

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky, K13137



Diplomová práce

Externalizace virtuálních zdrojů zvuku

Externalization of virtual sound sources

Jan Stuchlík

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

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika

prezenční magisterský

Obor: Multimediální technika

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Jan Stuchlík**

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

Název tématu: **Externalizace virtuálních zdrojů zvuku**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s problematikou externalizace zvukového vjemu při binaurálním poslechu. Navrhněte experiment studující tento jev s využitím prostředků zvukové rozšířené reality. Tento experiment proveďte a vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Blauert, J. (ed.), "Technology of binaural listening", Springer, 2013, 513 p.
- [2] Albrecht, R., Lokki, T., and Savioja, L., "A mobile augmented reality audio system with binaural microphones," in Interacting with sound workshop (IwS'11), pp. 7-11, Stockholm, Sweden, August 30, 2011.

Vedoucí: Ing. František Rund, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

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

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 2. 2015

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Františku Rundovi, Ph.D., za cenné rady a připomínky. Dále chci ocenit spolupráci s Ing. Dominikem Štorkem, především při zpracování výsledků experimentu. Velké díky patří také lidem, kteří se s ochotou zúčastnili měření. Tato práce byla navíc podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS14/204/OHK3/3T/13.

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.

Datum: 11. 5. 2015

.....
podpis diplomanta

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je uskutečnit a vyhodnotit experiment studující jev externalizace virtuálních zdrojů zvuku při binaurálním poslechu s využitím principu rozšířené zvukové reality. V úvodních kapitolách jsou zmíněny základní principy binaurální lokalizace zdroje zvuku a definovány pojmy externalizace a rozšířené zvukové reality. Následuje popis experimentu a realizace měřicího systému. V poslední části jsou uvedeny výsledky a jejich hodnocení.

Abstract

The goal of this diploma thesis is to make and evaluate an experiment studying externalization of virtual sound sources in binaural listening using Augmented Reality Audio concept. Opening chapters describe fundamental principles of binaural sound source localization and definitions of externalization and Augmented Reality Audio. Next part deals with description of experiment and realization of measuring system. Last part introduces final results and its evaluation.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Souřadný systém [1]	2
Obrázek 2: Principy ITD a ILD [2].....	3
Obrázek 3: Zpoždění signálu do levého a pravého ucha [2]	4
Obrázek 4: Přenosová funkce zvukovodu a vnějšího ucha [8]	6
Obrázek 5: Měření HRIR pomocí mikrofonů umístěných na umělé hlavě	8
Obrázek 6: Strukturální model HRTF [3]	9
Obrázek 7: Virtuální polohování zvuku pomocí HRTF a DHRTF [13].....	9
Obrázek 8: Vztah mezi virtuální, rozšířenou a skutečnou realitou.....	10
Obrázek 9: Klasifikace AR na základě lidských smyslů.....	11
Obrázek 10: Uživatel v rozšířené realitě a pseudoakustickém prostředí [14]	12
Obrázek 11: Subjektivní škála definující stupeň externalizace zvukového zdroje	14
Obrázek 12: Možnosti simulace reálného zdroje zvuku	16
Obrázek 13: Postavení reproduktoru, posluchače a rozložení pozic.....	18
Obrázek 14: Princip přepínání mezi virtuálním a reálným zdrojem zvuku	19
Obrázek 15: Fyzické propojení zvukové karty s ostatními komponenty	20
Obrázek 16: Softwarové nastavení zvukové karty.....	20
Obrázek 17: Návrh ARA systému pro studium externalizace	21
Obrázek 18: Schéma systému pro experiment.....	22
Obrázek 19: Zvolené parametry zvukového nastavení	22
Obrázek 20: Fáze jednoho cyklu experimentu	24
Obrázek 21: Principiální schéma konvoluce po blocích	26
Obrázek 22: Konvoluce zvukového signálu s impulsovou odezvou v PD.....	26
Obrázek 23: Efekt pro vytvoření umělého dozvuku v PD	27
Obrázek 24: Diagram celkového algoritmu experimentu	28
Obrázek 25: Grafické rozhraní určené pro řízení experimentu.....	29

Obrázek 26: Ukázka průběhu jednoho cyklu algoritmu v PD	30
Obrázek 27: Algoritmus pro automatické otáčení židle	31
Obrázek 28: Program pro zvukový záznam reakce posluchače.....	32
Obrázek 29: Schéma pro změření HRIR strukturálního modelu.....	33
Obrázek 30: Funkce nastavující zvukový stimul a výstup	34
Obrázek 31: Princip virtuálního polohování zvuku metodou MODEL a HRTF	35
Obrázek 32: Algoritmus pro virtuální polohování metodou DHRTF	36
Obrázek 33: Funkce umožňující vkládání efektu umělého dozvuku	37
Obrázek 34: Aplikace pro testování experimentu	38
Obrázek 35: Využití kontingenční tabulky pro zpracování výsledků	39

Seznam grafů

Graf 1: Závislost míry externalizace na pozici zdroje (bez umělého dozvuku)	40
Graf 2: Závislost míry externalizace na typu zvuku (bez umělého dozvuku)	41
Graf 3: Závislost míry externalizace na pozici zdroje (světlo).....	42
Graf 4: Závislost míry externalizace na pozici zdroje (tma)	42
Graf 5: Závislost míry externalizace na typu zvuku (světlo)	43
Graf 6: Závislost míry externalizace na typu zvuku (tma).....	43
Graf 7: Závislost míry externalizace na stupni efektu	44
Graf 8: Závislost míry externalizace na metodě polohování	45
Graf 9: Závislost počtu chyb virtuální → reálný na zrakových podmínkách.....	45
Graf 10: Závislost počtu chyb reálný → virtuální na zrakových podmínkách.....	46

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Lokalizace zvuku.....	2
2.1. Souřadný systém.....	2
2.2. Principy binaurální lokalizace	3
2.2.1. ITD	4
2.2.2. ILD.....	4
2.2.3. Lokalizace ve vertikální rovině.....	5
2.3. Faktory ovlivňující lokalizaci zvuku	5
2.4. Externalizace zdroje zvuku	6
3. Metody virtuálního polohování	7
3.1. HRTF	7
3.2. Strukturální model HRTF	8
3.3. DHRTF	9
4. Rozšířená realita.....	10
4.1. Využití rozšířené reality	10
4.2. Typy rozšířené reality	11
4.3. Augmented Reality Audio (ARA)	11
5. Psychoakustické metody měření	13
5.1. Vyhodnocení pomocí numerické škály	13
5.2. Vyhodnocení pomocí grafické škály	13
6. Popis experimentu	14
6.1. Scénář experimentu	14
6.2. Simulace reálného zdroje zvuku.....	16
6.3. Rozmístění pozic a uživatele	18
6.4. Přepínání mezi virtuálním a reálným zdrojem.....	19
6.5. Rozšíření ARA.....	21
6.6. Měřicí systém	22
6.7. Plán experimentu.....	23
7. Implementace prostředí pro experiment	25
7.1. Úvod do PD	25
7.1.1. Implementace operace konvoluce v PD	25

7.1.2. Implementace efektu dozvuku v PD	27
7.2. Princip řídicího algoritmu	27
7.2.1. Grafické rozhraní.....	29
7.2.2. Průchod algoritmem	30
7.2.3. Otáčení židle	31
7.2.4. Záznam reakce uživatele.....	32
7.2.5. Sběr HRIR pro experiment	33
7.2.6. Výběr zvukového signálu a výstupu	34
7.2.7. Implementace strukturálního modelu a HRTF	35
7.2.8. Implementace DHRTF.....	36
7.2.9. Aplikace efektu umělého dozvuku	37
8. Základní testování.....	38
9. Výsledky.....	39
9.1. Zpracování.....	39
9.2. Interpretace	40
10. Hodnocení a závěr	47
11. Použitá literatura a internetové zdroje.....	48
Dodatky	50

1. Úvod

Základní myšlenka rozšířené zvukové reality (Augmented Reality Audio - ARA) je známá již roky. Nicméně množství aplikací ARA systému je limitováno pouze lidskou představivostí. Mezi příklady využití ARA systému lze zařadit nahrané komentáře v muzejních výstavách, telekomunikační vylepšení, asistenční průvodce nebo lékařské aplikace. Velice zajímavou vizí je např. vytvoření medicínského „simulátoru“ vnímání reality pacientů s mentálním poškozením.

Základní koncept ARA charakterizuje techniky, kde je reálný zvukový prostor rozšířen o virtuální sluchová prostředí a komunikační scénáře. Virtuální zdroj je vytvořen s pomocí metod virtuálního polohování zdroje zvuku, zabývajících se simulací šíření zvuku z jednoho bodu do zvukovodu, a následně „domíchán“ do reálné zvukové scény kolem posluchače. Výsledný zvuk je přenesen pomocí sluchátek. Jedním z problémů u virtuálně polohovaných zvukových zdrojů je subjektivní vnímání zvuku uvnitř hlavy. Řešením je dosažení tzv. externalizace zvukového zdroje. Tato problematika je mimo jiné součástí projektu s názvem „Psychoakustická měření, modely slyšení a jejich aplikace“, podporovaného grantem Studentské grantové soutěže ČVUT.

Cílem této práce je realizace experimentu studujícího jev externalizace při binaurálním poslechu s využitím ARA principu a následné zpracování a prezentace výsledků pomocí vhodné statistické metody.

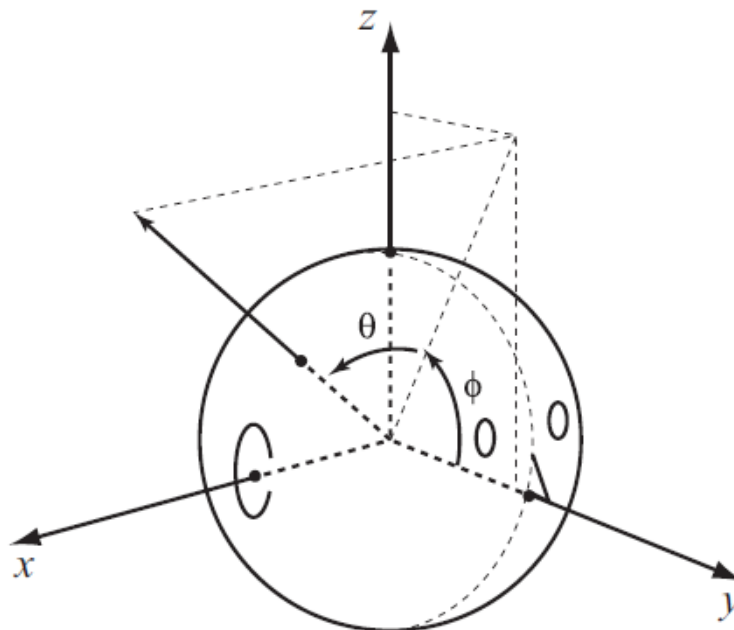
Následující kapitoly popisují základní principy binaurální lokalizace zdroje zvuku, definice pojmů externalizace, rozšířené zvukové reality a základy psychoakustického měření. Další část obsahuje popis experimentu, návrh měřicího systému a jeho implementaci po stránce hardwaru i softwaru. V závěru jsou uvedeny výsledky experimentu ve formě grafů a shrnujícího hodnocení.

2. Lokalizace zvuku

Studium lokalizace a dalších psychoakustických jevů započalo v první polovině dvacátého století a zdaleka ne všechny principy jsou zcela pochopené. Lidské sluchové ústrojí je komplikovaný mechanismus a nesmíme zapomenout, že v této oblasti operujeme se subjektivními vjemy, nikoliv s objektivně změřitelnými veličinami. Experimenty zmíněné v [1] ukázaly, že člověk využívá k lokalizaci zdroje zvuku několika jevů, které společně vytváří zvukový vjem, jenž lidský mozek snadno bez vědomí subjektu zhodnotí.

2.1. Souřadný systém

Pokud je třeba určit polohu zvuku v prostoru, musí se nejprve zavést souřadný systém. Pro účely práce využijeme následující systém - v jeho středu se bude nacházet střed koule, která představuje posluchačovu hlavu. Osa x bude procházet pravým uchem posluchače, osa y vpřed a osa z nad hlavou posluchače. Jelikož jsme si hlavu posluchače aproximovali do podoby koule, budeme pracovat se sférickými souřadnicemi, kde polohu určuje vzdálenost od počátku a dvojice úhlů.



Obrázek 1: Souřadný systém [1]

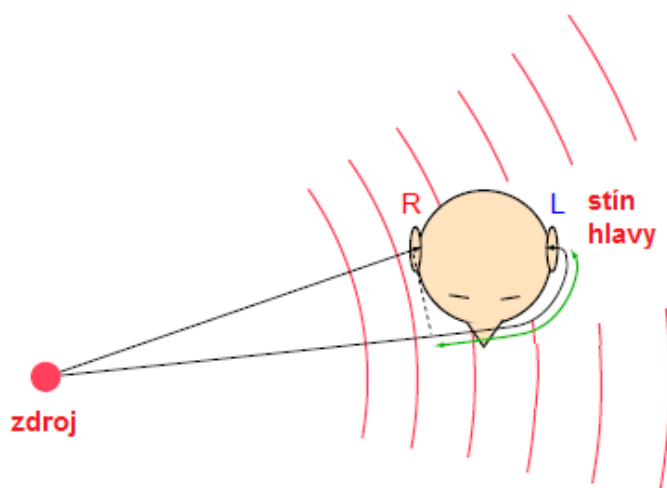
Nejprve zjistíme velikost úhlu, který svírá zdroj zvuku s horizontální plochou, a nazveme jej elevace (φ). Elevace udává vertikální polohu zvuku a může nabývat hodnot v rozsahu (-90° ; 270°). Poté určíme odklon od osy y a nazveme jej azimut, neboli θ . Azimut definuje horizontální umístění zdroje a jeho rozsah činí (-90° ; 90°).

Azimut θ [°]	Elevace φ [°]	Poloha
0	0	vpředu
0	90	nad hlavou
0	180	vzadu
- 90	0	vpravo
90	0	vlevo

Tabulka 1: Významné polohy zdroje zvuku

2.2. Principy binaurální lokalizace

V roce 1907 představil Lord Rayleigh tzv. duplexní teorii, obsahující dva základní principy, které naznačuje obrázek 2, pro určení azimutální polohy zdroje – ITD (Interaural Time Difference) a ILD (Interaural Level Difference).

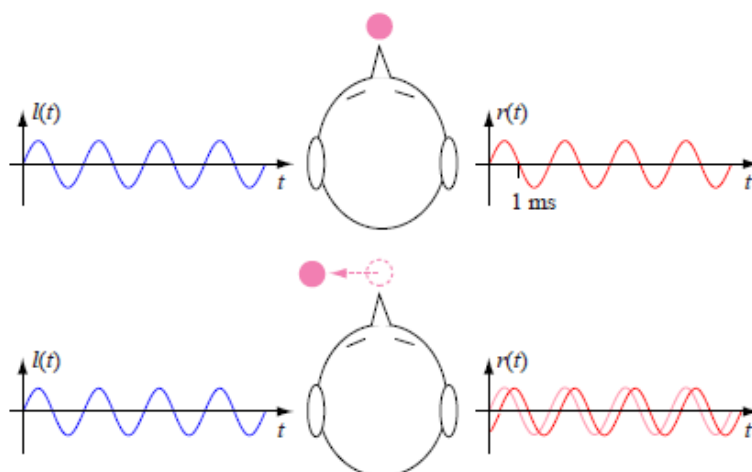


Obrázek 2: Principy ITD a ILD [2]

Je zřejmé, že pokud zdroj signálu je např. vlevo od posluchače, dosáhne zvukový signál levého ucha dříve než pravého, tj. existuje určitý časový rozdíl, a zvuk je vnímán zleva. Stejně tak dochází k rozdílu v intenzitě, zvuk v přivráceném uchu je hlasitější než v odvráceném.

2.2.1. ITD

Princip ITD popisuje rozdíl v čase dopadu zvukových vln do levého a pravého ucha posluchače. Díky tomuto rozdílu jsme schopni zvuk lokalizovat. Pokud se zdroj zvuku nalézá např. blíže levému uchu, přicházející signál se nejdříve dostane do levého a s určitým časovým zpožděním do pravého ucha. Na základě experimentů provedených v [3] na kulové reprezentaci hlavy bylo zjištěno, že největší dosažitelné zpoždění je přibližně 660 μs , což odpovídá délce periody pro frekvence kolem 1,5 kHz. Pro zvuky o frekvencích nižších než 1500 Hz je daný fázový posuv hlavním měřítkem pro určení polohy. Výsledky dalších pozorování však ukázaly, že tato souvislost platí jen do určité míry.



Obrázek 3: Zpoždění signálu do levého a pravého ucha [2]

2.2.2. ILD

Druhý princip lokalizace zvuku v horizontální rovině se zakládá na rozdílu v intenzitě zvukových vln přicházejících do jednotlivých uší posluchače. Máme-li umístěn zdroj zvuku jinde než před posluchačem, signál přicházející do vzdálenějšího ucha musí překonat překážku v podobě hlavy. Pokud signál obsahuje frekvence, jejichž vlnová délka je menší než průměr hlavy, dochází k odrazům a difrakcím [2]. To způsobí zeslabení signálu. Jde o tzv. *akustický stín hlavy*, který způsobuje změnu spektra vnímaného signálu, což rovněž dokresluje představu o poloze zdroje. Lidé, kteří jsou dlouhodobě odkázáni na poslech jedním uchem, jsou díky tomuto mechanismu spolu s předchozí zkušeností schopni do jisté míry určit směr zdroje zvuku [8].

2.2.3. Lokalizace ve vertikální rovině

Výše popsané rozdíly vysvětlují problematiku lokalizace v horizontální rovině. Vjem výšky (elevace) zdroje, rozlišení mezi zvukem přicházejícím zepředu a zezadu a vjem vzdálenosti se nedají vysvětlit jen s použitím ILD a ITD. Tyto jevy závisí na ovlivnění příchozího zvuku zejména odrazy od různých částí těla subjektu, např. ramen, hlavy a ušního boltce [3]. Sluchový aparát se tedy v případě lokalizace ve vertikální rovině opírá hlavně o spektrální změny způsobené ušním boltcem a také částečně i o odchýlení zvukového kanálu od osy spojující obě uši. Tento princip se ale projevuje teprve u vyšších kmitočtů. Nízkým tónům nepůsobí hlava dostatečnou akustickou překážku. Proto je poměrně těžké rozlišit, zda zvuk přichází zepředu, nebo zezadu (kapitola 2.1.). Tento problém nastává zejména u harmonických průběhů. U složených tónů, které obsahují složky na vysokých kmitočtech, je lokalizace značně ulehčena. Příchodem daného zvuku zezadu totiž dojde k odfiltrování vyšších frekvencí následkem akustického stínu ušního boltce. Tento typ lokalizování zvuku vzniká především na základě zkušeností spojených se zrakovou kontrolou [4].

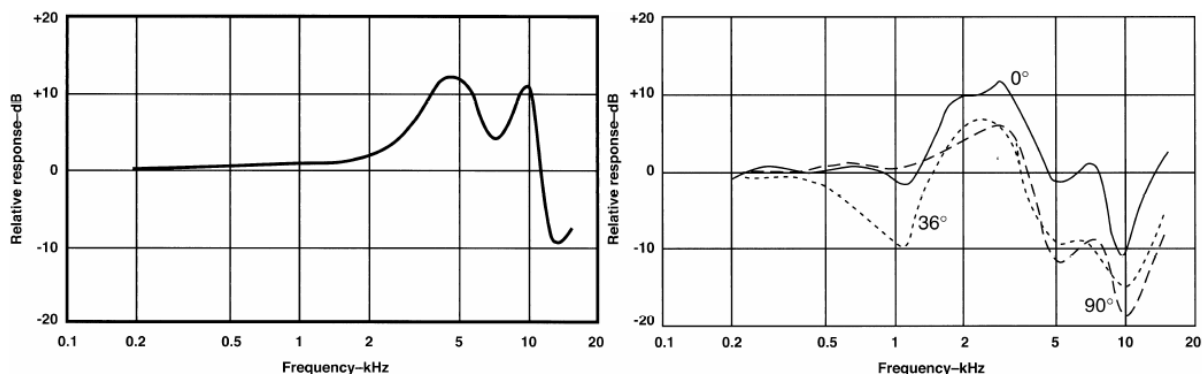
2.3. Faktory ovlivňující lokalizaci zvuku

Pro správné určení směru příchozího zvuku je třeba mít na paměti, že existuje několik parametrů, které mají zásadní vliv na lokalizování zdroje zvuku. Každý z následujících faktorů je zohledněn a kombinován s ostatními při analýze zvuku lidským sluchem. Jedním z nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují schopnost lokalizace, je frekvence. Jak již bylo zmíněno dříve, kmitočty s hodnotou vlnové délky srovnatelnou s šířkou hlavy jsou u harmonických signálů pro schopnost lokalizace znatelně horší než u ostatních kmitočtů. Neméně zásadní vliv na schopnost člověka určit směr příchozího zvuku má také spektrální složení zvuku.

Pro přesnost lokalizace zdroje v prostoru je u lidského sluchu důležité, zda se daný objekt pohybuje, popř. zda pozorovatel může otáčet hlavou, nebo jsou oba elementy statické. Při pohybu zdroje či uživatele se mění fáze zvukové vlny, která dopadá do obou uší, a tím usnadňuje lokalizaci. Drobné pohyby hlavou pomáhající identifikaci se provádí nevědomky [5]. Lidský sluch se s přibývajícím věkem stává méně citlivým na nízkých a vysokých kmitočtech, což má za následek obtížnější lokalizaci na daných frekvencích. Schopnost lokalizace se ovšem vyvíjí během života zkušenostmi a spojováním zrakových a sluchových vjemů [5]. Svou roli hraje i akustické pole, ve kterém lokalizace probíhá. Ve volném poli bývá určení směru složitější než v uzavřené místnosti, kde lidský sluch využívá prvotních odrazů a difúzního dozvuku.

2.4. Externalizace zdroje zvuku

Společně s lokalizací zvuku je třeba zavést i pojem tzv. lateralizace, která vychází z principů časové a intenzitní diference popsané výše. Pokud není rozdíl mezi signály v obou uších v intenzitě a časový posun je menší než 2 ms, nastává tzv. splývání v jediný vjem, subjektivně umístěný uprostřed hlavy [6]. Lateralizace má z experimentálního hlediska význam pouze při binaurálním poslechu. Lokalizace v prostoru musí být doplněna tzv. externalizací sluchového vjemu. Bylo demonstrováno, že člověk při poslechu pomocí sluchátek dokáže jasně rozlišit mezi laterizovaným a lokalizovaným (venku z hlavy) zdrojem zvuku a že tyto dva typy koexistují v posluchačových zkušenostech [7]. Jedním z fyzických faktorů externalizace jsou odrazy od ramen a přechodné děje časového průběhu signálu [5]. Na tomto principu mají podíl především přenosové funkce zvukovodu a vnějšího ucha, což je znázorněno na obrázku 4. Maxima přenosové funkce zvukovodu se nacházejí v okolí kmitočtů 5 a 10 kHz, což koresponduje s fyzikálními vlastnostmi samotného zvukovodu. Maxima přenosové funkce vnějšího ucha jsou v oblasti mezi 1 a 5 kHz v závislosti na příchozím směru zvuku [8].



