

AKADEMIE MÚZICKÝCH UMĚNÍ V PRAZE
HUDEBNÍ A TANEČNÍ FAKULTA

Hudební umění

Zvuková tvorba

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VÍCEKANÁLOVÉ FORMÁTY PRO ZÁZNAM HUDBY

Reprodukce 5.1 signálu pomocí sluchátek

BcA. Jan Vaniš

Vedoucí práce:	doc. MgA. Ing. Ondřej Urban, Ph.D.
Oponent práce:	Ing. Milan Guštar, Ph.D.
Datum obhajoby:	6. 6. 2023
Přidělovaný akademický titul:	MgA.

Praha, 2023

ACADEMY OF PERFORMING ARTS IN PRAGUE

MUSIC AND DANCE FACULTY

Art of Music

Sound production

MASTERS THESIS

MULTICHANNEL FORMATS FOR MUSIC RECORDING

Reprodukce 5.1 signálu pomocí sluchátek

BcA. Jan Vaniš

Thesis supervisor:	doc. MgA. Ing. Ondřej Urban, Ph.D.
Opponent:	Ing. Milan Guštar, Ph.D.
Date of defence:	6. 6. 2023
Academic degree conferred:	MgA.

Praha, 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vícekanálové formáty pro záznam zvuku“ vypracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Praze dne

.....

podpis diplomanta

Upozornění

Využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, nebo jakákoliv nakládání s nimi je možné pouze na základě licenční smlouvy, tj. souhlasu autora a AMU v Praze.

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. MgA. Ondřeji Urbanovi Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, za konzultace a za pomoc se zvukovou technikou během příprav psychoakustického testu. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Otčenáškovvi Ph.D. za zásadní pomoc během vymýšlení, během příprav, ale i v průběhu samotného psychoakustického testu.

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou reprodukce prostorového zvuku ve formátu 5.1 pomocí sluchátek.

V úvodu práce je zmíněno teoretické pozadí prostorového zvuku. Práce zde popisuje prostorové vlastnosti zvuku a principy, díky kterým je člověk schopný lokalizovat zdroj zvuku v prostoru. Dále se věnuje reprodukci zvuku pomocí surroundové konfigurace 5.1. Zmiňuje také způsoby, kterými lze dosáhnout prostorového zvuku při reprodukci pomocí sluchátek.

Stěžejní částí práce je psychoakustický poslechový experiment, jehož cílem je zjištění kvality lokalizace zdroje zvuku v transversální rovině při reprodukci 5.1 signálu pomocí sluchátek. Zde je v práci zmíněná metodologie a samotný průběh experimentu, analýza naměřených dat a jejich výsledná interpretace. Naměřená data prokazují, že lokalizace azimutu v celém prostoru kolem posluchače je při reprodukci 5.1 signálu na sluchátka možná.

Abstract

The thesis deals with the problem of reproduction of 5.1 surround sound using headphones.

The theoretical background of surround sound is mentioned in the introduction of the thesis. Here the thesis describes the spatial properties of sound and the principles by which one is able to locate the source of sound in space. It then discusses sound reproduction using a 5.1 surround configuration. It also mentions the ways in which spatial sound can be achieved when reproduced using headphones.

The central part of the thesis is a psychoacoustic listening experiment to determine the quality of sound source localization in the transverse plane when reproducing a 5.1 signal using headphones. Here, the thesis discusses the methodology and the actual conduct of the experiment, the analysis of the measured data and their resulting interpretation. The measured data demonstrate that azimuth localization in the entire space around the listener is possible when reproducing a 5.1 signal on headphones.

Obsah

Úvod.....	1
1 Úvod do problematiky prostorového zvuku.....	3
1.1 Prostorové vlastnosti zdroje zvuku.....	4
1.2 Prostorové vlastnosti akustického prostředí.....	6
2 Lokalizace zvuku.....	8
3 Estetika prostorového zvuku.....	11
4 Reprodukce prostorového zvuku pomocí reproduktorů.....	13
4.1 Binaurální stereofonie.....	13
4.2 Kvadrofonní zvuk.....	15
4.3 Konfigurace 5.1.....	15
4.4 Další vícekanálové konfigurace.....	18
5 Reprodukce prostorového zvuku pomocí sluchátek.....	19
5.1 Reprodukce 5.1 pomocí sluchátek.....	20
5.2 Hypotéza.....	21
6 Metodiky.....	23
6.1 Tvorba a výběr stimulů.....	23
6.2 Analýza výsledků.....	26
6.3 Nedostatky a limitace.....	26
7 Experiment: Srovnání lokalizace 5.1 signálu při reprodukci pomocí konfigurace 5.1 a sluchátek.....	28
7.1 Výběr respondentů.....	28
7.2 Uspořádání reproduktorů.....	28
7.3 Výběr sluchátek.....	30
7.4 Použitý hardware.....	30
7.5 Použitý software.....	30
7.6 Způsob zaznamenávání odpovědí.....	33
7.7 Před-test.....	34
7.8 Průběh poslechového testu.....	35
8 Výsledky hlavního experimentu.....	36
8.1 Získaná data.....	36
8.2 Interpretace dat.....	45
9 Závěr.....	48
9.1 Odpovědi na hypotézy.....	48
9.2 Zhodnocení experimentu.....	49

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot 1

Příloha 2: Tabulka naměřených hodnot 2

Seznam použitého označování a zkratk

ASW – Zdánlivá šířka zdroje (angl. Apparent/Auditory Source Width)

DAW – Software určený ke zvukové tvorbě (angl. Digital Audio Workstation)

HRTF – Přenosová funkce hlavy (angl. Head-related Transfer Function)

Hz – Jednotka frekvence (Hertz)

ILD – Interaurální intenzitní diference (angl. Interaural Level Difference)

ITD – Interaurální časová diference (angl. Interaural Time Difference)

LFE – Kanál nízkofrekvenčních efektů (angl. Low-frequency Effects)

MARC – Výzkumné centrum hudební akustiky HAMU

WAV – Nekomprimovaný zvukový formát (angl. Waveform audio)

Úvod

Informace o směru, ve kterém je v trojrozměrném prostoru vůči posluchači umístěn zdroj zvuku, je velmi důležitá. Umožňuje člověku zdroj zvuku pouze za pomoci sluchu lokalizovat a následně na něj určitým způsobem reagovat. Protože ale prostor kolem nás může být poměrně složitý, i lokalizace zvuku ve třech dimenzích může být obtížná, a nemusí být vždy zcela přesná.

O to obtížnější je pak přenos informace o pozici zdroje zvuku a jeho následná lokalizace při reprodukci zvuku pomocí omezeného počtu reproduktorů. Přes všechny limitace reprodukce zvuku však existují způsoby, jak navodit posluchači pocit přítomnosti ve skutečném prostoru. Všechny způsoby a techniky, kterými lze dosáhnout vnímání prostorového zvuku se souhrnně nazývají anglickým termínem "immersive audio" či "immersive sound". Tento termín můžeme do češtiny přeložit jako pohlcující či vnořující se zvuk.

Immersive audio je slovem nadřazeným pro termín "spatial audio". Spatial audio obecně zahrnuje všechny audio systémy, které se snaží dosáhnout prostorového zvuku, typicky využitím většího množství zvukových kanálů k reprodukci zvuku. Termín spatial audio bývá často zaměňován s anglickým "surround sound". Termínem surround sound nazýváme konkrétní systémy reproduktorů, které v názvu zpravidla zahrnují jejich přesný počet a přesné rozestavení v prostoru, tedy jejich konfiguraci. Můžeme tak říci, že všechny systémy surround sound náleží do kategorie spatial audio, ale ne naopak. Protože překlad obou výše zmíněných termínů do češtiny je "prostorový zvuk", rozhodl jsem se pro přehlednost nadále v této práci referovat o spatial audio jako o prostorovém zvuku a o surround sound jako o surroundovém zvuku či surroundové konfiguraci.

Se surroundovými konfiguracemi se v praxi zřejmě nejčastěji setkáme při sledování filmů či jiných audiovizuálních děl. Protože je divák po celou dobu sledování fixován v pozici, která je definovaná polohou sedačky a projekčního plátna či televizní obrazovky, je možné pomocí rozestavení reproduktorů kolem diváka vytvářet komplexní zvukový prostor.

Při poslechu reprodukováné hudby či jiných zvukových děl je ale zcela běžné vykonávat jiné aktivity, nebo se dokonce se zdrojem zvuku pohybovat. Mobilita posluchače značně komplikuje vytváření zvukové prostorovosti pomocí rozestavení reproduktorů kolem něj. Tento fakt může být jedním z důvodů, proč není poslech hudby pomocí surroundových konfigurací zcela běžný.

Naopak stále běžnější je poslech hudby pomocí sluchátek. Přestože standardní sluchátka reprodukuje pouze dva zvukové kanály, existují způsoby, kterými lze i při poslechu na sluchátka dosáhnout benefitů prostorového zvuku. První experimenty s reprodukcí prostorového zvuku

pomocí sluchátek vznikly již před více než sto lety. Avšak velký průlom přinesla jeho komercializace v posledních letech, zejména firmou Apple. Ta v roce 2021 uvedla podporu Spatial Audio¹ v operačním systému iOS 11 a umožnila tak reprodukci hudby ve vícekanálových formátech, běžně dostupné na streamovacích platformách, pomocí sluchátek AirPods Pro či Max. Uživatelé této služby nepotřebují instalovat žádný další nástroj či aplikaci, protože systém je již implementován v celém Apple ekosystému. Podle statistik firmy Apple uvedení Spatial audio přilákalo na streamovací službu Apple Music nové posluchače. Více než polovina uživatelů Apple Music poslouchá hudbu ve Spatial Audio a jejich počet nadále roste. Stejně tak roste počet umělců, kteří produkují hudbu ve vícekanálových formátech (AppleInsider, 2022). Práce s umístěním zdroje zvuku do virtuálního prostoru kolem posluchače se tak de facto stává novým výrazovým prostředkem, jehož poslech je stále dostupnější pro širokou veřejnost.

Cíl práce

Rostoucí popularita prostorového zvuku mě motivovala k podrobnějšímu výzkumu této problematiky. Tato práce se pomocí poslechového testu snaží kvantifikovat, zda poslech prostorového zvuku ve formátu 5.1 pomocí sluchátek skutečně může přinášet obdobné prostorové benefity, jako poslech 5.1 signálu pomocí surroundové konfigurace reproduktorů. Poslechový test na skupině respondentů zjišťuje, zda odpovídá lokalizace zdroje zvuku v transverzální rovině při reprodukci pomocí reproduktorů reprodukci na sluchátka. Klade si za cíl odpovědět na následující otázky:

1. Je shodná lokalizace zdroje zvuku při reprodukci pomocí 5.1 konfigurace reproduktorů a při reprodukci virtuální 5.1 konfigurace reproduktorů pomocí sluchátek?
2. Liší se kvalita lokalizace zvuku v obou případech pro různé zvukové stimuly?

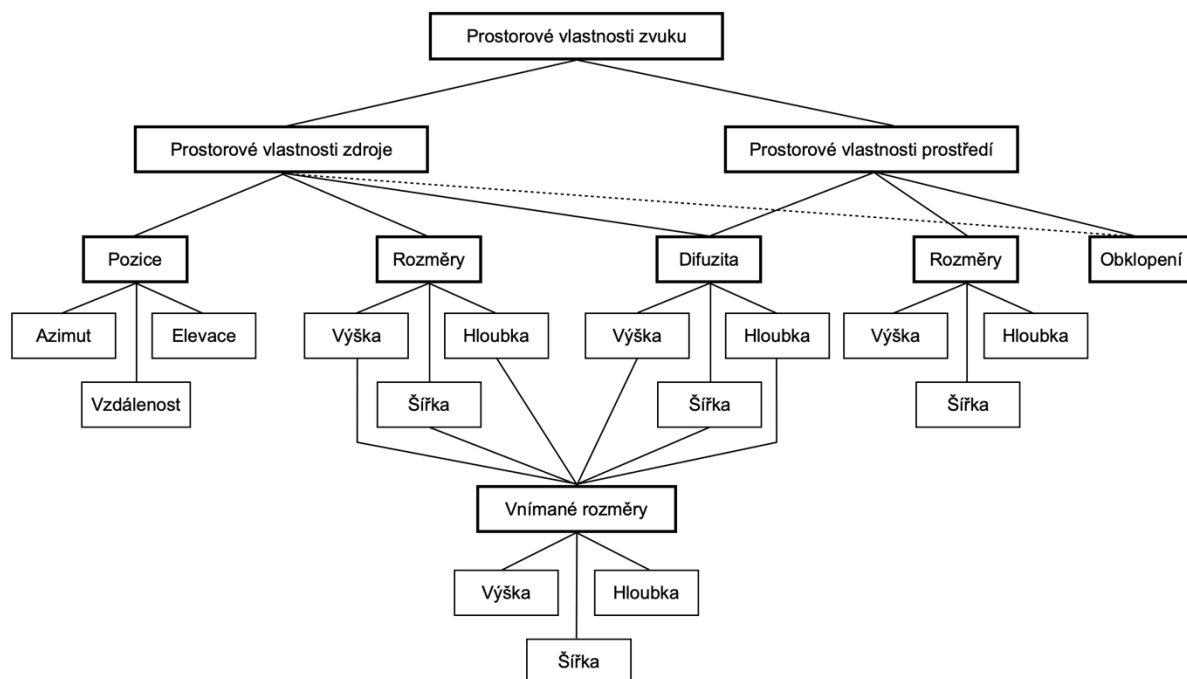
¹ V tomto kontextu je Spatial Audio název funkce v iOS 11, která umožňuje reprodukci prostorového zvuku na sluchátka.

1 Úvod do problematiky prostorového zvuku

Jsou-li splněny podmínky pro šíření zvuku, může zdroj zvuku vyvolat v posluchači sluchový vjem. Sluchovým vjemem rozumíme odraz veškerých kvantitativních vlastností zvuku v lidském vědomí (Syrový, 2013). Jde primárně o informaci o výšce zvuku, jeho délce, hlasitosti a barvě.

Zvuk je signálem, tedy jevem, nesoucím informaci (Wikipedia: Signál). Součástí sluchového vjemu je proto také zvuková informace (Syrový, 2014). Na podobě zvukové informace se podílí nejen kvantitativní, ale i kvalitativní vlastnosti zvuku. Do podoby zvukové informace zasahuje například zvuková zkušenost posluchače či kvalita akustického přenosu zvuku prostředím. Zvuková informace je potom interpretace obsahového sdělení ve zvukovém signálu posluchačem. Díky zvukové informaci může posluchač vyvozovat závěry o různých vlastnostech zdroje zvuku. Například o jaký konkrétní zdroj zvuku se jedná či v jakém je kvalitativním stavu. Důležitou součástí zvukové informace je prostorová informace, tedy soubor všech vlastností zvuku charakterizujících prostor, ve kterém se zdroj zvuku i posluchač vůči sobě nacházejí.

Prostorovými vlastnostmi zvuku můžeme souhrnně označit veškeré prostorové vlastnosti zdroje zvuku a prostředí, ve kterém dochází k šíření zvuku. Tyto vlastnosti se mnohdy doplňují a vzájemně ovlivňují. Přesto je ale třeba oddělovat prostorové vlastnosti zdroje zvuku od prostorových vlastností prostředí. Rumsey (2001) uvedl hierarchii prostorových vlastností takto:



Obrázek 1.1: Hierarchie prostorových vlastností zvuku (převzato Rumsey, 2001)

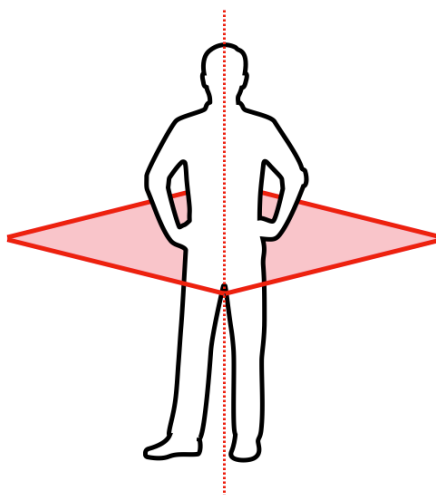
1.1 Prostorové vlastnosti zdroje zvuku

Prostorové vlastnosti zdroje zvuku jsou odrazem zejména fyzikálních vlastností zdroje zvuku. Společně s prostorovými vlastnostmi prostředí vytváří celkový prostorový vjem.

1.1.1 Pozice zdroje

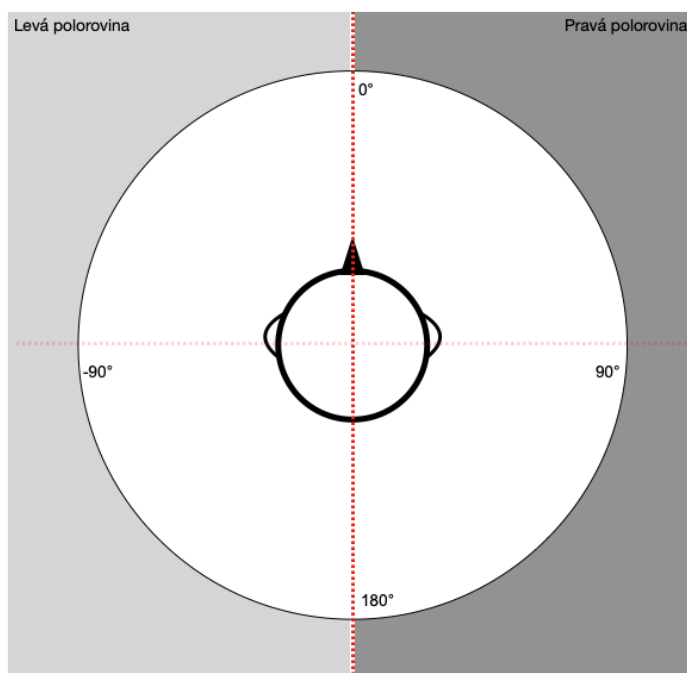
Pozicí zdroje rozumíme jeho souřadnice v trojrozměrném prostoru. Souřadnice jsou definovány azimutem, elevací a vzdáleností. Jejich určení poslechem nazýváme lokalizace zvuku.

Azimut je úhel určující polohu zvuku v horizontální, respektive transversální rovině. Transverzální rovina je anatomická rovina, která prochází lidským tělem kolmo na jeho vertikální osu a dělí tak lidské tělo na horní a dolní část. Pro účely poslechu se tato rovina vkládá do spojnice uší.



