

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Zpracování zvuku pro sférická videa - sada výukových úloh

Martin Novotný

Vedoucí práce: Ing. František Rund, Ph.D.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **466298**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zpracování zvuku pro sférická videa - sada výukových úloh

Název bakalářské práce anglicky:

Audio Processing for Spherical Video - Set of Laboratory Exercises

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s postupy pro tvorbu zvuku pro 360 stupňová (sférická) videa a používanými formáty. Navrhněte a připravte vzorové úlohy pro výuku demonstrující kompletní postup přípravy zvuku pro tyto formáty, tj. od pořízení záznamu, přes mixáž, mastering až po reprodukci. Výstupem budou návody pro úlohy a demonstrační realizace včetně dokumentace, projektů pro jednotlivá prostředí apod.

Seznam doporučené literatury:

[1] Rumsey, Francis, Virtual Reality: Mixing, Rendering, Believability. JAES Volume 64, Issue 12, pp. 1073-1077, December 2016.
[2] Bates, Enda and Boland, Francis, 'Spatial Music, Virtual Reality and 360 Media' In 2016 AES International Conference on Audio for Virtual and Augmented Reality, Los Angeles, CA, USA, September 2016.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. František Rund, Ph.D., katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **12.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. František Rund, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Na začátku práce bych rád poděkoval katedře radioelektroniky FEL, ČVUT v Praze, jmenovitě pak Ing. Františku Rundovi, Ph.D., za umožnění práce se specifickou technikou, jakou je ambisonický mikrofon a za několik podnětných konzultací a nápadů k bakalářské práci v průběhu semestru a Ing. Janu Bednářovi za poskytnuté konzultace k pokročilejším nastavením použitého mixážního pultu.

Prohlášení

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

V Praze, 23. května 2019

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá implementací pracoviště ambisonie pro katedru radioelektroniky FEL, ČVUT v Praze. Čtenář je v práci stručně seznámen se základními vlastnostmi ambisonie a následným procesem zpracování ambisonického zvuku pro sférická videa. Dále je v projektu uvedena konkrétní implementace daného ambisonického pracoviště vč. návodů k 5 laboratorním úlohám k seznámení čtenářů s ambisonickým záznamem zvuku, jeho zpracováním a využitím pro sférická videa.

Klíčová slova: zvuk, ambisonie, sférická videa, HRTF, Cubase

Vedoucí práce: Ing. František Rund, Ph.D.
Katedra radioelektroniky
FEL, ČVUT v Praze

Abstract

This bachelor thesis deals with an implementation of ambisonics workplace for Department of Radioelectronics FEE, CTU Prague. The reader is briefly introduced to the basics of recording and processing of ambisonic audio. After that, the concrete implementation of ambisonic workplace is presented to the reader, including five instruction lists for laboratory exercises, which demonstrates the basic principles of ambisonic sound processing with an emphasis on the most widespread usage of ambisonic sound - spherical videos.

Keywords: sound, ambisonics, spherical videos, HRTF, Cubase

Title translation: Audio Processing for Spherical Video - Set of Laboratory Exercises

Obsah

Úvod	1	B.2 Funkce	40
1 Teoretické základy ambisonie	3	B.2.1 ambiConvert	40
1.1 Ambisonie	3	B.2.2 ambiLS	41
1.1.1 Ambisonie prvního řádu	5	B.2.3 ambiPan	42
1.1.2 Ambisonie vyšších řádů	6	B.2.4 ambiRotate	42
1.2 Úpravy ambisonického mixu	6	B.2.5 normalise	43
1.3 Ambisonické mikrofony	8	B.2.6 plotter	44
1.4 Formáty pro ambisonii	10	C Návod k použití ambisonického	
1.5 Dekódování ambisonického zvuku	10	pracoviště	45
1.5.1 Dekódování pomocí		C.1 Struktura pracoviště	46
beamformingu	11	C.2 Možnosti pracoviště	46
1.5.2 Dekódování pomocí principu		C.3 Základní nastavení pracoviště	46
virtuálních reproduktorů	11	C.4 Struktura vzorových projektů	
1.5.3 Binaurální dekodování pomocí		v Cubase	47
HRTF	13	C.5 Obecný popis procesu zpracování	49
2 Zpracování ambisonického zvuku	15	C.6 Podrobný popis jednotlivých	
pro sférická videa	15	pluginů	50
2.1 Proces zpracování ambisonického		C.7 Využití automatizace DAW	
zvuku	15	v ambisonii	56
2.2 Head-Locked audio	17	C.8 Použitá a doplňková literatura	57
3 Implementované pracoviště	19	D Pracovní listy k laboratorním	
ambisonie a laboratorní úlohy	19	úlohám	59
3.1 Struktura pracoviště	19	D.1 Laboratorní úloha 1	60
3.1.1 Funkce mikrofону Dummy head		D.2 Laboratorní úloha 2	70
Neumann KU100	20	D.3 Laboratorní úloha 3	79
3.2 Laboratorní úlohy	21	D.4 Laboratorní úloha 4	86
3.2.1 Ambisonický mikrofon	21	D.5 Laboratorní úloha 5	96
3.2.2 Polohování neambisonických			
stop a beamformingu	22		
3.2.3 Mastering audia pro sférická			
videa	22		
3.2.4 Ambisonie vyšších řádů			
a kvalita binaurální reprodukce	23		
3.2.5 Matematická podstata			
ambisonie	24		
3.3 Problémy při implementaci a jejich			
řešení	25		
Závěr	29		
Literatura	31		
A Struktura přiloženého DVD	35		
B Vytvořené kódy v SW MATLAB	37		
B.1 Skripty	37		
B.1.1 Spherical harmonics single	37		
B.1.2 Spherical harmonics multi	39		

Obrázky

1.1	Struktura zavedeného souřadného systému	4
1.2	Průběh přidružených Legendrových funkcí do řádu 2	5
1.3	Sférické harmonické funkce pro ambisonii prvního řádu	5
1.4	Tvar sférických harmonických funkcí využívaných do ambisonie 4. řádu	6
1.5	Pojmenování základních typů rotací kolem jednotlivých souřadných os	7
1.6	Struktura mikrofonu Sennheiser AMBEO VR Mic	8
1.7	Eigenmike microphone - mikrofon pro ambisonii 4. řádu	9
1.8	Porovnání pořadí kanálů u formátu FuMa a u číslování pomocí ACN . . .	10
1.9	Význam parametrů při dekódování ambisonie pomocí virtuálních reproduktorů	12
1.10	Jeden z návrhů rozložení reproduktorů pro poslech prostorového zvuku	13
1.11	Základní principy lokalizace zvuku	14
2.1	Obecná bloková struktura zpracování ambisonických signálů .	16
2.2	Detail pluginu Ambi Pan HD . . .	17
2.3	Hlavní okno aplikace Audio360 Encoder	18
2.4	Sférické video zobrazené v ekvidistantní válcové projekci . . .	18
3.1	Obecná bloková struktura ambisonického pracoviště	20
3.3	Mikrofon Dummy head Neumann KU100	20
3.2	Pohledy na pracoviště ambisonie	28