Obrázek 4: Přenosová funkce zvukovodu a vnějšího ucha [8]

Externalizace se řeší především v systémech pro virtuální polohování zdroje zvuku v binaurálním poslechu. Hlavním cílem těchto systémů je vytvoření pocitu příchodu zvuku z určitého bodu v prostoru, tedy v některých případech i dosažení co nejlepšího vjemu externalizace. Efekt laterizovaného zvuku při poslechu na sluchátka může být produkován použitím intenzitních a časových rozdílů ve dvou kanálech korespondujících se simulovaným zdrojem [6]. Pro dosažení externalizace virtuálního zdroje zvuku se může jako řešení jevit použití sofistikovanějších binaurálních technik. Vytvoření vjemu externalizace, jak bylo zjištěno v [9], lze také dosáhnout dodáním umělého dozvuku virtuálnímu zdroji. Nabízí se ale otázka volby nastavené úrovně dozvuku. Jedním z aspektů ovlivňujících celkovou externalizaci virtuálního zvuku může být i jeho charakter a signálová úroveň (hlasitost) [10]. Jak již bylo zmíněno výše, uživatel při lokalizaci zvuku využívá i své zkušenosti spojené se zrakovým podnětem či pohyby hlavou.

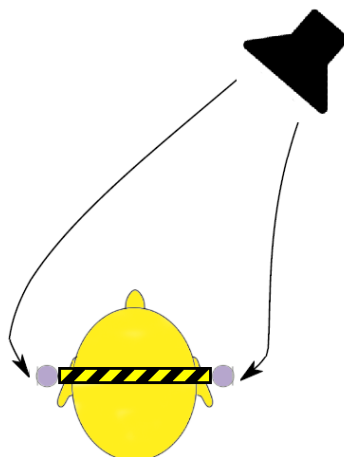
Jako náměty pro studium externalizace se nabízí jednak vliv zakrytí očí posluchače a fixace jeho hlavy během testu a dále např. využití různých typů zvukových stimulů. Hlavním problémem při výzkumu externalizace v binaurálním poslechu je ale fakt, že samotný vjem externalizace zvukového zdroje je subjektivní záležitost a není zcela definován. Jestliže posluchač označí daný zvukový zdroj za externalizovaný, není úplně jasné, co je tím myšleno. Na jednu stranu může externalizace pro uživatele znamenat neschopnost rozeznání virtuálních objektů od reálných zvuků. Na druhou stranu tím uživatel možná míní, že zvuk vnímá trochu více z hlavy. Nabízí se tak myšlenka provedení testu porovnávacího míru externalizace pro reálné a virtuální zvukové objekty.

3. Metody virtuálního polohování

Metody virtuálního polohování zdroje zvuku se zabývají simulací šíření zvuku z jednoho bodu do zvukovodu. Snaží se o umělé vyvolání dojmu lokace zvuku v určitém bodě v prostoru. Pro výzkum externalizace virtuálních zdrojů zvuků je vhodné disponovat odlišnými způsoby virtuálního polohování, abychom mohli otestovat jejich vliv na míru externalizace. Jednou z dimenzí připravovaného experimentu je srovnání metod polohování (ILD, ITD, HRTF, DHRTF) za účelem zjištění, která má nejlepší výsledky celkově a která naopak nejlepší poměr vjem/složitost implementace. Tyto informace mohou posloužit při stanovování parametrů pro systémy vyžadující generování virtuálních zdrojů zvuku, např. při vytváření lékařských aplikací určených pro simulaci mentálních postižení.

3.1. HRTF

Jedna z možností simulace polohování zvuku jak v horizontální, tak vertikální rovině, je využití tzv. přenosové funkce vztažené k hlavě (HRTF - Head Related Transfer Function). HRTF popisuje filtraci zvukové vlny před dopadem na ušní bubínek vlivem vnějšího ucha, hlavy a horní části trupu. Uplatňují se zde zejména mechanismy ohybu a odrazu zvukové vlny. Specifická míra filtrace těchto částí těla značně napomáhá schopnosti lidského sluchu lokalizovat zvukový zdroj [3]. HRTF je složitá funkce kmitočtu a třech sférických veličin: azimutu, elevace a vzdálenosti. Jednou z metod, které se používají k určení přenosové funkce pro určitou lokaci zdroje, je změření HRIR (Head Related Impulse Response), tedy impulsní odezvy vztažené k hlavě. Přenosová funkce HRTF se pak získá Fourierovou transformací HRIR (pro každé ucho zvlášť). Měření se provádí za pomoci speciální figuríny v bezodrazové komoře. Důvodem je snaha co nejvíce minimalizovat vliv dozvuku na hledanou charakteristiku. Přibližný princip měření je znázorněn na obrázku 5.



Obrázek 5: Měření HRIR pomocí mikrofonů umístěných na umělé hlavě

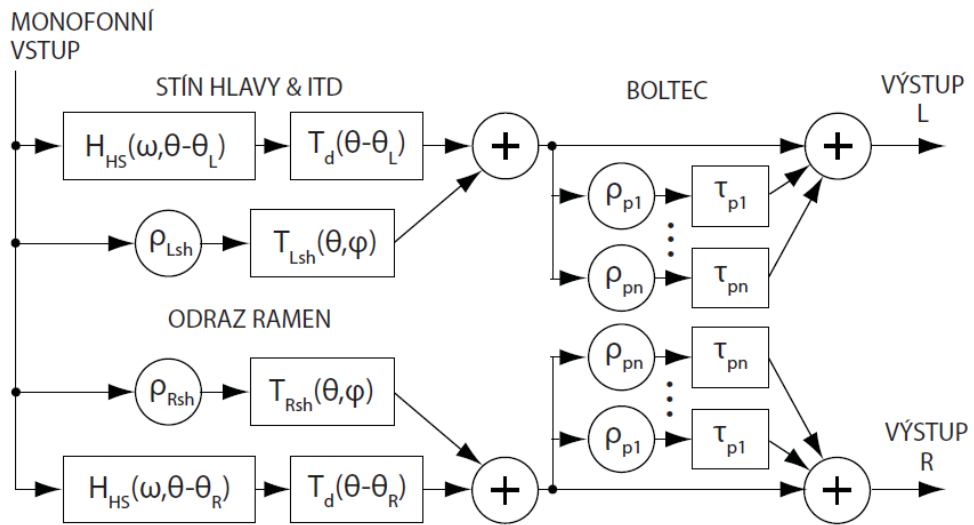
Tato figurína, tzv. umělá hlava, simuluje tvar horní části lidského těla a obsahuje speciální měřicí mikrofony umístěné v uších, kterými jsou HRIR měřeny. Pro účely modelování příchodu zvuku z určitého směru tedy stačí provést konvoluci tohoto zvuku s odezvou HRIR odpovídající příslušnému směru. Konvoluce diskrétního signálu $x[n]$ a impulsní charakteristiky $h[n]$ je dána vztahem:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{m=0}^n x[n-m] \cdot h[m]$$

Zvuk pro levé sluchátko pak získáme konvolucí původního jednokanálového zdroje zvuku s levým kanálem impulsní charakteristiky. Analogicky, pokud provedeme konvoluci s impulsní charakteristikou odpovídající pravému kanálu, získáme zvuk pro pravé sluchátko. Ve výsledku dostaneme dvoukanálový zvuk s tím, že zdroj zvuku změnil svou původní pozici uprostřed hlavy za pozici, odkud byla změřena daná impulsní charakteristika pomocí umělé hlavy.

3.2. Strukturální model HRTF

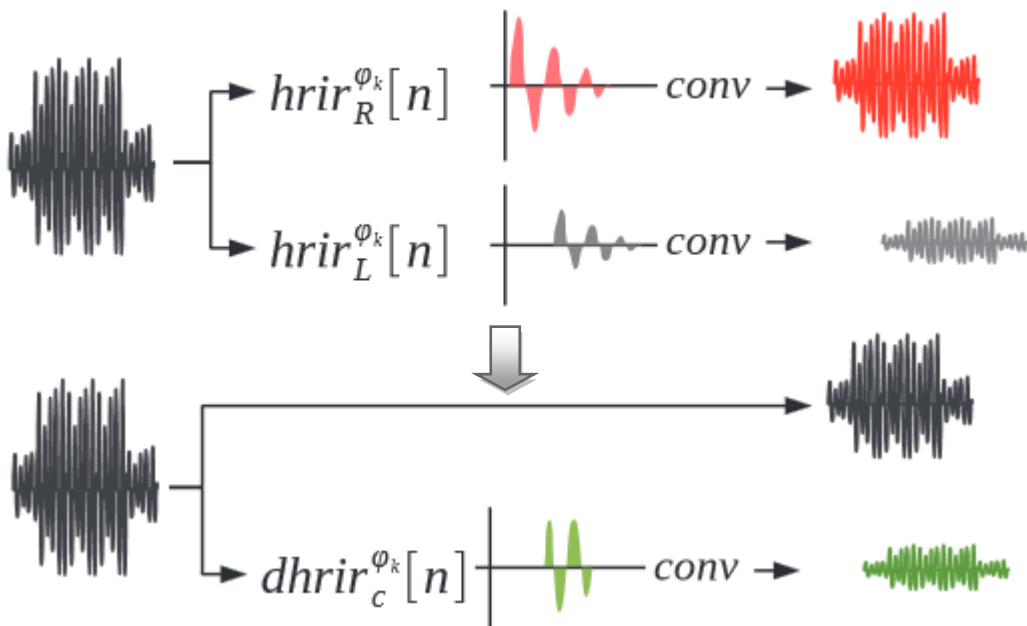
Princip spočívá v rozdělení HRTF na menší části a hledání jejich závislosti na antropometrických parametrech daného subjektu. V případě nalezení spojitosti lze vytvořit individuální přenosovou funkci jen na základě znalosti parametrů konkrétního posluchače. Obrázek 6 znázorňuje příklad modelu, který se zakládá na zjednodušeném popisu šíření a difrakce zvukových vln v časové oblasti. To umožňuje relativně jednoduchou a efektivní implementaci za pomoci algoritmů pro diskrétní zpracování zvukových signálů v reálném čase. Nevýhoda tohoto modelu je v tom, že umožňuje virtuální polohování zvukového zdroje pouze v prostoru před posluchačem [3]. Tento model byl implementován v rámci mé bakalářské práce [11] a bude využit k účelům experimentu.



Obrázek 6: Strukturální model HRTF [3]

3.3. DHRTF

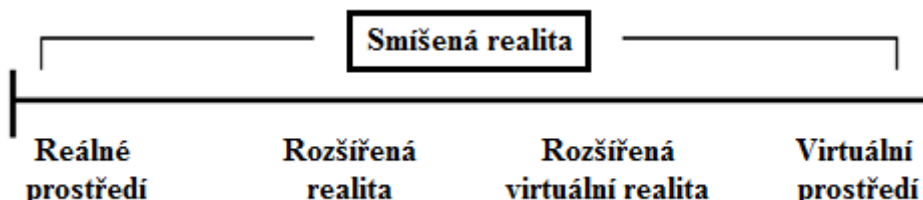
Alternativní způsob polohování zdroje zvuku, použitý např. v [12], využívá funkci poměru mezi HRTF pro levé a pravé ucho, tzv. ITF (Interaural Transfer Function), někdy označované jako DHRTF (Differential Head-Related Transfer Function). Tato metoda umožňuje aplikovat konvoluci pouze na jeden kanál, který odpovídá odvrácenému uchu vzhledem k poloze virtuálního zvukového zdroje. Hlavní výhoda spočívá v redukci výpočetních nároků v metodách virtuálního polohování do sluchátek, kdy je potřeba provádět operaci konvoluce pro každý kanál zvlášť (obrázek 7). To má ale za následek omezení v podobě schopnosti polohování pouze v horizontální rovině.



Obrázek 7: Virtuální polohování zvuku pomocí HRTF a DHRTF [13]

4. Rozšířená realita

Rozšířená realita (AR – Augmented Reality) je technologií, jež je dnes považována za jeden z vycházejících trendů a řadí se mezi rychle se vyvíjející odvětví oboru virtuální reality. V podstatě jde o sloučení skutečné a virtuální reality v jednom okamžiku. AR je chápána jako termín pro přímé či nepřímé zobrazení reálného fyzického prostředí, jehož prvky jsou rozšířeny a sloučeny s virtuálními obrazy, které vytvořila počítačová technologie [14]. Výsledkem je tedy smíšená realita. Důležité je, že rozšíření neboli augmentace probíhá v reálném čase. AR je tedy specifickým druhem virtuální reality, který kombinuje virtuální prostředí s reálným světem (viz obrázek 8). Rozšířená realita si nedává za snahu nahradit reálné prostředí, jak tomu bývá u virtuální reality, ale určitým způsobem doplňuje nebo pozměňuje jeho vnímání [14]. Nedochozí k úplnému ponoření uživatele do virtuálního světa.



Obrázek 8: Vztah mezi virtuální, rozšířenou a skutečnou realitou

4.1. Využití rozšířené reality

V počátcích byl výzkum technologie AR zaměřen především na vojenské a vědecké účely. V současnosti již AR patří do téměř všech lidských odvětví, její vliv neustále roste. Jedním z největších kladů AR je možnost rozvoje znalostí a jednoduššího zjišťování informací. Její kompaktnost umožňuje předat velké množství informací na minimum prostoru, čehož využívá řada oborů. Mezi příklady využití AR systému patří např. nahrané komentáře v muzejních výstavách, telekomunikační vylepšení [15], asistenční průvodce nebo lékařské aplikace [16].

4.2. Typy rozšířené reality

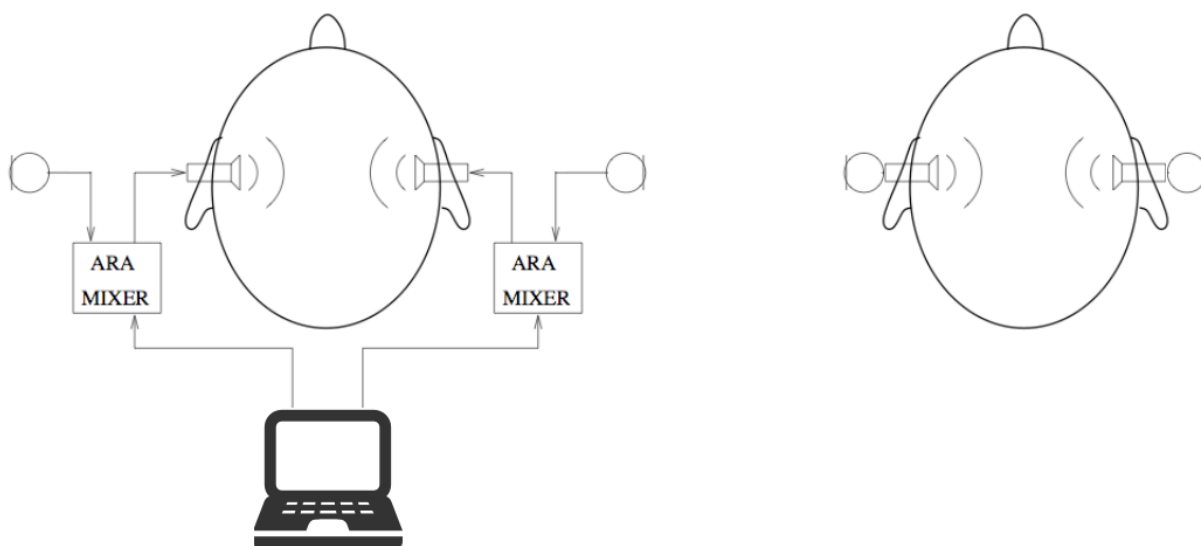
AR nemusí být vázaná pouze na grafiku a zobrazení, což si většina lidí pod tímto pojmem vybaví. Klasifikace AR může probíhat na několika úrovních. Dělení AR podle užití lidských smyslů znázorňuje obrázek 9. Zraková AR (visual AR) je nejběžnějším typem AR, oku se počítačová grafika zobrazuje prostřednictvím displeje počítače, televize nebo mobilu. Často je doprovázena druhou nejrozšířenější zvukovou AR (audio AR), která namísto grafických obohacení používá zvukové efekty.



Obrázek 9: Klasifikace AR na základě lidských smyslů

4.3. Augmented Reality Audio (ARA)

V aplikacích rozšířené zvukové reality je reálné zvukové prostředí kolem uživatele doplněno o virtuální zvuky. Možnost poslechu přirozeného akustického prostředí kolem uživatele odlišuje koncept rozšířené zvukové reality od tradičního konceptu virtuální zvukové reality, kde je uživatel vystaven zcela syntetickému akustickému prostoru [14]. Reálný prostor se reprodukuje jako pseudoakustický svět prostřednictvím speciálního setu obsahujícího binaurální mikrofony a sluchátka. Přicházející zvukový signál je snímán miniaturními integrovanými mikrofony, které následně přenesou signál pomocí sluchátek do uší posluchače. Vzhledem k tomu, že situace je odlišná od klasického poslechu reálného prostředí, mluví se o tzv. pseudoakustickém prostředí (obrázek 10 vpravo). Experimenty provedené v [17] ukázaly, že uživatelé jsou schopni se adaptovat na modifikované akustické prostředí v rozumném časovém intervalu.



Obrázek 10: Uživatel v rozšířené realitě a pseudoakustickém prostředí [14]

Hlavní účel ARA systému spočívá v kombinování reálných a virtuálních akustických objektů v pseudoreálných prostředích. Většina již vytvořených systémů je designována na principu obohacení sluchové scény o informaci, kterou obsahuje virtuální zdroj. Informace může být definována charakterem zdroje, jeho prostorovou polohou atd. Správná funkce systému, jak již bylo zmíněno výše, je podmíněna zpracováním v reálném čase, což prakticky znamená zajištění dostatečně nízké latence. Obecně se rozlišují dva extrémní případy podle požadavků na ARA systém. Buď je soustava navržena tak, aby uživatel nebyl schopen rozeznat reálný zvuk od virtuálního. V druhém případě je naopak požadavek, aby virtuální sluchové scény byly generovány s kvalitou zajišťující jejich odlišitelnost od reálného akustického prostředí [14].

Hlavním cílem této diplomové práce je studium jevu externalizace za použití výše zmíněného principu ARA. V rámci příprav je třeba navrhnout a realizovat systém založený na myšlence rozšířené zvukové reality. Připravovaný experiment má mj. za úkol zjistit, jakými parametry musí virtuální zdroj disponovat, aby uživatel (ne)rozeznal vygenerovaný virtuální objekt od reálného okolí. Prakticky půjde o generování střídavě virtuálních a reálných zdrojů zvuku o různých parametrech a sledování vlivu těchto parametrů na vjem externalizace a schopnost rozeznatelnosti původu zvukového stimulu (virtuální/reálný). Pro přípravu experimentu je ale potřeba zvolit vhodnou metodu měření a správně ji aplikovat.

5. Psychoakustické metody měření

Pro řádné provedení testu je třeba nejdříve definovat několik důležitých pojmů, týkajících se daného typu experimentu. Psychoakustickým experimentem se rozumí specifická forma psychologického experimentu zabývající se sledováním účinků zvukových podnětů [18]. Během tohoto měření jsou vyšetřovány účinky nezávisle proměnné a zjišťovány hodnoty závisle proměnné, jakožto hodnoty cílové. Většinou ale dojde k situaci, kdy je výsledek měření ovlivněn dalšími nežádoucími proměnnými, které není v silách experimentátora kontrolovat. Vliv těchto vnějších rušivých proměnných lze omezit např. jejich změřením a následnou eliminací vhodnou statistickou metodou. Dalším způsobem minimalizace může být snaha o zkonstantnění nežádoucích proměnných [18]. Vliv působení většího či menšího počtu proměnných na průběh experimentu má za následek změnu průměrné hodnoty cílové proměnné. Opakováním experimentu, např. na více lidech, je možné tuto variabilitu minimalizovat.

K účelu daného experimentu je vhodné využít přímou metodu posuzování zvukových stimulů pomocí subjektivních posuzovacích škál. Jde o nejoblíbenější a nejpoužívanější psychometrickou metodu. Mezi její největší přednosti patří jednoduchost, rychlost a univerzálnost při aplikaci. Pro testované uživatele je navíc poměrně zajímavá, protože interpretace jejich rozhodnutí bývá pro většinu jedinců velmi intuitivní. Spočívá v umístění daného podnětu na spojitém psychologickém kontinuu v závislosti na posouzení vjemu, který tento podnět vyvolal [18].

5.1. Vyhodnocení pomocí numerické škály

Tato stupnice je tvořena posloupností celých čísel a doplněna slovními popisy všech, nebo alespoň některých hodnot. Posluchačovým úkolem je přiřadit každému podnětu číslo stupnice tak, aby jeho slovní popis co nejvíce odpovídal vyvolanému vjemu. Hlavním předpokladem při vytváření numerické škály je alespoň přibližné splnění podmínky vzájemné korespondence hodnot psychoakustické proměnné s jejich slovními popisy.

5.2. Vyhodnocení pomocí grafické škály

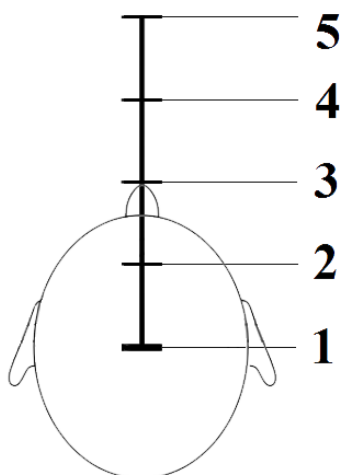
Jedná se o nejpoužívanější typ subjektivní posuzovací škály, protože práce s ní je pro posluchače zajímavější a snazší než v případě numerické stupnice. Posuzování podnětů se provádí grafickým vyznačením bodu na úsečce, kam by posluchač posuzovaný podnět umístil. Tyto úsečky se mohou lišit délkou, měřítkem, číselným nebo slovním popisem jednotlivých bodů. Vzhledem ke zmíněným vlastnostem bude tento typ škály použit pro hodnocení míry externalizace zvukového zdroje v připravovaném experimentu.