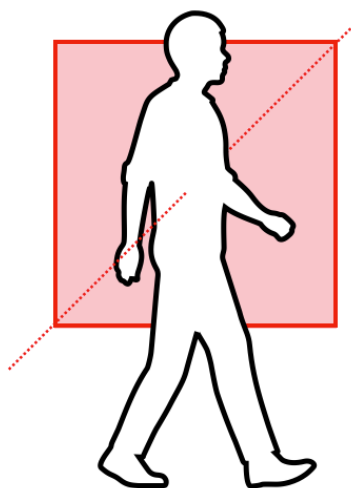
Obrázek 1.2: Transverzální rovina a vertikální osa lidského těla

Azimut je potom úhel, který svírá spojnice zdroje zvuku a posluchače se sagitální osou lidského těla. Ve zvukové praxi typicky dělíme transversální rovinu pomocí sagitální osy na levou a pravou polovinu. Pokud vnímáme zdroj zvuku v pravé polovině, mluvíme o jeho lokalizaci zprava, pokud v levé polovině, lokalizujeme ho zleva. Vnímáme-li pozici zdroje zvuku přímo na sagitální ose, mluvíme o lokalizaci zepředu či zezadu.



Obrázek 1.3: Transverzální rovina a sagitální osa

Elevace je úhel definující polohu zvuku ve vertikální, respektive mediální rovině. Mediální, či mediánní rovina je anatomická rovina kolmá na horizontální osu těla. Rozděluje ho na pravou a levou část.



Obrázek 1.4: Mediální rovina a horizontální osa lidského těla

Úhel, který svírá spojnice zdroje zvuku a posluchače s transverzální rovinou, je elevace. Rozdělíme-li mediální rovinu pomocí sagitální osy, vznikne spodní polorovina a horní polorovina. Lokalizaci zvuků v horní polorovině můžeme nazvat lokalizací shora a lokalizaci zvuků ve spodní polorovině můžeme nazvat lokalizací zdola.

Vzdálenost je vlastnost, která doplňuje azimut a elevaci ve třetím rozměru. V kontextu vnímaných prostorových vlastností zvuku není vzdálenost skutečnou vzdáleností zdroje

od posluchače, ale spíše vzdáleností, která se jeví poslechem. Vjem vzdálenosti je způsobený zejména úbytkem hlasitosti zvuku, který vzniká delší konanou vzdáleností. Dále pak úbytkem vysokých frekvencí ve spektru zvuku, který je způsobený pohltivostí ve vzduchu. V případě, že se zvuk šíří v uzavřeném prostoru, je vjem vzdálenosti podpořen také přítomností dozvuku. Vjem vzdálenosti souvisí i s potlačeným odrazem zvuku od země (Rumsey, 2001).

1.1.2 Rozměry zdroje

Rozměry zdroje bychom mohli dále rozdělit na šířku a hloubku. Často se tyto vlastnosti ne zcela přesně označují výrazem prostorovost zdroje. S prostorovostí však typicky spojujeme spíše akustické prostředí (viz kapitola 1.2.1). Také je třeba rozlišovat mezi šířkou a hloubkou v kontextu celkového zvukového obrazu (o které mluvíme například při poslechu reprodukováné hudby) a šířkou a hloubkou jednotlivých dílčích zdrojů zvuku.

V angličtině se pro šířku zdroje používá termín ASW – Apparent/Auditory source width (Rumsey, 2001). Ten bychom mohli do češtiny přeložit jako "zdánlivá šířka zdroje". Tato vlastnost ale není reálným rozměrem zdroje zvuku. Je určena tím, kolik prostoru zdánlivě zabírá zdroj zvuku v pomyslném zvukovém obrazu.

Vjem zdánlivé šířky zdroje je způsobený zejména brzkými odrazy v prostoru, asi do 80 milisekund (Rumsey, 2001).

Zatímco zdánlivá šířka zdroje popisuje vlastnosti zdroje na ose levá-pravá, hloubka popisuje perspektivu zdroje zvuku na ose předozadní. Hloubku vykazují zejména dostatečně velké zdroje (Rumsey, 2001), například symfonický orchestr.

1.2 Prostorové vlastnosti akustického prostředí

Každý prostor se svými fyzikálními vlastnostmi podepisuje na kvalitě akustického přenosu zvuku. Z Rumseyho hierarchie prostorových vlastností (obrázek 1.1) je však patrné, že jediná vlastnost "rozměr prostředí" je vázána pouze na prostor. Ostatní prostorové vlastnosti jsou kombinací působení vlastností zdroje a prostoru. Ačkoliv jsou zdroj a prostředí dva unikátní články v řetězci přenosu zvuku, jsou vzájemně provázány a často také vnímány posluchačem jako jeden celek.

1.2.1 Rozměry prostředí

Rozměry prostředí jsou, podobně jako u zdroje zvuku, vnímaným odrazem skutečných fyzikálních rozměrů prostoru. Vjem rozměrů prostoru úzce souvisí s množstvím a podobou zvukových odrazů v něm. Zvukový přesah rozměrů prostoru vnímaný sluchem se v angličtině označuje termínem spaciousness. Ten bychom mohli do češtiny přeložit jako prostorovost. Prostorovost je určena nejen velikostí prostoru, ale také jeho dozvukovostí.

Prostorovost však můžeme chápat také jako fúzi vlastností zdroje a vlastností prostoru. V tomto kontextu je prostorovost jakýmsi celkovým subjektivně vnímaným prostorovým dojmem, který je tvořený primárně z vjemů ASW a obklopení (Bradley, Souldore, 1995).

1.2.2 Obklopení

Pojem obklopení zvukem je českým překladem anglického envelopement. Tento termín již může působit poněkud abstraktně, protože nemá zcela přímou spojitost s fyzikálními vlastnostmi prostoru. Obklopení podobně jako prostorovost úzce souvisí s odraženým zvukem. Vjem obklopení je určen zejména úrovní pozdních odrazů, směrem, ze kterého přicházejí k posluchači, a jejich časovým rozložením (Bradley, Souldore, 1995). Obklopení může být ovlivněno také zdánlivou šířkou zdroje.

1.2.3 Difuzita

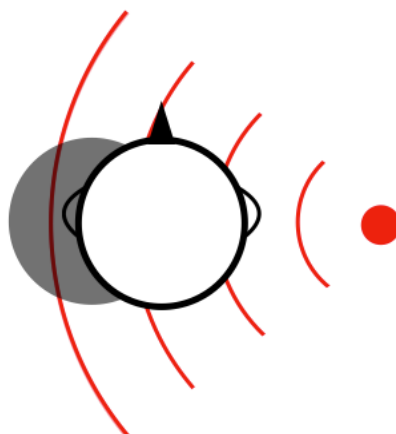
Difuzita je vlastnost, kterou ovlivňuje zejména prostředí, současně ale i zdroj zvuku. Difuzita popisuje, jakým způsobem se chová zvuk v prostoru. Velkou difuzitou se vyznačuje prostor, ve kterém je zvuk rozptýlen rovnoměrně do všech stran. Oproti tom malou difuzitu má prostor, ve kterém jsou odrazy fokusovány více směrově.

Difuzita ovlivňuje podobu zvukového pole. Zvukové pole může dále vykazovat určité rozměry, podobně jako samotný zdroj zvuku.

2 Lokalizace zvuku

Lokalizaci můžeme definovat jako určení směru a vzdálenosti reálného či virtuálního zdroje sluchem (Syrový, Guštar, 2016). Člověk je schopen lokalizovat zvuk díky monaurálním a binaurálním informacím. Monaurální informace jsou ty, které člověk vnímá jedním uchem, kdežto binaurální vznikají současným poslechem pomocí obou uší.

Monaurální informace vycházejí primárně ze spektrálního složení zvuku. Vlivem stavby lidského těla a vzhledem k rozměrům hlavy dochází ke změnám ve spektru přijímaného zvuku. Tyto změny jsou závislé na pozici, ve které se zdroj zvuku vůči posluchači nachází. Bude-li se například zdroj zvuku nacházet vpravo od posluchače a bude-li produkovat zvuk o vlnové délce menší či srovnatelné s rozměry hlavy, ocitne se levé ucho v akustickém stínu. Ten způsobí úbytek intenzity zejména vyšších frekvencí (Syrový, 2013). Díky takové změně barvy zvuku je člověk schopný usuzovat na směr, ze kterého zvuk přichází.



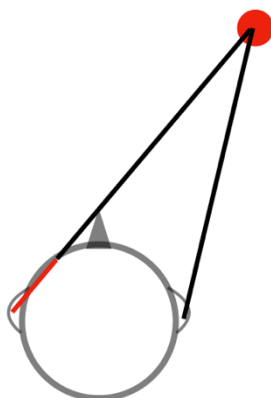
Obrázek 2.1: Akustický stín hlavy

Zásadní vliv na monaurální informaci má však samotný ušní boltce. Existují dvě hlavní teorie, jakým způsobem se ušní boltce na monaurální informaci podílí (Wright, Herbank, Wilson, 1974). Podle Jense Blauerta funguje boltce jako filtr, který na základě azimutu zdroje zvuku některé části spektra zvýrazňuje a jiné potlačuje. Podle Dwighta W. Batteaua vytváří odrazy zvuku v záhybech ušního boltce zpoždění. Toto zpoždění je proměnné pro různé směry, ze kterých zvuk přichází. Lokalizace zvuku by podle této teorie měla být určena velikostí zpoždění mezi přímým zvukem a zvukem odraženým pomocí záhybů boltce. Není však jasné, zda je člověk vůbec schopný toto zpoždění vnímat, protože je velmi krátké. Pro azimut se pohybuje mezi 10-100 mikrosekundami (Wright, Herbank, Wilson, 1974). Vliv ušního boltce je také velmi důležitý pro schopnost lokalizace elevace. Elevaci totiž určujeme pouze pomocí monaurálních informací.

Shrneme-li veškeré výše zmíněné vlivy do jedné funkce, získáme přenosovou funkci hlavy. Ta je známější spíše pod anglickým označením HRTF – Head Related Transfer Function. HRTF ukazuje, jakým způsobem se pro jedno ucho spektrálně a fázově mění zvuk produkovaný zdrojem v jedné konkrétní pozici vůči posluchači vlivem akustického působení lidské hlavy. Pár monaurálních HRTF pak tvoří binaurální HRTF. Monaurální přenosová funkce hlavy do jisté míry stačí k omezené lokalizaci zdroje zvuku. Člověk dokáže porovnávat aktuální podobu monaurální HRTF s podobami HRTF, kterým byl vystaven dříve (Moore, 2013). Díky tomu mohou omezeně lokalizovat zvuk například i lidé postižení hluchotou na jedno ucho.

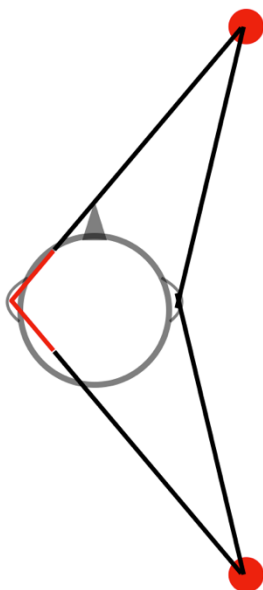
Binaurální poslech na rozdíl od monaurálního přináší posluchači možnost porovnávat signál mezi jednotlivými uchy. To zásadně zpřesňuje schopnost lokalizace azimutu, a to o více než 20° (Syrový, 2014). Signály z obou uší se porovnávají zejména v časové a spektrální doméně.

Lidské uši mají mezi sebou vzdálenost, která je určena velikostí hlavy. Velikost průměrné lidské hlavy se pohybuje kolem 20 centimetrů (Naylor, 2021). Pokud se bude zdroj zvuku nacházet mimo mediální rovinu, musí k jednomu z uší konat delší dráhu, a tedy i delší čas. Zvuk v obou uších má proto odlišnou fázi.



Obrázek 2.2: Různé vzdálenosti od zdroje k uším

Takto vzniklé zpoždění se nazývá interaurální časová diference neboli ITD (Interaural Time Delay). Nejvyšší hodnotu má toto zpoždění ve chvíli, kdy je zdroj zvuku umístěn v ose jednoho z uší, má tedy azimut $\pm 90^\circ$. Hodnota ITD pro tento azimut se pohybuje kolem 650 mikrosekund (Rumsey, 2001) v závislosti na velikosti hlavy. Pomocí ITD je člověk schopný pro některé frekvence velmi přesně rozlišovat mezi lokalizací zleva a zprava. Problém však nastává u předozadní lokalizace, protože pouze na základě zpoždění není možné určit, zda se zdroj zvuku nachází vpředu či vzadu (Novotný, 2010).



Obrázek 2.3: Nejednoznačná lokalizace zdroje zvuku pomocí ITD

Další problém vyvstává u čistých sinusových tónů s frekvencí nad 700 Hz, jejichž polovina vlnové délky se přibližuje vzdálenosti obou uší (Rumsey, 2001). Fázový posun u těchto tónů je velmi nejednoznačný a člověk není schopný vyhodnotit, které ucho bylo vystaveno zvuku dříve.

Obecně můžeme říct, že lokalizace pomocí ITD funguje zejména na nízkých frekvencích. Pro frekvence vyšší než 1 kHz již člověk není schopný analyzovat fázi signálu, protože vláskové buňky ve vnitřním uchu nekmitají dostatečně synchronně (Rumsey, 2001).

ITD je doplněna o interaurální intenzitní diferenci neboli ILD (Interaural Level Difference). Změna v úrovni signálu je opět způsobena odlišnou vzdáleností obou uší (byť je změna intenzity zvuku v důsledku větší konané vzdálenosti v praxi víceméně zanedbatelná) ale hlavně odlišným spektrem zvuku.

Samotná analýza ITD a ILD však k dokonalé lokalizaci nestačí. Důležitá je schopnost porovnávat časové změny v HRTF, které vznikají pohybem hlavy. Lokalizaci pak ovlivňují také ostatní smysly, zejména zrak.

3 Estetika prostorového zvuku

Již v době, kdy ještě nebylo možné zaznamenávat a zpracovávat zvuk, existovaly způsoby, kterými mohli skladatelé ovlivňovat prostorový dojem z hudebního díla. Zpěváci se běžně v kostelech umísťovali na kruchtu. Někteří muzikanti hráli v sálech mimo jeviště, nebo dokonce za scénou. Těmito a mnohými dalšími způsoby vznikl výrazový prostředek, se kterým mohou skladatelé pracovat dodnes.

Díky vynálezu záznamu a reprodukce zvuku se však otevřela i mistrům zvuku možnost využít tohoto výrazového prostředku a určitým způsobem ovlivnit zvukové dílo tak, aby dosáhli poutavějšího či efektnějšího výsledku. Můžeme zmínit celkem tři estetické přístupy, které si může mistr zvuku pro práci s prostorem vybrat.

Historicky nejstarší a lidskému sluchu asi nejbližší přístup k estetice zvukové informace je snaha o dosažení co „nejpřirozenějšího“ zvuku. Nejpřirozenější zvuk je v tomto případě takový zvuk, který obsahuje zcela stejné znaky, jako zvuk produkovaný v reálném prostoru. Poslech nahrávky by tedy měl posluchači navodit věrnou iluzi přítomnosti v tomto prostoru. Nejpřirozenější zvuk je bohužel pouze nedosažitelným ideálem, protože není možné věrně zachytit a reprodukovat akustickou realitu. Je však možné se nejpřirozenějšímu zvuku do určité míry přiblížit, a to i díky technologii prostorového zvuku.

Tento estetický přístup se uplatňuje zejména při tvorbě nahrávek umělé hudby. To proto, že umělá hudba, narozdíl od hudby populární či elektronické, existuje vždy pouze v kontextu určitého prostoru. Aby mohlo dojít k produkci této hudby, je třeba, aby se hudebníci a posluchači v daném prostoru setkali. Chceme-li umělou hudbu reprodukovat, je tedy potřeba navodit posluchači pocit přítomnosti v takovémto prostoru. Můžeme namítnout, že pakliže vlivem limitací zvukové techniky nelze realitu naprosto věrně napodobovat, je výše popsaný přístup zbytečný a neaktuální. Nahrávce nepřináší žádnou přidanou hodnotu a vytváří jen „horší kopii“ reality. Na druhou stranu ho můžeme chápat jako určitou nikdy nekončící výzvu pro mistry zvuku, kteří neustále vymýšlejí další a další techniky, jakými se k ideálnímu zvuku přiblížit.

Druhý přístup k estetice zvukové informace celou tuto filozofii převrací – místo umístění posluchače do hudebního sálu se snaží umístit hudebníky blízko posluchači do místa poslechu (Rumsey, 2001). Zejména vhodným snímáním jednotlivých nástrojů či nástrojových skupin, ale také uměním výsledné mixáže, je možné stylizovat realitu tak, aby byl poslech nahrávky pro posluchače zajímavější, byť za cenu ztráty jakési věrnosti či přirozenosti zvuku. Tento estetický přístup má jasnou nadstavbu: umožňuje posluchači takový hudební zážitek, který by v hledišti koncertního sálu nemohl zažít.

Třetím estetickým přístupem je vytváření zcela nové zvukové reality. Během tohoto procesu nedochází k přenosu zvukové informace mezi prostorem záznamu a prostorem reprodukce. Jedná se o reprodukci zvukové informace uměle vytvořené mistrem zvuku. Tohoto přístupu se využívá u žánrů, které pro svoji existenci nevyžadují reálný prostor. Může to být například populární či elektronická hudba. Dále se tohoto přístupu může využít ve chvíli, kdy je potřeba nasimulovat reálný prostor, který ale mimo simulovanou realitu neexistuje. Tak je tomu například ve filmech, počítačových hrách či virtuální realitě. Mistr zvuku za pomoci různých prostředků uměle vsazuje zvukové objekty do virtuálního zvukového obrazu. Takto mohou vznikat i zvukové informace, které by v reálném prostoru vzniknout nikdy nemohly.

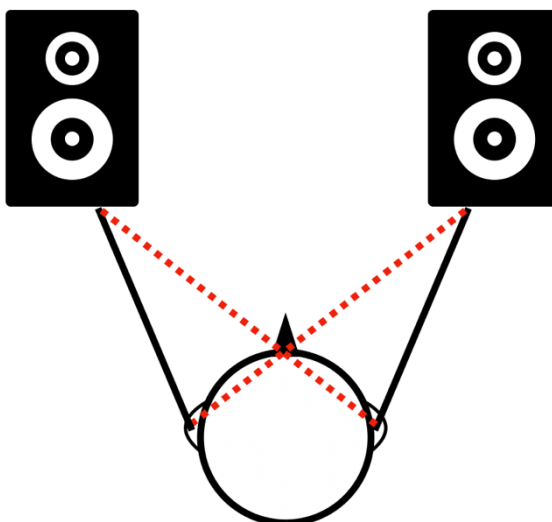
Všechny tři přístupy se v praxi často různým způsobem prolínají. Je například běžné doplňovat věrnou nahrávku orchestru o umělý dozvuk nebo o spotové mikrofony, které jsou uměle vsazovány do zvukového obrazu. Naopak "umělé" nahrávky populární hudby se zejména v minulosti často doplňovaly dozvukem ze skutečných prostorů. Není tedy možné říct, který z přístupů je ten nejlepší. To proto, že je nutné vždy stavět přístupy do kontextu doby, žánru, účelu nahrávek a dalších důležitých parametrů.