Tabulky

1.1	Přehled základních směrovostí mikrofonů	11
-----	---	----



Úvod

Historie ambisonie začíná už 70. letech 20. století ve Velké Británii, kdy inženýr Michael Gerzon, který pracoval pod NRDC (*National Research Development Corporation*), přišel s nápadem rozložit zvukové pole na signály, které jsou nezávislé na výsledném rozložení reproduktorů při poslechu (což byl velký rozdíl v porovnání s ostatními surround formáty, kde jednotlivé signály přímo reprezentovaly signály pro jednotlivé reproduktory). Tato myšlenka se velmi brzy ujala a ambisonie dostala do hledáčku mnoha vědeckých skupin, které blíže zkoumaly její teoretickou podstatu a vlastnosti, což vedlo až k objevu ambisonie vyšších řádů, a to v 90. letech 20. století. Od této doby je ambisonie stále ve fázi vývoje a výzkumu. Díky rozvoji DSP a MEMS tak již není v současné době problém v laboratorních podmínkách zaznamenat a zpracovat např. ambisonii 9. řádu.

V komerční sféře ale ambisonie neměla takový úspěch jako na poli vědeckém, a to hlavně z důvodu náročných výpočtů výsledných signálů pro jednotlivé reproduktory. Větší pozornosti se ambisonii v komerční sféře po delší době dostává ve druhé polovině druhého desetiletí 21. století, a to v souvislosti s rozvojem sférických videí a virtuální reality, kde je ambisonie ze své podstaty (tj. přenos informace o zvukovém poli bez vazby na výsledné rozložení reproduktorů) ideálním formátem pro záznam a reprodukci prostorového zvuku.

Z tohoto důvodu se ve své bakalářské práci pokusím v kapitole 1 přiblížit matematickou podstatu ambisonie. V kapitole 2 se dále zaměřím na popis postupu, kterým je možné zpracovávat jednotlivé ambisonické mixy, které je následně možné připojit k vytvořeným sférickým či VR videím. Kromě výše uvedeného také ve své bakalářské práci implementuji ambisonické pracoviště, které bude naplňovat postup zpracování popsany v kapitole 2 a vytvořím k němu vzorové úlohy. S popisem vytvořeného pracoviště vč. rozboru jednotlivých úloh se čtenáři mohou seznámit v kapitole 3.

Kapitola 1

Teoretické základy ambisonie

1.1 Ambisonie

Ambisonie využívá mapování prostorového zvuku pomocí sférických harmonických funkcí. Tyto funkce jsou řešením úhlové části Laplaceovy rovnice ve sférických souřadnicích, která splňuje podmínku ortogonality (viz [1]).

Před zápisem vztahu pro určení jednotlivých sférických harmonických je dobré si definovat souřadnou soustavu. Ta se typicky (dle [2] či [3]) definuje následovně

- osa x směřuje ve směru pohledu pozorovatele,
- osa y směřuje nalevo od pozorovatele,
- osa z směřuje nad pozorovatele.

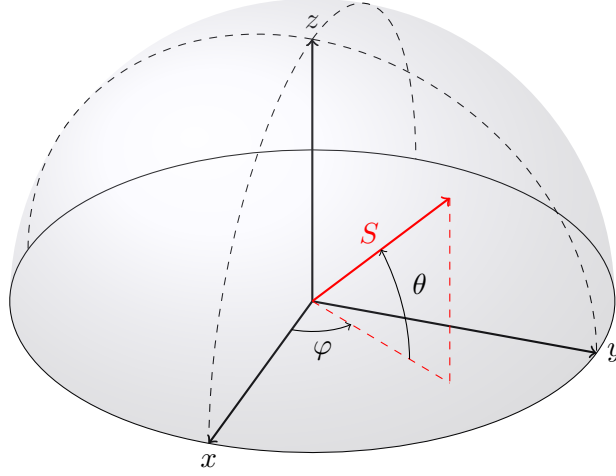
Bavíme o sférických harmonických funkcích, je proto dobré si zavést parametry sférických souřadnic - konkrétně orientaci úhlů φ a θ . Vzdálenost r není pro základní práci s ambisonií podstatná, neboť se při výpočtech předpokládá, že se posluchač nachází ve vzdáleném poli, kde jsou všechny akustické vlny rovinné. Pro věrnější syntézu je ale nutné uvažovat i vzdálenost zdroje, s čímž se lze setkat u většiny ambisonických pluginů - viz sekce 2.1. U ambisonického zpracování se typicky volí následující konvence

- $\varphi \in [-\pi; \pi]$ (azimut) - nulová hodnota ve směru osy x , kladné hodnoty proti směru hodinových ručiček,
- $\theta \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ (výškový úhel) - nulová hodnota pro horizontální rovinu, záporná hodnota pro body pod horizontální rovinou.

Pro snazší orientaci v zavedeném značení poslouží obr. 1.1. Reálnou část jednotlivých sférických harmonických funkce lze dle [4] či [5] určit vztahem¹

$$Y_l^m(\varphi, \theta) = N_l^{|m|} \cdot P_l^{|m|}[\sin(\theta)] \cdot \begin{cases} \sin(|m|\varphi), & \text{pro } m < 0, \\ \cos(|m|\varphi), & \text{pro } m \geq 0, \end{cases} \quad (1.1)$$

¹Občas se v definici sférických harmonických funkcí objevuje tzv. Condon–Shortley fázový člen $(-1)^m$. Tento člen byl chybně převzat z definic sférických harmonických funkcí z kvantové mechaniky, neboť pro ambisonii se nepoužívá (viz [6]).



