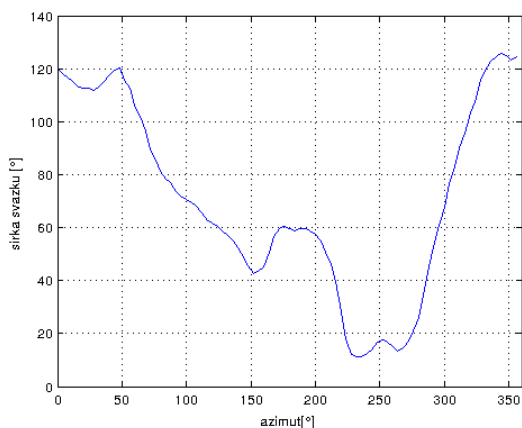
Zatím byl prozkoumán rozsah elevace -25° až 25° při azimutu $0-360^\circ$. Databáze ARI je mimo tento rozsah nekonzistentní a autor se bude dále zabývat jejím zpracováním. V Tabulce 2 je vyznačen příklad nejvýznamnějších bodů pro elevaci 0° a mez 0,95. V Grafu 1 a Grafu 2 jsou průběhy kritérií pro azimut $0-360^\circ$ té samé elevace a v Grafu 3 ukázka podobnostní mapy.

Tabulka 2: Příklad významných bodů pro 0° elevace

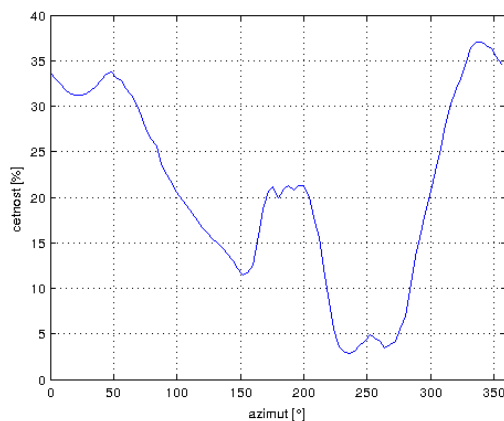
Azimut	Šířka svazku	Četnost
50°	120°	33,8%
120°	60°	21,2%
340°	126°	37,1%

8 Další vývoj

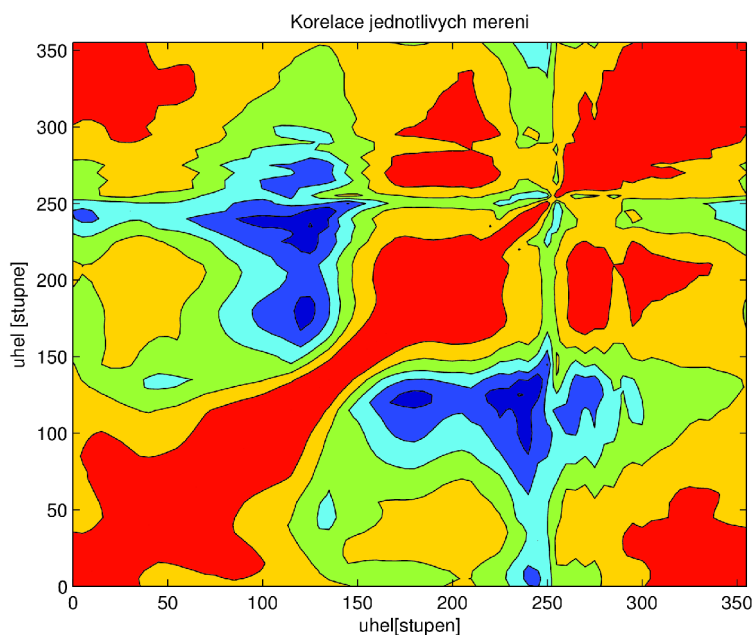
Z výsledků je patrné, že způsob zpracování ARI databáze přináší viditelné výsledky. Tato práce se však nachází stále ve stádiu vývoje. Body zvolené pomocí výše popsaných kritérií budou zpětně srovnávány s rovnoměrným rozložením pomocí MSE. Dalším cílem tedy bude interpolace fáze. Výsledná interpolace modulu a fáze bude použita k zpětnému vytvoření HRIR pomocí funkce *ifft*. Veškeré skripty budou následně přepracovány a sjednoceny ve skript určený k měření a následnému zpracování HRTF a HRIR. Bude obsahovat GUI pro snadné ovládání, a možnosti nahrání HRIR pomocí techniky MLS, interpolaci a uložení záznamu do formátu LISTEN.



Graf 1: Šířka svazku pro 0° elevace



Graf 2: Četnost pro 0° elevace



Graf 3: Podobnostní mapa při 0° elevace

Poděkování

Výzkum popsany v tomto článku je prováděn pod vedením Ing. F. Runda Ph.D, FEL ČVUT v Praze a podporován grantem SGS11/159/OHK3/3T/13

Literatura

- [1] T. NISHITO; S. KASHITA; K. TAKEDA; F. ITAKURA, "Interpolating head related transfer functions in the median plane," Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 1999 IEEE Workshop on , vol., no., pp.167,170, 1999 doi: 10.1109/ASPAA.1999.810876
- [2] T. LINDNER, "Using of Polynomial Piecewised Interpolations in HRTF". In: *Poster2013*. Praha: ČVUT, 2013, s. 4.
- [3] ACOUSTIC RESEARCH INSTITUTE. *HRTF database* [online]. 2013-10-11 [cit. 2013-10-11]. Dostupné z: http://www.kfs.oeaw.ac.at/index.php?option=com_content&view=article&id=608&Itemid=606&lang=en
- [4] SUCHAN, R. *Metodika měření HRTF*. Praha, 2013. Individuální projekt. Fakulta elektrotechnická - České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. F. Rund Ph.D.
- [5] B. XIE, X. ZHONG, R. DAN a Z. LIANG. Head-related transfer function database and its analyses. *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*. 2007, roč. 2007, č. 50, s. 14. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11433-007-0018-x#page-1>
- [6] D. BEGAULT. *Head Related Transfer Function Pseudo-Stereophony* [patent]. Spojené státy Americké. Užitný vzor, 5173944. Uděleno 22.11.1992.
- [7] M. ŠVEJDA. *Implementace virtuálního akustického zdroje na DSP*. Praha, 2013. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická - České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. F. Rund Ph.D.
- [8] M. BOLEK. *Přehled formátů pro HRTF*. Praha, 2013. Individuální projekt. Fakulta elektrotechnická - České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. F. Rund Ph.D.
- [9] J. BOUŠE. *Model směrového slyšení*. Praha, 2013. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická - České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. F. Rund Ph.D.

Bc. Tomáš Lindner

Na Lysině 12, Praha 4 – Podolí

mail: lindner.prac@gmail.com

GSM: +420 725 649 715