4 Reprodukce prostorového zvuku pomocí reproduktorů

Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách, zvuk se během akustického přenosu v uzavřeném prostoru šíří k posluchači typicky ze všech stran, což přispívá k některým prostorovým vlastnostem zvuku. Při běžné monofonní či stereofonní reprodukci však k takovému šíření zvuku nedochází (nepočítáme-li odrazy vznikající v prostoru reprodukce). Během monofonní reprodukce reprodukuje pouze jeden zvukový kanál. Zvukový obraz je proto zpravidla úzký a není možné lokalizovat zdroje zvuku na ose levá-pravá. Z hlediska prostorového zvuku můžeme chápat monofonní reprodukci jako reprodukci v nulté dimenzi, protože jeden monofonní reproduktor je bodový zdroj. Oproti tomu klasická stereofonní reprodukce zvukový obraz rozšiřuje do první dimenze. Zvukový prostor je ovšem limitovaný úhlem, který s posluchačem svírají oba reproduktory.

4.1 Binaurální stereofonie

Dva kanály při reprodukci zvuku již ale mohou stačit k umístění zvuku i do druhé dimenze. Tedy nejen do osy pravolevé, ale i předozadní. Způsob reprodukce, který toto umožňuje, se nazývá binaurální stereofonie. Během binaurální stereofonie je reprodukován signál v obou kanálech upraven pomocí HRTF a měl by se tedy jevit posluchači v takové podobě, jakou má ve chvíli, kdy dopadá na ušní bubínky. Narozdíl od poslechu na sluchátka ale posluchač slyší v obou uších kromě signálu z příslušného kanálu také přeslech signálu z druhého reproduktoru.



Obrázek 4.1: Přeslechy mezi jednotlivými reproduktory

To je v případě binaurální stereofonie řešeno pomocí transaural crosstalk cancelling procesingu (Rumsey, 2001). Jedná se o systém, který eliminuje přeslech z druhého kanálu pomocí přimíchávání tohoto signálu filtrovaného a zpožděného podle HRTF a s inverzní fází

k signálu ve druhém kanálu. Problémem tohoto systému je fakt, že posluchač slyší signál procesovaný pomocí HRTF, který je však reprodukován v prostoru. Tím pádem se na něm dále uplatňuje vlastní HRTF posluchače a další vlastnosti prostoru. Ve chvíli, kdy posluchač opustí sweetspot, tedy ideální pozici poslechu, se zvukový obraz zhroutí.

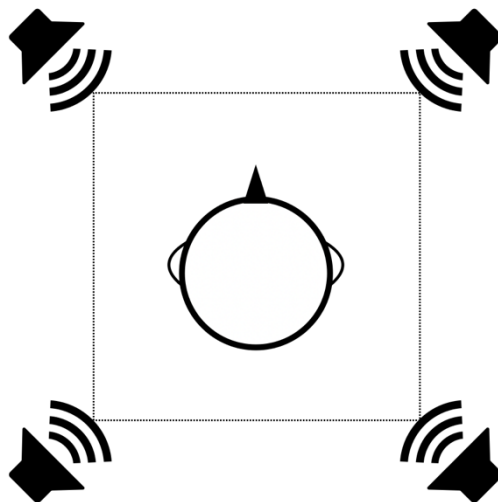
O prostorovém zvuku v pravém slova smyslu mluvíme v případě systémů, které využívají větší množství zvukových kanálů a reproduktorů k navození pocitu prostorovosti. Typicky využívají umístění reproduktorů kolem posluchače nebo za něj. Takových systémů existuje celá řada. Jejich vynálezy jsou spojeny zejména s vývojem filmového zvuku a s jednotlivými filmovými studii jako například Warner Brothers, 20th Century Fox či Disney. Ta experimentovala zejména s počtem kanálů, umístěním reproduktorů, ale také způsobem kódování zvukové stopy k filmové.

Takto začaly vznikat systémy prostorového zvuku. Systémem či formátem prostorového zvuku rozumíme souhrn typicky standardizovaných informací o kódování a dekódování zvuku, jeho přenosu, počtu kanálů a rozmístění jednotlivých reproduktorů.

Je důležité odlišovat termíny "systém/formát" a "konfigurace". To proto, že i různé odlišné systémy mohou mít stejné konfigurace, respektive na jednu konfiguraci je možné reprodukovat zvuk pomocí různých systémů (například formáty Dolby Digital a DTS v případě konfigurace 5.1). Níže v této práci jsou zmíněny konfigurace, kterých využívají či v minulosti využívali posluchači z řad široké veřejnosti.

4.2 Kvadrofonní zvuk

První komerčně dostupnou konfigurací pro prostorový zvuk byl čtyř kanálový zvuk (angl. Quadraphonic sound). Tato konfigurace využívá čtyři reproduktory – dva páry vpředu a dva vzadu. Všechny reproduktory svírají úhel 90°.



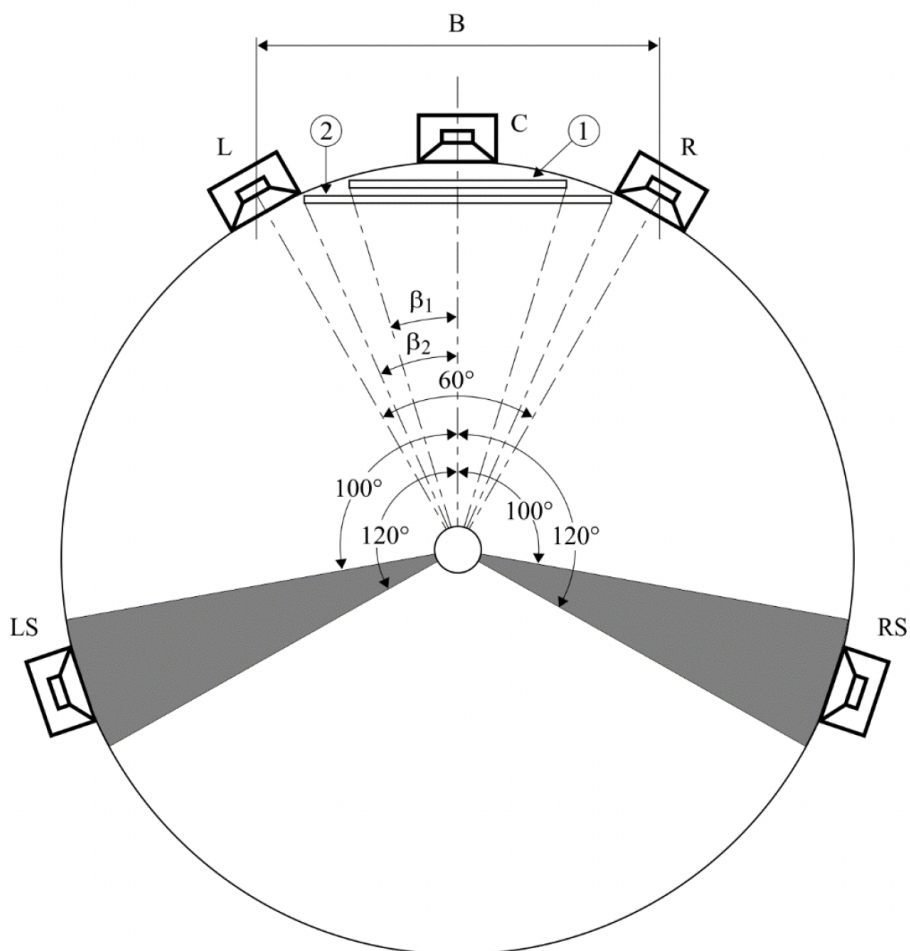
Obrázek 4.2: Rozvržení reproduktorů v kvadrofonním systému

Zejména tento veliký úhel způsobil, že systémy, využívající tuto konfiguraci, nebyly příliš komerčně úspěšné. Nejen, že nebyly zpětně kompatibilní s klasickými stereo systémy, ale přední obraz, který vytvářely, často působil nestabilně a s nejasným středem (Rumsey, 2001).

4.3 Konfigurace 5.1

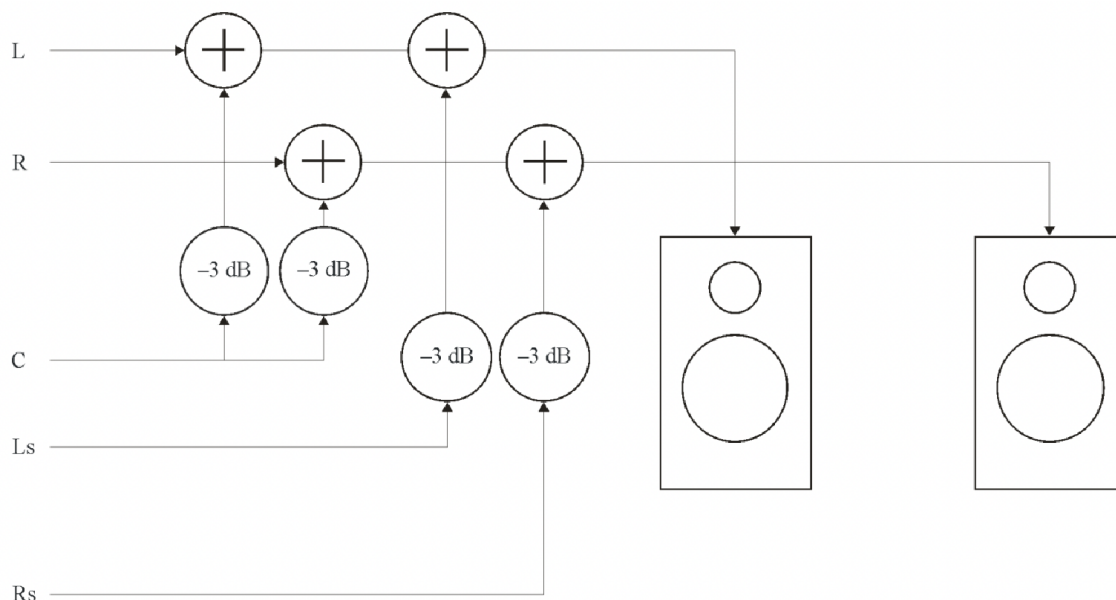
Komerčně úspěšnou se stala až šestikanálová konfigurace 5.1. Její konkrétní specifikace popisuje norma ITU-R BS.775. Ta vznikla v 90. letech 20. století. Je ale neustále aktualizována. Konfigurace 5.1 využívá k reprodukci zvuku šest reproduktorů. Před posluchačem je umístěný standardní stereo pár reproduktorů (kanály Left, Right), doplněný o reproduktor umístěný ve středu (kanál Center). Tyto reproduktory slouží k tvorbě primárního zvukového obrazu. Další pár reproduktorů je umístěný za posluchačem (kanály Left surround, Right surround). Tyto reproduktory jsou určeny zejména k vytvoření efektu prostorovosti. Proto se jimi typicky přehrávají dozvuky místností a prostorů, případně další prostorové efekty. Šestý reproduktor, subwoofer, slouží k přehrávání nízkých frekvencí nepřesahujících 120 Hz (ITU, 2022) (kanál Low-frequency effects). LFE je pouze efektní kanál. I v případě, že není využit, je možné dosáhnout prostorových benefitů konfigurace. Podle ITU (2022) je také možné využít subwoofer nejen k reprodukci LFE, ale i pro podporu basové složky v ostatních kanálech. ITU

přesně definuje pozice předních reproduktorů. Pozice zadních reproduktorů spíše doporučuje v určitém rozsahu.



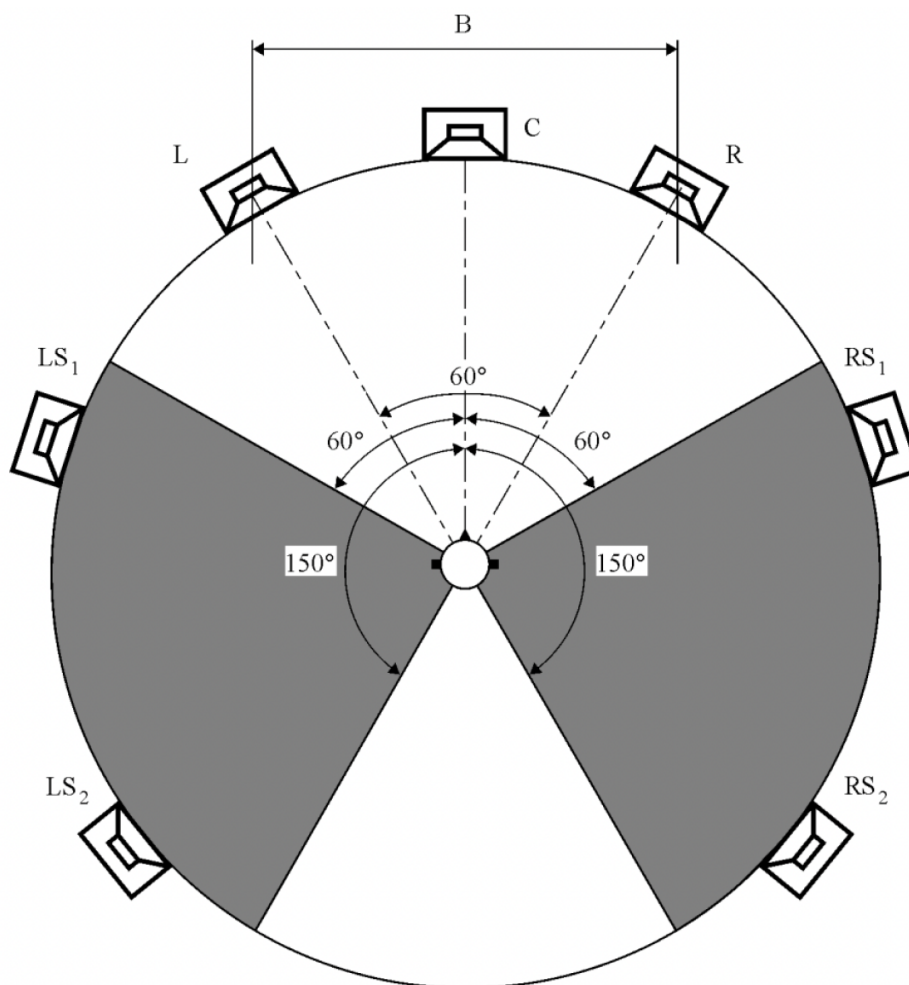
Obrázek 4.3: Rozvržení reproduktorů konfigurace 5.1 podle ITU (převzato ITU, 2022)

Zásadní výhodou konfigurace 5.1 je její reciproční kompatibilita s běžnou stereofonní reprodukcí. Zpětné kompatibility 5.1 se stereem dosáhneme pomocí tzv. downmixu, tedy smíchání pěti kanálů do dvou tak, aby byla zachována zvuková informace. LFE kanál se během downmixu typicky vypouští. Takto vypadá downmix 5.1 signálu podle ITU (2022):



Obrázek 4.4: Downmix 5.1 do stera (převzato ITU, 2022)

Z pozic jednotlivých reproduktorů však plynou také určité prostorové nevýhody, které konfigurace 5.1 má. Levý a pravý reproduktor tvoří společně s posluchačem rovnostranný trojúhelník. To zejména proto, aby šel na konfiguraci 5.1 věrně reprodukovat klasický stereofonní signál. Kdyby nebylo nutné dodržovat tento kompromis, mohly by 5.1 konfigurace využívat mnohem širšího obrazu. Protože pevný zvukový střed je zajištěný centrálním reproduktorem, je teoreticky možné rozšířit zvukový obraz zvětšením vzdálenosti mezi levým a pravým reproduktorem (při zachování stejné vzdálenosti od posluchače). Při rozestavění reproduktorů podle ITU (2022) může být tedy zvukový obraz z předních reproduktorů možná zbytečně úzký (Rumsey, 2001). Další nevýhodou je obtížnost lokalizace zdroje zvuku v celých 360 stupních azimutu. Konfigurace 5.1 je ze své podstaty nevhodná k přesné lokalizaci zdroje v prostoru kolem posluchače. K tomuto účelu jsou reproduktory umístěny nerovnoměrně. Existují však způsoby, jakými klasickou 5.1 konfiguraci vylepšit tak, aby byly její nevýhody potlačeny. Jedním ze způsobů je například použití dalšího páru zadních surroundových reproduktorů.



BS.0775-02

Obrázek 4.5: Doplnění druhého páru L_s , R_s k 5.1 (převzato ITU, 2022)

4.4 Další vícekanálové konfigurace

Existují další konfigurace, které jsou v podstatě mutacemi konfigurace 5.1. K té přidávají další reproduktory. Jejich princip je ale pořád stejný. Příkladem může být například konfigurace 7.1, vyvinutá pro potřeby širokoúhlých pláten v kinech. V konfiguraci 7.1 jsou oproti 5.1 přidány další dva přední reproduktory (kanály L, CL, C, CR, R) (Rumsey, 2001).

Zásadní změnu oproti konfiguraci 5.1 však přináší konfigurace, které kromě předních a zadních kanálů počítají také s výškovými. Tyto kanály jsou reprodukovány reproduktory umístěnými v jiné elevaci, než je posluchač (typicky ze stropu nad ním). Tím rozšiřují zvukový obraz do posledního třetího rozměru. Prvním takovým standardizovaným systémem je Dolby Atmos, který podporuje až 10 výškových kanálů.

5 Reprodukce prostorového zvuku pomocí sluchátek

Při poslechu monofonní či klasické stereofonní nahrávky na sluchátka dochází k jevu, který se nazývá lateralizace. Lateralizace je "subjektivní umístění zvuku na interaurální spojnici, tj. na fiktivní meziušní spojnici uvnitř hlavy." (Syrový, Guštar, 2016) K tomuto jevu dochází z toho důvodu, že sluchátka jsou umístěna přímo u ucha a zvukový signál tak není ovlivněn HRTF. Případně ne tolik, jako při klasickém poslechu. Posloucháme-li monofonní nahrávku, je signál v obou sluchátkách stejný. Takový signál bude posluchač vlivem lateralizace vnímat přesně uprostřed hlavy. Pokud bude jeden z kanálů zpožděný, přesune se vjem na interaurální spojnici blíže k uchu, které je vystaveno dřívějšímu zvuku (Syrový, 2013). Pokud bude mít jeden z kanálů větší intenzitu, přesune se vjem blíže k uchu s příslušným kanálem. Díky těmto vlastnostem se může při klasické stereofonní reprodukci zvukový obraz rozprostírat po celé interaurální spojnici.