Obrázek 1.1: Struktura zavedeného souřadného systému

kde $l \in \mathbb{N}_0$ značí řád sférické harmonické funkce a $m \in \mathbb{Z} \wedge -l \leq m \leq l$ značí stupeň sférické harmonické funkce, člen $N_l^{|m|}$ značí normalizační koeficient a člen $P_l^{|m|}[\sin(\theta)]$ označuje přidruženou Legendrovu funkci řádu l a stupně $|m|$. Průběhy přidružených Legendrových funkcí pro jednotlivé řády a stupně jsou na obr. 1.2, tvar sférických harmonických funkcí pro ambisonii prvního řádu vč. jejich jednoduššího zápisu (bez uvažování normalizačního koeficientu) je na obr. 1.3 Normalizační koeficient $N_l^{|m|}$ je dle [4] možné pro normalizaci SN3D² (použité u ambisonického formátu ambiX - viz sekce 1.4) vyjádřit jako

$$N_l^{|m|} = \sqrt{\frac{2 - \delta_m}{4\pi} \cdot \frac{(n - |m|)!}{(n + |m|)!}}, \quad (1.2)$$

kde člen δ_m značí tzv. Kroneckerovo delta v proměnné m , pro které platí vztah

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & \text{pro } m = 0, \\ 0, & \text{pro } m \neq 0. \end{cases} \quad (1.3)$$

V obr. 1.3 se lze kromě tvaru jednotlivých sférických harmonických funkcí seznámit i s koeficientem ACN (*Ambisonics Channel Numbering*). Tento koeficient jednoznačně určuje pomocí jednoho čísla danou sférickou harmonickou funkci, a to na základě vztahu (viz [4] či [3])

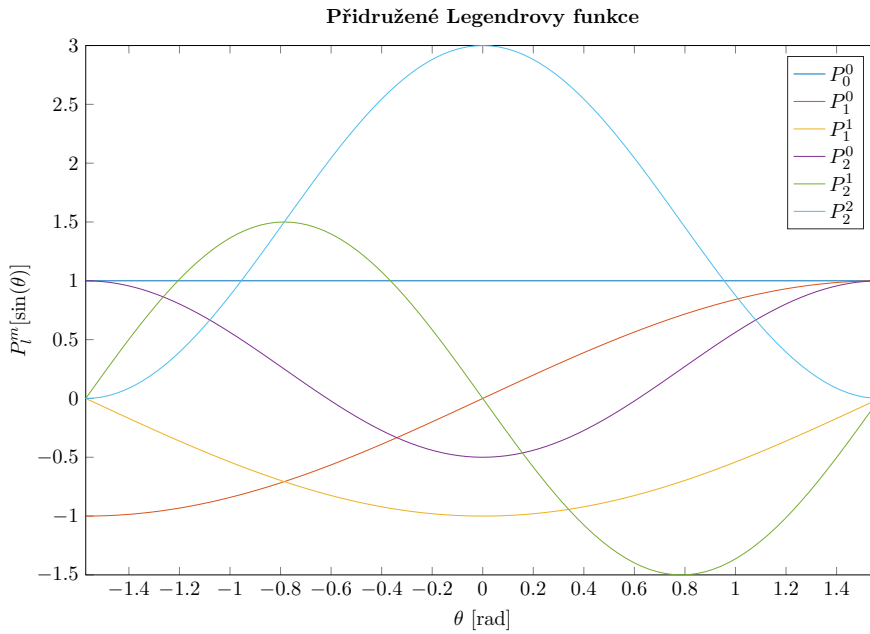
$$\text{ACN} = l^2 + l + m, \quad (1.4)$$

kde l resp. m je řád resp. stupeň dané sférické harmonické funkce. Význam tohoto koeficientu bude patrný v sekci 1.4.

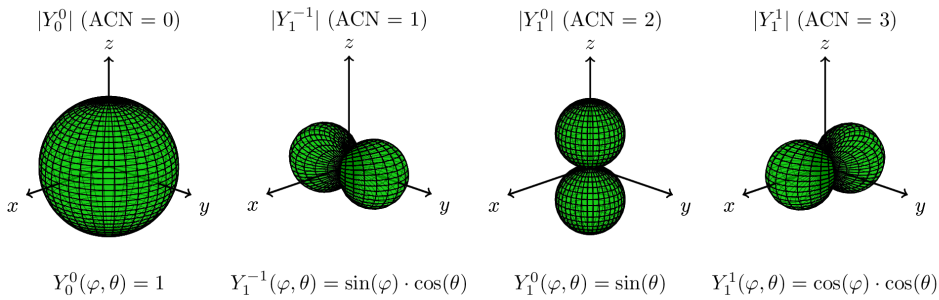
²V některých zdrojích (např. [3]) je možné se setkat s definicí normalizačního koeficientu jako

$$N_l^{|m|} = \sqrt{(2 - \delta_m) \cdot \frac{(n - |m|)!}{(n + |m|)!}},$$

který pro ambisonii prvního řádu vede na jednotkové zesílení.



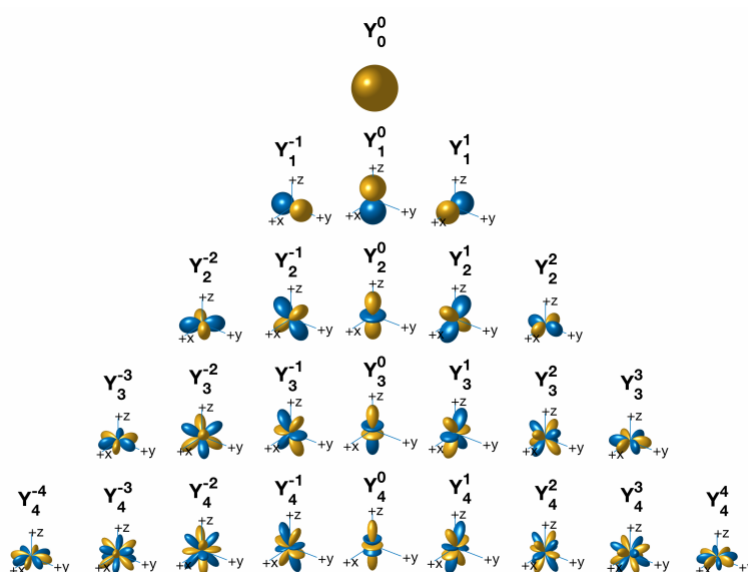
Obrázek 1.2: Průběh přidružených Legendrových funkcí do řádu 2



Obrázek 1.3: Sférické harmonické funkce pro ambisonii prvního řádu

1.1.1 Ambisonie prvního řádu

Ambisonie prvního řádu je nejjednodušší způsob, pomocí kterého můžeme mapovat prostorové zvukové pole. K tomu, abychom byli schopni bez zkrácení namapovat celé zvukové pole potřebujeme celkem 4 kanály, typicky označované jako W, X, Y, Z. Označení kanálů plyne z tvarů sférických harmonických funkcí - jak je vidět z obr. 1.3, tak jednotlivé sférické harmonické funkce řádu 1 vždy prakticky snímají zvuk jen z jedné osy souřadného systému. Zvukový soubor tvořený z kanálů W, X, Y, Z pak tvoří tzv. ambisonický zvuk prvního řádu ve formátu B. Zvuk v tomto formátu se poté využívá k dalším úpravám (jako například celková rotace zvukového pole apod.) a finálnímu dekódování.