6. Popis experimentu

Pro praktickou realizaci experimentu je třeba provést implementaci jak po stránce softwaru, tak hardwaru. To zahrnuje volbu vhodného programovacího prostředí, umožňujícího zpracování signálu v reálném čase, a následné vytvoření algoritmu. V případě hardwaru se jedná o zvolení potřebných komponent, jejich propojení, správné nastavení a následné otestování. Dále je třeba brát zřetel na přípravu scénáře pro psychoakustický experiment. Mezi důležité úkoly, které je třeba vyřešit, se řadí např. výběr zvukových stimulů, interaktivní způsob vyhodnocování, vhodný zácvik posluchačů. Popis zvolené konfigurace včetně scénáře experimentu je uveden v následujících kapitolách.

6.1. Scénář experimentu

Měření bude probíhat formou poslechových testů automaticky řízeného experimentu technikou binaurální stereofonie, tedy za pomoci sluchátek. Experiment bude individuální, takže sezení bude probíhat s každým posluchačem zvlášť za přibližně stejných experimentálních podmínek. Posluchači bude předložena sada zvukových nahrávek. Jeho úkolem bude nahrávky slovně ohodnotit dle níže uvedené grafické škály (obrázek 11) a rozhodnout, zda přehrávaný zvuk vyšel z reproduktoru, nebo byl virtuálně doplněn. Nahrávky budou virtuálně polohovány do sluchátek několika metodami. Dále bude sledován vliv externalizace na charakter a pozici generovaného zvukového stimulu. Experiment bude navíc rozdělen na dvě části, kdy při jedné z nich se uživatel zakryje oči. Pro možnost kontroly průběhu experimentu bude vytvořeno řídicí grafické rozhraní umožňující zahájení, ukončení a monitoring během experimentu. Experimentátor díky tomu bude moci upozorňovat posluchače, v jaké části experimentu se právě nacházejí.



Obrázek 11: Subjektivní škála definující stupeň externalizace zvukového zdroje

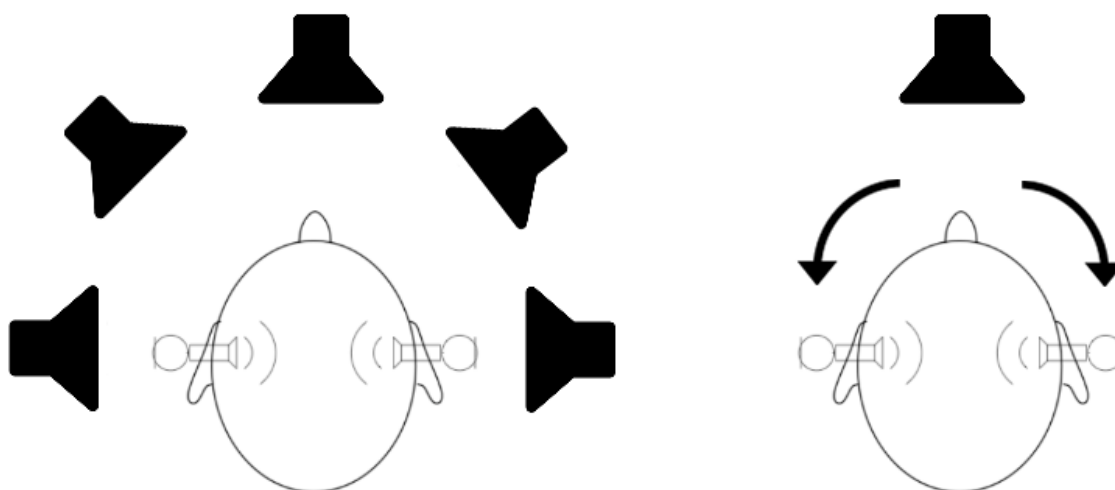
Pro přehlednost je v tabulce 2 uveden seznam všech proměnných, se kterými se bude během měření pracovat. Aby měly výsledky experimentu odpovídající hodnotu, je třeba provést měření minimálně desetkrát. V rámci testovacích signálů je potřeba použít více stimulů. Ideálně se vytvoří takový soubor, který alespoň zčásti zastoupí některé kategorie signálů, např. syntetické zvuky (čistý tón, složený tón, bílý šum), reálné zvuky (perkusií charakter, hudební charakter, řečový signál).

Proměnná	Počet prvků	Specifikace
Nezávislé proměnné:	6	-
Posluchač	15	pokusné osoby
Zvukový signál	5	<ul style="list-style-type: none"> • bicí • mužská promluva • piano • bílý šum • harmonický signál
Hodnota echa	3	<ul style="list-style-type: none"> • bez echa • střední echo • vysoké echo
Zrakový podnět	2	<ul style="list-style-type: none"> • světlo • tma
Azimutální pozice	5	<ul style="list-style-type: none"> • -90° • -45° • 0° • 45° • 90°
Zvukový zdroj	3	<ul style="list-style-type: none"> • reálný • virtuální (model) • virtuální (HRTF)
Závislé proměnné:	2	
Míra externalizace zvukového zdroje	5	1....zcela laterizován 5....zcela externalizován
Původ zvukového zdroje	2	V...virtuální R...reálný

Tabulka 2: Seznam proměnných pro experiment s externalizací

6.2. Simulace reálného zdroje zvuku

Mezi úkoly experimentu se řadí i test schopnosti posluchače odlišit reálné zvukové stimuly od těch uměle vygenerovaných. To vyžaduje simulaci reálného zdroje zvuku. Možnosti jsou v zásadě dvě - buď se využije více pevných reproduktorů, nebo se jeden reproduktor umístí vždy do příslušného místa a poté se s ním bude hýbat. Každá z variant má svá úskalí.



Obrázek 12: Možnosti simulace reálného zdroje zvuku

V prvním případě jde především o zajištění několika pevných zdrojů - reproduktorů, které budou umístěny na různých místech. Nebude se jednat o virtuální zdroje, ale reálné. Dojde tedy k nahrazení např. nějakého mluvčího reproduktorem postaveným v místě, kde by stál. Pokud mají reproduktory simulovat různé zdroje, mohou být umístěny v různých polohách či vzdálenostech a není kritická jejich kalibrace. Konkrétní realizace metody je vidět na obrázku 12 vlevo. Jedná se o matici „stejných“ reproduktorů, které představují jeden reálný zdroj v různých pozicích. Toto rozložení ale přináší omezení. Jelikož každý z reproduktorů simuluje tentýž zdroj, je nutné, aby reproduktory měly shodné vlastnosti a charakteristiky. Toto řešení není nereálné, nicméně pracnější na realizaci. Další otázkou je způsob přehrání zvuku. Když se jedná o vytvoření reálných zdrojů rozmístěním reproduktorů a poté přehrání jednoho zdroje do jednoho reproduktoru, např. pomocí vícekanálové zvukové karty, problém nevzniká. Pokud by se ale vytvářel virtuální zdroj na reproduktory, bylo by třeba zajistit polohovací algoritmus, kterým se virtuální zdroj vytvoří. Poté se bude jednat o zdroj virtuální, nikoli reálný. Při samotném měření by se pak musely brát v úvahu i vlastnosti polohovacího algoritmu.

V případě druhé varianty (obrázek 12 vpravo) by byl zapotřebí pouze jeden reproduktor, což je zřejmá výhoda oproti první možnosti. Představa ruční manipulace s reproduktorem během experimentu se jeví jako časově i fyzicky náročná, i když v minulosti se již takto několik měření provádělo. Nabízí se však možnost nepohybovat reproduktorem, nýbrž posluchačem. Místo umístění reproduktoru do určitého bodu se uživatel natočí do příslušné pozice vzhledem k reproduktoru.

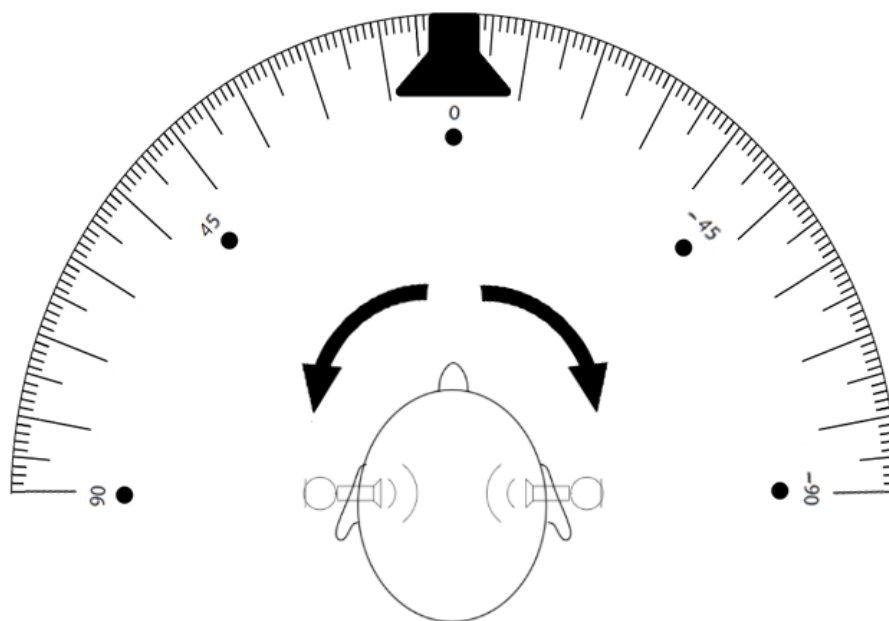
Pro tyto účely experimentu byla využita dálkově ovládaná židle, vytvořená v rámci projektu SGS kolegou Ondřejem Šupkou [19]. Jako rozhraní mezi řídicím programem a driverem motoru otáčení židle slouží vývojový kit Arduino Uno, který disponuje připojením k počítači přes USB a umožňuje emulaci sériového portu. Fyzické propojení s židlí je realizováno UTP kabelem. Řízení je velmi jednoduché. Prakticky jde o posílání hodnot 0-225 přes sériový port (resp. jeho emulaci). Arduino v sobě obsahuje panem Šupkou vytvořený skript, který příchozí čísla příslušně vyhodnotí a pošle instrukce do driveru motoru. Ten již řídí proud v jednotlivých cívkách motoru. V přiložené tabulce 3 se lze dočíst seznam instrukcí a k nim odpovídající operace.

Hodnota	Operace
1-230	natočení o daný úhel
238	zapnutí motoru
239	vypnutí motoru
240-249	nastavení rychlosti
250	směr otáčení doprava
251	směr otáčení doleva
255	inicializace

Tabulka 3: Operace prováděné Arduinem v závislosti na zaslaných hodnotách

6.3. Rozmístění pozic a uživatele

Následující obrázek znázorňuje rozvržení testovacích pozic a pohyb uživatele během experimentu. Každá pozice je definovaná tečkou a hodnotou azimutu. Pro testování vlivu změny pozice zdroje zvuku na stupeň externalizace v systémech ARA bylo zvoleno pět pevných pozic v horizontální rovině definovaných v kapitole 2.1. – 90° , 45° , 0° , -45° , -90° . Praktické rozvržení si lze prohlédnout na fotografiích v příloze D.

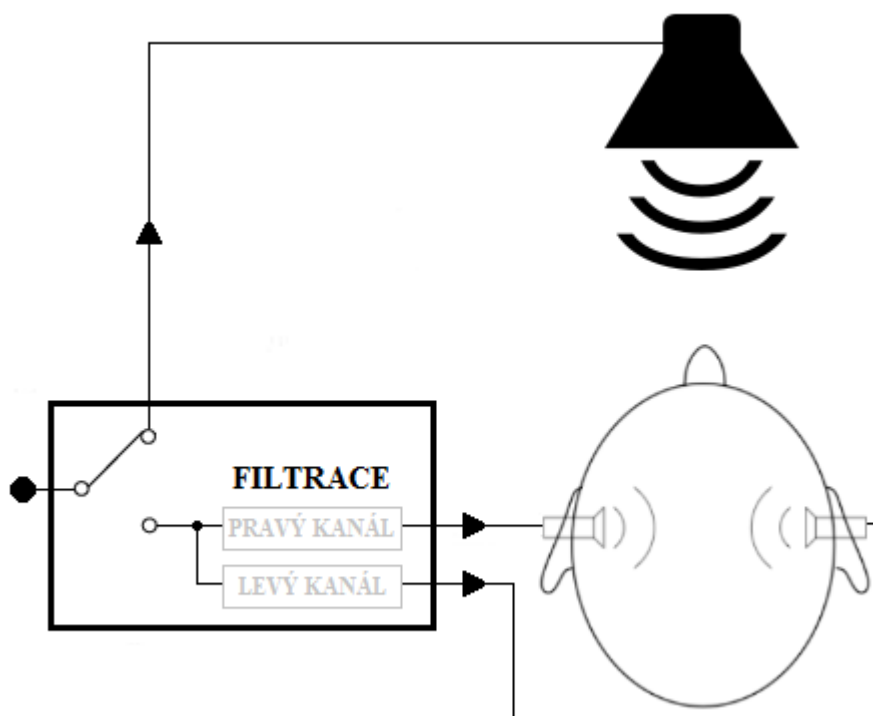


Obrázek 13: Postavení reproduktoru, posluchače a rozložení pozic

Reproduktor je statický a umístěný před posluchačem v úrovni hlavy. Díky dálkově ovládané otočné židli je uživatel vždy umístěn do požadovaného úhlu vůči reproduktoru. Systém otáčení je navržen tak, že úhel natočení je konstantní s krokem 45° . Uživatel se pohybuje v půlkruhu zleva doprava a zpět, prochází tedy postupně všemi pozicemi. Tento způsob pozicování byl zvolen z několika důvodů. Jedním z nich je pravidelnost v obměňování pozic v průběhu experimentu, což usnadňuje práci při vytváření poslechových testů. Další výhodou je nižší časová náročnost experimentu, a s tím související efektivita. Židle se otáčí s definovanou rychlostí, takže se změnou pozice o různé úhly by docházelo i ke změně časového intervalu potřebného pro samotné otočení. Při dodržení stejné doby určené pro experiment by poté klesl počet otestovaných pozic.

6.4. Přepínání mezi virtuálním a reálným zdrojem

Experiment vyžaduje schopnost přepínat mezi zvukem do sluchátek a do reproduktoru. Pro dodržení dříve zmíněného principu ARA je navíc potřeba zajistit přenos signálu z binaurálních mikrofonů, umístěných v uších posluchače, zpět do sluchátek. Obrázek 14 naznačuje obecný způsob přepínání mezi výstupy systému pro studium externalizace. Vstupní signál se buď přímo vyšle na reproduktorový výstup, nebo je filtrován příslušným algoritmem a virtuálně polohován do sluchátek. Vykreslený princip udává požadavky jak na softwarovou stránku systému, tak i na hardwarové řešení. V prvním případě jde o zajištění počítače s programem umožňujícím práci se zvukem v reálném čase. V druhém případě pak v úvahu přichází využití externí vícekanálové zvukové karty, která je schopná se připojit k řídicímu počítači, disponuje nízkou latencí a také dostatečným počtem vstupů/výstupů. Konkrétně se jedná o 2 vstupy pro mikrofony a výstupy do sluchátek a reproduktoru. Z těchto důvodů byla využita zvuková karta RME Fireface 400 a notebook Hewlett-Packard s procesorem i5.

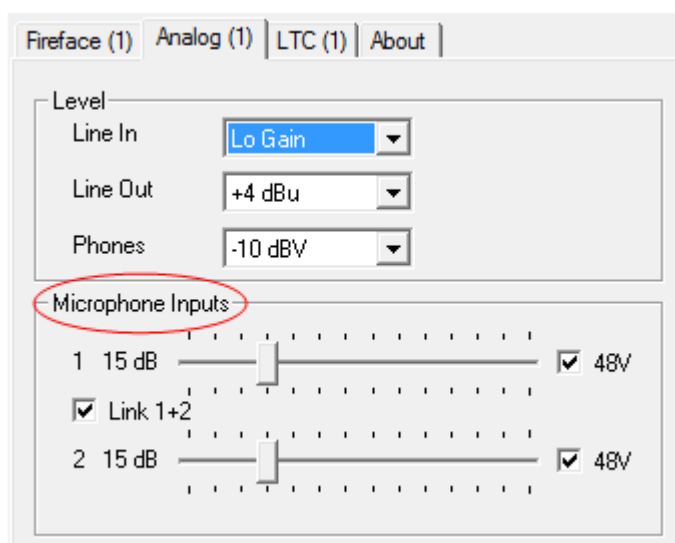


Obrázek 14: Princip přepínání mezi virtuálním a reálným zdrojem zvuku

Řídicí počítač je propojen s externí zvukovou kartou Fireface 400 přes rozhraní FireWire. Obrázek 15 vyznačuje propojení jednotlivých komponent se zvukovou kartou. Výstup z mikrofonů binaurálních sluchátek se pomocí redukce přivede na XLR vstupy zvukové karty, které zároveň zajišťují fantomové napájení pro mikrofony. Nastavení zvukové karty lze vidět na obrázku 16. Kromě jiného bylo zvoleno zesílení mikrofonů 15 dB. K této hodnotě jsem dospěl na základě subjektivního testování, přičemž jsem bral v úvahu především přirozenost poslechu. Ze zvukové karty je vyveden jednak výstup do sluchátek, kde byla použita redukce z konektoru jack 6,3 mm na jack 3,5 mm. Druhý výstup typu jack 6,3 mm, umístěný na zadní straně zvukové karty, je připojen k zesilovači obsluhujícímu reproduktor.



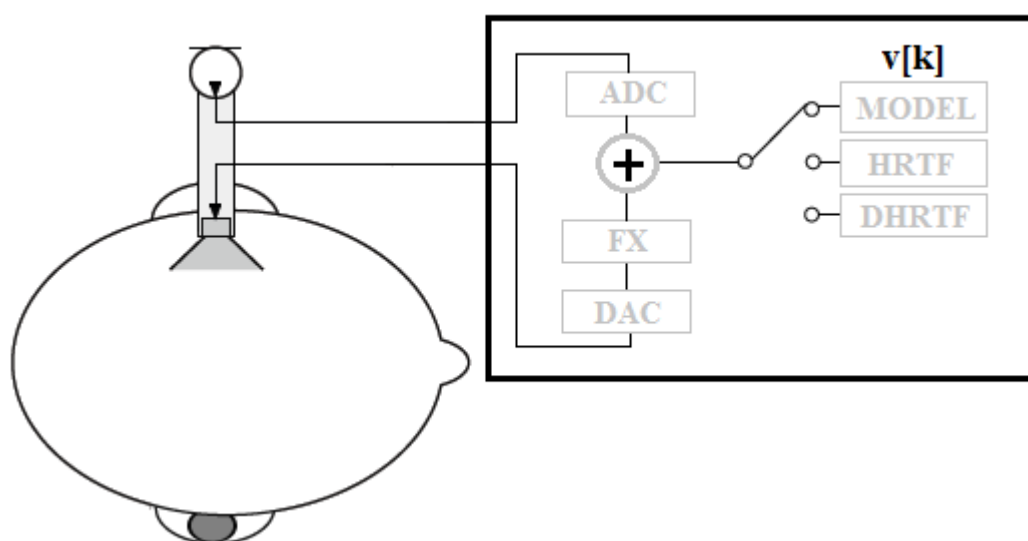
Obrázek 15: Fyzické propojení zvukové karty s ostatními komponenty



Obrázek 16: Softwarové nastavení zvukové karty

6.5. Rozšíření ARA

Jak již bylo napsáno výše, jednou z dimenzí experimentu je testování vlivu různých metod virtuálního polohování na stupeň externalizace a schopnost zamaskování virtuálního zvuku do prostředí pseudoreality v ARA. Dalším rozměrem experimentu je aplikace zvukových efektů na zpracovávané signály za účelem ovlivnění vjemu externalizace. Vytvořený systém by tedy měl umožňovat zpracování signálu, vkládání virtuálních zvukových objektů pomocí několika přístupů, a to vše provádět v reálném čase. To vyžaduje především efektivní implementaci jednotlivých metod představených v předešlých kapitolách – HRTF, strukturální model HRTF a DHRTF.

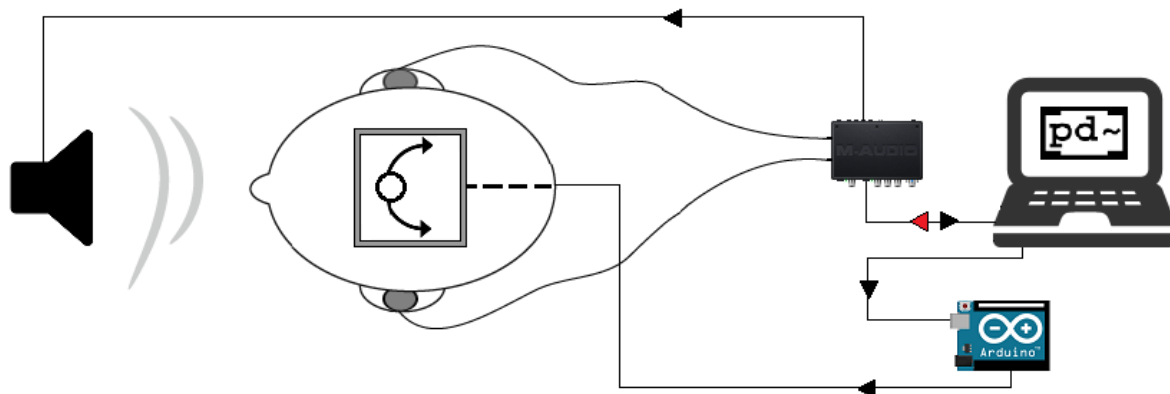


Obrázek 17: Návrh ARA systému pro studium externalizace

Obrázek 17 naznačuje zjednodušený princip ARA systému s uvedeným rozšířením pro jeden zpracovávaný kanál. Signál přicházející do mikrofону, umístěného ve sluchátku posluchače, je přiveden na vstup systému. Tam je digitálně zpracován příslušným algoritmem a doplněn o virtuální zvukový zdroj $v[k]$ pomocí některé z implementovaných metod virtuálního polohování. Poté se signál odešle do sluchátka uživatele. Analogický postup se provede i pro druhý kanál jen s jednou výjimkou. V případě použití metody DHRTF dochází totiž k její aplikaci pouze na jeden kanál, druhý se nezpracovává.