Abychom docílili realistického prostorového vjemu zvuku při poslechu na sluchátka, je třeba navodit pocit externalizace. Externalizace je subjektivní pocit vnímání zdroje vně hlavy. K externalizaci by mělo dojít, pakliže je stereofonní signál vhodně zpracován pomocí HRTF. Protože ve sluchátkách, na rozdíl od výše zmíněného poslechu na reproduktory, není žádný přeslech mezi kanály, není v podstatě potřeba signál dále upravovat. Stereofonní signál upravený pomocí HRTF nazýváme binaurální.

Existují celkem tři způsoby, kterými lze získat binaurální stereofonní signál. Prvním způsobem je nahrání signálu pomocí mikrofónů umístěných v zevním zvukovodu figuranta. Signál je upravený pomocí HRTF akusticky již během záznamu vlivem umístění mikrofónů. Navíc je upravený pomocí HRTF odvozené od konkrétních vlastností hlavy daného posluchače. Bude-li nahrávku poslouchat sám figurant, měl by v ideálním případě zvuk vykazovat zcela totožné prostorové vlastnosti, jaké měl během záznamu. Pokud však bude nahrávku poslouchat jiná osoba, jejíž HRTF je vlivem fyziologických vlastností hlavy a těla odlišná, mohou být prostorové vlastnosti zvuku zkresleny. Je jasné, že i z tohoto důvodu není tento systém příliš vhodný a praktický pro masové použití v hudebním průmyslu. Seběmenší pohyby hlavy figuranta během záznamu navíc způsobují další změny v prostorových vlastnostech zvuku.

Druhým způsobem je proto použití umělé hlavy či umělého torza, které živého člověka z předchozího příkladu nahradí. Hlavní nevýhodou tohoto způsobu je určitá univerzální aproximace HRTF, na základě které je umělá hlava konstruována. Ta opět vede ke zkreslení prostorových vlastností zvuku.



Obrázek 5.1: Umělá hlava Neumann KU 100 (převzato Neumann: KU 100)

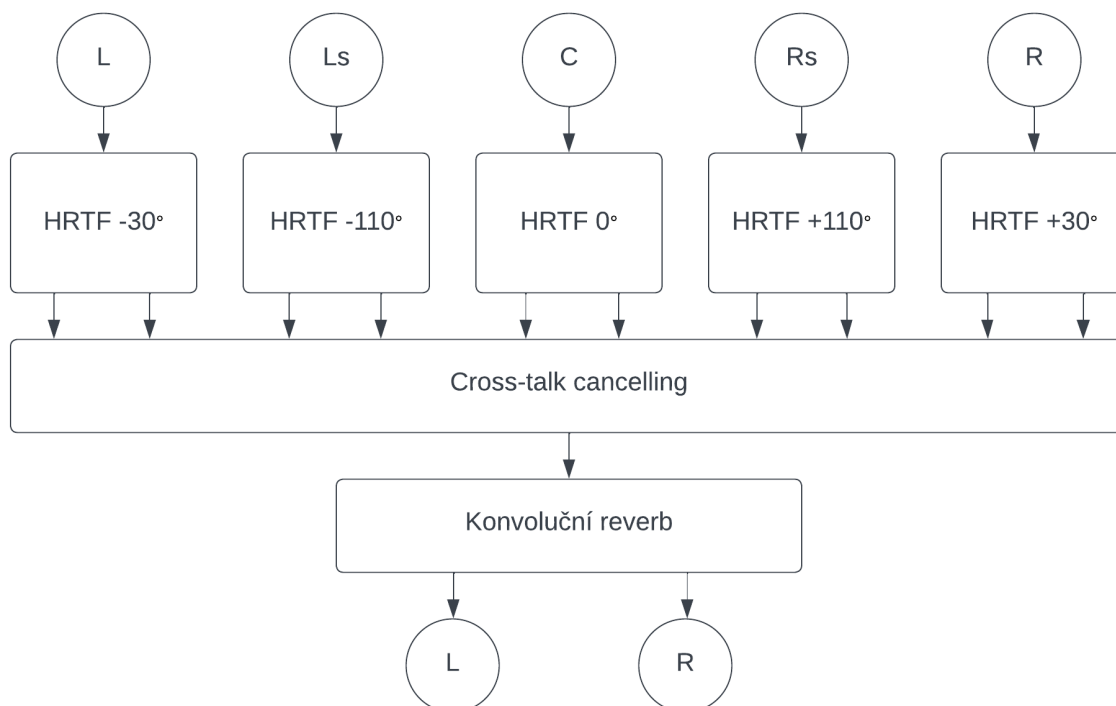
Třetím způsobem je softwarová syntéza HRTF. Tento způsob přináší celou řadu zajímavých možností. Software na základě vstupních dat syntetizuje HRTF a v reálném čase pomocí této HRTF upravuje zvukový signál. Protože uživatel typicky může ovlivňovat vstupní data syntézy, je možné dosáhnout velmi přesvědčivých výsledků. Uživatel může například definovat přesné vlastnosti své hlavy (například její obvod, vzdálenost uší). Existují dokonce aplikace, které umožňují uživateli nafotit či naskenovat svoji hlavu. Software potom HRTF vytváří uživateli na míru z analýzy vstupních dat. Další výhodou je možnost syntézy HRTF proměnné v reálném čase na základě pohybu hlavy posluchače. Pohyby hlavy zásadně umocňují pocit externalizace (Syrův, 2013). Existují způsoby, kterými lze snímat pohyby hlavy posluchače, a informace o aktuální poloze hlavy dále uplatňovat v algoritmu syntézy HRTF. Tím můžeme docílit ještě většího pocitu prostorovosti, a navíc i určitého benefitu interakce posluchače s nahrávkou.

5.1 Reprodukce 5.1 pomocí sluchátek

Při reprodukci signálu vícekanálových konfigurací pomocí sluchátek se nejčastěji uplatňuje třetí způsob, tedy softwarová syntéza HRTF, v kombinaci s technikou virtuálních zdrojů zvuku. K celému procesu dochází v binaurálním procesoru, jehož zobecněný princip je následující:

Do binaurálního procesoru vstupují jednotlivé kanály. Každý je upraven pomocí binaurální HRTF s azimutem odpovídajícím příslušnému reproduktoru. Podporuje-li procesor snímání

pohybů hlavy posluchače, mohou se azimuty HRTF jednotlivých reproduktorů měnit v reálném čase na základě pohybů hlavy. Kanály následně prochází cross-talk cancelling procesorem, který potlačuje přeslech mezi jednotlivými kanály. Tímto krokem se snižuje míra lateralizace signálu a napomáhá se jeho externalizaci. Následně je k signálu přidán dozvuk místnosti, typicky pomocí konvoluce signálu a impulsní odezvy místnosti. Přidání realistických odrazů k signálu opět napomáhá pocitu externalizace (Rumsey, 2001). Takovýto signál je reprodukován pomocí sluchátek.



Obrázek 5.2: Blokové schéma principu jednoduchého binaurálního procesoru

Signál z LFE typicky nebývá zpracováván pomocí HRTF, ale bývá přimícháván k jednotlivým kanálům. Konkrétní způsoby, kterými fungují binaurální procesory a kterými se v praxi zpracovávají jednotlivé kanály, se ale liší s výrobcem procesoru a nejdou proto zobecnit. Některé procesory například mohou dále upravovat spektrální složení zvuku ekvalizací. Také jejich bloková schémata a celé principy se mohou lišit. Konkrétní podoba těchto informací bývá výrobním tajemstvím.

5.2 Hypotéza

V této práci jsem se rozhodl otestovat jeden z mnoha binaurálních procesorů. Jedná se o procesor Waves NX. Tento procesor je primárně určen mistrům zvuku, kteří si pomocí sluchátek mohou simulovat reálnou zvukovou režii a v té provádět mixáž. Umožňuje převod stereofonního zvuku, kvadrofonního zvuku, 5.1 a 7.1 do binaurálního sterea. Rozhodl jsem se

porovnat, jak respondenti lokalizují azimut 5.1 signálu při poslechu na konfiguraci 5.1 a při poslechu na sluchátka. Pracoval jsem s následujícími hypotézami:

1) V ideálním případě by měl binaurální procesor generovat takový signál, který bude vykazovat stejné prostorové vlastnosti jako signál reprodukováný reproduktory. Mezi poslechem na 5.1 konfiguraci reproduktorů a poslechem na sluchátka by tedy neměly nastat žádné rozdíly a lokalizace azimutů jednotlivých zdrojů zvuku by měla být shodná.

2) Rozdíly by neměly vznikat ani s typem stimulu. Stejný prostorový vjem by mezi reproduktory a sluchátky měl vzniknout jak pro impulsní signál, tak pro kontinuální signál se stejným azimutem.

6 Metodiky

Poslechový test, který bude popsán v následujících kapitolách, využívá psychoakustické metody posuzování zvukových podnětů na subjektivních škálách. V rámci této metody je úkolem posuzovatele umístit zvukový podnět na spojitě psychologické kontinuum (Melka, 2005). Jako posuzovací škála bylo vybráno grafické znázornění prostoru kolem posluchače. Konkrétně kruhová výseč, která byla dále jemně dělena na dílčí azimuty s konstantním krokem. Takto vznikla intervalová škála, jejíž jednotka měření se rovnala velikosti kroku jednotlivých azimutů. Úkolem posluchače bylo poslechem umístit každý zvukový stimul na průsečík příslušného azimutu a oblouku kruhové výseče. Protože každému azimutu na škále přísluší konkrétní hodnota, bylo tímto postupem možné kvantifikovat posluchačův vjem lokalizace jednotlivých zvukových stimulů.

Využití této metody je běžné pro experimenty, které se zabývají lokalizací azimutu zdroje zvuku. Metodika experimentu je inspirována například experimentem "Spatial Audio with Consumer Headphones: How its quality affects the immersion," (Gutierrez-Parera, Lopez, 2016) který zkoumal vztah kvalitativních vlastností běžně dostupných sluchátek a vjemu lokalizace. V popisovaném experimentu je využita stejná hodnotící škála.

6.1 Tvorba a výběr stimulů

V poslechovém testu byly použity celkem tři typy stimulů. Kontinuální signály – růžový šum a řečový signál a impulzní signál – lusknutí. Rozdílné stimuly byly vybrány z několika důvodů. Prvním z nich byla nutnost testovat Hypotézu 2. Druhým důvodem byl předpoklad, že použití různých typů stimulů může potlačit určité vlivy, které na měření mohou mít vlastnosti binaurálního procesoru Waves NX (Waves: Waves NX). Posledním důvodem byl fakt, že topologie signálu může mít vliv na kvalitu lokalizace, vzhledem k různým fyziologickým mechanismům lokalizace popsaným v kapitole 2.

Růžový šum byl vytvořen generátorem testovacího signálu v programu Logic Pro X (Apple: Logic Pro X). Signál z generátoru byl vyexportován a dále se pracovalo s jedním stále stejným vzorkem růžového šumu, trvajícím asi dvě vteřiny.

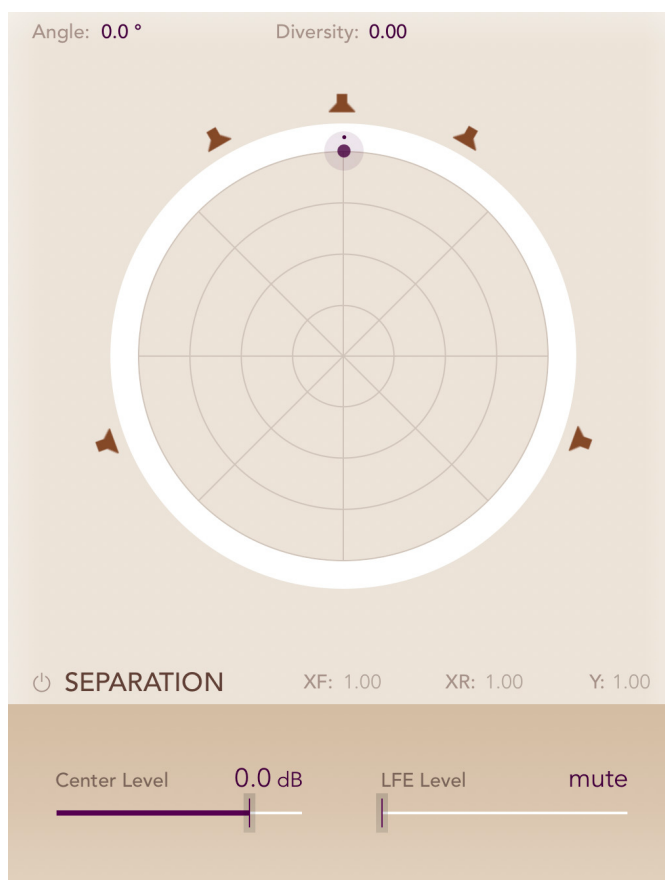
Řečový signál vznikl záznamem mužského hlasu, který říká větu: "Ukázal jsem pár lidem Ismaelovu fotku." Stimul byl dlouhý zhruba dvě vteřiny. V signálu byly pomocí de-esseru Fabfilter Pro-DS (Fabfilter: Pro-DS) potlačeny sykavky, které se během před-testu ukázaly být rušivé.



Obr. 6.1: Nastavení de-esseru Fabfilter Pro-DS

Lusknutí je syntetickým zvukem, který byl k účelu poslechového experimentu vybrán ze zvukové banky Splice.

Z jednotlivých monofonní stimulů byl následně vytvořen 5.1 signál pomocí panorámování využitím Surround Panneru v programu Logic Pro X.



Obr. 6.2: Surround panner v programu Logic Pro X (negativ)

Každému zvuku byl nastaven odlišný azimut od 0° do 180° s krokem 15° . Celkem tak vzniklo 13 pozic pro každý ze tří stimulů. K testování byla vybrána pouze pravá polorovina proto, aby byl redukován celkový počet stimulů. Vycházelo se z předpokladu, že vlastnosti konfigurace 5.1 jsou vzhledem k symetrickému rozestavení reproduktorů stejné pro pravou i levou polorovinu.

Všechny stimuly měly parametr Diversity nastavený na hodnotu 0.00. Pokud azimut stimulu odpovídal úhlu, který má se sagitální osou posluchače svírat některý z reproduktorů dle ITU (2022), byl tento stimul reprodukován pouze příslušným reproduktorem. Pokud se azimut stimulu nacházel mezi dvěma reproduktory, byl vytvořen jako fantomový zdroj pouze pomocí těchto dvou reproduktorů. Stimuly byly tedy vždy reprodukovány pouze pomocí jednoho či dvou reproduktorů, a to na základě příslušného azimutu.

Všechny stimuly měly vypnutý LFE kanál. To proto, že jeho vliv na lokalizaci je zanedbatelný. Úroveň kanálu Center byla nastavená na 0.0 dB, nebyl tedy oproti ostatním kanálům zesilován ani zeslabován.

Při testování poslechu na sluchátka byly stimuly v reálném čase převáděny z 5.1 do binaurálního sterea pomocí VST plug-inu Waves NX.

6.2 Analýza výsledků

Výsledky měření jednotlivých úloh byly analyzovány pomocí metod deskriptivní statistiky. Zkoumala se zejména poloha a rozptyl dat naměřených z odpovědí respondentů, a to pomocí analýzy rozptylu a lineární regrese. Dále bylo využito grafické znázornění četnosti dat. K potvrzení Hypotézy 1 se porovnávaly odpovědi pro konfiguraci 5.1 a sluchátka. K potvrzení Hypotézy 2 se porovnávaly odpovědi pro jednotlivé typy stimulů, a to opět pro konfiguraci 5.1 a pro sluchátka. Grafická reprezentace dat byla vytvořena pomocí knihovny matplotlib v programovacím jazyce Python. Analýza rozptylu a lineární regrese byla provedena ve statistickém programu Jamovi (2022).

6.3 Nedostatky a limitace

Největší limitací celého experimentu bylo použití pouze jednoho binaurálního procesoru. Procesor Waves NX může svým funkčním principem vykazovat určité vlastnosti, které mohly výsledky experimentu pozitivně či negativně zkreslit. Můžeme předpokládat, že kvalita prostorových vlastností zvuku a samotné lokalizace zdroje zvuku je různá pro různé typy binaurálních procesorů. V budoucnu by tedy jistě bylo dobré opakovat experiment se statisticky významnějším počtem binaurálních procesorů tak, aby bylo možné výsledky experimentu co nejlépe zobecnit.

Druhou limitací experimentu bylo nevhodné rozestavení reproduktorů v testovací místnosti (viz kapitola 7.2). Průměr kružnice, na které leží reproduktory, byl větší než šířka poslechové místnosti. Nebylo tedy možné rozestavět pravý zadní a levý zadní reproduktor tak, jak doporučuje norma ITU (2022), protože by se reproduktory do místnosti nevešly. Namísto doporučených 140 stupňů tak zadní reproduktory svíraly 80 stupňů. Tento fakt byl ale zohledněn v procesoru Waves NX, ve kterém je možné upravovat úhly virtuálních 5.1 zdrojů. Výsledky experimentu tedy nejde vztahovat na standardní konfiguraci 5.1, je však možné porovnávat výsledky lokalizace mezi konkrétní testovanou konfigurací 5.1 a jejím binaurálním modelem. Lze předpokládat, že postavení reproduktorů mohlo zpřesnit lokalizaci vzadu, mezi azimuty 140-180 stupňů, a naopak a zhoršit lokalizaci zleva mezi azimuty 30 a 140 stupňů.

S tímto zmíněným nedostatkem souvisí také problematika nepřesných souřadnic jednotlivých stimulů. Z důvodu nesprávného rozestavení zadních reproduktorů vznikla odchylka u stimulů s azimuty většími než 30 stupňů. Stimul, který měl v Surround panneru nastavené souřadnice 110 stupňů byl reprodukován jedním zadním reproduktorem, jak je vysvětleno v kapitole 6.1. Tento reproduktor však nebyl vůči posluchači umístěn v příslušných 110 stupních, a proto

nebylo možné zaznamenaný vjem posluchače přiřadit tomuto azimutu. Stejný problém nastal také u všech fantomových zdrojů, které byly tvořeny za účasti zadních reproduktorů. Tento nedostatek však neměl na měření zásadní vliv, protože účelem měření nebylo porovnání skutečných souřadnic stimulů se zaznamenanými vjemy respondentů, ale srovnání lokalizace na konfiguraci 5.1 a její binaurální model.

7 Experiment: Srovnání lokalizace 5.1 signálu při reprodukci pomocí konfigurace 5.1 a sluchátek

Hlavní experiment proběhl v únoru a březnu roku 2023 na Hudební a taneční fakultě Akademie múzických umění v Praze. Hlavnímu experimentu předcházela před-test. Před-test i hlavní experiment probíhaly v poslechové místnosti oddělení experimentální psychoakustiky Výzkumného centra hudební akustiky MARC. Test byl rozdělen na dvě poloviny. V první polovině řešili respondenti úlohy reprodukováné pomocí konfigurace 5.1 a ve druhé polovině úlohy reprodukováné pomocí sluchátek. Každá z polovin obsahovala 39 úloh (3 stimuly se 13 azimuty).