Obrázek 1.4: Tvar sférických harmonických funkcí využívaných do ambisonie 4. řádu (převzato z [7])

1.1.2 Ambisonie vyšších řádů

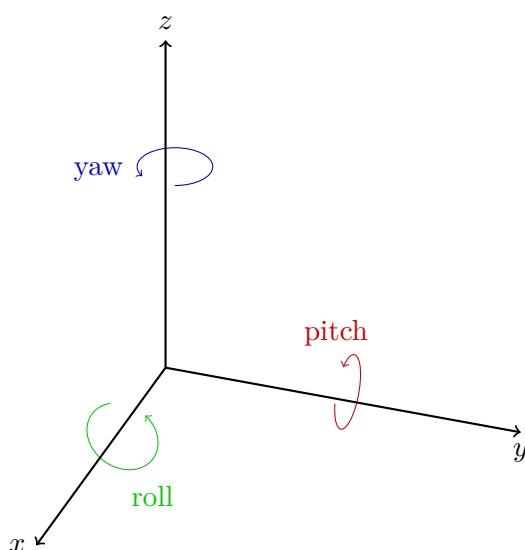
Ambisonie vyšších řádů umožňuje přesnější mapování prostorového zvuku, a to díky použití více sférických harmonických funkcí. Konkrétně platí, že pro plnou prostorovou informaci z ambisonii řádu N je potřeba právě $(N + 1)^2$ kanálů (viz [4], [2]). Je vidět, že počet kanálů kvadraticky roste se zvyšujícím se řádem, čímž samozřejmě dramaticky zvyšuje nároky na paměť a rychlost zpracování. Tvar sférických harmonických funkcí do ambisonie 4. řádu je na obr. 1.4. V současné době se lze setkat s komerční výrobou mikrofonů pro ambisonii 4. řádu (viz sekce 1.3), v laboratorních podmínkách se podařilo vytvořit ambisonický mikrofon pro ambisonii 9. řádu (viz [8]).

1.2 Úpravy ambisonického mixu

Máme-li k dispozici ambisonický mix, můžeme ještě před výsledným exportem zvuku provést základní úpravy se zvukovým polem. Pokud dodržíme podmínku, že budeme daný efekt aplikovat shodně na všechny stopy ambisonického mixu, je možné bez ztráty prostorové informace na jednotlivé stopy aplikovat bez jakýchkoliv modifikací běžně používané efekty, jako např.

- EQ,
- kompresor,
- reverb,
- expander ad.

Pokud ale nebudeme výše uvedenou podmínku respektovat, může jednoduše dojít ke zkreslení prostorové informace (viz [9]).



Obrázek 1.5: Pojmenování základních typů rotací kolem jednotlivých souřadných os

Kromě výše uvedených efektů je možné i poměrně jednoduše s celým zvukovým polem rotovat. K tomu, aby se nemusely odvozovat obecné matice pro rotaci o daný azimut a výškový úhel, využívá se implementačně jednoduššího přístupu, a to pomocí rotací kolem jednotlivých souřadných os. Z tohoto důvodu se zavádějí tři typy rotací (kladné úhly proti směru hodinových ručiček; viz [3] či [6])

- **roll** - rotace kolem osy x ,
- **pitch** - rotace kolem osy y ,
- **yaw** - rotace kolem osy z ,

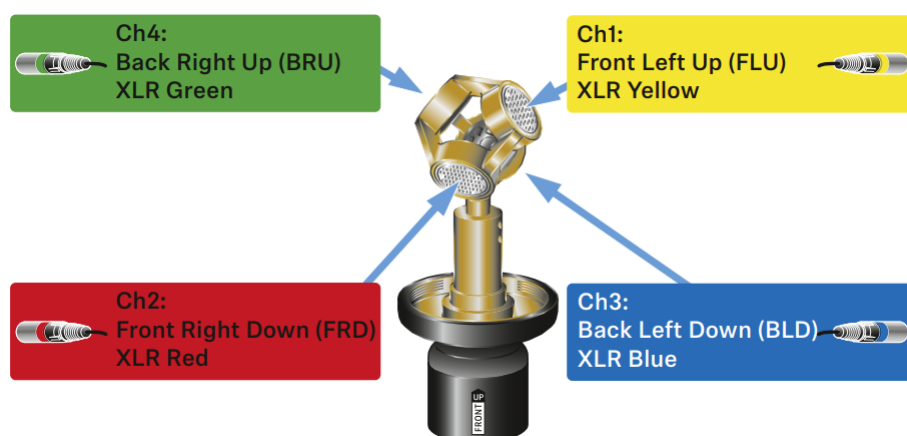
které názorně demonstruje obr. 1.5. Obecně lze rotovaný výstupní signál získat pomocí maticového násobení jako

$$\mathbf{A}' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{A}, \quad (1.5)$$

kde \mathbf{A}' je vektor s rotovanými signály, \mathbf{R} je rotační matice a \mathbf{A} je vektor s původními signály. Pro rotaci kolem osy y o úhel α tak vztah (1.5) pro ambisonii prvního řádu přejde do tvaru

$$\begin{pmatrix} W' \\ X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (1.6)$$

pro vyšší řády ambisonie pak získáme mnohem komplikovanější vztahy, které lze např. dohledat v [10].



Obrázek 1.6: Struktura mikrofonu Sennheiser AMBEO VR Mic (převzato z [11])

1.3 Ambisonické mikrofony

Z obr. 1.3 plyne, že pro záznam prostorového zvuku v ambisonii prvního řádu by v podstatě stačily 4 mikrofonní kapsle, konkrétně jedna kulová a tři osmičkové (každá pro jednu osu souřadného systému). Takovému mikrofonu se říká „native B-format microphone“ a jeho vytvoření je velmi složité, a to hlavně z toho důvodu, že pro správnou funkci by všechny mikrofonní kapsle musely být umístěny v počátku souřadného systému, což je fyzikálně nemožné realizovat (viz [12]). Z tohoto důvodu jsem při rešeršní práci nenarazil na žádný komerčně vyráběný mikrofon, který využívá tohoto principu. Tento princip by bylo také nemožné využít pro ambisonii vyšších řádů, a to z toho důvodu, že již tvary jednotlivých sférických funkcí neodpovídají běžně používaným směrovým charakteristikám mikrofonů.