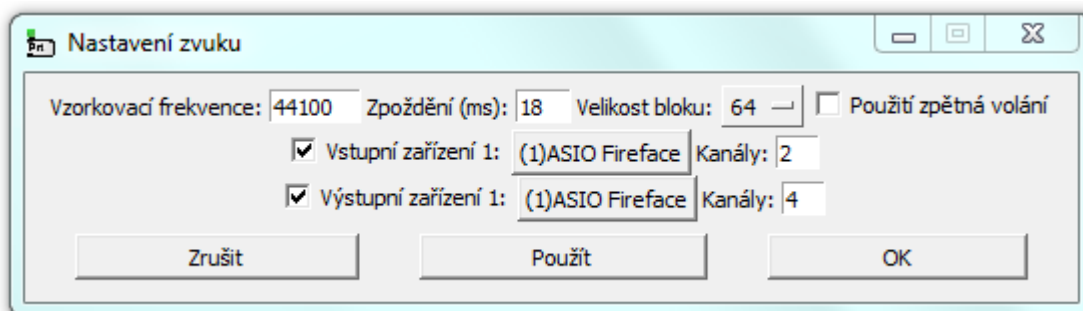
6.6. Měřicí systém

Schéma na obrázku 18 ilustruje celkové propojení jednotlivých hardwarových prvků, které byly zvoleny pro použití v rámci experimentu. Systém je založen na koncepci ARA a doplněn o komponenty umožňující studium jevu externalizace.



Obrázek 18: Schéma systému pro experiment

Základní kostru systému tvoří binaurální sluchátka Roland CS-10EM. Každé z nich obsahuje vestavěný kondenzátorový mikrofón s osmičkovou směrovou charakteristikou a dostatečně vyrovnanou přenosovou funkcí. Mikrofóny ke svému fungování vyžadují fantomové napájení, což zajišťuje zvuková karta Fireface 400. Stereofonní signál z mikrofónů se přivádí na vstup externí zvukové karty, ze které je dále veden přes rozhraní FireWire do řídicího počítače. Zde je v reálném čase zpracován pomocí programovacího prostředí Pure Data a poté vyslán zpět na sluchátkový výstup zvukové karty. Pro zajištění komunikace řídicího programu se zvukovou kartou je třeba v nastavení zvuku zvolit odpovídající zařízení (obrázek 19). Neméně důležitým parametrem pro správnou funkci systému je také latence, s jakou má program pracovat. Testováním se nakonec dosáhlo hraniční hodnoty zpoždění 18 ms, což je vzhledem k účelům experimentu přijatelná hodnota.



Obrázek 19: Zvolené parametry zvukového nastavení

Druhým výstupem zvukové karty je poté počítač propojen s reproduktorem. Pro přepínání výstupů v řídicím programu stačí poslat aktuální zvukový vzorek na odpovídající výstup zvukové karty. Signál jdoucí do sluchátek pak obsahuje buď virtuálně polohovaný zvukový objekt, nebo zvuk z reproduktoru zachycený mikrofony. Pro otáčení uživatele během experimentu slouží dálkově řízená židle. Vývojový kit Arduino Uno je přes USB rozhraní připojen k počítači a řídicí povely z Arduina se vysílají po UTP kabelu.

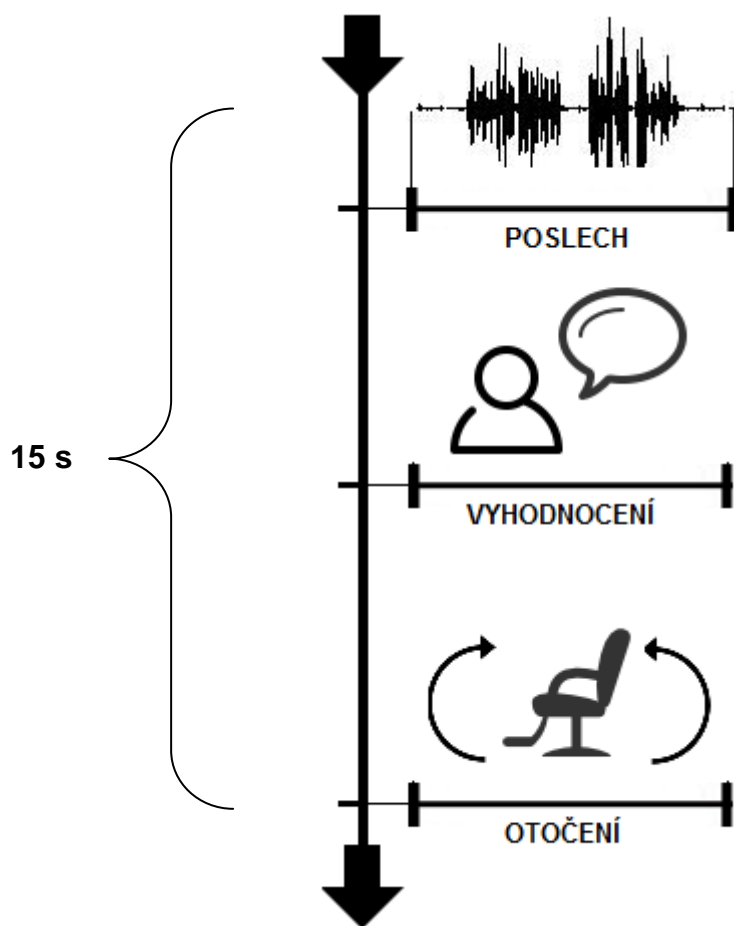
6.7. Plán experimentu

V následujícím textu je popsán přesný průběh experimentu, rozdělený do několika bodů. Zmíněným postupem si projde každý ze skupiny 15 posluchačů, se kterými se experimentální sezení provede. Jako místo provedení experimentu byla zvolena laboratoř Centra asistivních technologií (CAT), která je akusticky upravena.

Každé experimentální sezení bude probíhat tímto způsobem:

- 1) Uživatel je usazen na otočnou židli a s pomocí experimentátora mu jsou nasazena binaurální sluchátka. Poté se mu nastaví opěrka hlavy, znemožňující její pohyb během měření. Experimentátor se ujistí, zda posluchači nastavená opěrka vyhovuje a sluchátka má pevně nasazena.
- 2) Posluchač je podroben instruktáži, při které mu jsou vysvětleny nejdůležitější principy a cíle měření. Především je popsán průběh experimentu, způsob jeho vyhodnocení a probrána hodnotící škála pro určení míry externalizace. Tato část současně slouží jako zácvek posluchače, neboť je již aktivován modifikovaný poslech přes sluchátka. Experimentátor se proto kolem uživatele během instruktáže prochází, občas luskně a průběžně tak kontroluje posluchačovy reakce. V této části je také dán uživateli prostor pro případné dotazy. Instruktáž by neměla přesáhnout 10 minut.
- 3) Poté dojde k samotnému měření pod dohledem experimentátora. Aby uživatel nebyl vystaven přílišné interakci s okolím během experimentu, jsou využity černé závěsy zakrývající okna a řídicí místo s experimentátorem. Posluchač ohodnotí celkem 84 zvukových vzorků, rozdělených do dvou částí. V první polovině měření je v každé pozici před posluchačem umístěn ukazatel, napovídající jakým způsobem hodnotit (obrázek v příloze E). Druhá část experimentu probíhá tak, že uživatel má zakryté oči a předpokládá se, že způsob hodnocení si již osvojil. Každá z částí by měla trvat 10 minut a posluchač je vždy upozorněn experimentátorem, když se nachází v polovině dané části.

Následující obrázek naznačuje vzorový průběh jednoho měřicího cyklu experimentu. Posлуhač si nejdříve přes sluchátka poslechne zvukovou ukázkou. Ta je mu přehrána dvakrát a na celý poslech je vyhrazen čas 5 sekund. Následuje interval pro vyhodnocení. Posлуhač se má za úkol během 5 sekund slovně vyjádřit, zda zvuková ukázkou vyšla z reproduktoru – R, nebo byla vytvořena virtuálně – V. Poté ohodnotí podle předložené grafické škály s rozsahem 1 - 5 míru externalizace zvukového vzorku, kde číslo 1 představuje zcela laterizovaný zdroj, číslo 5 naopak zcela externalizovaný. Ve výsledku tedy vždy musí zaznít určitá kombinace písmena a čísla, např. V-4. Po uplynutí času se židle s uživatelem natočí do další pozice a cyklus se opakuje. Celý interval trvá 15 sekund.



Obrázek 20: Fáze jednoho cyklu experimentu

7. Implementace prostředí pro experiment

Pro vytvoření obsluhujícího algoritmu byl zvolen program Pure Data (dále jen PD). PD je grafický programovací jazyk kombinující grafické a klasické textové programování. Kód je zároveň uživatelským rozhraním. Byl vytvořen Millerem Puckettem a neustále se rozvíjí komunitou jako open source. Hlavní princip PD je práce s toky dat v reálném čase. Využívá se zejména jako prostředí ke generování a zpracování zvuku, případně videa či obrazu. Fantazii se však meze nekladou, tudíž PD lze používat i k zcela odlišným úkolům, např. ke komunikaci po internetu. Obliba PD převládá především u umělců, lze ho použít i pro vědecké účely a různé simulace. Já budu využívat jeho schopností především v oblasti práce se zvukem.

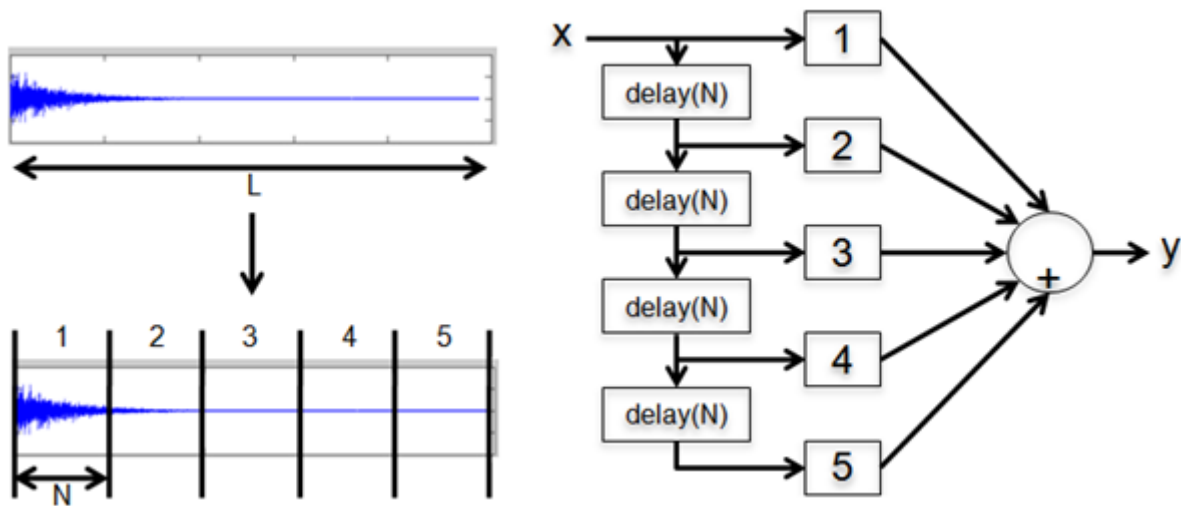
7.1. Úvod do PD

Základními stavebními kameny programování v PD jsou tzv. „objekty“, které vykonávají specifické funkce, jež lze odvodit již z jejich samotných názvů. Vzájemným propojováním jednotlivých objektů pomocí „vodičů“ lze dosáhnout námi požadovaných výsledků. PD pracuje ve dvou režimech – editačním a operačním. V editačním režimu probíhá vlastní proces programování. V operačním režimu se spouští a ovládá výsledný program, který jsme v editačním režimu vytvořili, objekty jsou „uzamknuté“ a nelze je již editovat. Případné zájemce o hlubší poznání jazyka PD odkazuji na [20], kde lze nalézt jak dokumentaci a manuály potřebné pro práci s PD, instalační soubory pro jednotlivé platformy, tak i hotové „patche“ (tj. programy vytvořené v PD).

7.1.1. Implementace operace konvoluce v PD

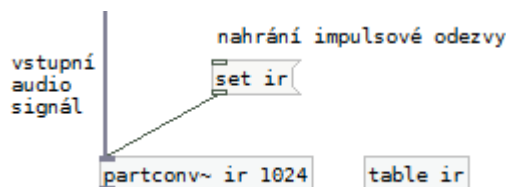
Základní princip matematické operace konvoluce a její účel využití v experimentu byl probrán v kapitole 3.1. Jelikož jedním z požadavků správné funkčnosti ARA systému je především zpracování v reálném čase, je třeba se zamyslet nad implementací konvoluce s ohledem na její časovou a výpočetní náročnost. Jednoduchým způsobem, jak dosáhnout přiměřené latence a přitom zachovat relativně nízké výpočetní požadavky, je rozdělit zpravidla dlouhou impulsní charakteristiku na více kratších bloků. Konvoluce poté probíhá paralelně v rámci několika menších bloků.

Je dána impulsní charakteristika konečné délky L , která se rozdělí do P bloků stejné délky N . Délka bloku N je s ohledem na implementaci algoritmu a použití FFT volena jako mocnina 2. V případě, že délka impulsní charakteristiky L není celočíselným násobkem délky bloku K , může být na potřebnou délku doplněna nulovými hodnotami. Tímto způsobem tedy lze převést výchozí filtr na odpovídající paralelní kombinaci filtrů kratších, což naznačuje obrázek 21. Každá paralelní větev se skládá z jednoho bloku impulsní odezvy a zpoždění *delay*, které odpovídá pozici bloku v původní IR.



Obrázek 21: Principiální schéma konvoluce po blocích

V PD existuje funkce *partconv~*, která realizuje právě konvoluci po blocích. Vstupními parametry jsou impulsová odezva a velikost bloku N . Je třeba poznamenat, že s větší hodnotou bloku roste jednak efektivita, ale i latence. Následující obrázek znázorňuje praktickou realizaci konvoluce zvukového signálu s příslušnou impulsovou odezvou, která je uložena v `table ir`.

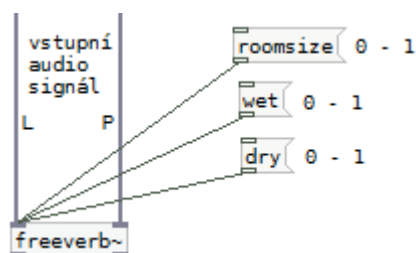


Obrázek 22: Konvoluce zvukového signálu s impulsovou odezvou v PD

7.1.2. Implementace efektu dozvuku v PD

Efektová úprava zvuku slouží k výrazným změnám vlastností jednoho nebo více zvukových parametrů. Efekty se mohou dělit podle toho, na který ze zvukových parametrů má efektová úprava převažující vliv - výšku, sílu, barvu či časový rozměr zvuku. Jde o simulaci ozvěny, resp. dozvuku uvnitř uzavřených prostor. Zvuková vlna dopadající na překážku se zčásti pohltí, zčásti pak dojde k jejímu odrazu. Tím vzniká informace o prostoru. Na charakter dozvuku má vliv např. velikost místnosti. Je-li zvuk „suchý“ (bez odrazů), člověk jej vnímá jako něco nepřirozeného.

Funkce *freeverb~* pracuje na principu jednoduché implementace standardního Schroeder/Moorer modelu dozvuku, který využívá 8 hřebenových filtrů jak pro levý, tak pro pravý kanál. Vstupem funkce jsou dva kanály pro příchodící stereofonní signál. V případě monofonního zvuku lze využít jen jeden z kanálů. Funkce umožňuje nastavení výsledného efektu několika parametry, z nichž hlavními jsou velikost simulované místnosti a úroveň odraženého a přímého signálu. Na obrázku 23 je schéma efektu v PD s popisem parametrů, včetně jejich rozměrů.

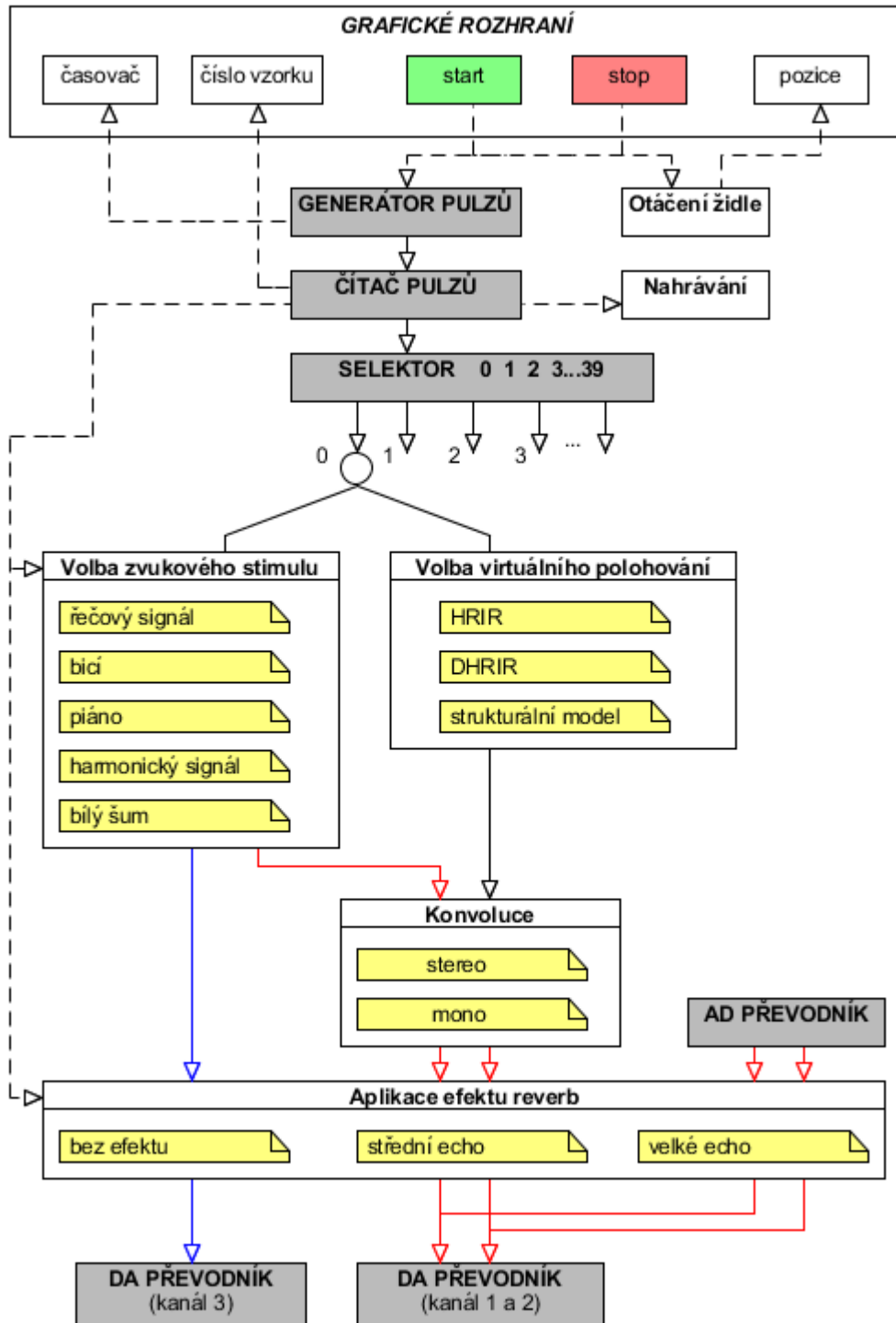


Obrázek 23: Efekt pro vytvoření umělého dozvuku v PD

7.2. Princip řídicího algoritmu

Zjednodušený diagram celkového algoritmu, zajišťujícího průběh experimentu, je zobrazen na obrázku 25. Chod programu je řízen z grafického rozhraní, konkrétně pomocí intuitivních tlačítek „start“ a „stop“. Kliknutím na dané tlačítko je předána informace funkcím pro generování impulsů a automatické otáčení židle. Informace o pořadovém čísle aktuálního zvukového vzorku, generovaná čítačem impulsů, je rozesílána a zpracována v dalších částech programu. Každý vytvořený impuls představuje jeden zvukový vzorek. Parametry daného zvukového stimulu jsou postupně definovány průchodem impulsu algoritmem. Nejdříve se stanoví typ zvukového zdroje a výstup (reproduktor – modrý průběh signálu /sluchátka – červený průběh signálu). V případě volby výstupu na reproduktor je signál vyslán do efektovací jednotky a poté převeden do analogové podoby. Pokud má být požadovaný zvuk přehráván ve sluchátkách, je třeba jej virtuálně polohovat. To

vyžaduje výběr polohovací metody. Zvolením jedné z implementovaných metod jsou načteny příslušné impulsové odezvy. Virtuální zvuk je pak vytvořen pomocí konvoluce signálu s načtenými odezvami. Následuje aplikace efektu a sečtení virtuálního zdroje zvuku s pseudoakustickou realitou z mikrofonů, čímž dojde k vytvoření rozšířené zvukové reality.

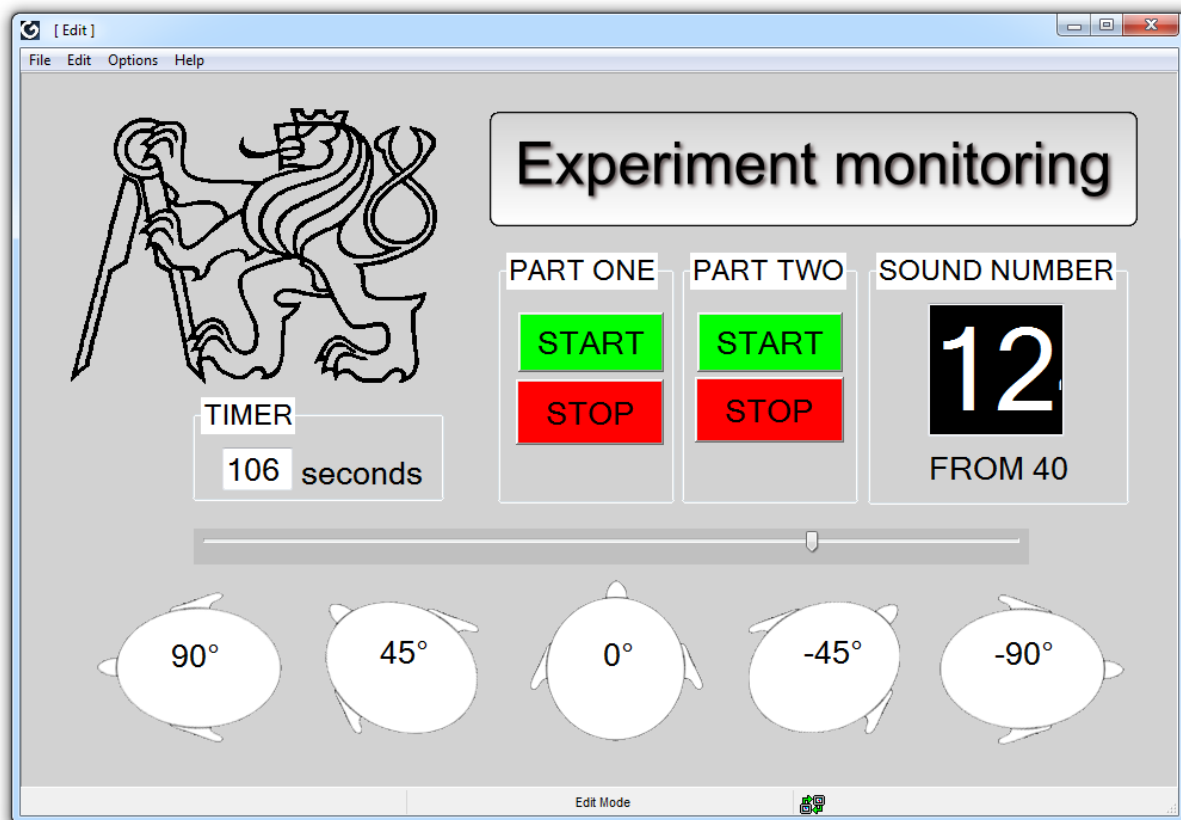


Obrázek 24: Diagram celkového algoritmu experimentu

7.2.1. Grafické rozhraní

Graphical Interface for Pure Data je multiplatformní rozšíření softwaru Pure Data, umožňující tvorbu grafického uživatelského rozhraní pro hotové programy v Pure Data, tzv. „patche“. Veškeré informace o GrIPD, včetně instalačních souborů, lze získat na [21]. GrIPD komunikuje s patchem prostřednictvím PD systému zpráv se „send“ a „receive“ objekty. GrIPD obsahuje dvě základní komponenty – PD objekt *gripd* - `gripd` a externí GUI editor/aplikaci. Obě dvě operují jako separované programy a spolupracují prostřednictvím TCP/IP. Funkce *gripd* je psaná v programovacím jazyce C a jedná se o rozšiřující knihovnu pro PD, která se umístí do vyhotoveného patche.