7.1 Výběr respondentů

Poslechového testu se účastnilo celkem dvanáct respondentů. Respondenti byli vybráni z řad studentů a pedagogů kateder Zvukové tvorby HAMU a FAMU. Z HAMU se experimentu zúčastnilo osm respondentů, z FAMU čtyři respondenti. Respondenti z HAMU vesměs potvrdili nevelké zkušenosti s poslechem 5.1, respondenti z FAMU naopak. Respondenti se testu účastnili dobrovolně a anonymně. Autor experimentu se testu nezúčastnil.

7.2 Uspořádání reproduktorů

V poslechové místnosti byly instalovány reproduktory Genelec 1029A a 1030A. Reproduktory 1030A byly použity pro přední tři kanály, zatímco 1029A byly použity pro zadní dva kanály. Všechny reproduktory byly stejně vzdáleny od místa poslechu. Reproduktory byly natočeny tak, že průsečík akustických os všech pěti reproduktorů se nacházel v místě poslechu. Všechny reproduktory se nacházely ve stejné výšce.

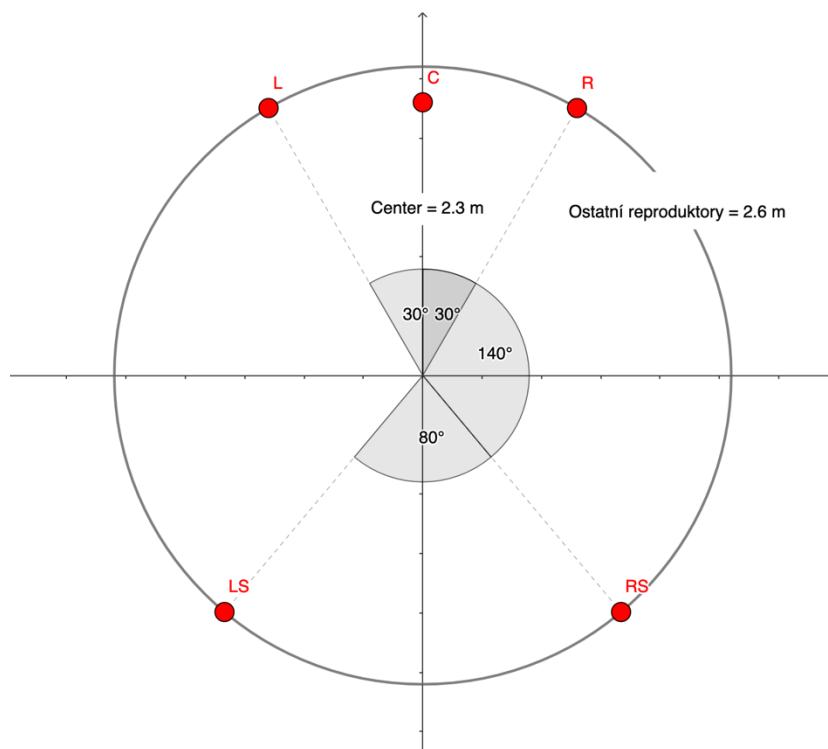
Vzhledem k rozměrům poslechové místnosti byly reproduktory rozestavěny odlišně od normy ITU (2022). Přední tři reproduktory byly pevně připevněny k zemi a stály na jedné přímce. Místo poslechu bylo určeno jako vrchol rovnostranného trojúhelníku, jehož délka strany odpovídala vzdálenosti levého a pravého reproduktoru. Délka strany rovnostranného trojúhelníku se rovnala 260 centimetrů. Vzdálenost centrálního reproduktoru od místa poslechu byla naměřena 230 centimetrů. Centrální reproduktor byl proto zpožděn tak, aby jeho signál odpovídal vzdálenosti vzdálenějších reproduktorů. Rozdíl 30 centimetrů vzdálenosti odpovídá při teplotě 20 stupňů Celsia a rychlosti šíření zvuku 343 metrů za vteřinu zpoždění 0,87 milisekund. Zpoždění můžeme vyjádřit také pomocí samplů. Při vzorkovací frekvenci 44,1

kHz, která byla během pokusu použita, je toto zpoždění rovné 38,3 samplům, respektive 38 samplům po zaokrouhlení. Centrální reproduktor byl proto vůči ostatním zpožděn o 38 samplů.



Obrázek 7.1: Přední tři reproduktory v poslechové místnosti

Zadní reproduktory byly umístěny ve stejné vzdálenosti od místa poslechu, jako přední reproduktory. Byly umístěny v bocích místnosti tak, aby byl dosažen co největší možný úhel mezi zadními reproduktory. Byly umístěny souměrně tak, aby měl každý z nich stejnou vzdálenost také vůči příslušnému přednímu reproduktoru.



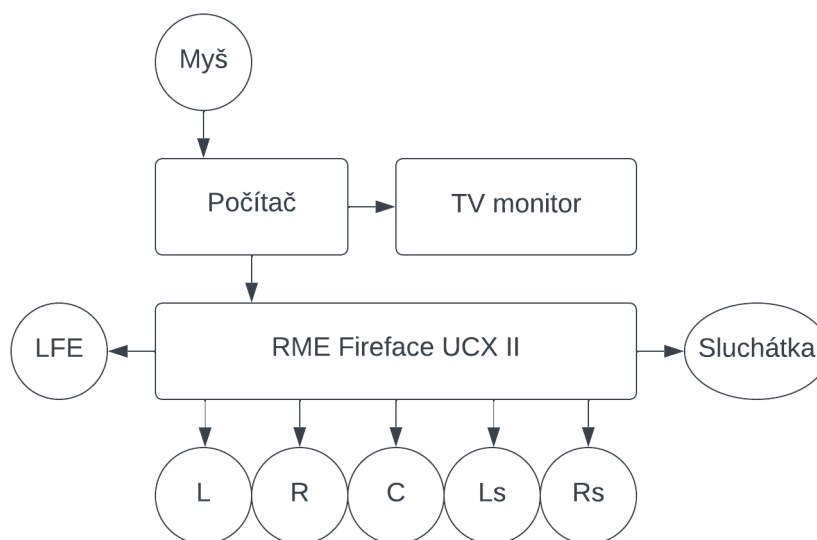
Obrázek 7.2: Rozestavění reproduktorů v poslechové místnosti

7.3 Výběr sluchátek

Při výběru sluchátek určených k testování se vycházelo z poznatků Gutierrez-Parery a Lopeze (2006). Ti experimentem zjistili, že zkreslení způsobené nízkou kvalitou sluchátek na spotřebitelské úrovni nemá vliv na vnímání prostorového zvukového obrazu. Dále bylo potvrzeno, že záměny azimutu při předozadní lokalizaci vznikají při použití sluchátek s vysokou i nízkou kvalitou. Z těchto důvodů byla vybrána jako dostačující otevřená sluchátka Beyerdynamic DT990 Pro 250 ohm, která jsou ve zvukových studiích běžným standardem. Pro kontrolu experimentu byla na třech respondentech použita sluchátka AKG K501. Výsledky neprokázaly zásadní anomálie související s použitým typem sluchátek.

7.4 Použitý hardware

Celý poslechový test byl naprogramován v prostředí MAX/MSP a probíhal tedy na počítači. Odpovědi respondentů byly zaznamenávány pomocí zápisu na papír. Respondenti měli k dispozici myš, kterou mohli ovládat ovládací prvky poslechového testu. Softwarové prostředí poslechového testu sledovali respondenti po celou dobu experimentu na TV monitoru, který se nacházel v jejich sagitální ose, nad centrálním reproduktorem. Počítač byl propojený se zvukovou kartou RME Fireface UCX II, která je díky svým vlastnostem vhodná k poslechovým testům a akustickým měřením. Do této zvukové karty byla zapojena také sluchátka.



Obrázek 7.3: Blokové schéma zapojení testovací místnosti

7.5 Použitý software

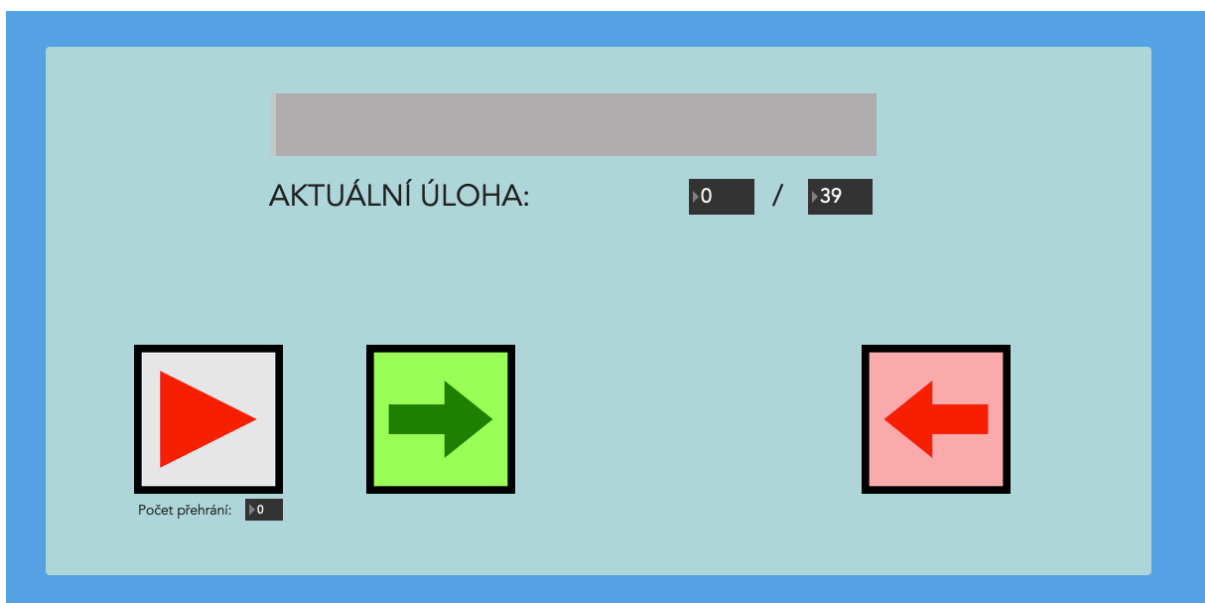
K vytvoření 5.1 stimulů z monofonního signálu byl použit software Logic Pro X s použitím dalších plug-inů (viz kapitola 6.1). Všechny stimuly byly z tohoto programu vyexportovány jako

šestikanálové soubory WAV se vzorkovací frekvencí 44,1 kHz a bitovou hloubkou 24-bit. Stejné parametry byly nastaveny i pro reprodukci zvuku.

K vytvoření poslechového testu bylo použito prostředí MAX/MSP, které umožňuje objektové programování. Prostředí poslechového testu bylo programováno tak, aby jeho ovládání kladlo na respondenta co nejnižší nároky a umožňovalo plné soustředění na zvukové stimuly.

Hlavní okno testovacího prostředí bylo respondentům zobrazeno na televizním monitoru. V horní části okna se nacházel indikátor postupu testem a také označení aktuální řešené úlohy. Ve spodní části okna byla respondentům dostupná dvě tlačítka. Tlačítko s červeným trojúhelníkem na bílém pozadí sloužilo ke spuštění stimulu příslušné úlohy. Tlačítko přehrání bylo omezeno na dvě kliknutí, po kterých se stalo neaktivním. Každý stimul tedy bylo možné přehrát pouze dvakrát. Toto omezení bylo zavedeno proto, aby se zamezilo snaze respondentů o co nejpřesnější určení azimutu stimulu jeho opakovaným poslechem. Naopak tak byla podpořena instinktivní lokalizace stimulu. Pod tímto tlačítkem se nacházelo informativní počítadlo přehrání stimulu u příslušné úlohy. Vpravo od tlačítka přehrání se nacházelo tlačítko s tmavě zelenou šipkou na zeleném pozadí. Toto tlačítko sloužilo ke skoku na další úlohu.

V pravém dolním rohu okna se dále nacházelo tlačítko s tmavě červenou šipkou na červeném pozadí. Toto tlačítko sloužilo ke skoku na předchozí úlohu. Respondenti ale byli instruováni tak, aby toto tlačítko samovolně nepoužívali. U žádného z respondentů nedošlo k opakování některé z úloh.



Obrázek 7.4: Okno testovacího prostředí

Testovací prostředí četlo zvukové soubory se stimuly v pseudonáhodném pořadí, které bylo vygenerováno před samotným testováním. Pořadí stimulů bylo stejné pro jednotlivé respondenty, ale také pro poslech na reproduktory i na sluchátka.

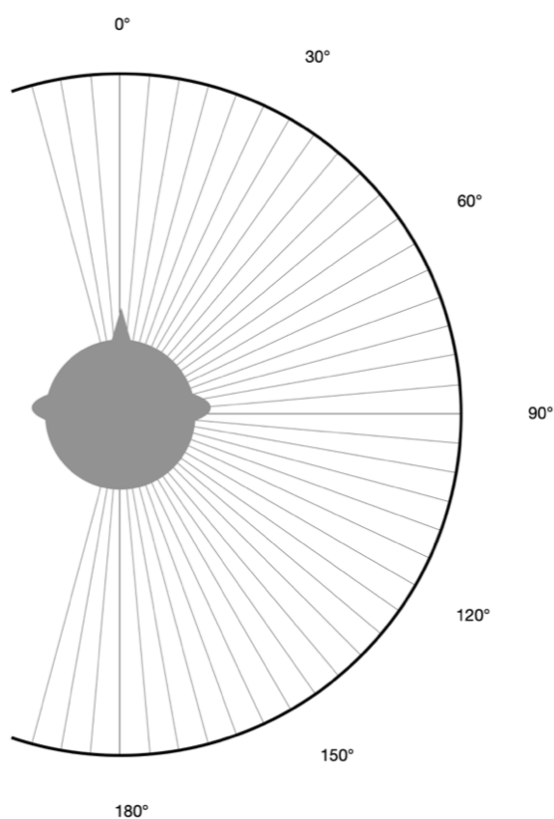
Zvukové soubory byly v případě poslechu na sluchátka v reálném čase převáděny na binaurální stereofonní signál pomocí procesoru Waves NX. Ten byl spuštěn uvnitř prostředí MAX/MSP jako VST plug-in. Nastavení parametrů v procesoru bylo stejné pro všechny respondenty a vycházelo z továrního nastavení. Pro syntézu HRTF byly využity tovární parametry modelování hlavy – obvod 55 centimetrů a oblouková vzdálenost uší 25 centimetrů. Parametry "Room Ambience" byly upraveny během před-testu tak, aby zvukový vjem při poslechu pomocí sluchátek co nejvíce odpovídal vjemu z poslechové místnosti. Hodnota parametru "Amount" který zvyšuje dojem vzdálenosti posluchače od zdroje a nabývá hodnot od 0 do 100 (Waves: NX manuál) byla snížena z továrních 17 na 5. Parametr "Center trim", který umožňuje upravovat vlivem virtuální místnosti pouze signál centrálního reproduktoru, zůstal na tovární hodnotě 100 %. Center byl tedy ovlivňován zcela stejně jako ostatní kanály. Parametry "Speaker position" byly upraveny tak, aby odpovídaly reálnému rozestavení reproduktorů v poslechové místnosti. Parametr "Rear", který upravuje úhel mezi zadními reproduktory byl tak nastaven na 80 stupňů. Parametr "Headphone EQ" byl nastaven na sluchátka DT990 a ekvalizace pomocí korekční křivky byla zapnuta. Při použití sluchátek K501, jejichž korekční křivka není v procesoru Waves NX obsažena, byla ekvalizace vypnuta. Snímání hlavy "Head Tracking" bylo po celou dobu experimentu vypnuté. Pomocí posuvníku "Output" byla dosažena komfortní poslechová hlasitost, která se v průběhu experimentu neměnila.



Obrázek 7.5: Nastavení procesoru Waves NX

7.6 Způsob zaznamenávání odpovědí

Respondenti zaznamenávali odpovědi sami tužkou do záznamového archu. V záznamovém archu byly k jednotlivým úlohám přiřazeny příslušné grafiky s hodnotící škálou. Grafiky všech úloh byly stejné. Ve středu grafiky byla znázorněna lidská hlava pro lepší orientaci respondenta. Kolem hlavy byla znázorněna část kružnice, reprezentující prostor kolem respondenta. Z grafického znázornění hlavy vycházely paprsky, reprezentující jednotlivé azimuty v prostoru. Interval mezi azimuty byl stanoven na 5 stupňů, protože nejnižší postřehnutelná úhlová změna se při binaurálním poslechu udává 3 až 4 stupně (Syrový, 2013). Pro ještě lepší orientaci respondenta byly v grafice číselně označeny azimuty, odpovídající násobkům 30 stupňů.



Obrázek 7.6: Grafika jednotlivých úloh v záznamovém archu

Úkolem respondentů bylo křížkem označit průsečík části kružnice a příslušného azimutu, ze kterého lokalizovali zvukový stimul. Protože byly všechny stimuly panorámovány pouze do pravé poloviny, byla levá část hodnotící škály částečně omezená. Respondenti však byli instruováni tak, že pokud budou lokalizovat zvuk zleva mimo vyznačenou kružnici, označí tuto skutečnost křížkem do bílého prostoru u levého ucha v grafice.

7.7 Před-test

V rámci příprav na hlavní experiment proběhl před-test. Toho se v různých fázích účastnili celkem čtyři respondenti a autor experimentu. Z toho dva respondenti se následně účastnili také hlavního experimentu. Účelem před-testu byl zejména výběr vhodných azimutů zvukových stimulů, jemnost dělení hodnotící škály, ale také vhodné nastavení elektroakustického řetězce.

V první fázi před-testu probíhala analýza lokalizace stimulů z různých azimutů při poslechu na konfiguraci 5.1. Poslechem bylo zjištěno, že je možné lokalizovat zdroje zvuku z celého prostoru kolem posluchače a systém je tedy vhodný k experimentu. Byly objeveny dvě oblasti, ve kterých respondentům přišla lokalizace obtížná. První oblast se nacházela zhruba mezi 45 a 60 stupni a druhá mezi 90 a 145 stupni. Dva stimuly s podobnými azimuty, které oba náležely jedné z těchto oblastí, se poslechem jevily velmi podobně a bylo náročné mezi nimi přesně rozlišovat, nehledě k typu stimulu. Tento poznatek se do určité míry potvrdil i v naměřených datech z hlavního experimentu. Během před-testu bylo také potvrzeno, že rozdíly v azimutu menší než 15 stupňů jsou velmi špatně rozlišitelné. Proto byla tato hodnota vybrána jako nejmenší krok v hodnotách jednotlivých azimutů stimulů hlavního experimentu.