Z důvodů uvedených výše se tedy používá jiný princip (viz [13]) - prostorový zvuk je zaznamenán alespoň $(N + 1)^2$ mikrofonními kapslemi, kde N symbolizuje požadovaný řád ambisonie. Výstup jednotlivých mikrofonů tvoří tzv. ambisonický zvuk řádu N ve formátu A. Tento zvuk je poté řadou matematických operací převeden na ambisonický zvuk řádu N ve formátu B (tedy na signály které jsou váhovány danými sférickými harmonickými funkcemi určenými podle vztahu (1.1)). Pro ambisonii prvního řádu, kde se typicky využívají 4 mikrofonní kapsle s kardioidní směrovou charakteristikou s rozložením podle obr. 1.6 se převod mezi ambisonickým formátem A a B zjednoduší na následující maticové násobení (převzato z [11], význam kanálů je patrný z obr. 1.6)

$$\begin{pmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{FLU} \\ \text{FRD} \\ \text{BLD} \\ \text{BRU} \end{pmatrix} \quad (1.7)$$



Obrázek 1.7: Eigenmike microphone - mikrofon pro ambisonii 4. řádu (převzato z [7])

Jak plyne ze vztahu (1.7) a z textu výše, je výroba ambisonického mikrofonu prvního řádu (v porovnání s vyššími řády) poměrně jednoduchá.³ Proto jsem při rešeršní práci narazil na několik ambisonických mikrofonů prvního řádu, které pro mapování prostoru využívají právě popsánoho postupu. Namátkou se jedná např. o mikrofony

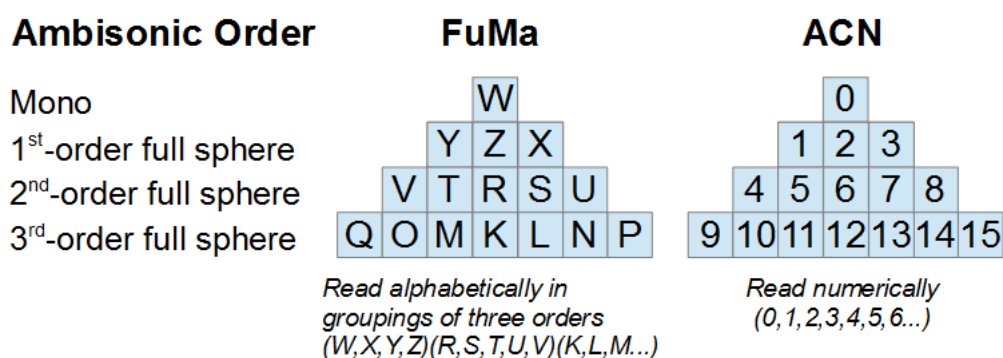
- Sennheiser AMBEO VR Mic (viz [11]),
- Soundfield SPS200 (viz [14]),
- Neve VR microphone (viz [15]),
- RODE NT-SF1 (viz [16]) ad.

Oproti tomu mikrofony pro vyšší řády ambisonie potřebují mnohem sofistikovanější přepočty (které typicky nejsou ani výrobci zveřejňovány) a zároveň rovnoměrné umístění velkého množství mikrofonních kapslí na malou plochu (podle řádu ambisonie). Z tohoto důvodu jsem při rešeršní práci narazil na velmi málo ambisonických mikrofonů vyšších řádů, konkrétně

- 8 capsule 2nd Order ambisonic mic od výrobce Brahma microphones (viz [17]),
- Zylia ZM-1 (ambisonie 3. řádu - 19 mikrofonních kapslí; viz [18]),
- Eigenmike microphone (ambisonie 4. řádu - 32 mikrofonních kapslí; viz obr. 1.7).

Je ale velmi pravděpodobné, že díky rozvoji MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) technologie dojde v následujících letech k masivnímu rozvoji

³Je pravda, že velkým neduhem všech ambisonických mikrofonů je nestálost směrové charakteristiky pro vyšší frekvence, což samozřejmě vede na to, že vztah (1.7) již neplatí a dojde ke zkreslení prostorové informace, ale přesné řešení tohoto problému jde nad rámec této práce (viz [9]).



Obrázek 1.8: Porovnání pořadí kanálů u formátu FuMa a u číslování pomocí ACN (převzato z [20])

ambisonických mikrofonů vyšších řádů. Další informace o ambisonii vyšších řádů lze dohledat např. v [19] či [8].

1.4 Formáty pro ambisonii

V současné době se u ambisonického záznamu zvuku můžeme setkat se dvěma základními formáty, a to

- **ambiX** (Ambisonics exchangable),
- **FuMa** (Furse-Malham),

kde formát **FuMa** je historicky starší a z důvodu jeho neduhů (zmíněných níže) se nahrazuje formátem **ambiX**. Zásadní rozdíl mezi těmito formáty je v pořadí kanálů, kde formát **ambiX** využívá řazení podle ACN (určené dle vztahu (1.4)), oproti tomu formát **FuMa** využívá historicky staršího řazení a čtení, a to dle abecedního pořadí jednotlivých kanálů (viz obr. 1.8). Dalším výrazným rozdílem mezi jednotlivými formáty je i maximální počet kanálů, které daný soubor zvládne pojmout. Formát **FuMa** je stavěn nejvýše na ambisonii třetího řádu, a to hlavně z důvodů maximální velikosti souboru (který u formátu **FuMa** nemůže přesáhnout 4 GB - viz [4]) a také kvůli jisté nekonceptnosti při třídění kanálů (viz výše). Oproti tomu formát **ambiX** není shora limitován ani velikostí, ani počtem kanálů (díky řazení pomocí ACN je jednoduché přidat další kanály). Posledním zásadním rozdílem mezi těmito formáty je normalizační koeficient $N_l^{|m|}$ používaný při určování jednotlivých sférických harmonických funkcí dle vztahu (1.1). Formát **ambiX** využívá váhování SN3D popsané vztahem (1.2), oproti tomu formát **FuMa** využívá starší typ váhování $\max N$ (viz [6]).

1.5 Dekódování ambisonického zvuku

Jak již bylo řečeno v sekcích výše, jednotlivé kanály ambisonického formátu B obsahují prostorový zvuk po váhování pomocí dané sférické harmonické

Tabulka 1.1: Přehled základních směrovostí mikrofonů (převzato z [21])

směrovost	směrová charakteristika
$D = 0$	kulová
$D = 0,5$	superkardioidní
$D = 1$	kardioidní
$D = 1,5$	hyperkardioidní
$D = 2$	osmičková

funkce. Tento princip dává velkou volnost při dekódování, neboť máme k dispozici informace o přesném rozložení jednotlivých zvuků v prostoru (kde tato informace je tím přesnější, čím větší je řád ambisonie). Na základě této informace pak můžeme např.