Pro řízení a kontrolu průběhu experimentu bylo za pomoci rozšiřující knihovny GrIPD vytvořeno přehledné grafické rozhraní, které si lze prohlédnout na obrázku 25. Aplikace umožňuje obsluhovat každou část experimentu příslušnými tlačítky. Navíc se uživateli zobrazuje uplynulý čas měření, aktuální pořadové číslo zvukového vzorku a pozice posluchače.

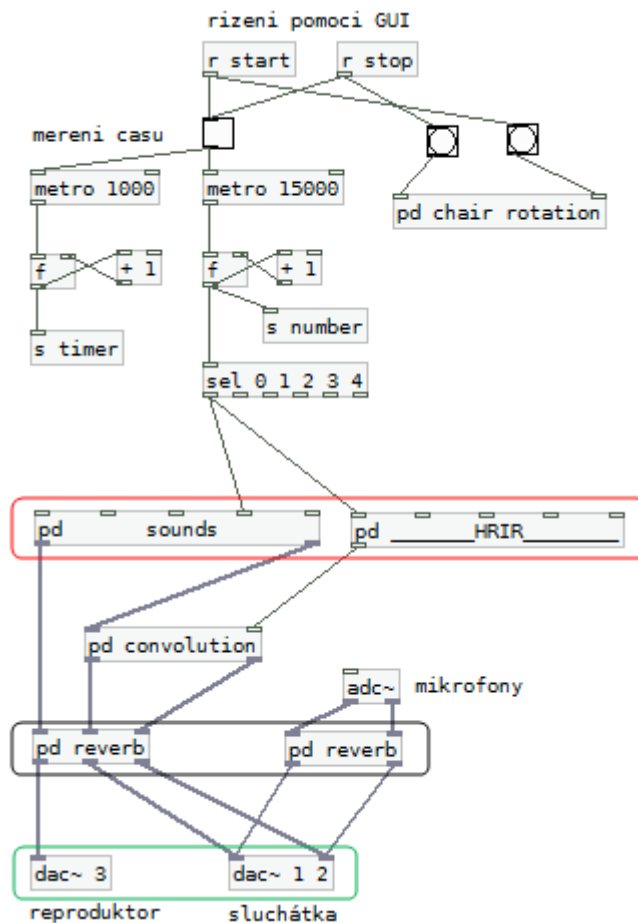


Obrázek 25: Grafické rozhraní určené pro řízení experimentu

7.2.2. Průchod algoritmem

Praktickou ukázkou celkového průběhu jednoho cyklu experimentu znázorňuje obrázek 26. Startovací impuls vyslaný z grafického rozhraní zahájí automatické otáčení židle a zapne řídicí generátor impulsů, vysílající každých 15 sekund. Generátor pošle impuls do čítače, který předá číslo funkci s názvem *sel*. Ta podle přijatého čísla vygeneruje impuls na příslušném výstupu, v tomto případě 0.

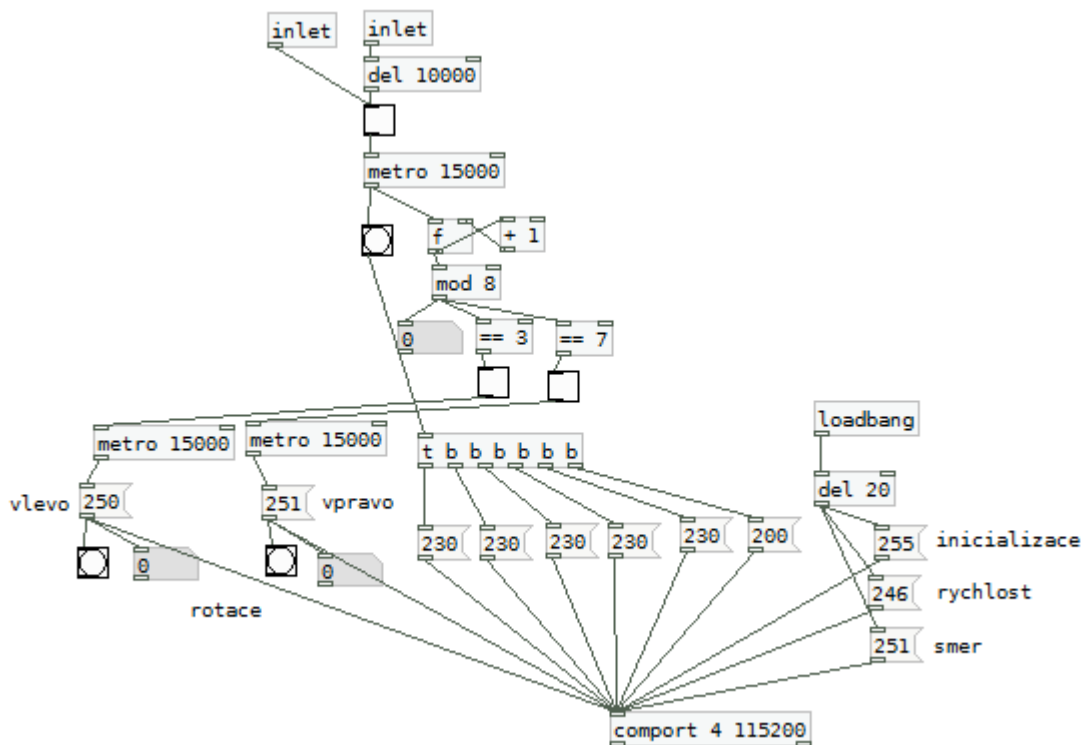
V první části cyklu (červeně označené) se volí, jaký zvukový vzorek bude přehrán a zda má být virtuálně polohován některou z metod do sluchátek, nebo vyslán do reproduktoru. Je tedy nutné generovat dva impulsy – jeden zodpovídá za spuštění požadovaného zvukového stimulu. Druhý impuls rozhoduje o použité polohovací metodě a pozici zvuku v horizontální rovině. Druhá část cyklu (černě označená) umožňuje aplikaci efektu umělé ozvěny na jeden ze tří vstupů – reálný zdroj z reproduktoru, virtuální zdroj do sluchátek nebo pseudoakustickou realitu z mikrofonů. Třetí část (zeleně označená) definuje jednotlivé audio výstupy programu, které jsou propojeny s externí zvukovou kartou.



Obrázek 26: Ukázka průběhu jednoho cyklu algoritmu v PD

7.2.3. Otáčení židle

Algoritmus pro ovládání natočení židle je zobrazen na obrázku 27 a je navržen tak, aby pohyb židle během experimentu probíhal zcela automaticky. Stěžejní je funkce `comport 4 115200`, která řídí komunikaci s židlí a vysílá po sériovém portu číslo 4 počet mikroinstrukcí, odpovídající natočení o úhel 45° . Jelikož počet zaslaných mikroinstrukcí v jednom časovém okamžiku je limitován hodnotou 230 a natočení židle o 1° odpovídá přibližně 30 instrukcím, je potřeba zaslat sérii hodnot postupně. Natočení židle o 45° znamená odeslat $30 \cdot 45$, tedy 1350 instrukcí. Toho se dosáhne díky funkci `t b b b b b`, která impulsem na vstupu vygeneruje sérii po sobě jdoucích impulsů na výstupu. Při spuštění funkce se nejdříve systém automaticky inicializuje zasláním hodnoty 255 a zároveň dojde i k nastavení rychlosti a směru otáčení židle. Samotný chod algoritmu je řízen dvěma vstupy – jeden přijímá startovací impuls. Ten je vyslán v okamžiku začátku měření. Jelikož ale každému otočení předchází přehrání zvuku uživateli a časový interval pro vyhodnocení, musí být impuls zpožděn. To zajišťuje funkce `del 10000`, která příchozí impuls opozdí o 10 sekund. Až poté dojde ke spuštění generátoru impulsů s intervalem 15 sekund, což odpovídá času pro natočení židle do dané pozice, přehrání zvuku a vyhodnocení od posluchače. Pro pohyb židle v půlkruhu se musí pravidelně měnit směr otáčení. Na výstupu generátoru impulsů je proto vytvořen jednoduchý čítač impulsů spojený s funkcí *modulo 8*.

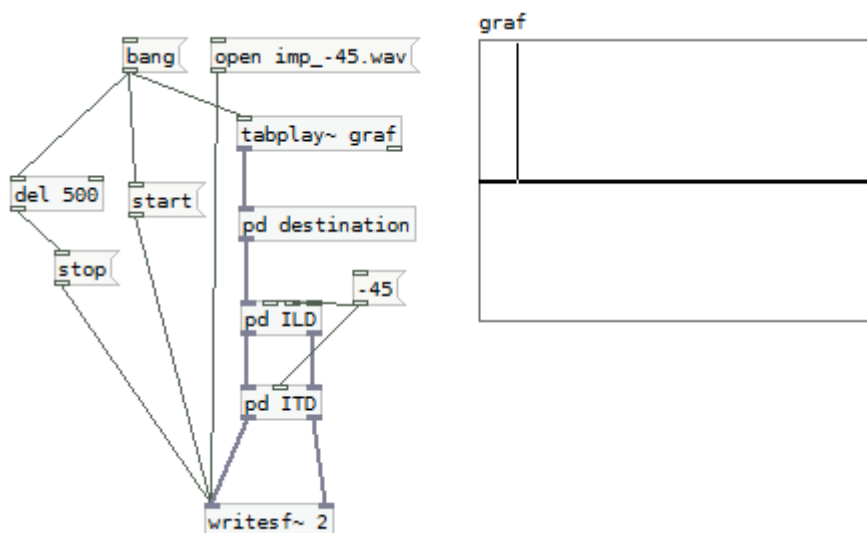


Obrázek 27: Algoritmus pro automatické otáčení židle

7.2.5. Sběr HRIR pro experiment

Pro snadnější práci se strukturálním modelem, implementovaným v PD v rámci mé bakalářské práce, byly změřeny impulsové odezvy modelu pro požadované hodnoty azimutu. Na následujícím obrázku je vidět schéma měření. Nejprve je vytvořen prázdný zvukový soubor typu wav s definovaným názvem, např. „imp_-45.wav“. Pokud není nastavena složka, ve které se má soubor vytvořit, dojde k jeho vygenerování ve složce obsahující daný PD patch.

Dirackův impuls, nahraný v grafu, je kliknutím na příkaz `bang` přehrán skrze filtry reprezentující ILD, ITD a výstup se ukládá do připraveného zvukového souboru díky funkci `writesf~ 2`. Ta je řízena symboly „start“, „stop“ a jedním z parametrů této funkce je i počet kanálů výsledného zvuku, který v tomto případě činí 2 – jedná se tedy o stereofonní signál. Tímto způsobem lze získat impulsovou odezvu daného systému.

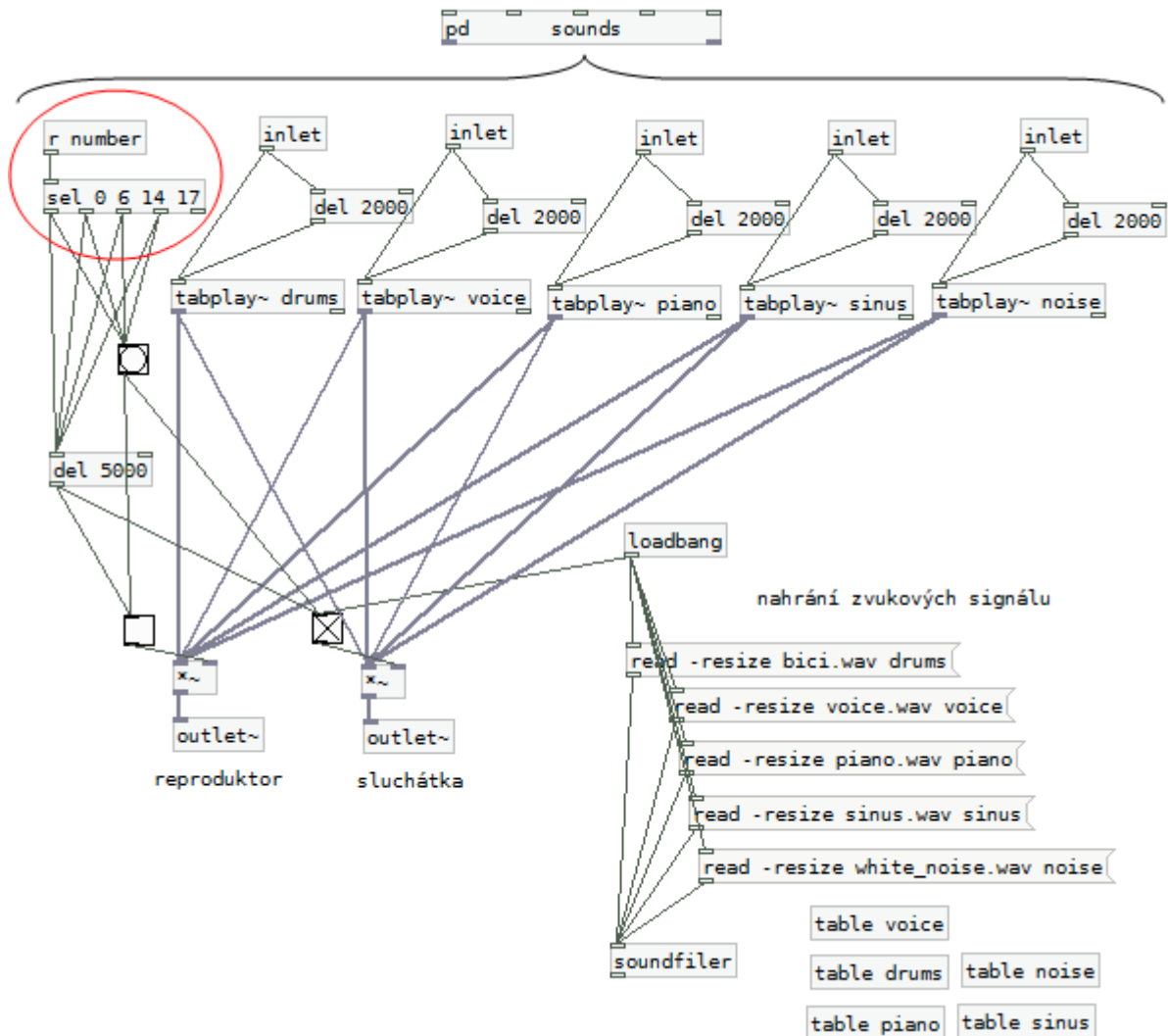


Obrázek 29: Schéma pro změření HRIR strukturálního modelu

Při následné implementaci metody strukturálního modelu HRTF v rámci experimentu již není potřeba znovu vytvářet zmíněné filtry simulující principy ILD a ITD. K virtuálnímu polohování zvukového zdroje postačí načtení získaných impulsových odezví a následná konvoluce se zvoleným zvukovým vzorkem, jako v případě implementace metod HRTF a DHRTF. Pro tento experiment byly použity naměřené impulsové charakteristiky [22] s krokem azimutu 15° po celém rozsahu, tedy 360° , kde azimut 0° je pozice přímo před obličejem a rostoucí azimut je proti směru hodinových ručiček.

7.2.6. Výběr zvukového signálu a výstupu

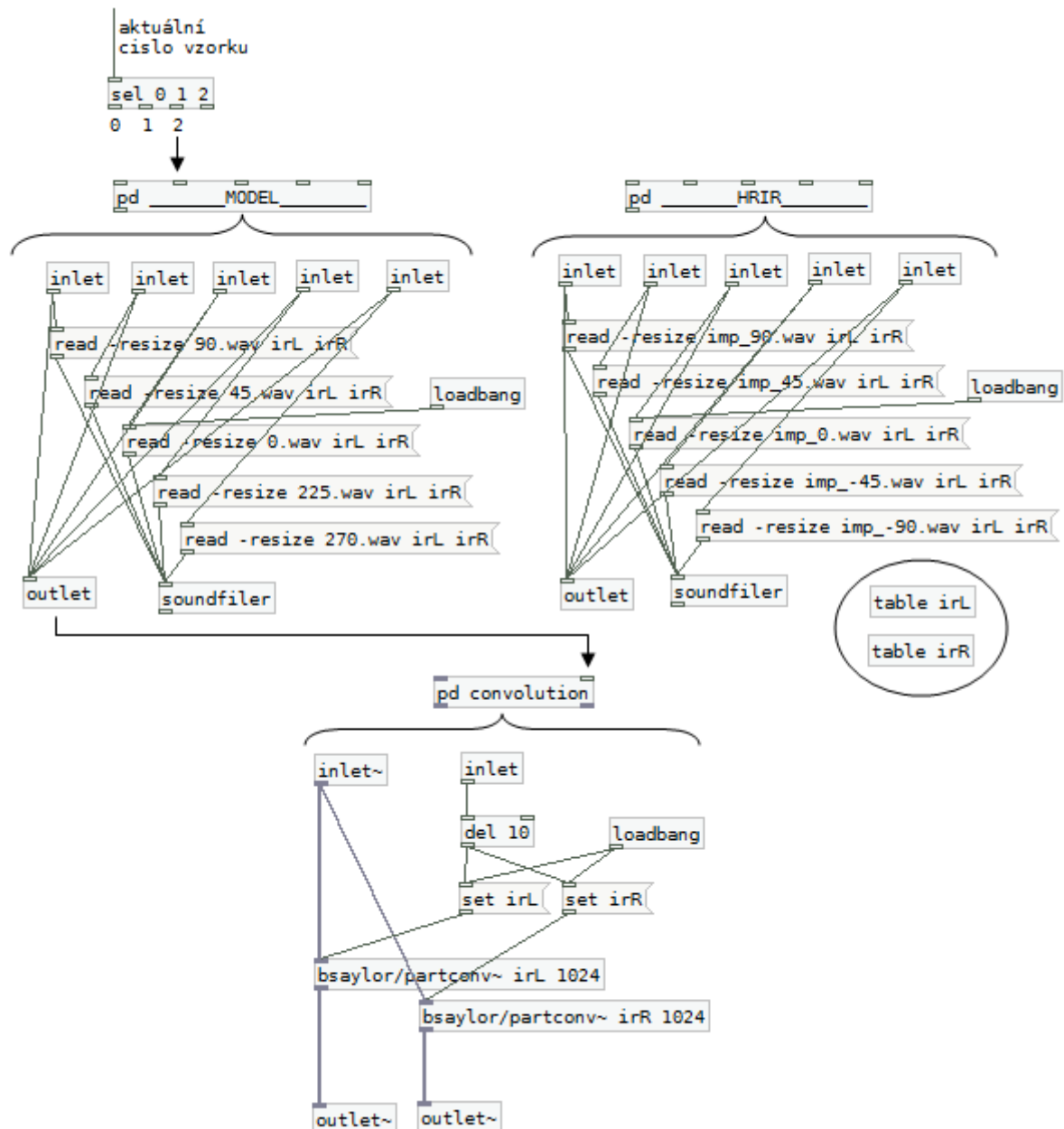
Volba zvukového stimulu a výstupu se provádí pomocí funkce *sounds*. Algoritmus lze zhlédnout na obrázku 30. Funkce obsahuje pět vstupů, přičemž přivedením impulsu na zvolený vstup se přehraje jeden z načtených zvukových souborů dvakrát. To je zajištěno rozdvojením impulsu na vstupu. První impuls spustí okamžité přehrávání, přičemž druhý impuls je zpožděn o dvě sekundy. Nahrání souborů probíhá automaticky se zapnutím programu. Funkce disponuje dvěma výstupy. Levý výstup představuje reproduktor a pravý sluchátka (nastavený defaultně). Rozhodnutí, zda daný zvukový vzorek bude přehráván reproduktorem či virtuálně polohován do sluchátek, je dáno pořadovým číslem zvukového vzorku v rámci experimentu. Čísla zvuků, určených pro přehrávání reproduktorem, obsahuje příslušná funkce (červeně označeno). Pokud je funkcí přijat index odpovídající jednomu z těchto čísel, dojde k přepnutí výstupu na reproduktor. Po přehrávání zvuku je výstup opět vrácen do původního nastavení.