Druhá fáze před-testu se věnovala binaurálnímu procesoru Waves NX. Bylo zjištěno, že i při poslechu na sluchátka je možné lokalizovat zvukový stimul v binaurální podobě z celého prostoru kolem posluchače. Respondenti vypověděli, že některé stimuly se jim zdály být externalizované a některé lateralizované. Vypověděli také, že zejména v případě šumového stimulu byli i přes jeho lateralizaci schopni určit azimut v celém prostoru, a to díky změnám v barvě zvuku. Při továrním nastavení parametru "Room Ambience" procesor k signálu přidával příliš velké množství dozvuku. Respondenti potvrdili, že zvukové stimuly se tak jeví velmi odlišně při porovnání s jejich reprodukcí pomocí reproduktorů. Parametr "Room Ambience" byl proto ve spolupráci s respondenty nastaven tak aby mezi reprodukcí na reproduktory a na sluchátka nastal co nejmenší rozdíl.

V poslední fázi před-testu již byly testovány konkrétní stimuly, používané v hlavním experimentu a také funkčnost testovacího prostředí. Bylo zjištěno, že respondenti některé stimuly lokalizovali zleva, ačkoliv azimuty všech stimulů náležely pouze pravé polorovině. K lokalizaci některých stimulů zleva docházelo při poslechu na sluchátka, ale i při poslechu na reproduktory. Z tohoto důvodu byla hodnotící škála rozšířena o hodnoty náležící také levé polorovině.

7.8 Průběh poslechového testu

Respondenti byli testováni jednotlivě a v poslechové místnosti byl vždy přítomný pouze jeden z nich. Před zahájením testování byli všichni respondenti seznámeni s účelem a tématem poslechového testu. Následně bylo respondentům vysvětleno ovládání testovacího prostředí a způsob zaznamenávání odpovědí, včetně možnosti odpovědi pro lokalizaci zleva. Respondenti byli instruováni, aby při poslechu zvukových stimulů reprodukováných pomocí reproduktorů po celou dobu reprodukce sledovali televizní monitor a tím co nejvíce omezili pohyby hlavy. Byli také upozorněni na omezení počtu přehrání zvukových stimulů. Respondentům byly následně puštěny všechny tři typy stimulů z referenčního azimutu 0 stupňů. Tím byli respondenti seznámeni s povahou jednotlivých zvuků. Dále proběhla první fáze testování, tedy 39 úloh na konfiguraci 5.1. První fáze testu trvala průměrně asi 9 minut.

Před začátkem druhé fáze byli respondenti instruováni ohledně nasazení sluchátek. Ty si měli nasadit tak, aby zadní část mušle sluchátka jemně doléhala na zadní část ušního boltce. Respondenti byli poučeni o orientaci sluchátek tak, aby nedošlo k záměně levého a pravého kanálu. Následně byly respondentům opět puštěny všechny tři typy stimulů z referenčního azimutu 0 stupňů. Pouze v případě jednoho respondenta bylo potřeba zvýšit poslechovou hlasitost. Referenční stimuly se proto v případě tohoto respondenta opakovaly pro nově nastavenou hlasitost. Poté byla spuštěna druhá fáze testování, která měla opět 39 úloh. Druhá fáze testu trvala průměrně asi 7 minut.

8 Výsledky hlavního experimentu

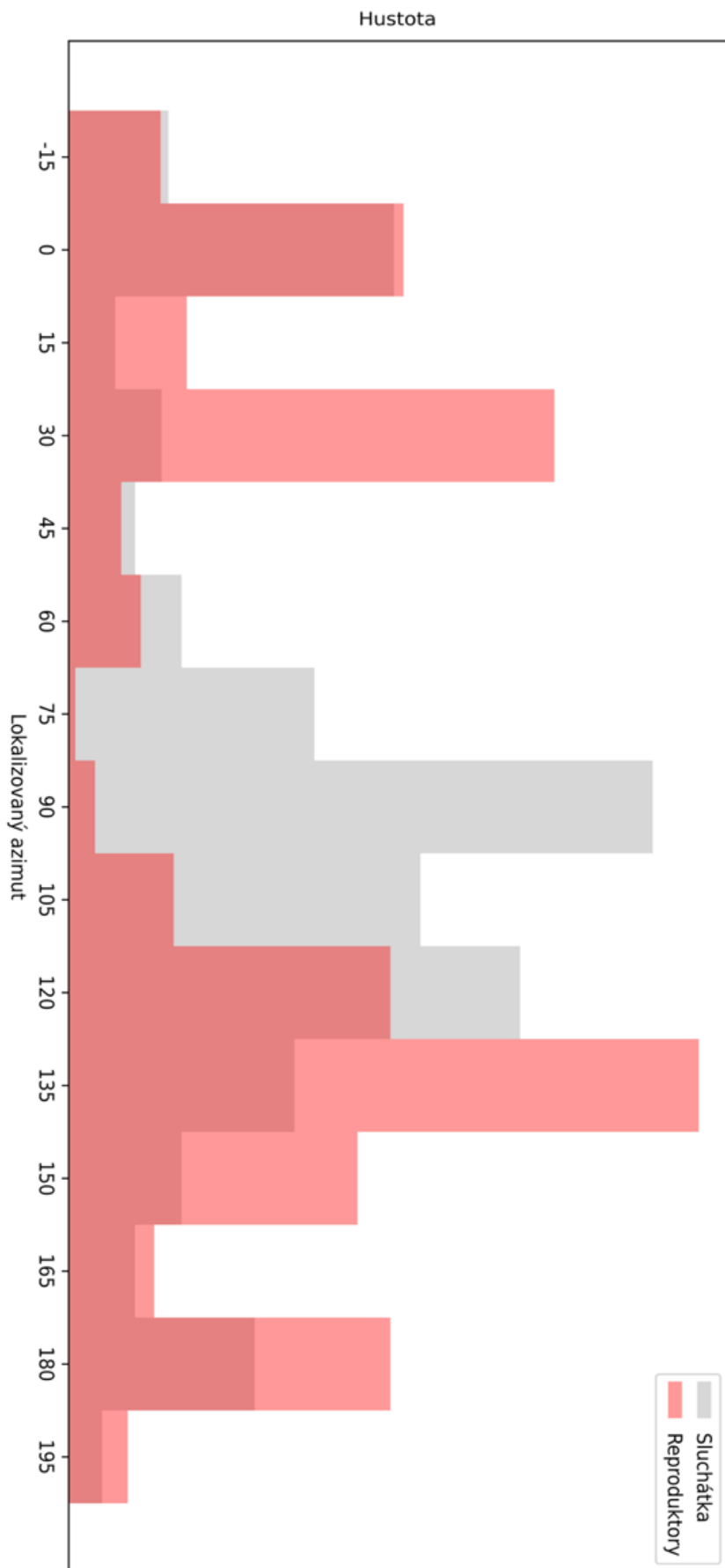
Výsledky hlavního experimentu byly získány odečtem hodnot jednotlivých úloh z hodnotící škály. Protože hodnotící škála byla sestavena z jednotlivých azimutů v prostoru kolem posluchače, bylo možné dále pracovat přímo s hodnotami vyznačenými respondenty. Protože ale hodnotící škála zasahovala na obou svých koncích do levé poloroviny, bylo potřeba upravit hodnoty azimutů tak, aby byla hodnotící škála kontinuální. Jako počátek škály byl určen azimut 0 stupňů, hodnoty nacházející se vlevo od počátku byly záporné s krajní hodnotou -15 stupňů. Hodnoty levé poloroviny přesahující 180 stupňů se dále přičítaly a nejvyšší možnou odpovědí bylo tedy 195 stupňů. Pokud respondent lokalizovat zdroj zvuku zleva mimo hodnotící škálu, nebyla této odpovědi přiřazena číselná hodnota.

8.1 Získaná data

Takto vzniklý statistický soubor obsahoval odpovědi 12 respondentů na každou z 39 úloh, a to zvláště pro reprodukci pomocí reproduktorů a sluchátek. Protože nelze jednoznačně říct, zda jednotlivé extrémní hodnoty ve statistickém souboru vznikly chybou v měření, či vlivem přirozené variability, byly tyto extrémní hodnoty ve statistickém souboru ponechány pro další analýzu.

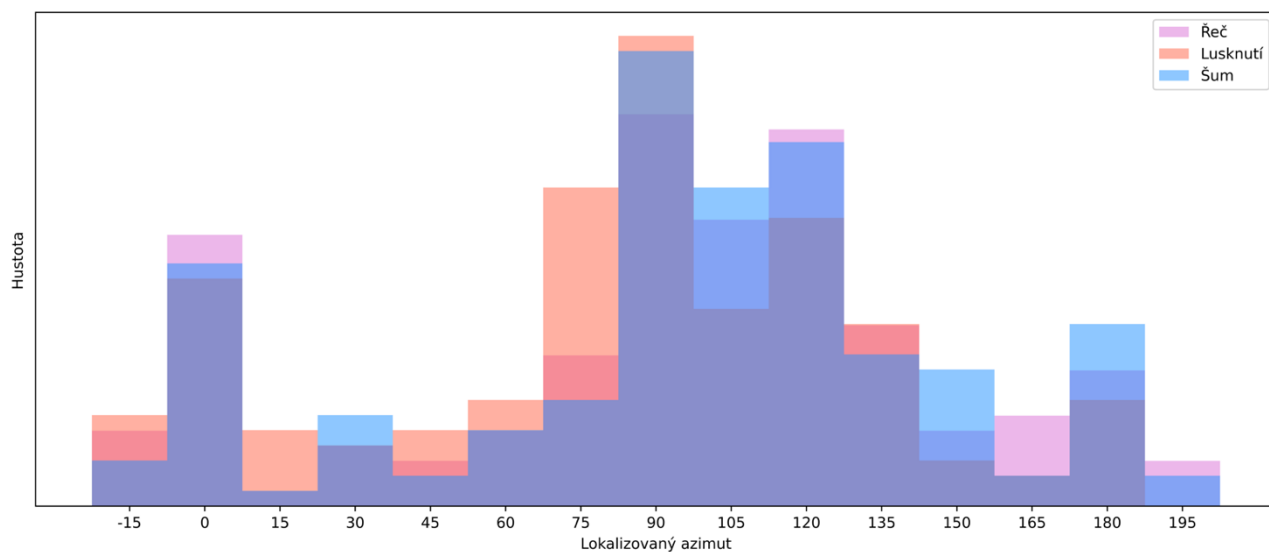
8.1.1 Histogramy odpovědí

Z celého statistického souboru byl vytvořen histogram, který ukazuje četnost lokalizovaných azimutů s krokem 15 stupňů

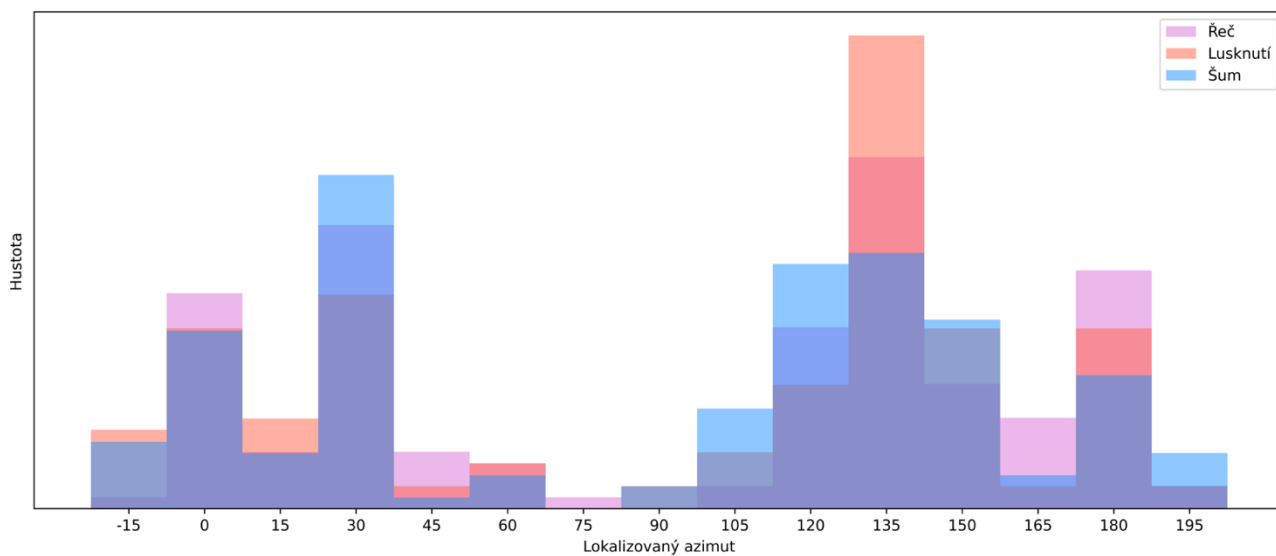


Obrázek 8.1: Histogram odpovědí všech úloh na sluchátka a reproduktory

Dále pak vznikly histogramy také pro jednotlivé typy stimulů a daný typ reprodukce.



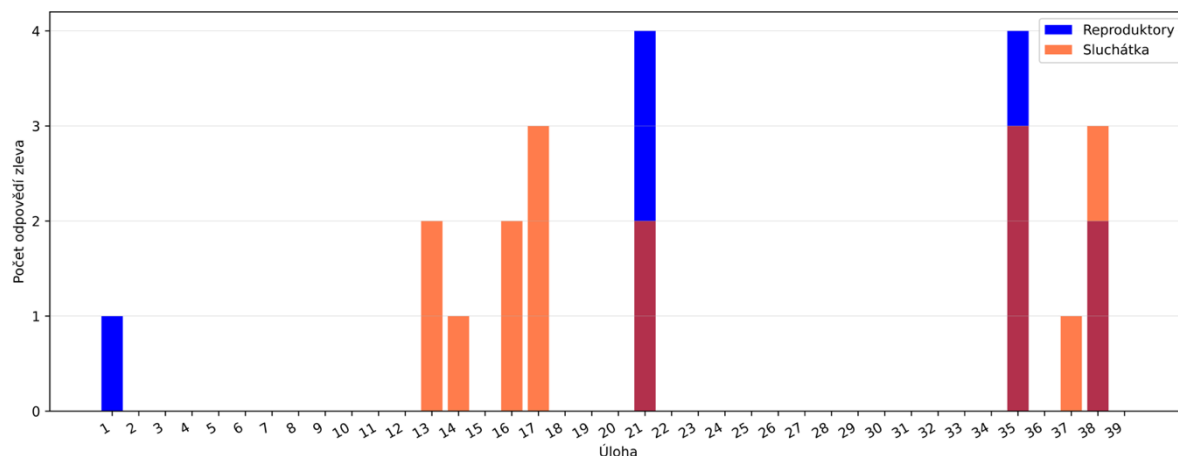
Obrázek 8.2: Histogramy odpovědí na úlohy pro daný typ stimulu při reprodukce pomocí sluchátek



Obrázek 8.3: Histogramy odpovědí na úlohy pro daný typ stimulu při reprodukce pomocí reproduktorů

8.1.2 Odpovědi mimo hodnotící škálu

Protože se hodnotící škála skládala z azimutů pravé poloviny a pouze z části levé poloviny, mohla nastat situace, kdy bude respondent lokalizovat zdroj zvuku mimo hodnotící škálu. V průběhu experimentu se toto u některých úloh ukázalo být pravidlem, což potvrzuje následující graf.



Obrázek 8.4: Počet odpovědí zleva mimo hodnotící škálu u každé z úloh

8.1.3 Vliv sluchátek na experiment

Během experimentu byly použity dva typy sluchátek. Aby bylo možné zcela zavrhnout vliv sluchátek na lokalizaci azimutu, a tedy na průběh celého experimentu, byly výsledky analyzovány také zvlášť pro jednotlivá sluchátka. Statistický soubor byl rozdělen podle použitého typu sluchátek na 9 respondentů, kteří poslouchali pomocí sluchátek DT990 Pro 250 ohm a na 3 respondenty, kteří poslouchali pomocí sluchátek K501. Na statistickém souboru byla provedena analýza rozptylu s použitím lokalizovaného azimutu jako závislé proměnné a typem sluchátek jako skupinové proměnné.

One-Way ANOVA (Welch's)

	F	df1	df2	p
Lokalizovaný azimut	0.0755	1	187	0.784

Obrázek 8.5: Výsledek analýzy rozptylu pro lokalizovaný azimut a typ sluchátek

8.1.4 Analýza skupin respondentů

Přítomnost dvou homogenních skupin respondentů během testování umožnila hlubší analýzu rozdílů v odpovědích mezi jednotlivými skupinami. Protože můžeme předpokládat, že studenti FAMU mají větší poslechové zkušenosti s reprodukcí zvuku pomocí konfigurace 5.1, vyvstala výzkumná otázka, zda se tato zkušenost může statisticky projevit na lokalizaci stimulu. Statistický soubor byl rozdělen do dvou skupin podle fakult, na kterých jednotliví respondenti působí. Následně byla provedena lineární regrese s použitím lokalizovaného azimutu jako závislé proměnné a příslušné fakulty jako faktoru. Lineární regrese byla provedena zvlášť pro reprodukci na sluchátka a na konfiguraci 5.1.