- vybrat a „zachytit“ pouze určitou část prostoru - tzv. beamforming
- dopočítat informaci o konkrétním rozložení zvukového pole v daném bodě prostoru - tzv. princip virtuálních reproduktorů ad.

1.5.1 Dekódování pomocí beamformingu

Jak bylo řečeno výše, máme-li k dispozici libovolný ambisonický zvuk ve formátu B, znamená to, že máme informace o rozložení zvukového pole v daném prostoru (tím přesnější, čím vyšší je řád ambisonie). Z tohoto důvodu si vlastně můžeme v rámci postprodukčních úprav ambisonického zvuku vybrat jen tu část prostoru, kterou potřebujeme. Toto lze udělat pomocí tzv. virtuálních mikrofonů. Tyto mikrofony umístíme do počátku souřadného systému a na základě jejich směrovosti (viz tab. 1.1) a úhlu snímání můžeme poté dopočítat výsledný signál. Pro jednoduchý virtuální mikrofon pro ambisonii prvního řádu lze např. dle [21] určit výstupní signál $s(t)$ jako

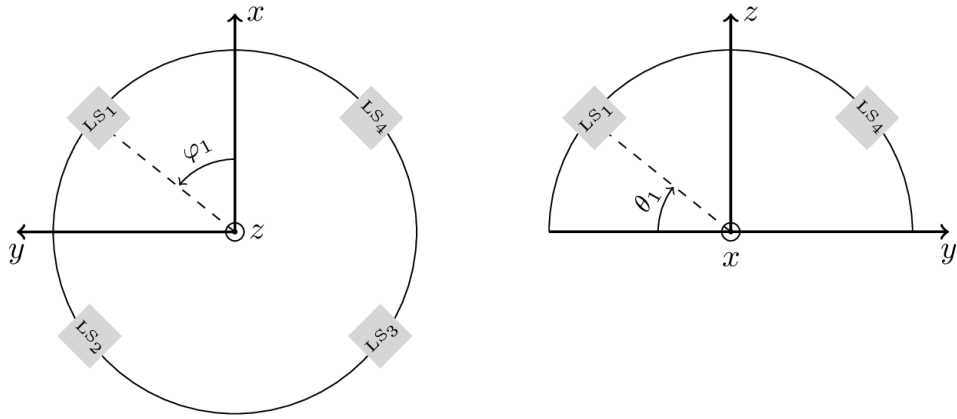
$$s(t) = \frac{1}{2} \cdot [(2 - D) \cdot W(t) + D \cdot (r_x \cdot X(t) + r_y \cdot Y(t) + r_z \cdot Z(t))], \quad (1.8)$$

kde D je směrovost virtuálního mikrofonu a r_x , r_y a r_z jsou směrové kosiny natočení virtuálního mikrofonu vzhledem k jednotlivým souřadným osám. K dekódování pomocí beamformingu lze použít např. SW VVMic - viz [22].

1.5.2 Dekódování pomocí principu virtuálních reproduktorů

Pomocí principu virtuálních reproduktorů můžeme z ambisonického formátu B dopočítat signály pro jednotlivé reproduktory např. pro rozložení 5.1, 7.1 či libovolné jiné rozložení reproduktorů.⁴ Prakticky se nejedná o nic jiného, než o několikanásobnou aplikaci beamformingu (s trochu sofistikovanějšími parametry pro optimalizaci výsledného signálu) - viz [2]. Pro realizaci nejjednodušších dekoderů (kdy rozmísťujeme jednotlivé reproduktory na jednotkovou

⁴Pro správné vnímání prostorového efektu se doporučuje reproduktory rozmísťovat rovnoměrně v prostoru.



Obrázek 1.9: Význam parametrů při dekódování ambisonie pomocí virtuálních reproduktorů

kružnici) nám stačí znát pouze azimut φ a výškový úhel θ jednotlivých reproduktorů (viz obr. 1.9, zkratka LS znamená *loudspeaker* čili reproduktor). Se znalostí těchto parametrů je poté možné dopočítat signál pro jednotlivé reproduktory s_{LS} jako

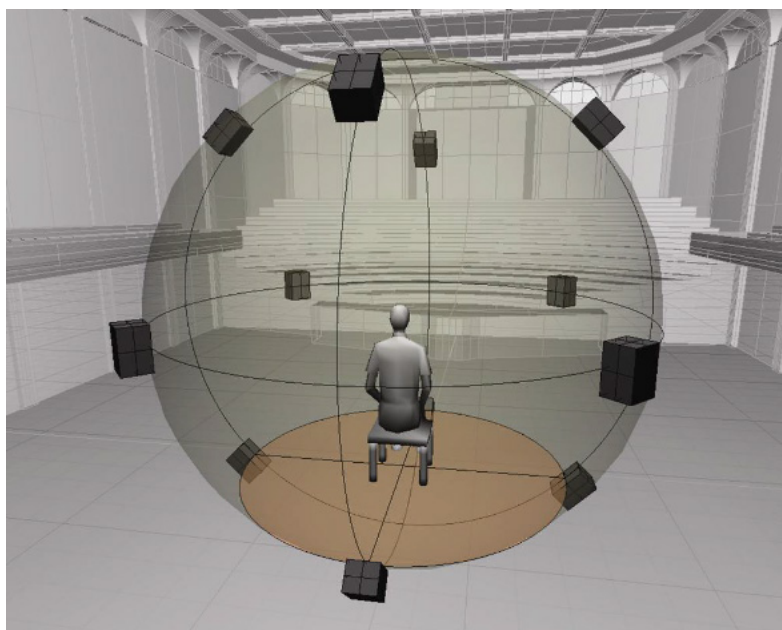
$$\mathbf{S}_{\text{LS}} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{A}, \quad (1.9)$$

kde vektor \mathbf{S}_{LS} obsahuje signály pro jednotlivé reproduktory, \mathbf{D} značí matici pro dekódování a vektor \mathbf{A} označuje daný ambisonický signál. Matice pro dekódování má mnoho tvarů, její koeficienty se liší hlavně podle rozmístění reproduktorů a použitého typu dekódování (psychoakustické, fyzikální - viz [2]). Například pro tzv. Max- r_e dekódování s rovnoměrným rozložením reproduktorů se dle [2] řádek matice \mathbf{D} (odpovídající váhovacím koeficientům pro jeden reproduktor) promění pro ambisonii prvního řádu na

$$\mathbf{D}^T = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{N}} \\ \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \cos(\varphi_n) \cdot \cos(\theta_n) \right] \\ \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \sin(\varphi_n) \cdot \cos(\theta_n) \right] \\ \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \sin(\theta_n) \right] \end{pmatrix}, \quad (1.10)$$

kde N je počet použitých reproduktorů. Pokud bychom chtěli jednotlivé koeficienty pro dekódování získat pro nerovnoměrné rozložení reproduktorů, je třeba k jejich výpočtu využít numerické metody (viz [2] či [23])