Obrázek 30: Funkce nastavující zvukový stimul a výstup

7.2.7. Implementace strukturálního modelu a HRTF

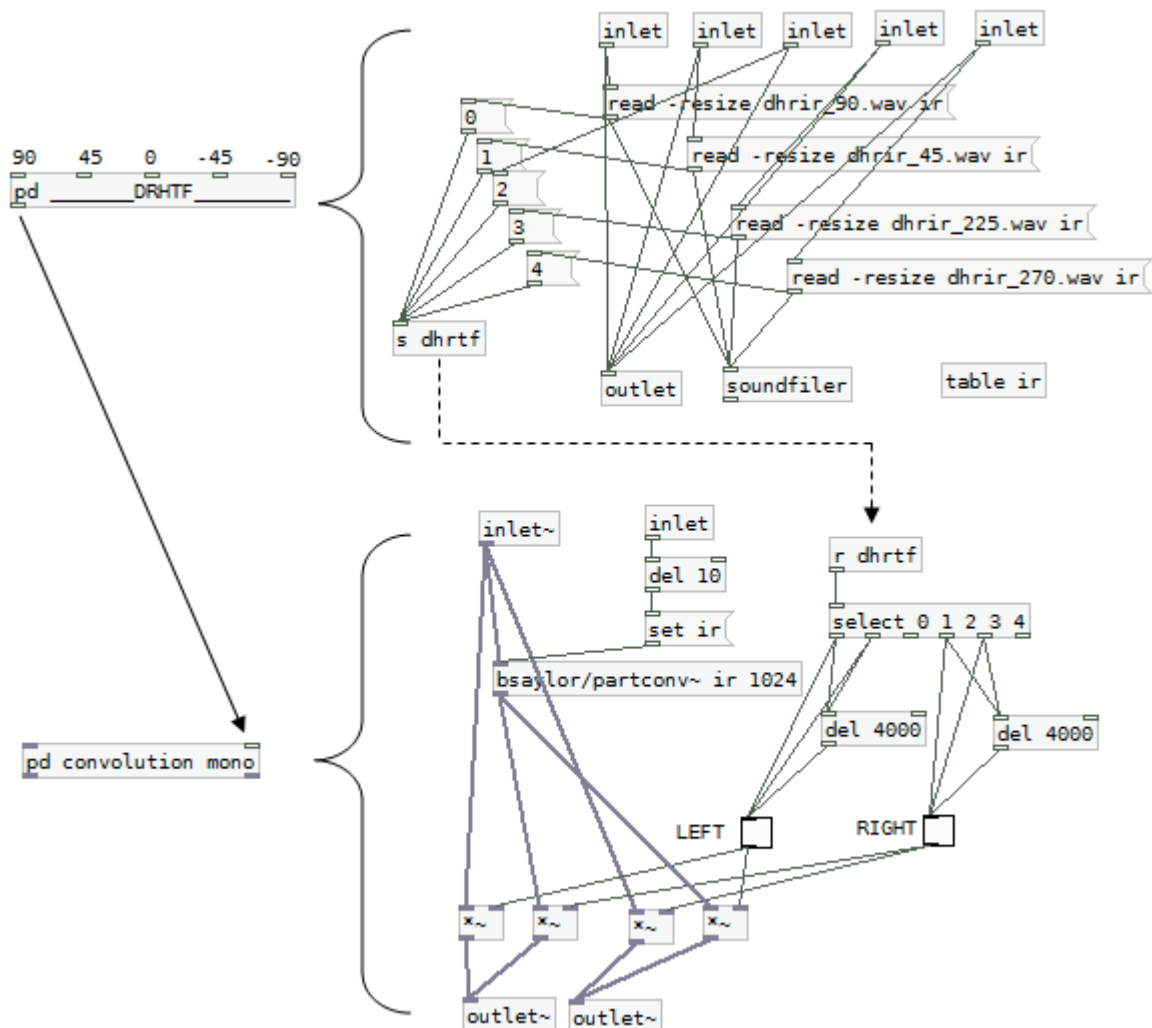
Pro virtuální polohování zvukového vzorku se impuls odpovídající pořadovému číslu daného zvuku v experimentu (viz obrázek 31) propojí s jedním ze vstupů vybrané polohovací metody. Každá z implementovaných metod obsahuje vždy pět vstupů, které představují pět horizontálních pozic virtuálního zvuku. Vysláním impulsu napojeného na určitý vstup zvolené metody dojde k načtení příslušné impulsové odezvy pro levý a pravý kanál a jejich uložení pomocí funkce `soundfiler` do připravených souborů `table`. Zároveň s tím se vyše další impuls na vstup algoritmu provádějícího konvoluci a nahrané impulsové odezvy se načtou do funkce `partconv~`.



Obrázek 31: Princip virtuálního polohování zvuku metodou MODEL a HRTF

7.2.8. Implementace DHRTF

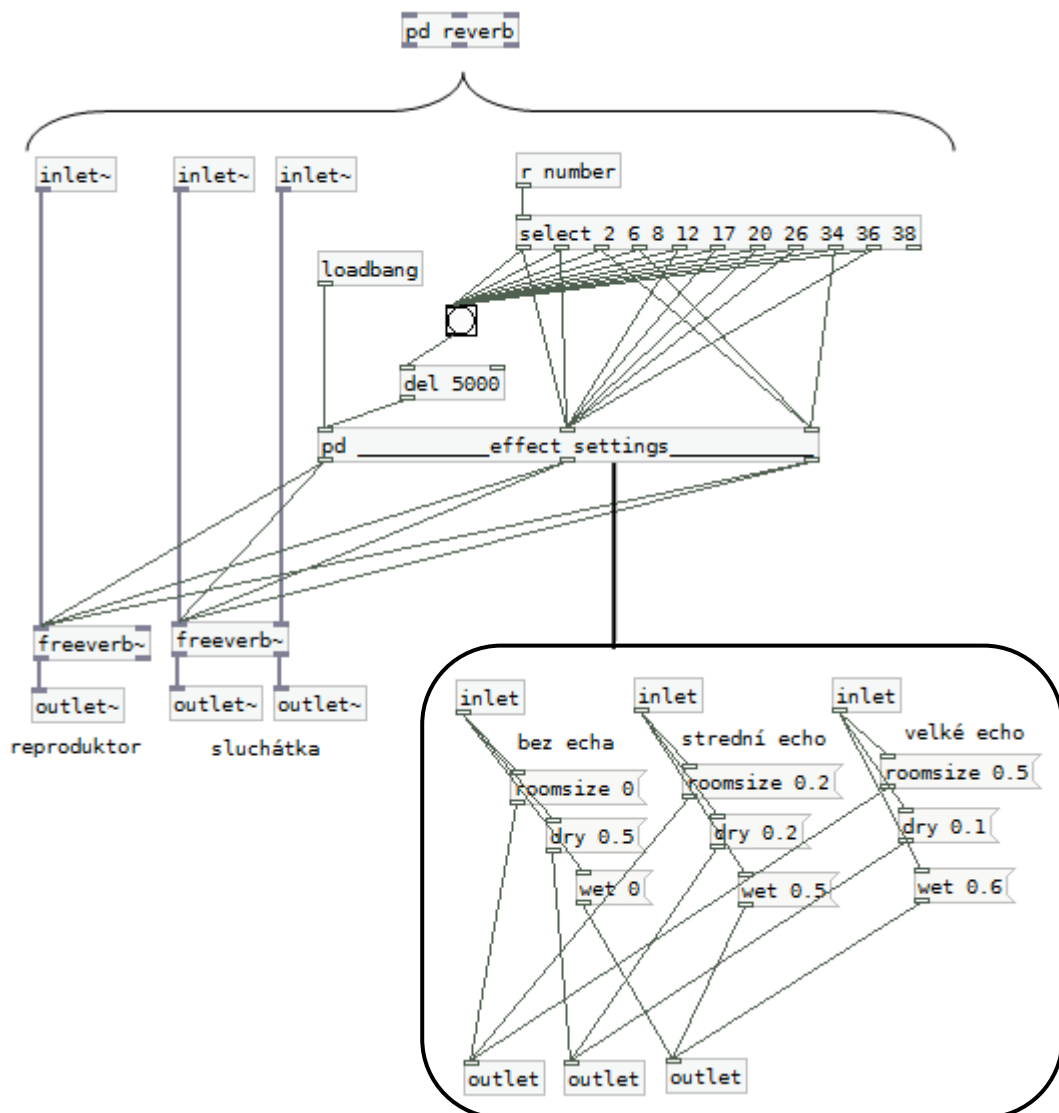
Oproti předchozím metodám, jejichž implementace byla popsána výše, se při použití DHRTF chová algoritmus odlišně (viz kapitola 3.3.). Důvodem je, že metoda provádí konvoluci vždy jen s jedním z kanálů vstupního signálu v závislosti na požadované poloze virtuálního zdroje zvuku. Druhý kanál se nezpracovává. Navíc pokud je vybrána hodnota azimutu 0° , oba kanály zvukového vzorku se ponechávají beze změn. Se zvolenou pozicí virtuálního objektu dojde kromě načtení příslušné impulsové odezvy i k odeslání specifického indexu. Ten je zpracován již známou funkcí *sel*, která podle hodnoty indexu sepne odpovídající kombinaci kanálů na výstupech. Schéma algoritmu lze zhlédnout na obrázku 32.



Obrázek 32: Algoritmus pro virtuální polohování metodou DHRTF

7.2.9. Aplikace efektu umělého dozvuku

Poslední částí, kterou zpracováváný signál prochází, je jednotka aplikující zvukový efekt dozvuku (obrázek 33). O to se stará především funkce *freeverb~*, popsaná v kapitole 7.1.2. Hlavním úkolem algoritmu je na základě pořadového čísla zvukového vzorku aplikovat na signál efekt umělého dozvuku o definovaných parametrech. Funkce nerozlišuje, zda je příchozí signál veden do reproduktoru, nebo do sluchátek. Aplikace efektu se provede na všech kanálech, přičemž v daném okamžiku je aktivní pouze jeden výstup. Funkce nabízí tři nastavení efektu podle množství přidaného echa (černě označené), přičemž jednotlivé parametry byly definovány na základě poslechových testů. Jakmile je zefektovaný signál přehrán, nastaví se míra efektu na defaultní (bez echa).

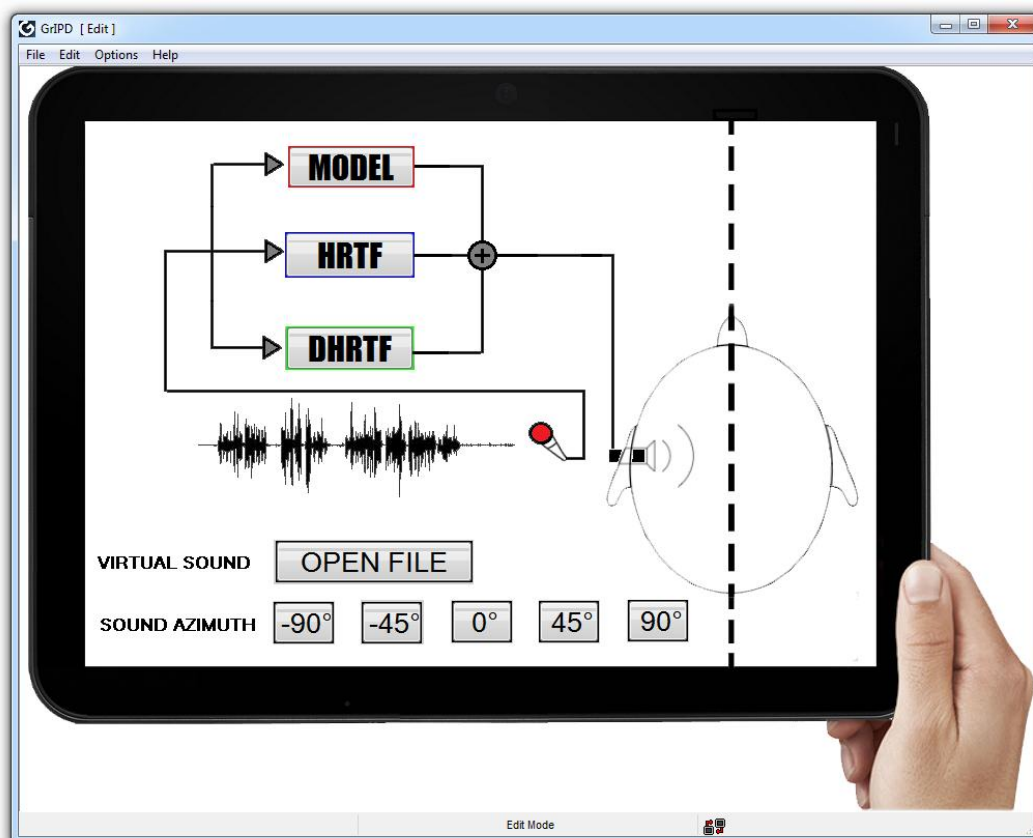


Obrázek 33: Funkce umožňující vkládání efektu umělého dozvuku

8. Základní testování

Navržený systém musel být před samotným experimentem podroben testům ohledně jeho celkové funkčnosti. Otestování se týkalo jak hardwarových prvků, tak řídicího algoritmu a jeho dílčích funkcí. Z toho důvodu byla vytvořena pomocná aplikace s grafickým rozhraním, která umožňovala výběr zvukového stimulu, polohu virtuálního zdroje a polohovací metodu (obrázek 34). Tímto způsobem se ověřila především funkčnost jednotlivých implementovaných metod pro virtuální polohování. Zásadní chybu vykazovala metoda DHRTF. Vzorky polohované touto metodou se vyznačovaly nezvyklým zkreslením. Důvodem byla zřejmě použitá banka HRIR, z nichž se DHRTF generovalo. To bohužel znamenalo vyřazení zmíněné metody z experimentu.

Sledován byl i vliv prováděné operace konvoluce při výpočtech na celkové zatížení systému, přičemž byla při jednom z testů zjištěna neznámá chyba se zvukovou kartou. Karta nečekaně přestala pracovat a ze sluchátek byl slyšet pouze pískot. Situace se vyřešila restartem zvukové karty a změnou softwarového nastavení. Problém se pak již nevyskytl.



Obrázek 34: Aplikace pro testování experimentu

9. Výsledky

V této kapitole jsou interpretovány nejdůležitější výsledky a závěry, které můžeme z experimentu vyvodit. Dle plánu experimentu, popsaného v kapitole 6.7., bylo od všech pokusných osob získáno subjektivní ohodnocení předložených stimulů. Nahraná ústní hodnocení každého z posluchačů byla uložena ve zvukovém formátu wav a dána na přiložené CD, jehož kompletní obsah je uveden v příloze A. Experimentu se zúčastnilo celkem 15 osob (12 mužů a 3 ženy). Převážně se jednalo o studenty FEL ČVUT v Praze. Detailní informace popisující složení testovací skupiny obsahuje tabulka v příloze B.

9.1. Zpracování

Pro provedení sumarizace dat z rozsáhlých tabulek, uvedených v příloze C, se nabízí možnost použití tzv. kontingenčních tabulek. Jde o přehledné získávání a prezentování dat z tabulek a databází s možností lehce definovat různé pohledy na data. Řádky a sloupce odpovídají zvoleným dimenzím dat. Ukázka vyhodnocení získaných dat z tohoto experimentu s využitím kontingenční tabulky je znázorněna na obrázku 35.

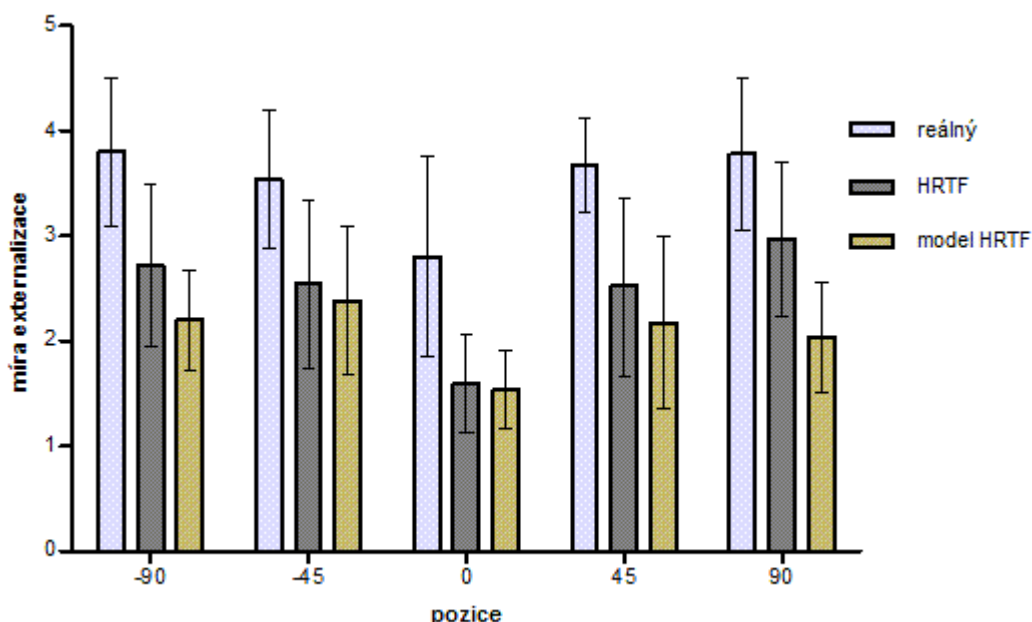
Průměr externalizace		
Polohovací metoda <input type="checkbox"/>	posluchač A	posluchač B
<input type="checkbox"/> hrir	2,25	1,8125
<input type="checkbox"/> -90	2,5	1
<input type="checkbox"/> -45	3	1,75
<input type="checkbox"/> 0	1,666666667	2,333333333
drums	1	5
noise	2	1
voice	2	1
<input type="checkbox"/> 45	2	2
<input type="checkbox"/> 90	2	1
<input type="checkbox"/> model	2,4	2,466666667
Celkový součet	2,322580645	2,129032258

Obrázek 35: Využití kontingenční tabulky pro zpracování výsledků

9.2. Interpretace

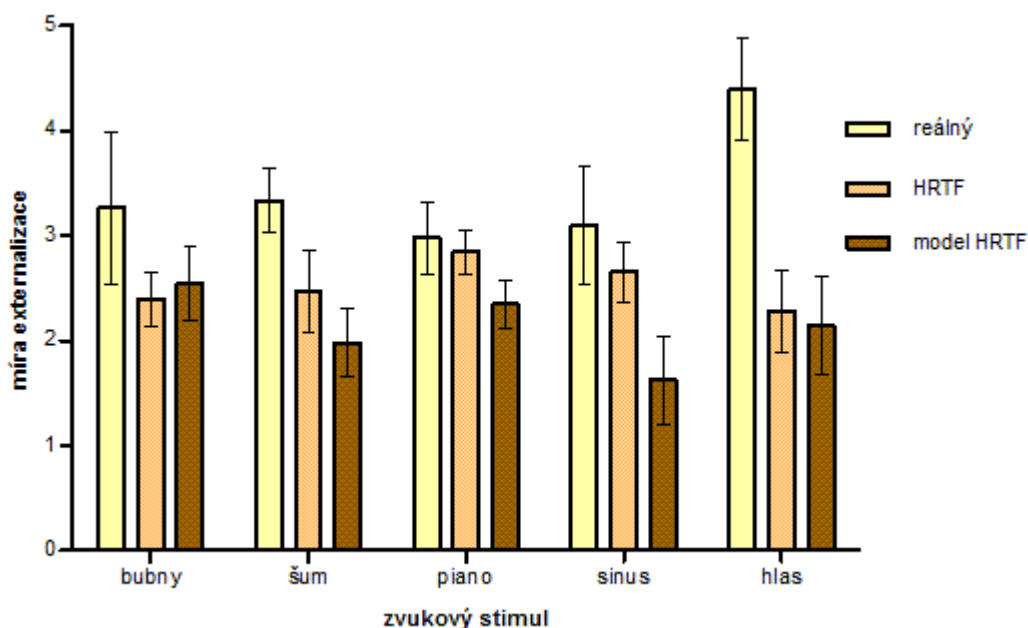
S využitím kontingenčních tabulek byly zpracovány výsledky měření a ty nejsignifikantnější poté vyneseny do 10 závěrečných grafů zobrazujících střední hodnoty a směrodatné odchylky sledovaných proměnných. Grafy s popisem jsou prezentovány na následujících stránkách. Většina předložených grafů vykazuje trend, že nejlepší vjem externalizace je s velkou převahou u reálných zvuků přehraných reproduktorem. Důvodem můžou být např. přeslechy nebo špatně zvolená banka HRIR.

Pro vykreslení grafů 1 a 2 byly zahrnuty hodnoty z obou částí experimentu (uživatel viděl/neviděl). Vzorky s aplikací zvukového efektu byly vynechány.



Graf 1: Závislost míry externalizace na pozici zdroje (bez umělého dozvuku)

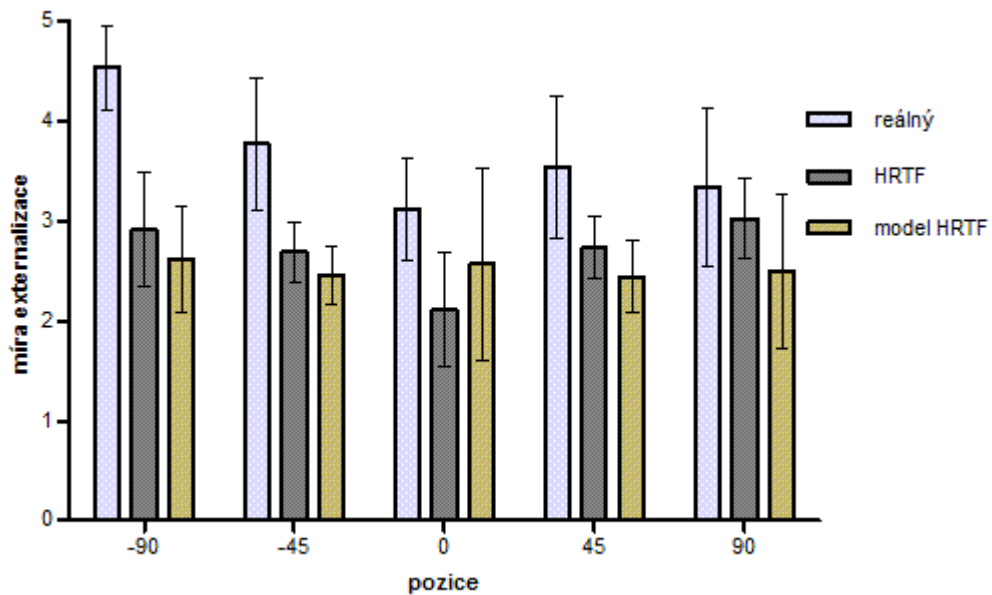
Graf 1 zobrazuje vliv pozice zvukového zdroje na vjem externalizace pro jednotlivé polohovací metody. Výsledky vykazují souměrnost kolem středu s tím, že citelný pokles vnímání externalizace byl zaznamenán u pozice s azimutem 0°. Tento trend souhlasí s předpokladem vzniku laterizace (vnímání zvuku uvnitř hlavy) především v případech, kdy se signály přicházející do obou uší neliší v čase ani intenzitě, viz kapitola 2.4. Dále si lze povšimnout, že na všech pozicích je zjevný stejný sestupný trend polohovacích metod.