Model Coefficients - Lokalizovaný azimut

Predictor	Estimate	SE	t	p
Intercept ^a	97.85	3.07	31.90	<.001
Fakulta:				
F – H	-9.48	5.21	-1.82	0.070

^a Represents reference level

Obrázek 8.6: Výsledek lineární regrese pro lokalizovaný azimut a fakultu – sluchátka

Model Coefficients - Lokalizovaný azimut

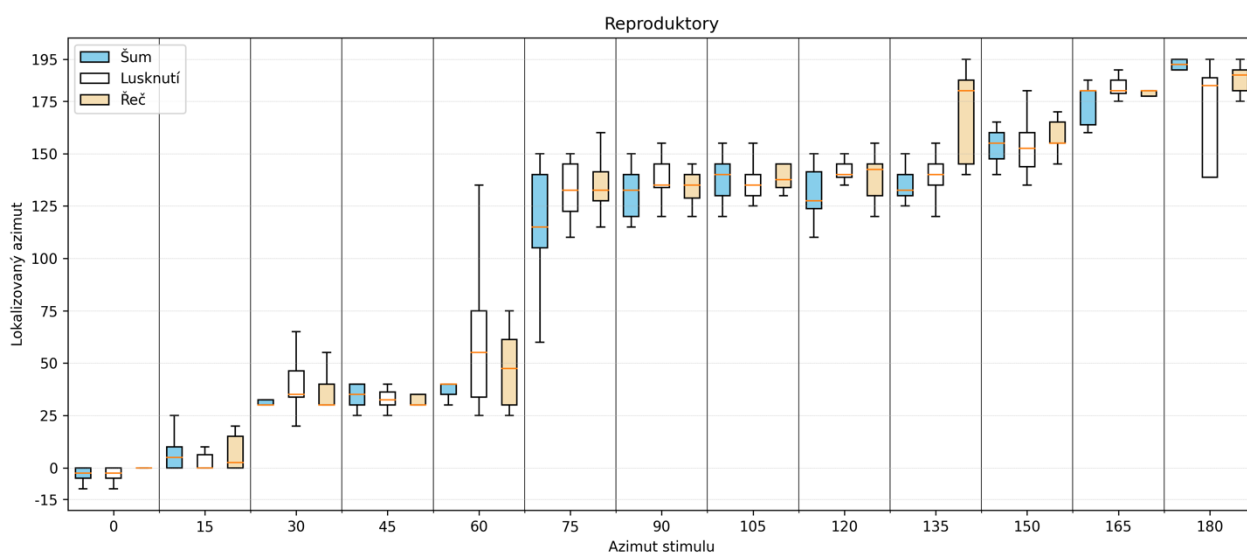
Predictor	Estimate	SE	t	p
Intercept ^a	100.48	3.75	26.802	<.001
Fakulta:				
F – H	-2.39	6.46	-0.371	0.711

^a Represents reference level

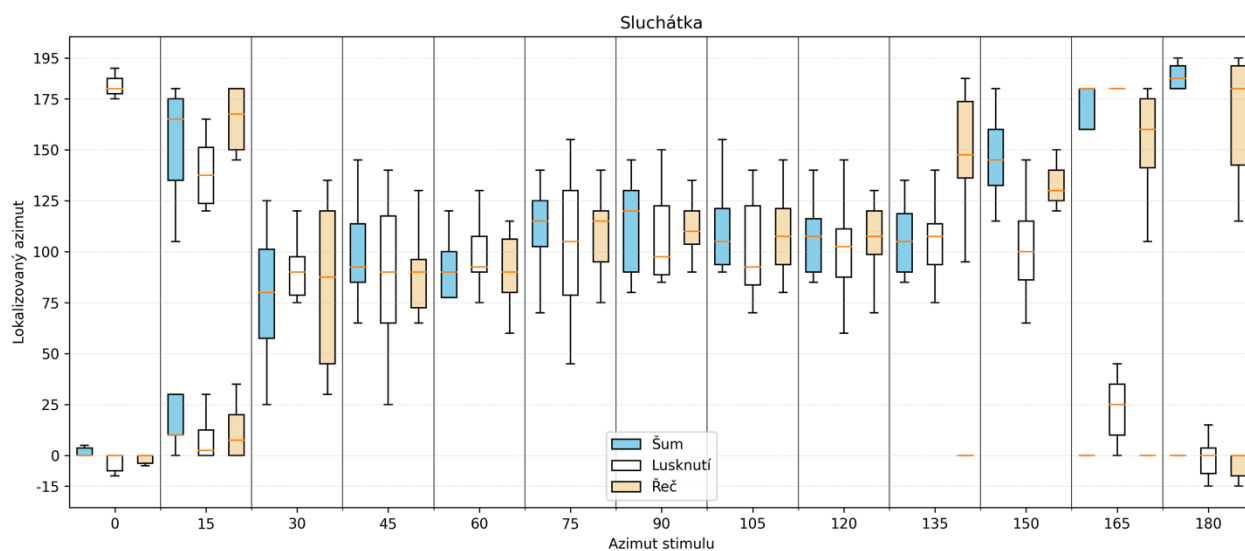
Obrázek 8.7: Výsledek lineární regrese pro lokalizovaný azimut a fakultu – reproduktory

8.1.5 Vliv typu reprodukce

Statistický soubor byl dále rozdělen podle typu reprodukce a typu stimulu. Z odpovědí respondentů byly vytvořeny krabicové grafy. Protože při reprodukci pomocí sluchátek docházelo u některých úloh k zaměňování azimutu v předozadním směru, vznikaly tak v krabicovém grafu dlouhé sloupce, které ale nereflektovaly skutečné rozložení dat. V těchto případech proto byly odpovědi respondentů rozděleny na dva klastry shlukováním pomocí metody nejbližších středů. Tím vznikly dva sloupce nad sebou, reflektující oba klastry v odpovědích.



Obrázek 8.8: Krabicový graf odpovědí pro jednotlivé typy stimulu – reproduktory



Obrázek 8.9: Krabicový graf odpovědí pro jednotlivé typy stimulu – sluchátka

Také na tomto statistickém souboru byla provedena lineární regrese. Jako závislá proměnná byl opět použit lokalizovaný azimut, jako faktor typ reprodukce.

Model Coefficients - Lokalizovaný azimut

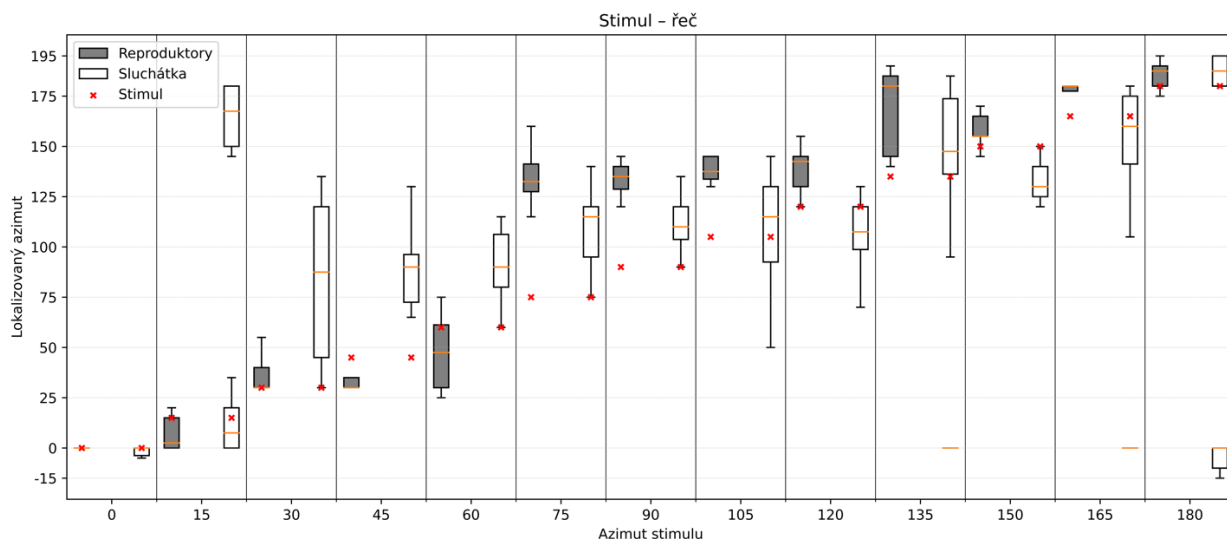
Predictor	Estimate	SE	t	p
Intercept ^a	99.67	2.78	35.89	<.001
Typ reprodukce:				
Sluchatka – Reprodukory	-5.10	3.94	-1.30	0.196

^a Represents reference level

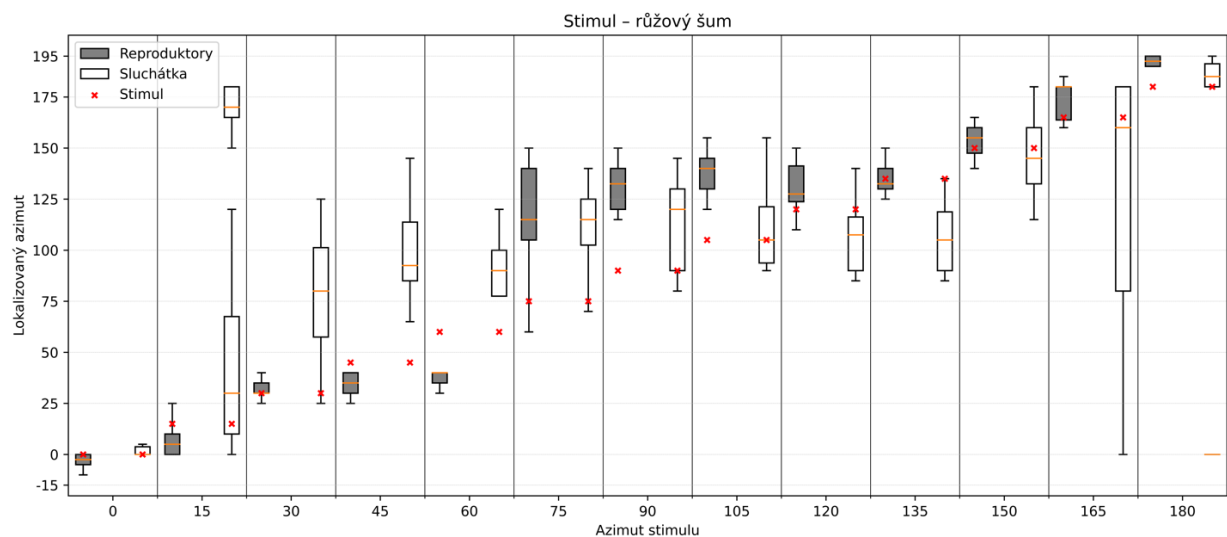
Obrázek 8.10: Výsledek lineární regrese pro lokalizovaný azimut a typ reprodukce

8.1.6 Vliv typu stimulu

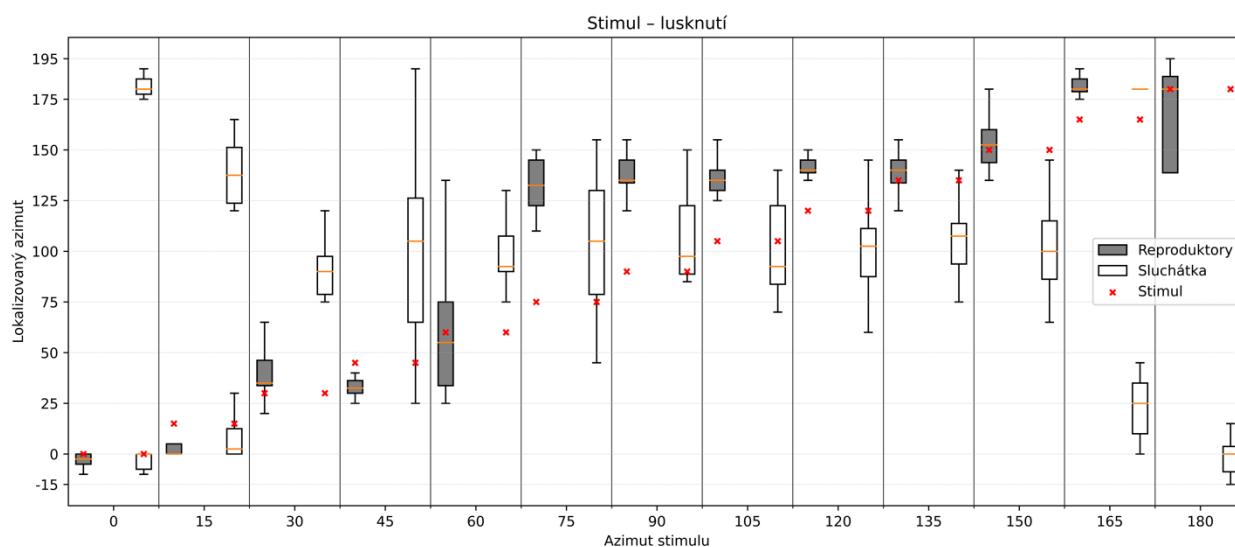
Krabicové grafy byly vytvořeny také pro jednotlivé typy stimulů v obou typech reprodukce.



Obrázek 8.11: Krabicový graf lokalizace stimulu řeč pro oba typy reprodukce



Obrázek 8.12: Krabicový graf lokalizace stimulu šum pro oba typy reprodukce



Obrázek 8.13: Krabicový graf lokalizace stimulu lusknutí pro oba typy reprodukce

Pro jednotlivé typy stimulů byla opět provedena lineární regrese, a to zvlášť pro každý typ reprodukce. Lokalizovaný azimut byl použit jako závislá proměnná, typ stimulu jako faktor. Následně byla stejná regrese provedena pro oba typy reprodukce dohromady, opět s lokalizovaným azimutem jako závislou proměnou. Ve výsledcích jsou jednotlivé stimuly označeny takto: SNP – lusknutí, SP – řeč, N – šum.

Model Coefficients - Lokalizovaný azimut

Predictor	Estimate	SE	t	p
Intercept ^a	96.72	5.26	18.380	<.001
Typ stimulu:				
SNP – N	3.74	7.47	0.501	0.617
SP – N	5.17	7.48	0.691	0.490

^a Represents reference level

Obrázek 8.14: Výsledek lineární regrese pro typ stimulu při reprodukci pomocí konfigurace 5.1

Model Coefficients - Lokalizovaný azimut

Predictor	Estimate	SE	t	p
Intercept ^a	100.17	4.30	23.304	<.001
Typ stimulu:				
SNP – N	-13.05	6.07	-2.150	0.032
SP – N	-3.70	6.08	-0.609	0.543

^a Represents reference level

Obrázek 8.15: Výsledek lineární regrese pro typ stimulu při reprodukci pomocí sluchátek

Model Coefficients - Lokalizovaný azimut

Predictor	Estimate	SE	t	p
Intercept ^a	98.421	3.41	28.885	<.001
Typ stimulu:				
SNP – N	-4.609	4.82	-0.956	0.339
SP – N	0.765	4.83	0.158	0.874

^a Represents reference level

Obrázek 8.16: Výsledek lineární regrese pro typ stimulu při obou typech reprodukce

8.2 Interpretace dat

8.2.1 Histogramy odpovědí

Histogram lokalizovaných odpovědí (obrázek 8.1) perfektně reflektuje rozestavění reproduktorů v prostoru. Zcela patrné vrcholy grafu jsou přesně v pozicích jednotlivých reproduktorů – na azimutu 0 centrálního reproduktoru, na azimutu 30 pravého reproduktoru a na azimutu 135 (respektive 140) pravého zadního reproduktoru. Poslední vrchol je patrný na azimutu 180 stupňů. Tento vrchol je zřejmě způsobený jasným fantomovým zdrojem, který vytvářely oba zadní reproduktory, svírající relativně malý úhel 80 stupňů. Na histogramu reproduktorů naopak vidíme znatelný pokles mezi azimuty 45 a 105. Tento pokles je zřejmě způsobený nejasným fantomovým zdrojem, který vytvářel přední a zadní pravý reproduktor vlivem velkého úhlu 110 stupňů mezi nimi.

Oproti tomu histogram odpovědí při reprodukci na sluchátka ukazuje pouze jeden značný vrchol v oblasti okolo azimutu 90 stupňů. Příčinou tohoto vrcholu by mohla být určitá míra lateralizace, která subjektivně posouvala vjem zvuku k pravému uchu a vytvářela tak dojem lokalizace zvuku ze směru tohoto ucha, tedy z 90 stupňů.

8.2.2 Odpovědi mimo hodnotící škálu

Nejvyšší počet odpovědí mimo hodnotící škálu byl v případě poslechu na reproduktory u azimutů 180 stupňů (úlohy 21 a 35), v případě poslechu na sluchátka pak u azimutů 0 a 180 (úlohy 17, 35 a 38).

V úloze 21 byl použit stimul lusknutí, v úloze 35 řeč. Mimo hodnotící škálu zleva lokalizovala stimuly v těchto úlohách třetina respondentů. Šumový stimul se stejným azimutem (úloha 38) lokalizovali zleva mimo hodnotící škálu celkem 2 respondenti. Při reprodukci pomocí reproduktorů reprodukovaly tyto stimuly oba zadní reproduktory shodně. Původ odpovědí zleva mimo hodnotící škálu můžeme tedy zřejmě hledat v odrazech, které mohly vzniknout v poslechové místnosti.

Toto tvrzení podporuje i fakt, že úlohy, při kterých respondenti lokalizovali zleva mimo hodnotící škálu se shodují mezi poslechem pomocí reproduktorů a pomocí sluchátek, ačkoliv při reprodukci na sluchátka je těchto úloh mnohem více. V úloze 17 byl použit stimul lusknutí s azimutem 0 stupňů. V úlohách 35 a 38 byly použity stimuly řeč a lusknutí s azimutem 180 stupňů. Příčinou odpovědí zleva mimo hodnotící škálu opět mohou být odrazy zvuku, tentokrát uměle generované binaurálním procesorem.

V poslechovém testu se tento jev objevoval u obou typů reprodukce a u všech typů stimulů zejména s azimuty 0 stupňů a 180 stupňů. Vždy maximálně u třetiny respondentů.

8.2.3 Vliv sluchátek na experiment

Vliv sluchátek na experiment byl testován pomocí analýzy rozptylu dat, získaných z odpovědí respondentů (obrázek 8.5). Respondenti byli rozděleni do dvou skupin na základě použitých sluchátek. Hodnota F 0,0755 značí, že variace mezi odpověďmi jednotlivých respondentů mezi skupinami je relativně malá v porovnání s variací odpovědí uvnitř jednotlivých skupin. Hodnota p je vyšší než referenční hodnota 0,05. Tato data tedy napovídají, že použitý typ sluchátek v rámci tohoto experimentu neměl zásadní vliv na jeho výsledcích.

8.2.4 Analýza skupin respondentů

Respondenti byli rozděleni do dvou skupin HAMU a FAMU na základě příslušné fakulty, na které působí. Byla provedena lineární regrese pro reprodukci signálu pomocí sluchátek a pomocí konfigurace 5.1 se závislou proměnnou lokalizovaný azimut.

V případě lineární regrese pro poslech na sluchátka výsledky ukázaly, že respondenti ze skupiny HAMU v průměru lokalizovali stimuly ve všech úlohách o - 9,48 stupně jinak – na hodnotící škále tedy více vlevo – než respondenti ze skupiny FAMU, a to se standardní odchylkou 5,21 stupně. Protože však hodnota p byla 0,07, je třeba nahlížet na obě skupiny respondentů rovnocenně, protože nemůžeme s jistotou statisticky potvrdit, že obě skupiny lokalizovaly stimuly rozdílně. Vzhledem k tomu, že se hodnota p přibližuje referenční hodnotě 0,05, můžeme ale pozorovat určitou indikaci, že na větším statistickém vzorku by role fakulty a s ní spojená poslechová zkušenost mohla mít na lokalizaci azimutu při poslechu na sluchátka určitý vliv.

V případě reprodukce stimulu pomocí konfigurace 5.1 byl predikovaný průměrný rozdíl v azimutu již mnohem menší (-2,39°) a s větší statistickou chybou (6,46°). Hodnota p 0,711 zásadně překročila referenční hodnotu 0,05. Výsledek tedy nelze považovat za statisticky významný. Rozdíl v lokalizaci azimutu pro jednotlivé skupiny respondentů při reprodukci pomocí konfigurace 5.1 je nesignifikantní.