Nevýhodou tohoto dekódování je, že pro dosažení nezkráceného prostorového efektu je potřeba alespoň $(M + 1)^2$ kanálů (popř. $2M + 1$ kanálů pro pouze horizontální reprodukci - tj. pro výškový úhel θ všech reproduktorů bude platit $\theta = 0^\circ$), kde M je řád ambisonie, a zároveň že existuje pouze jedno ideální místo pro poslech (tzv. *sweet spot*), které se nachází ve středu souřadného



Obrázek 1.10: Jeden z návrhů rozložení reproduktorů pro poslech prostorového zvuku (převzato z [24])

systému - tedy pro správné vnímání prostoru musí být posluchač stále na jednom místě, což je samozřejmě např. při sledování sférických či VR videí velmi nepraktické (viz [9]). Z tohoto důvodu se přešlo k využití tzv. binaurální reprodukce (viz sekce 1.5.3), která uživateli umožňuje pohyb v prostoru bez ztráty prostorového efektu.

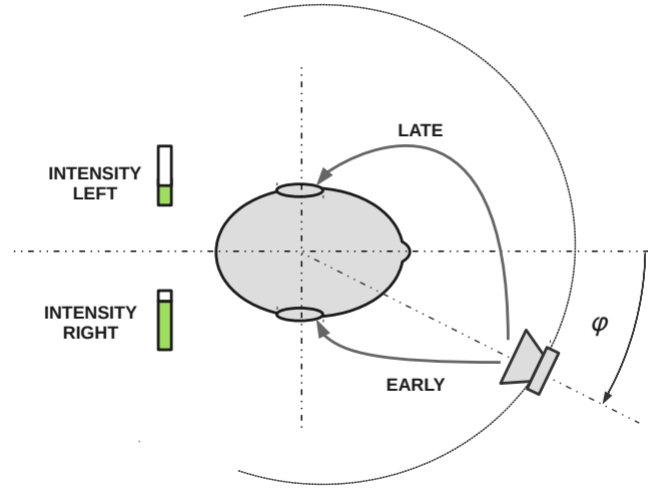
■ 1.5.3 Binaurální dekodování pomocí HRTF

Pokud máme k dispozici libovolný zdroj zvuku v prostoru, jsme schopni pomocí signálů, které nám přicházejí do uší lokalizovat jeho polohu, a to díky (viz [25] či [26])

- rozdílu intenzity zvuku mezi jednotlivými ušima,
- rozdílu času dopadu zvuku na jednotlivé uši.

Principy této lokalizace zdroje zvuku jsou naznačeny na obr. 1.11. Díky těmto principům je možné vytvořit obecnou funkci, která, zjednodušeně řečeno, popisuje, jakým způsobem vnímáme zvuky dopadající z různých úhlů a o různých frekvencích. Této funkci se říká HRTF (*Head Related Transfer Function*). HRTF je pro každého posluchače velmi individuální, protože závisí např. na

- rozměrech hlavy,
- tvaru ušního boltce ad.



Obrázek 1.11: Základní principy lokalizace zvuku (převzato z [26])

Výstupní signál pro poslech v levém uchu s_L resp. pravém uchu s_R poté získáme prostou filtrací signálů z jednotlivých reproduktorů pomocí HRTF a jejich následným součtem, tedy jako (viz [1])

$$\begin{aligned}
 s_L(t) &= \sum_{n=1}^N h_L(t, \varphi, \theta) * s_{LS_n}(t, \varphi, \theta) \\
 &= \sum_{n=1}^N \mathcal{F}^{-1}\{H_L(\omega, \varphi, \theta) \cdot S_{LS_n}(\omega, \varphi, \theta)\},
 \end{aligned} \tag{1.11}$$

kde $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ značí inverzní Fourierovu transformaci, H_L značí HRTF pro levé ucho, h_L značí HRIR (*Head Related Impulse Response*) pro levé ucho, N počet reproduktorů a $*$ operaci konvoluce. Pro pravé ucho bychom dostali analogický předpis, pouze bychom změnili HRIR resp. HRTF z levého ucha na pravé. Jak je vidět ze vztahu (1.11), mezi H_L a h_L platí vztah

$$\begin{aligned}
 H_L(\omega, \varphi, \theta) &= \mathcal{F}\{h_L(t, \varphi, \theta)\} \\
 h_L(t, \varphi, \theta) &= \mathcal{F}^{-1}\{H_L(\omega, \varphi, \theta)\},
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

tedy HRTF a HRIR jsou vzájemně vázány Fourierovou transformací. Přesné principy měření HRTF (resp. HRIR) jdou nad rámec tohoto textu a čtenáři se s nimi mohou seznámit např. v [25] či [26], podrobnější informace o využití HRTF v ambisonickém audio pro sférická videa je možné nalézt např. v [27].

Kapitola 2

Zpracování ambisonického zvuku pro sférická videa

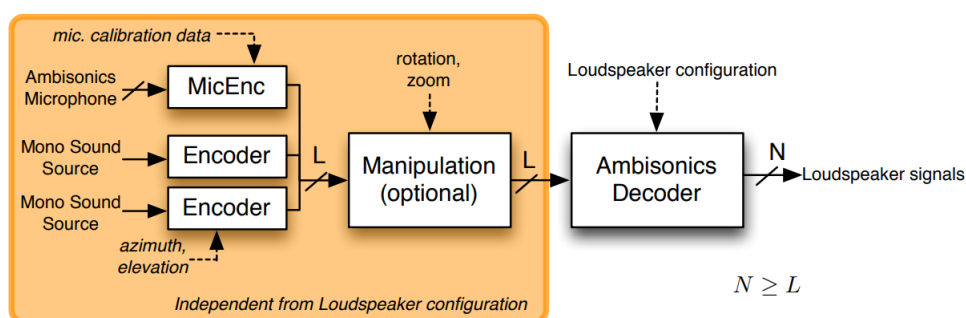
2.1 Proces zpracování ambisonického zvuku

Prostorový zvuk v ambisonii nám dává mnohem větší možnosti postprodukčních úprav, a to hlavně díky přítomnosti vertikální složky zvukového pole. Není proto překvapivé, že proces zpracování ambisonického mixu se bude v mnohém lišit od zpracování klasických mixů (viz [9] či [27]). Bloková struktura celého procesu je znázorněna na obr. 2.1. Je vidět, že při vytváření výsledného ambisonického mixu je třeba brát v potaz, že kromě zvukových dat z ambisonického mikrofonu máme často k dispozici i data z neambisonických zdrojů (např. z klopových mikrofonů, které mají jednotliví aktéři ve sférickém videu). Bohužel data z neambisonických zdrojů neobsahují informace o poloze, proto je potřeba je před dalším zpracováním umístit do zvukového prostoru. K tomuto účelu existuje velké množství pluginů (tzv. ambisonických pannerů), jako např.