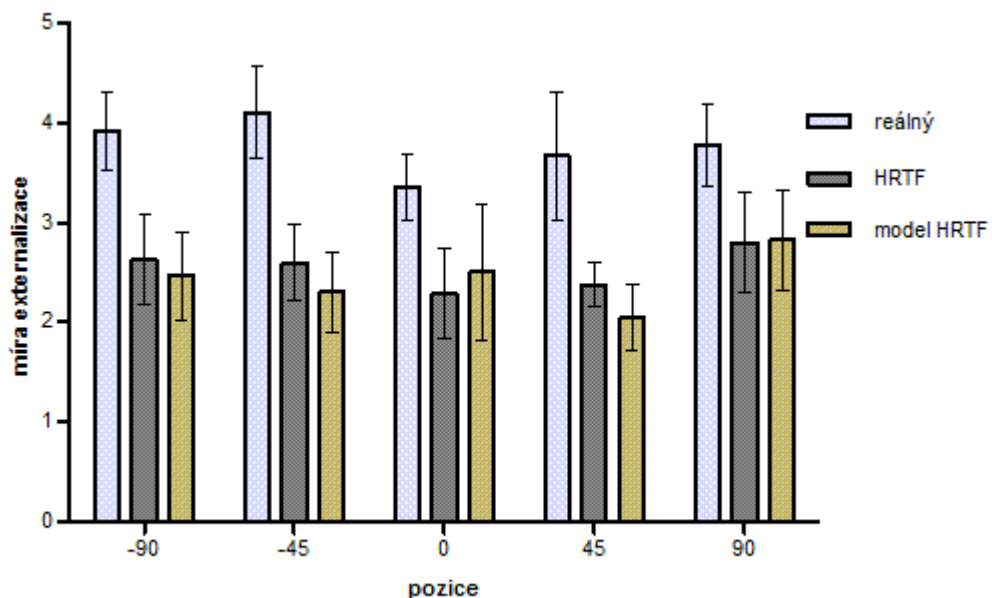
Graf 2: Závislost míry externalizace na typu zvuku (bez umělého dozvuku)

V grafu 2 je zobrazeno, jak závisí míra externalizace na zvoleném zvukovém stimulu. Nejvyrovnanější výsledky externalizace pro jednotlivé metody polohování vykazuje zvuk píána. Uživatelé tedy vnímali jeho reálnou podobu srovnatelně jako virtuální verzi. Naopak největší rozdíl externalizace mezi reálnou a virtuální variantou byl zaznamenán u zvuku s promluvou. Lidský hlas přehraný reproduktorem lidé vnímali jako nejvíce externalizovaný, což může být zapříčiněno zkušenostmi posluchačů s tímto typem zvuku v jejich běžném životě. Nejnižších hodnot externalizace naopak dosáhl harmonický signál, virtuálně polohovaný pomocí strukturálního modelu HRTF, což má zřejmě souvislost s lokalizací zvuku. Ta je totiž u harmonických průběhů pro člověka náročnější, jak bylo řečeno v úvodních kapitolách.

V následující dvojici grafů byly započítány zvukové vzorky z obou částí experimentu, avšak zpracovány samostatně pro každou část měření. Zde je porovnáván vliv pozice zvukového zdroje v případě, kdy uživatel vidí a kdy má zakryté oči.



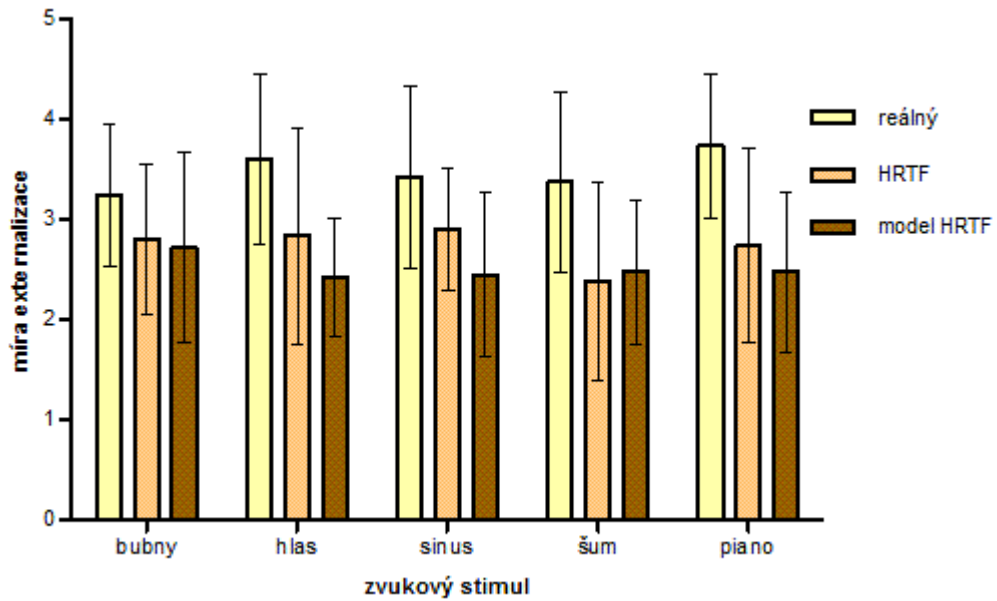
Graf 3: Závislost míry externalizace na pozici zdroje (světlo)



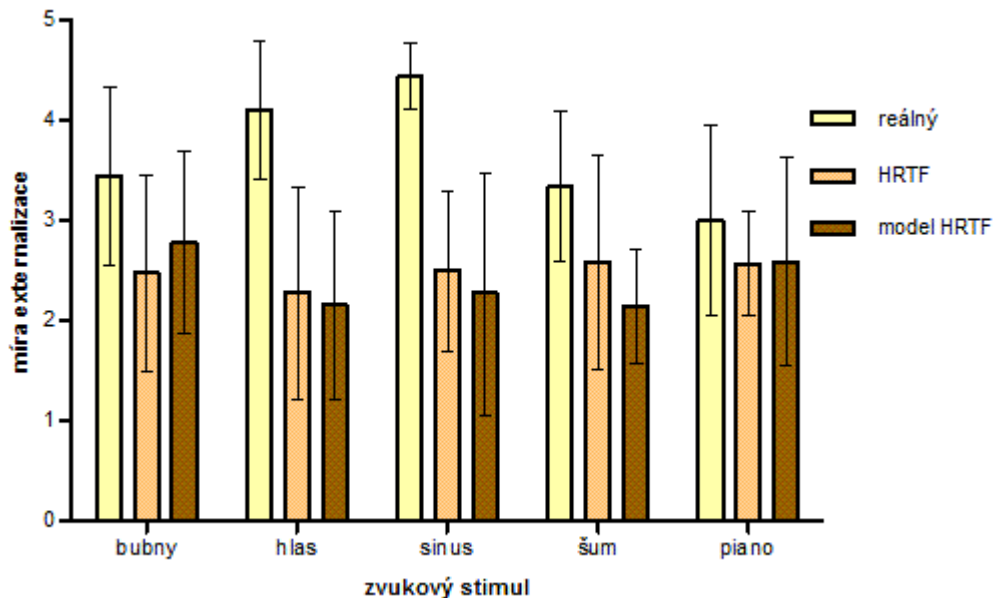
Graf 4: Závislost míry externalizace na pozici zdroje (tma)

V obou grafech je možné najít velmi podobné výsledky. Zrakové podmínky nemají vliv na vjem externalizace v případě různé pozice zvukového zdroje.

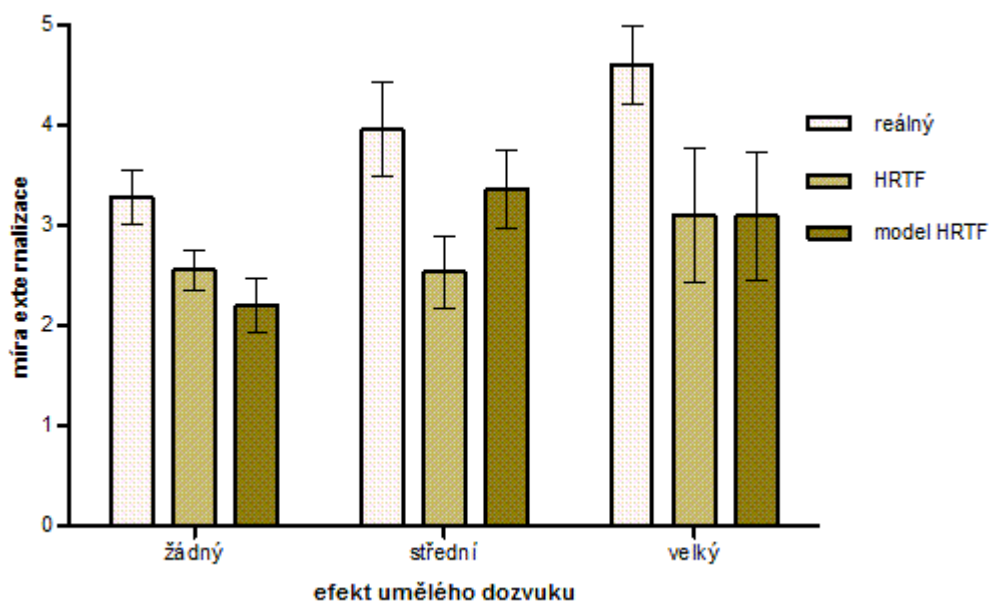
Další dva grafy (5 a 6) zobrazují, zda se vliv různých zvukových stimulů na vnímání externalizace změní zakrytím zraku posluchače. Výsledky se příliš neodlišují. Největší zvýšení externalizace se projevilo u sinusového signálu a signálu s promluvou. Došlo tedy k menšímu ovlivnění zakrytím očí posluchače.



Graf 5: Závislost míry externalizace na typu zvuku (světlo)

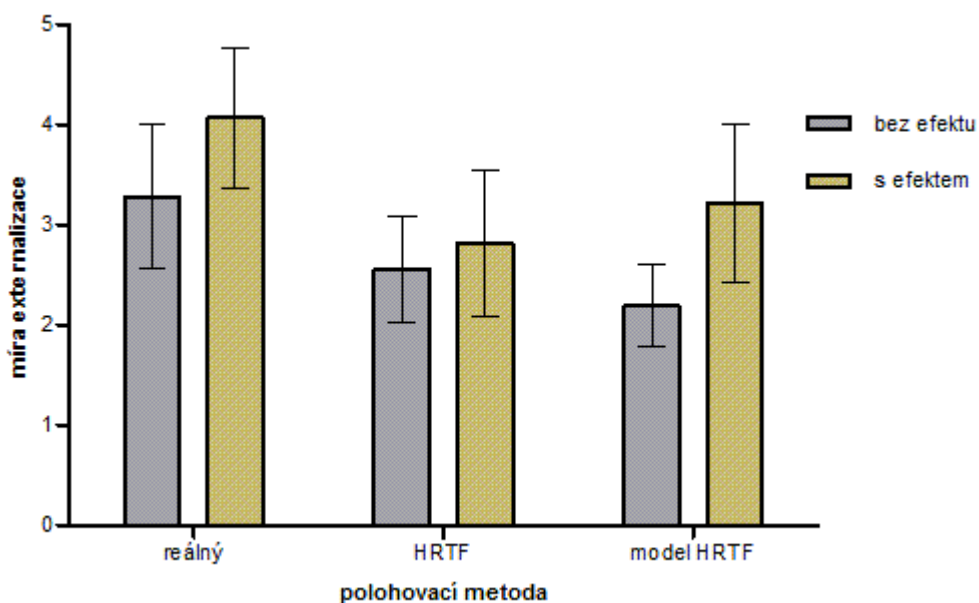


Graf 6: Závislost míry externalizace na typu zvuku (tma)



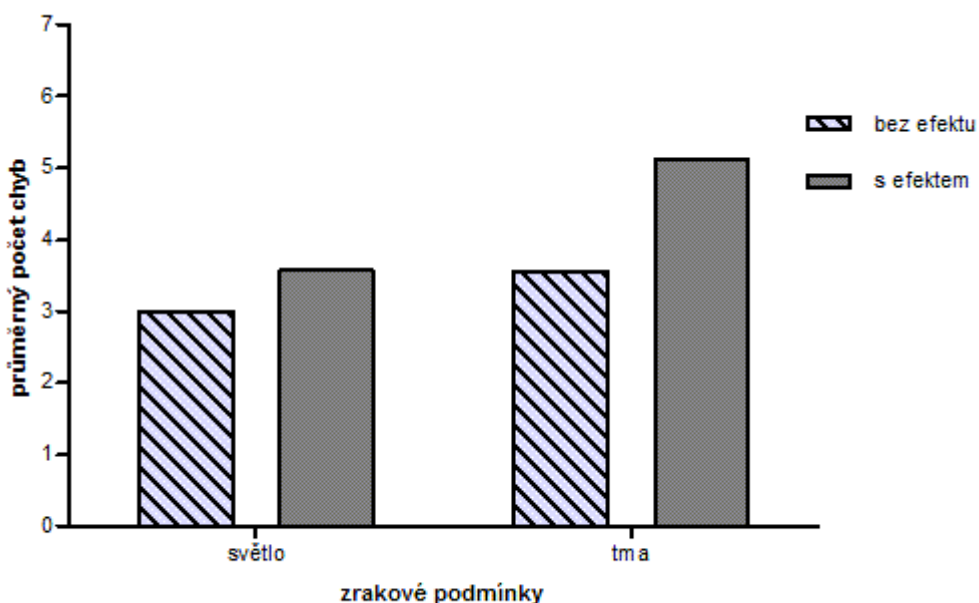
Graf 7: Závislost míry externalizace na stupni efektu

Graf 7 je vyneseno přes všechny zvukové vzorky experimentu a zkoumá vliv stupně zvukového efektu umělého dozvuku na vnímání externalizace. Nastavené parametry jednotlivých stupňů efektu jsou uvedeny v kapitole 7.2.9. Výsledky potvrzují předpoklad z kapitoly 2.4., že aplikací umělého dozvuku se dosáhne zvýšení vnímané externalizace. Zajímavý je ale fakt, že závislost externalizace na stupni efektu umělého dozvuku nejeví lineární trend pro virtuální polohovací metody, jako je to u reálných vzorků. To znamená, že při překročení určité hodnoty parametru je efekt umělého dozvuku u virtuálních zvukových objektů kontraproduktivní. Výsledný zvuk je přesycený simulovanými odrazy a je poté vnímán jako méně externalizovaný.

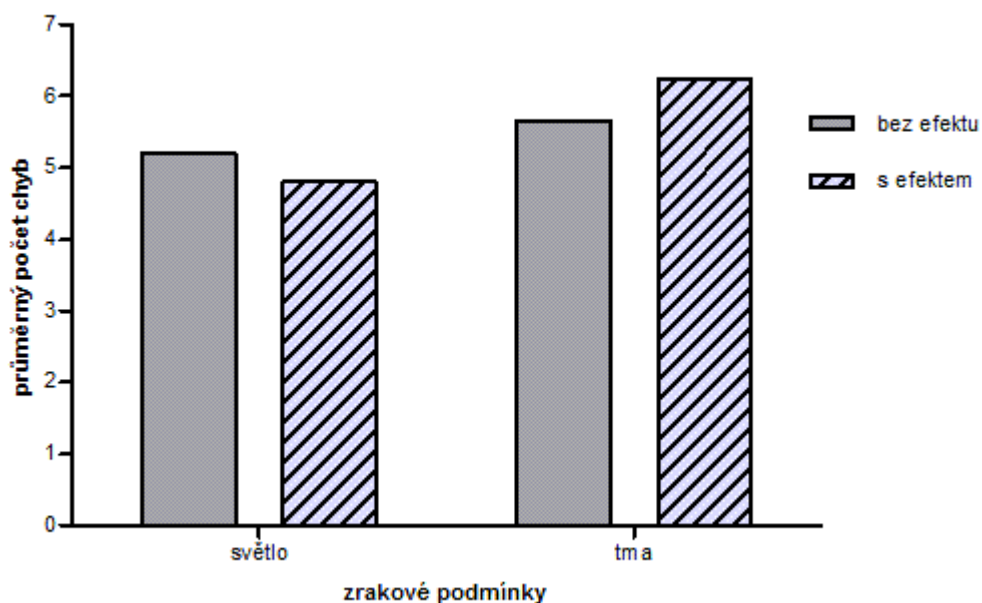


Graf 8: Závislost míry externalizace na metodě polohování

Graf 8 porovnává schopnost externalizace jednotlivých polohovacích metod. Aplikací efektu bylo u všech metod dosaženo vyšší míry externalizace, čímž se potvrdily původní předpoklady. Nejlepší výsledek externalizace v případě virtuálních polohovacích metod zaznamenal model HRTF s aplikovaným efektem umělého dozvuku. U zvukových vzorků, kde efekt nebyl aplikován, projevila lepší výsledky z hlediska externalizace metoda HRTF.



Graf 9: Závislost počtu chyb virtuální → reálný na zrakových podmínkách



Graf 10: Závislost počtu chyb reálný → virtuální na zrakových podmínkách

Grafy 9 a 10 znázorňují vlivy zrakových podmínek a aplikace efektu na schopnost rozlišení virtuálních zvuků od reálných. Graf 9 zobrazuje průměrný počet případů vztažený k jednomu subjektu, kdy byl označen virtuální zdroj za reálný (V→R). V grafu 10 je naopak vynesena druhá možnost omylu (R→V). Průměrný počet záměn reálného zvuku za virtuální dosáhl větších hodnot v porovnání s druhou variantou. Důvodem je zřejmě skutečnost, že uživatel byl vystaven modifikovanému akustickému prostředí a i přes zácvek byla pro něj rozšířená zvuková realita stále novou zkušeností.

Je vidět, že zakrytím očí došlo ke zvýšení obou typů chyb. Lidé hůře odlišovali virtuální a reálné zvuky. Jak ukazuje graf 9, aplikací efektu bylo dosaženo většího počtu záměn virtuálního zvuku za reálný, což se u některých aplikací ARA systému vyžaduje. Naopak v některých případech je cílem, aby uživatel jednoznačně poznal reálný zvuk, např. v lékařských aplikacích. Graf 10 naznačuje trend, kdy se dodáním efektu umělého dozvuku nepatrně zmenšil průměrný počet záměn reálného zvuku za virtuální.

10. Hodnocení a závěr

Ve své práci jsem využil informace z dostupné literatury a ověřených webových zdrojů, ale i své znalosti získané vysokoškolským studiem. Hlavním cílem bylo studium problematiky jevu externalizace a následný návrh, provedení a vyhodnocení experimentu zabývajícího se studiem externalizace virtuálních zdrojů zvuku, což se podařilo. V úvodních kapitolách této práce byly rozebrány základní principy binaurální lokalizace, metody virtuálního polohování zdroje zvuku a definovány pojmy externalizace, rozšířená realita a psychoakustické měření. V další části jsem popsal návrh a realizaci měřicího systému. Jako vývojové prostředí jsem zvolil program Pure Data, s jehož možnostmi práce se zvukem v reálném čase jsem se již seznámil v rámci své bakalářské práce.

Dále jsem navrhl celkový průběh experimentu. Po výběru vhodných zvukových stimulů přišlo na řadu vytvoření zvukového scénáře. To znamenalo zkombinovat a prostřídat různé typy zvuků s dalšími proměnnými jako pozice zvukového zdroje, polohovací metoda atd. Poté jsem přistoupil k volbě optimální psychoakustické metody měření. Na základě prostudování některých již realizovaných experimentů jsem zvolil metodu posuzování na subjektivních posuzovacích škálách a vytvořil k ní příslušnou stupnici. Pomocný ukazatel pro vyhodnocení je uveden v příloze E. Jednou z důležitých otázek během příprav experimentu byl způsob záznamu hodnocení. Uživatel měl v průběhu měření zcela zamezen pohyb hlavy, aby nedošlo k degradaci výsledků. To znamenalo volbu vyhodnocení ústní formou. Posluchačovy reakce byly tedy zaznamenávány pomocí měřicích mikrofonů integrovaných ve sluchátkách využívaných uživatelem. Nahrané reakce posluchačů jsou součástí dokumentace na přiloženém CD, jehož celkový obsah je popsán v příloze A.

Po návrhu průběhu celého experimentu jsem zvolenou psychoakustickou metodu aplikoval pomocí vytvořeného měřicího systému na vybraný vzorek posluchačů. Měření probíhalo v podobě subjektivních poslechových testů, přičemž bylo rozděleno na dvě části, kdy v jedné z nich měli posluchači zakryté oči. Stěžejní sledovanou proměnnou byl stupeň externalizace. Dále byla testována schopnost odlišení virtuálních zvukových objektů od reálných zdrojů zvuku. Fotografie z místa experimentu obsahuje příloha D.

Experiment absolvovalo 15 dobrovolníků. Detailní informace o testovaných subjektech zmiňuje tabulka v příloze B. Tabulky se získanými hodnotami z experimentu jsou umístěné v příloze C. Předložené výsledky prezentují vlivy zvolených proměnných (pozice, zvukový stimul, zrakové podmínky atd.) na externalizaci zvukového zdroje. Aplikací efektu umělého dozvuku se podařilo dosáhnout externalizace virtuálního zvukového zdroje. Experiment dále ukázal, že pro posluchače bylo v některých případech složité rozlišit virtuálně vytvořené zdroje zvuku od reálných. Získané poznatky mohou sloužit např. při návrhu ARA systému pro nejrůznější aplikace, ale i jako námět pro další experimenty.

11. Použitá literatura a internetové zdroje

1. MOULTON, D., *Total Recording*, KIQ Productions, 2000. ISBN 0-97643-0402.
2. MANDEL, M., *Spatial sound*, Columbia University Dept. of Electrical Engineering, 2008
3. BROWN, P., DUDA, R., *A structural model for binaural sound synthesis*, In IEEE Transaction on Speech and Audio processing, vol. 6, no. 5, p. 476 – 489, 1998.
4. SMETANA, C. a kol., *Praktická elektroakustika*, Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1981.
5. SYROVÝ, V., *Hudební akustika*, Akademie múzických umění v Praze, Praha 2003. ISBN 80-7331-901-2
6. HARTMANN, W. M., WITTENBERG, A., *On the externalization of sound images*, In The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 99, no. 6, pp. 3678-3688, 1996.
7. PLENGE, G., *On the differences between localization and lateralization*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 56, pp. 944-951, 1972.
8. BLAUERT, J., *Spatial hearing*, The MIT Press, 1997. ISBN 0-262-02413-6
9. BEGAULT, D. R., *Perceptual effects of synthetic reverberation on three-dimensional audio systems*, J. Audio Eng. Soc., vol. 40, pp. 895-904, 1992.
10. LOKKI, T., JARVELAINEN, H., *Subjective evaluation of auralization of physics-based room acoustics modeling*, in Proc. Int. Conf. on Auditory Display, Finsko, pp. 26-31, 2001.
11. STUHLÍK, J., *Implementace směrového efektu v reálném čase*, České vysoké učení technické v Praze, 2013.
12. LORHO, G., *Efficient HRTF synthesis using an Interaural Transfer Function model*, Nokia Research Center, Speech and Audio Systems Laboratory, 2000.
13. STOREK, D., RUND, F., *Differential head related transfer function as a new approach to virtual sound positioning*, in Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA) 2012 22nd International Conference, pp. 1–4, 2012.
14. HARMA, A., *Augmented reality audio for mobile and wearable appliances*, In J. Audio Eng. Soc., 52(6):618-639, 2004.