8.2.5 Vliv typu reprodukce

Vliv typu reprodukce je patrný již z krabicových grafů. Je evidentní, že mnohem větší shoda v lokalizaci panovala mezi respondenty při poslechu na konfiguraci 5.1, a to při všech typech stimulu. Je zde také viditelný skok mezi lokalizovanými azimuty zhruba 60 a 110 stupňů, který zřejmě reflektuje konkrétní rozestavění reproduktorů.

Poslech na sluchátka zanesl do výsledků mnohem větší rozptyl dat. V krajních mezích azimutu stimulů je také patrný jev zaměňování předozadního směru, a to opět pro všechny typy stimulu.

Mezi azimuty stimulů 30 až 120 stupňů se mediány lokalizovaného azimutu drží mezi 75 a 125 stupni. Tento fakt zřejmě reflektuje určitou míru lateralizace, jak bylo popsáno v kapitole 8.2.1.

Určitý rozdíl mezi jednotlivými typy reprodukce dokazuje také lineární regrese, která byla pro oba typy reprodukce provedena s lokalizovaným azimutem jako závislou proměnnou. Výsledek lineární regrese potvrdil, že při poslechu na sluchátka respondenti lokalizovali v průměru o -5,1 stupně odlišně – na hodnotící škále více vlevo – než při poslechu na reproduktory, a to se standardní odchylkou 3,94 stupně. Protože ale hodnota p (0,196) v tomto případě opět překonala referenční hodnotu 0,05, není tedy možné zavrhnout nulovou hypotézu, že mezi poslechem na systém reproduktorů a poslechem na sluchátka by neměly nastat žádné rozdíly a lokalizace azimutů jednotlivých zdrojů zvuku by měla být shodná. Je však nutné dodat, že výsledek lineární regrese není přesvědčivým důkazem Hypotézy 1 – je pouze důkazem, že v provedeném měření není dostatek dat, která by Hypotézu 1 mohla vyvrátit.

8.2.6 Vliv typu stimulu

Z krabicových grafů je patrné, že při reprodukci pomocí konfigurace 5.1 docházelo pouze k malým rozdílům v lokalizaci mezi různými typy stimulů se stejným azimutem. To potvrzují i výsledky lineární regrese. Jednotlivé skupiny stimulů byly mezi sebou při lineární regresi srovnávány. Hodnota p v obou případech (0,617 a 0,490) překonala referenční hodnotu 0,05. Ani v tomto případě není možné zavrhnout nulovou Hypotézu 2, že při reprodukci pomocí konfigurace 5.1 by rozdíly v lokalizaci neměly vznikat s typem stimulu.

Při reprodukci pomocí sluchátek jsou již polohy sloupců v krabicovém grafu rozmanitější. Výsledek lineární regrese říká, že existuje statisticky významný vliv typu stimulu na lokalizaci, a to konkrétně při porovnání typů stimulů lusknutí a šum. Hodnota p (0,032) pro tento případ je nižší, než referenční hladina 0,05. Respondenti v průměru lokalizovali stimuly lusknutí o -13,05 stupně jinak, tedy více vlevo než stimuly šumu. To se statistickou chybou 6,07 stupně. Tento fakt zřejmě můžeme přisuzovat přítomnosti odrazů zvuku zleva, které k signálu přidává binaurální procesor a které se při impulsním lusknutí projeví více než při kontinuálním šumu. Tuto hypotézu by potvrdil také výsledek srovnání druhé dvojice kontinuálních stimulů. Mezi stimuly řeč a šum se ve výsledcích lineární regrese neobjevil statisticky významný rozdíl a nelze zavrhnout nulovou Hypotézu 2, že tyto typy stimulu nemají vliv na lokalizaci zvuku při reprodukci pomocí sluchátek.

Porovnáme-li mezi sebou oba typy reprodukce, ani zde nenalezneme významný statistický důkaz, který by naznačoval závislost kvality lokalizace na typu stimulu. Hodnoty p pro obě dvojice typů stimulů jsou opět vyšší, než referenční hladina 0,05.

9 Závěr

Před samotným experimentem byly položeny dvě hlavní výzkumné otázky a s nimi související hypotézy. V průběhu experimentu se pak začaly nabízet dodatečné otázky, které by však k přesvědčivým výsledkům vyžadovaly mnohem podrobnější výzkum. Díky datům získaným v průběhu experimentu se podařilo odpovědět na obě výzkumné otázky. V odpovědi na výzkumné otázky se však odráží všechny nedostatky a limitace experimentu, zmíněné v kapitole 6.3.

9.1 Odpovědi na hypotézy

První výzkumnou otázkou bylo: "Je shodná lokalizace zdroje zvuku při poslechu na 5.1 konfiguraci reproduktorů a při poslechu virtuální 5.1 konfigurace reproduktorů na sluchátka?" K odpovědi na tuto otázku byla použita Hypotéza 1: "Mezi poslechem na 5.1 konfiguraci reproduktorů a poslechem na sluchátka by neměly nastat žádné rozdíly a lokalizace azimutů jednotlivých zdrojů zvuku by měla být shodná." Ačkoliv je z dat získaných experimentem patrný jakýsi systematický rozdíl v lokalizaci mezi jednotlivými typy reprodukce, nepodařilo se statisticky vyvrátit tuto hypotézu. Výsledky experimentu tedy naznačují, že reprodukce 5.1 signálu pomocí sluchátek je možná. Je možná také lokalizace zdrojů zvuku v celém prostoru kolem posluchače.

Druhou výzkumnou otázkou bylo: "Liší se kvalita lokalizace zvuku v obou případech pro různé zvukové stimuly?" K odpovědi byla použita Hypotéza 2: "Stejný prostorový vjem by mezi reproduktory a sluchátky měl vzniknout jak pro impulsní signál, tak pro kontinuální signál se stejným azimutem." Data experimentu ukázala, že pouze v případě poslechu na sluchátka může existovat spojení mezi typem stimulu a kvalitou lokalizace, a to v případě impulzního signálu. Tato odpověď však může reflektovat konkrétní vlastnosti použitého binaurálního procesoru a nelze ji proto zobecnit. V případě ostatních typů stimulů a v případě reprodukce pomocí reproduktorů nebyla prokázána závislost kvality lokalizace a typu stimulu.

Experiment poskytl odpovědi také na sekundární výzkumné otázky, které vyvstaly během něj. Protože byly použity dva typy sluchátek, byl zkoumán vliv jednotlivých sluchátek na kvalitu lokalizace. Data získaná experimentem naznačila, že typ použitých sluchátek by neměl mít na lokalizaci vliv, což potvrzují i starší studie provedené na toto téma. Experimentu se účastnili respondenti ze dvou fakult, bylo tak možné otestovat, zda má vliv poslechových zkušeností souvislost s kvalitou lokalizace. Výsledky experimentu indikují, že při poslechu na sluchátka by mohla určitá závislost existovat. Pro potvrzení této hypotézy by však bylo nutné provést výzkum na větším statistickém vzorku respondentů.

9.2 Zhodnocení experimentu

Přes zmíněné nedostatky a také relativně malý statistický vzorek respondentů došel poslechový test k určitým závěrům. Potvrdil, že lze lokalizovat zdroje zvuku v celé transversální rovině při reprodukci zvuku pomocí konfigurace 5.1. Lokalizace v celé rovině je možná i přes to, že konfigurace 5.1 je k tomuto účelu ze své podstaty nepříliš vhodná, což prokázaly výsledky lokalizace v některých azimutech. Experiment také prokázal, že lze, byť s určitými obtížemi, takovýto signál lokalizovat v celé transversální rovině také při jeho reprodukci pomocí sluchátek s využitím binaurálního procesoru Waves NX. Za určitých podmínek tedy může mít poslech hudby pomocí sluchátek obdobné prostorové benefity jako poslech hudby pomocí vícekanálových konfigurací. Aktuální trendy naznačují, že by v budoucnu poslech vícekanálových formátů pomocí sluchátek mohl být normou. Systémy jako Dolby Atmos, které přímo počítají s umístováním zvukových objektů do trojrozměrného prostoru kolem posluchače, by tak nemusely být omezeny pouze na audiovizuální tvorbu, ale také na tvorbu hudební. Tato technologie by v konečném důsledku mohla přinést zásadní změnu filozofie hudební mixáže.

V budoucnu by jistě bylo zajímavé opakovat tento experiment pro komplexnější zvukové formáty, jako například právě Dolby Atmos. Dále by se experiment mohl zaměřit na odlišné způsoby převodu signálu do binaurálního sterea, ať už za použití různých binaurálních procesorů či jiného způsobu aplikace HRTF.

Seznam literatury

- AppleInsider, 2022
Web AppleInsider. *AppleInsider* [online]. Dostupné z: <https://appleinsider.com/articles/22/02/15/apple-says-spatial-audio-is-a-hit-drawing-more-listeners-to-apple-music>
- Wikipedia: Signál
Signál. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sign%C3%A1l>
- Syrový, 2013
SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. ISBN 978-80-7331-297-8.
- Syrový, 2014
SYROVÝ, Václav. *Hudební zvuk: příspěvek k teorii zvukové tvorby*. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2014. ISBN 978-80-7331-323-4.
- Rumsey, 2001
RUMSEY, Francis. *Spatial Audio*. Amsterdam: Focal Press, 2001. ISBN 978-0-240-51623-3.
- Wright, Herbank, Wilson, 1974
WRIGHT, Donald, John H. HEBRANK a Blake WILSON. Pinna reflections as cues for localization. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 1974, **56**(3), 957-962 [cit. 2023-02-07]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1903355
- Moore, 2013
MOORE, Brian C. J. *An introduction to the psychology of hearing*. Šesté vydání. Leiden: Brill, [2013]. ISBN 978-90-04-25242-4.
- Naylor, 2021
NAYLOR, John. *Now Hear This* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2021 [cit. 2023-02-08]. ISBN 978-3-030-89876-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-89877-9
- Novotný, 2010
NOVOTNÝ, O. Psychoakustická měření binaurálních vlastností lidského sluchu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 53 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

- Bradley, Souldore, 1995
BRADLEY, J. S. a G. A. SOULODRE. Objective measures of listener envelopment. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 1995, **98**(5), 2590-2597 [cit. 2023-02-16]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.413225
- Syrový, Guštar, 2016
SYROVÝ, Václav a Milan GUŠTAR. *Malý slovník základních pojmů z hudební akustiky a hudební elektroniky*. 3. vydání. Praha: Akademie múzických umění v Praze (Nakladatelství AMU), 2016. ISBN 978-80-7331-383-8.
- ITU, 2022
BS.775-4: Multichannel stereophonic sound system with and without accompanying picture. 12/2022. International Telecommunication Union, 2022.
- Neumann: KU 100
Neumann KU 100. In: *NEUMANN* [online]. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://en-de.neumann.com/ku-100>
- Melka, 2005
MELKA, Alois. *Základy experimentální psychoakustiky*. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2005. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 80-7331-043-0.
- Gutierrez-Parera, Lopez, 2016
GUTIERREZ-PARERA, Pablo a Jose Javier LOPEZ. Spatial Audio with Consumer Headphones: How its quality affects the immersion. *Waves*. 2016, **8**, 17-29.
- Waves: Waves NX
Waves (2022). *Waves NX*. (Verze 13.0.0) [Počítačový Software]. Dostupné z <https://www.waves.com/plugins/nx>
- Apple: Logic Pro X
Apple (2021). *Logic Pro X*. (Verze 10.7.2) [Počítačový Software]. Dostupné z <https://www.apple.com/logic-pro/>.
- Fabfilter: Pro-DS
Fabfilter. (2021). *Fabfilter Pro-DS* (Verze 1.12) [Počítačový software]. Dostupné z <https://www.fabfilter.com/products/pro-ds-de-esser-plugin>
- Waves: NX manuál
Waves NX Virtual Mix Room User Guide. In: *Waves* [online]. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.waves.com/1lib/pdf/plugins/nx.pdf>
- Jamovi, 2022
The jamovi project (2022). *jamovi*. (Verze 2.3) [Počítačový Software]. Dostupné z <https://www.jamovi.org>.

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot 1

Tabulka naměřených hodnot pro reprodukci pomocí konfigurace 5.1

Úloha	Zadáni		Respondenti											
	Azimut	stimul	1H	2F	3F	4H	5H	6H	7H	8F	9H	10H	11H	12F
1	135	Řeč	150	140	190	180	180	140	140	180	185	185	195	140
2	45	lusknutí	35	40	30	35	30	40	30	30	30	25	40	35
3	150	lusknutí	155	180	160	140	140	155	160	150	135	145	150	160
4	90	lusknutí	135	155	115	140	145	135	130	150	145	135	120	135
5	75	Řeč	130	160	120	140	145	140	130	115	120	130	135	145
6	75	lusknutí	115	150	90	60	140	110	110	40	140	140	120	115
7	120	Řeč	150	155	140	145	130	130	145	145	120	125	145	135
8	135	lusknutí	145	155	135	140	140	140	145	140	120	125	145	130
9	105	lusknutí	135	140	135	140	140	155	130	155	125	135	130	125
10	15	lusknutí	10	0	10	0	10	25	0	5	0	5	5	15
11	75	lusknutí	150	150	125	145	135	145	110	125	115	140	130	110
12	120	lusknutí	120	145	130	145	140	125	120	150	110	130	125	125
13	0	Řeč	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	0	0
14	165	Řeč	180	180	180	170	180	180	185	180	180	180	170	170
15	60	lusknutí	40	90	30	40	40	35	30	35	35	40	65	40
16	0	lusknutí	-5	0	0	-10	0	0	-5	0	0	-5	-15	5
17	0	lusknutí	-5	0	0	-5	-10	0	-5	0	0	-5	-15	0
18	45	Řeč	30	55	30	30	30	35	30	30	35	30	55	30
19	30	lusknutí	30	30	40	40	30	30	20	30	30	30	55	25
20	105	Řeč	135	145	135	130	145	145	140	145	135	130	140	115
21	180	lusknutí			185	180	15	190	140	195	180		185	0
22	30	lusknutí	35	40	35	40	190	30	20	35	35	150	65	25
23	105	lusknutí	145	140	120	135	155	150	120	145	140	140	130	130
24	165	lusknutí	190	180	175	175	180	180	185	195	180	185	180	25
25	120	lusknutí	140	150	140	145	145	145	115	145	140	135	135	140
26	150	Řeč	155	160	155	155	165	155	170	165	155	145	150	165
27	15	Řeč	10	0	5	20	0	15	0	0	0	0	15	15
28	90	lusknutí	135	145	120	140	135	150	115	130	120	125	140	115
29	15	lusknutí	5	0	0	20	0	5	0	0	0	180	-10	10
30	150	lusknutí	140	165	110	160	160	150	160	160	155	155	155	115
31	90	Řeč	130	145	140	125	135	140	135	135	125	145	130	120
32	60	lusknutí	35	60	35	70	90	30	50	25	30	145	135	60
33	60	Řeč	45	65	75	50	60	30	35	30	30	25	60	70
34	135	lusknutí	135	140	145	140	130	150	125	130	130	130	135	125
35	180	Řeč			180	190		185		195	180	190	190	175
36	30	Řeč	30	30	30	55	30	40	40	30	30	30	40	30
37	165	lusknutí	160	180	180	165	160	180	180	180	180	185	175	160
38	180	lusknutí		195	180	195	190	190	195	195	190	195	180	180
39	45	lusknutí	35	30	30	40	90	35	30	30	20	25	50	35

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot 2

Tabulka naměřených hodnot pro reprodukci pomocí sluchátek

Úloha	Zadání			Respondenti											
	Azimut	Stimul	IH	2F	3F	4H	5H	6H	7H	8F	9H	10H	11H	12F	
1	135	Řeč	135	140	10	0	180	155	0	195	185	0	0	95	
2	45	Lusknutí	-10	0	5	0	0	0	190	180	180	-10	0	0	
3	150	Lusknutí	-10	0	30	175	-10	0	155	190	180	0	0	0	
4	90	Lusknutí	15	0	165	135	0	140	55	155	30	120	0	5	
5	75	Řeč	95	120	115	115	140	130	90	110	75	115	120	95	
6	75	Lusknutí	150	0	170	165	10	30	10	180	30	120	180	105	
7	120	Řeč	100	130	120	85	130	115	100	100	70	120	115	95	
8	135	Lusknutí	80	120	85	90	190	130	90	90	45	90	50	75	
9	105	Lusknutí	100	65	25	125	90	110	140	65	130	65	115	90	
10	15	Lusknutí	50	105	85	80	25	125	115	80	50	70	60	100	
11	75	Lusknutí	75	140	95	115	90	90	105	130	90	100	75	90	
12	120	Lusknutí	105	145	90	90	30	130	70	90	125	110	65	95	
13	0	Řeč	-10	-15	0	0	0	0	195	180	0	-5	0	0	
14	165	Řeč	175	0	150	145	175	180	130	0	0	170	120	105	
15	60	Lusknutí	90	40	100	100	40	40	110	90	90	100	120	90	
16	0	Lusknutí	105	110	125	120	140	125	80	105	70	125	130	95	
17	0	Lusknutí	75	90	130	130	135	120	75	155	45	85	130	80	
18	45	Řeč	65	90	95	90	30	130	100	90	120	65	75	85	
19	30	Lusknutí	80	90	145	125	135	90	90	130	125	100	130	115	
20	105	Řeč	120	90	125	80	145	135	115	100	50	100	115	95	
21	180	Lusknutí	85	150	90	90	145	130	85	105	90	120	120	85	
22	30	Lusknutí	100	130	120	90	140	70	75	135	80	95	85	85	
23	105	Lusknutí	125	100	100	130	155	90	90	95	90	120	120	110	
24	165	Lusknutí	90	110	100	115	145	80	105	110	120	100	60	75	
25	120	Lusknutí	90	130	110	110	140	125	80	110	75	105	95	100	
26	150	Řeč	95	135	130	125	165	125	120	150	130	140	140	125	
27	15	Řeč	165	0	170	150	0	35	145	180	180	15	180	150	
28	90	Lusknutí	120	90	115	105	140	85	90	115	90	110	120	105	
29	15	Lusknutí	100	145	70	90	140	130	65	110	90	100	100	75	
30	150	Lusknutí	90	90	95	85	130	135	90	105	105	105	115	130	
31	90	Řeč	100	90	110	110	135	120	120	125	90	105	110	105	
32	60	Lusknutí	25	0	40	25	180	35	45	180	180	10	0	10	
33	60	Řeč	90	100	80	80	60	70	90	110	115	105	90	110	
34	135	Lusknutí	125	180	150	115	160	145	125	160	145	160	135	135	
35	180	Řeč	-15	-10	0	0	180	180	195	180	180	195	120	0	
36	30	Řeč	45	85	45	85	30	135	120	30	120	100	120	90	
37	165	Lusknutí	160	180	0	160	160	180	180	0	180	180	180	0	
38	180	Lusknutí	0	0	0	180	190	0	180	-15	180	195	0	0	
39	45	Lusknutí	-15	-10	5	0	15	180	0	-15	0	-5	0	0	