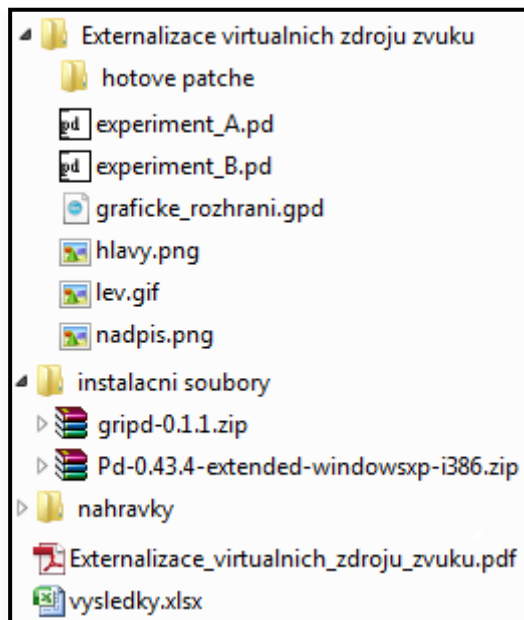
15. LOKKI, T., GAMPER, H., *Audio augmented reality in telecommunication through virtual auditory display*, In Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD 2010), pp. 63-71, 2010.
16. LIVINGSTON, M. A., GARRET, W. F., HIROTA, G., *Technologies for augmented reality systems: realizing ultrasound-guided needle biopsies*, in Proceedings of the 23rd Annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM, pp. 439-446, 1996.
17. HELD, R., *Shifts in binaural localization after prolonged exposures to atypical combinations of stimuli*, J. Am. Psychol., vol. 68, 1995.
18. MELKA, A., *Základy experimentální psychoakustiky*, Akademie múzických umění v Praze, 2005. ISBN 80-733-1043-0
19. SUPKA, O., *System for HRIR measurement – turnable chair design*, In POSTER 2015 – 19th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha: Czech Technical University in Prague, 2012.
20. RITSCH, W., *PD-community*, Pure Data [online]. Dostupné z: <http://puredata.info/>
21. SARLO, J., *GrIPD – A Graphical Interface Editing Tool and Run-time Environment for Pure Data*, Department of Music, University of California, San Diego [online]. Dostupné z: <http://crca.ucsd.edu/~jsarlo/gripd/>
22. URL: <http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/listen/download.html> [cit. 2015-03-31].

Dodatky

Příloha A

Obsah přiloženého CD

Součástí práce je přiložené CD s dvěma patchy prezentujícími jednotlivé části experimentu (patch v PD + grafické rozhraní v GrIPD), s instalačními soubory jednotlivých programů, souborem zvukových nahrávek se záznamem vyhodnocení posluchačů, excel souborem s výsledky experimentu a elektronickou verzí práce.



Příloha B

Informace o testovaných subjektech

pořadové písmeno	pohlaví	věk	stav sluchu	zkušenosti s prostorovým zvukem
A	muž	24	dobrý	střední (student FEL – multimediální technika)
B	muž	24	dobrý	malé
C	muž	28	dobrý	velké (student FEL – akustika)
D	muž	24	dobrý	malé
E	muž	28	dobrý	velké (student FEL)
F	žena	23	dobrý	střední (studentka FEL – multimediální technika)
G	muž	23	dobrý	střední (student FEL – multimediální technika)
H	muž	22	dobrý	žádné
I	žena	24	dobrý	žádné
J	muž	25	dobrý	žádné
K	žena	21	dobrý	žádné
L	muž	22	dobrý	žádné
M	muž	22	dobrý	střední (student FEL – multimediální technika)
N	muž	24	dobrý	střední (student FEL – multimediální technika)
O	muž	23	dobrý	velké (student FEL – multimediální technika)

Příloha C

Výsledky experimentu

Následující tabulky zobrazují hodnocení od jednotlivých účastníků z obou částí experimentu. Každý řádek tabulky vždy obsahuje informace o parametrech daného zvukového vzorku (azimut, typ stimulu, polohovací metoda) a následná hodnocení – virtuální – V, reálný - R, laterizovaný – 1, externalizovaný - 5. Červeně označené metody znamenají aplikaci efektu umělého dozvuku na zvukový signál. Modrá barva značí, že efekt byl aplikován na pseudoakustickou realitu.

PRVNÍ ČÁST

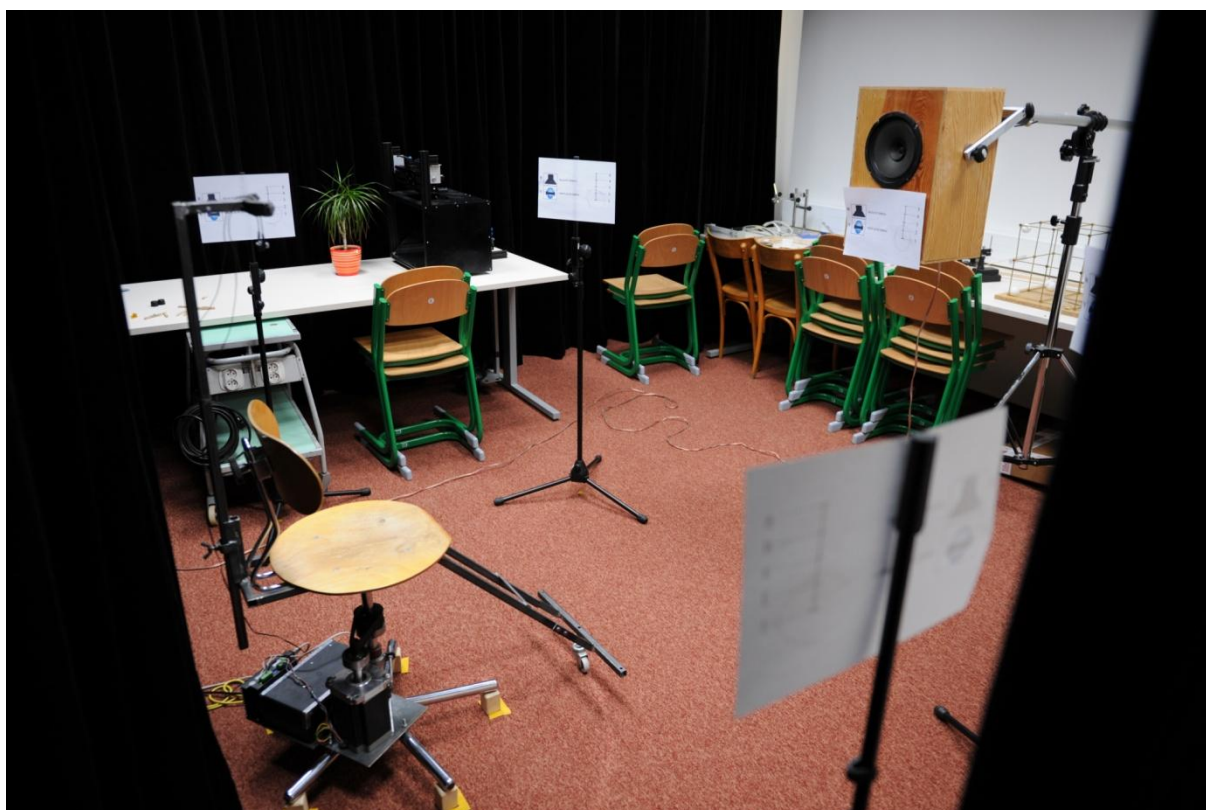
AZIMUT	SOUND	METHOD	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
90	drums	hrir	V 2	R 3	V 4	V 4	V 2	V 3	V 3	R 3	V 2	V 2	R 3	V 2	R 2	V 3	R 4
45	voice	model	V 2	V 2	V 5	V 5	V 1	V 2	V 2	V 3	V 4	V 2	V 1	V 3	V 2	V 2	V 4
0	piano	hrir	V 1	R 3	R 3	V 1	V 1	V 2	V 1	V 2	V 1	V 1	V 2	R 3	R 1	V 1	V 3
-45	sinus	repro	R 4	V 2	R 4	R 4	R 4	R 3	R 4	R 4	R 4	R 4	R 4	R 4	R 4	R 4	V 1
-90	noise	hrir	V 3	V 1	V 2	R 5	V 3	V 2	V 3	V 2	V 2	V 2	R 2	V 2	V 2	R 3	V 5
-45	drums	model	V 1	R 5	V 3	V 5	V 2	V 2	V 2	V 2	R 4	V 2	V 1	V 2	V 2	V 2	V 3
0	voice	repro	V 5	V 5	V 4	V 2	V 4	R 4	V 3	R 5	V 4	R 3	R 3	R 3	R 3	V 1	V 5
45	piano	hrir	V 4	R 2	V 3	V 3	R 4	R 3	V 2	R 3	R 3	R 2	R 3	R 3	R 4	V 3	V 2
90	sinus	model	R 5	V 1	V 2	V 4	V 4	R 4	V 4	V 2	V 1	V 2	V 2	V 1	R 4	V 2	R 4
45	noise	model	V 2	V 1	V 1	V 3	V 1	V 3	V 1	V 3	V 2	V 1	V 1	V 2	V 1	V 4	V 2
0	piano	repro	V 1	R 4	V 4	R 4	V 3	V 3	V 2	R 5	R 3	V 1	V 2	V 3	R 5	V 1	V 3
-45	drums	model	V 2	R 4	V 1	V 4	V 1	V 2	V 2	V 2	V 3	V 2	V 3	V 2	V 4	V 2	V 2
-90	voice	hrir	V 2	V 5	R 4	V 1	V 3	R 5	V 4	V 3	R 5	R 2	V 3	V 1	V 3	R 1	V 5
-45	noise	hrir	V 2	V 1	V 1	V 4	V 1	V 2	V 3	V 2	V 4	V 2	R 3	R 2	V 2	V 4	V 3
0	sinus	model	V 1	V 2	V 1	V 1	V 1	V 1	V 1	V 1	V 3	V 1	V 2	V 3	V 1	R 1	V 1
45	drums	repro	V 4	R 5	V 2	R 3	V 3	R 4	V 4	R 4	R 3	R 3	R 2	R 3	R 4	R 5	R 4
90	noise	hrir	V 3	V 1	R 5	V 5	R 5	V 2	V 2	R 3	R 2	V 2	R 2	V 4	V 3	V 3	V 4
45	sinus	model	V 3	V 4	V 3	V 3	V 3	V 3	V 3	V 2	R 3	R 4	V 1	V 3	R 4	V 3	R 5
0	noise	hrir	V 1	V 1	R 4	V 1	V 1	V 2	V 1	V 1	V 1	V 1	V 1	R 2	V 1	R 2	V 2
-45	voice	hrir	V 3	V 3	V 2	V 2	V 2	V 2	V 3	V 3	V 3	V 2	R 2	V 2	V 3	V 2	V 5
-90	piano	repro	R 5	R 5	R 5	R 5	R 5	R 5	R 5	R 3	R 4	R 5	R 4	R 4	R 5	V 5	R 3
-45	drums	model	V 2	R 4	V 2	V 5	V 2	V 2	V 2	V 1	R 3	V 2	V 1	V 3	V 2	R 3	V 3
0	sinus	repro	R 5	V 3	R 4	V 2	R 5	V 1	R 2	R 3	R 2	V 2	V 2	V 2	R 5	V 1	R 2
45	piano	hrir	V 3	R 1	V 1	V 5	R 3	V 1	V 3	R 4	V 4	V 2	V 3	R 2	R 4	R 3	V 4
90	voice	model	V 2	V 1	V 2	V 4	V 2	V 1	V 2	V 3	V 3	V 2	V 2	R 2	V 2	V 2	V 3
45	drums	model	V 2	R 4	V 2	V 4	V 1	V 2	V 3	V 2	R 4	V 2	V 3	V 3	V 2	V 4	V 3
0	noise	model	V 5	V 4	R 5	V 5	V 3	R 5	V 4	V 3	V 5	R 4	V 2	V 2	V 3	V 1	V 5
-45	piano	hrir	V 4	R 2	V 3	V 3	V 3	V 3	V 2	V 2	V 3	V 2	R 4	R 3	R 4	V 3	V 3
-90	sinus	hrir	V 4	V 1	V 2	R 5	R 4	V 2	V 1	V 3	R 4	R 4	V 3	V 2	R 5	R 3	R 2
-45	voice	model	V 3	V 4	V 1	V 4	V 1	V 2	V 2	V 2	V 3	V 2	V 1	V 3	V 2	R 2	V 4
0	drums	repro	V 1	R 5	R 4	R 2	V 2	R 4	V 2	V 3	V 2	R 4	R 3	R 2	R 4	V 3	R 3
45	sinus	hrir	R 4	V 2	V 2	R 5	R 4	V 2	V 3	V 3	V 2	V 2	V 3	R 3	R 2	R 2	V 3
90	piano	hrir	V 4	R 2	R 4	R 4	R 4	V 3	R 3	R 4	R 4	V 2	R 3	R 2	V 3	R 2	V 4
45	noise	model	V 2	V 3	V 1	V 3	V 1	V 2	V 1	V 2	V 2	V 2	V 1	V 3	V 1	V 2	V 1
0	voice	hrir	V 4	V 5	R 4	V 2	V 2	V 4	V 2	V 2	V 2	R 5	V 2	V 1	V 3	V 4	V 5
-45	sinus	repro	V 5	V 5	R 5	R 3	V 3	R 4	V 4	R 3	R 3	R 5	R 5	R 3	R 4	R 5	R 4
-90	drums	model	V 5	V 5	V 4	V 1	V 4	R 5	V 3	V 2	R 3	R 5	V 3	V 1	V 3	V 4	V 4
-45	piano	model	V 2	R 4	V 2	V 4	V 1	V 3	V 2	V 2	V 2	V 2	V 3	V 3	V 2	R 3	V 2
0	noise	repro	V 1	V 2	R 4	R 3	V 3	R 4	V 2	R 5	R 4	R 5	V 3	R 2	R 5	V 4	R 4
45	voice	hrir	V 2	R 3	V 1	V 4	V 4	V 1	V 3	V 2	V 1	V 2	V 1	V 2	V 2	V 3	V 4
90	noise	repro	R 5	V 1	R 3	R 4	R 4	R 5	R 3	R 5	R 2	R 2	R 3	R 3	R 5	R 2	R 3

DRUHÁ ČÁST

AZIMUT	SOUND	METHOD	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
90	drums	repro	R 5	R 5	V 3	V 4	R 4	R 3	R 4	R 3	V 2	R 3	R 5	R 3	R 3	R 4	R 3
45	voice	hrir	V 2	V 1	V 1	V 3	V 2	V 1	V 2	V 2	V 1	V 2	V 3	V 2	V 2	R 2	V 3
0	piano	repro	V 2	R 2	R 4	V 2	V 1	V 1	V 2	V 3	V 2	V 1	R 3	R 3	V 3	R 3	V 4
-45	noise	hrir	V 3	V 1	R 3	V 1	V 3	R 3	V 2	V 2	V 1	R 3	V 4	V 4	V 1	R 4	V 5
-90	drums	model	V 2	V 2	V 1	V 2	V 2	V 2	V 3	V 2	R 3	V 2	V 1	V 3	V 3	V 3	V 4
-45	sinus	hrir	V 4	V 1	V 2	V 5	V 1	V 2	R 2	V 1	V 1	V 2	V 2	R 1	R 3	V 3	R 3
0	voice	hrir	V 2	V 1	R 5	V 1	V 1	R 5	V 3	V 1	R 4	R 3	V 3	V 1	V 2	V 4	V 5
45	noise	model	V 2	V 3	V 1	V 4	V 1	V 3	V 1	V 3	V 3	V 2	V 1	V 2	V 2	V 2	V 3
90	piano	model	R 4	V 1	R 4	R 4	V 4	R 5	V 3	V 3	R 2	R 3	R 2	R 5	R 3	V 3	R 5
45	sinus	model	V 1	V 1	V 1	V 1	V 1	V 2	V 1	V 2	V 1	V 2	V 1	R 4	V 1	R 3	V 2
0	drums	repro	V 1	R 5	R 4	V 2	V 3	R 5	V 3	R 3	R 5	V 3	R 2	R 3	R 2	R 5	R 3
-45	voice	model	V 1	R 3	V 2	V 2	V 1	V 2	V 1	V 2	V 2	V 2	V 1	V 2	V 2	R 2	V 2
-90	sinus	hrir	R 3	V 1	R 4	R 5	R 5	R 2	V 2	V 3	V 2	V 3	V 2	V 1	R 3	R 2	R 3
-45	piano	repro	V 3	R 4	V 4	R 5	V 3	V 3	R 4	V 3	V 4	R 3	R 4	V 2	R 5	V 3	V 4
0	noise	hrir	V 2	V 1	V 4	V 1	V 2	R 4	V 2	V 1	R 3	R 2	V 3	V 1	V 3	V 2	V 5
45	drums	hrir	V 1	R 3	V 2	V 3	V 2	V 2	V 2	R 3	V 3	V 3	R 3	R 3	V 2	R 3	V 1
90	voice	repro	R 5	R 3	R 5	R 5	R 5	R 5	R 4	R 5	V 4	R 4	R 5	R 4	R 4	V 5	V 5
45	piano	model	V 1	R 3	V 2	V 4	V 2	R 2	V 2	V 3	V 2	V 2	V 3	V 2	V 2	V 2	V 3
0	sinus	repro	V 5	V 5	R 5	R 5	V 4	R 4	V 4	V 3	R 5	R 5	R 4	V 1	R 5	R 5	R 4
-45	drums	hrir	V 3	V 2	V 3	V 2	V 3	V 5	V 2	V 3	R 4	R 3	R 2	R 4	V 3	V 3	V 4
-90	piano	hrir	V 2	R 1	V 2	V 4	V 2	R 2	R 3	V 3	V 3	V 3	R 3	R 2	V 3	R 2	V 3
-45	voice	model	V 2	R 2	V 1	V 2	V 1	V 2	V 1	V 2	V 2	V 2	V 1	V 3	V 2	V 1	V 1
0	noise	repro	R 3	V 3	R 4	V 1	R 3	R 5	V 2	V 4	V 4	V 2	R 4	V 2	R 4	R 2	R 2
45	sinus	hrir	R 2	V 3	V 3	V 3	V 3	V 3	V 2	V 1	V 1	V 2	R 3	R 3	R 3	R 4	R 2
90	noise	hrir	V 2	V 1	R 4	R 5	R 4	R 3	V 2	R 4	R 2	R 3	R 2	V 2	V 3	V 3	V 2
45	drums	hrir	V 2	R 3	V 2	V 4	V 2	R 3	V 3	R 3	R 3	V 3	R 3	R 3	R 3	R 2	V 1
0	sinus	model	V 5	V 5	V 4	V 2	V 3	V 3	V 3	V 2	R 2	R 4	V 3	R 4	V 1	R 4	R 5
-45	noise	hrir	V 2	V 3	V 1	V 4	V 1	R 2	R 2	V 4	R 3	V 2	V 4	V 2	R 3	V 2	V 2
-90	voice	model	V 5	V 1	V 3	V 2	V 2	R 5	V 3	V 2	R 4	R 3	V 3	R 4	R 2	V 1	V 5
-45	piano	model	V 2	R 3	V 4	V 5	V 3	R 3	V 2	V 3	V 3	V 2	V 1	V 3	V 3	R 3	V 4
0	drums	hrir	V 1	R 5	V 2	V 2	V 1	R 2	V 1	V 1	V 2	V 1	V 1	V 2	V 1	V 1	V 3
45	noise	repro	R 5	V 3	R 5	V 3	R 4	R 3	R 3	R 3	R 4	R 3	R 4	R 4	R 4	V 3	R 4
90	sinus	model	V 2	V 1	V 1	V 3	V 2	V 3	V 1	V 3	V 1	V 2	V 2	V 1	V 2	R 3	V 1
45	piano	hrir	V 2	R 1	V 4	R 5	V 2	V 3	R 1	R 4	V 3	V 1	R 3	R 3	V 3	V 2	V 2
0	voice	repro	V 3	V 5	R 5	V 3	R 2	R 5	V 3	R 5	R 5	V 5	R 3	V 2	R 1	V 5	V 5
-45	drums	model	V 2	R 5	V 4	V 4	V 2	V 2	V 1	V 2	R 5	V 2	V 2	R 4	V 2	R 2	V 3
-90	noise	model	V 2	V 2	V 2	V 2	V 1	V 2	V 1	V 2	R 3	V 1	V 2	R 4	V 2	V 3	V 2
-45	sinus	repro	V 5	V 5	V 5	R 5	V 4	R 5	R 4	V 4	R 5	R 5	R 4	R 5	R 4	V 5	R 4
0	piano	model	V 1	R 2	V 2	V 2	V 1	V 1	V 1	V 2	V 2	V 1	V 3	V 2	V 1	R 1	V 3
45	voice	hrir	V 3	R 1	V 2	R 4	V 3	V 1	V 2	V 3	R 3	V 1	R 2	V 2	R 2	V 2	V 1
90	drums	model	V 4	V 3	V 3	V 3	V 4	R 2	V 2	V 4	R 5	R 3	V 1	R 4	V 3	R 2	R 5

Příloha D

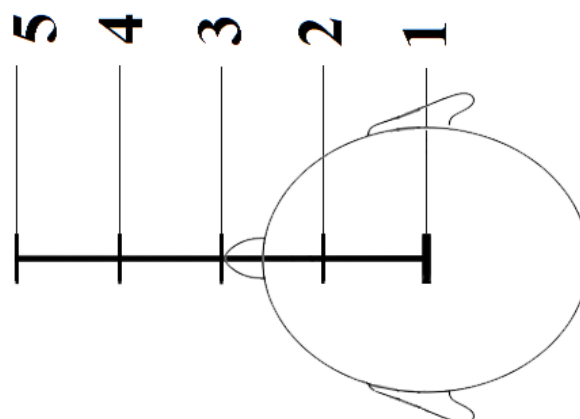
Fotografie experimentu (CAT laboratoř)





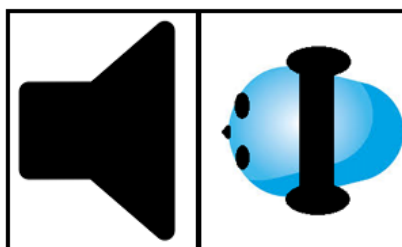
Příloha E

Pomocný ukazatel pro vyhodnocení



REÁLNÝ ZDROJ

VIRTUÁLNÍ ZDROJ



R

V

Příloha F

Seznam použitých zkratk

HRTF	Head Related Transfer Function
DHRTF	Head Related Transfer Function
ITF	Interaural Transfer Function
HRIR	Head Related Impulse Response
ILD	Interaural Level Difference
ITD	Interaural Time Difference
PD	Pure Data
GrIPD	Graphical Interface for Pure Data
AR	Augmented Reality
ARA	Augmented Reality Audio