- Ambi Pan HD od výrobce Noise Makers (viz [28]),
- Audio360 Spatiliser od Facebook 360 (viz [29]),
- aX Panner od SSA (viz [30]),
- B360 Ambisonics Encoder od Waves (viz [31]),
- 360pan od Audio EASE B.V. (viz [32]),
- O3A Panners od Blue ripple sound (viz [33]) ad.

Všechny výše uvedené pluginy využívají teorie popsané v sekci 1.1, tedy pomocí váhování danými sférickými harmonickými funkcemi na základě zvolené polohy (udané typicky pomocí prostorových úhlů φ a θ a vzdálenosti r - viz obr. 2.2). Řada dostupných pluginů umožňuje pomocí využití automatizace v daném DAW plynulou změnu jednotlivých parametrů - je tedy možné případně „trackovat“ pohyblivé zdroje apod. (detailnější popis této techniky je možné najít v příloze C; dále viz např. [28] či [34]).

Po napolohování jednotlivých neambisonických zdrojů zvuku a vytvoření



$$L_{3D} = (M + 1)^2$$

$$L_{2D} = 2M + 1$$

M... Ambisonics Order

L... Number of Ambisonics Channels

N... Number of Loudspeakers

Obrázek 2.1: Obecná bloková struktura zpracování ambisonických signálů (převzato z [8])

výsledné ambisonické informace v daném formátu dochází k masteringu celého ambisonického mixu - úpravy dynamiky, frekvenční korekce popř. jiné efekty stručně popsané v sekci 1.2. Po kontrole finálního masteru (mně samotnému se osvědčilo master zběžně kontrolovat přes binaurální downmix a po spokojenosti vyexportovat a prohlédnout spojený s daným sférickým videem a v případě problému proces opakovat) je nutné danou ambisonickou stopu vyexportovat a posléze ji spojit s požadovaným sférickým videem - buď pomocí SW `ffmpeg` nebo pomocí libovolné aplikace třetích stran (které ale také využívají `ffmpeg`, jen poskytnou trochu více přívětivější uživatelské prostředí) - za všechny aplikace doporučuji přehlednou aplikaci Audio360 Encoder (jejíž hlavní okno je na obr. 2.3). Tato aplikace umí kromě spojení prostorového audia se sférickým videem přidat do výsledného exportu také metadata, aby mohly přehrávače poznat, že se opravdu jedná o sférická videa (viz [35]). Pokud by metadata nebyla přidána, všechna videa by se zobrazovala v tzv. ekvidistantní válcové projekci - *equirectangular projection* - viz obr. 2.4.

Před spojením sférického videa s ambisonickou zvukovou stopou je ještě nutné si rozmyslet, pro jaké potřeby budu video využívat, protože ne všechny přehrávače jsou kompatibilní se všemi formáty ambisonie. Po zhlédnutí požadavků na prostorový zvuk ve sférických videích u dvou nejtýpčtějších webů pro přehrávání sférických videí - Facebook a YouTube (viz [35] a [36]) je možné zjistit, že jsou podporovány pouze ambisonické soubory prvního řádu¹ (popř. lze ještě přidat head-locked stereo stopu - viz sekce 2.2) ve formátu `ambix` (tzn. SN3D normalizace a pořadí kanálů dle ACN).

¹Facebook ještě podporuje tzv. hybridní ambisonický formát - tzn. 8 (resp. 10 kanálů vč. head-locked stereo stopy).



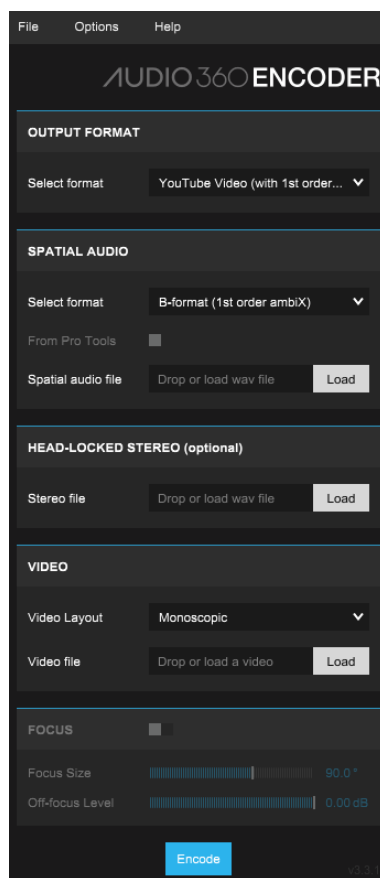
Obrázek 2.2: Detail pluginu Ambi Pan HD

Po úspěšném spojení sférického audia a videa a přidání metadat je možné výsledné video sledovat buď v libovolném přehrávači podporujícím sférická videa (např. VLC) či na VR headsetu - katedra má k dispozici VR headset HTC Vive. Zájemce o práci s tímto VR headsetem odkáží na [37], kde najdou vše potřebné.

2.2 Head-Locked audio

Kromě prostorového zvuku, který bude při sledování sférických videí sledovat naši polohu v prostoru a na jejím základě bude vytvářet daný binaurální downmix, občas potřebujeme i „statický“ zvuk, který bude znít stále stejně, bez vlivu na současnou polohu v prostoru (např. pro komentáře k videu či podkresovou hudbu). K tomuto účelu slouží tzv. head-locked audio stopa. Jedná se typicky o stereofonní stopu, která je umístěna do středu souřadného systému, díky čemuž odpadá její závislost na poloze.

Head-locked stopu můžeme buď přímo přidat k ambisonickému mixu (tzn. vytvoříme a vyexportujeme zvukový soubor, který má o 2 stopy více než ambisonický soubor daného řádu). Tento přístup je sice možný, ale moc se nevyužívá (hlavně z důvodu nekompatibility takovéto stopy s řadou ambisonických pluginů) - mnohem lepší postup je samostatně vyexportovat ambisonický mix ve formátu B a samostatně i head-locked stopu a tyto dvě stopy následně sloučit v libovolném SW, který tuto operaci provádí - za všechny SW dávám příklad již zmiňované aplikace Audio360 Encoder (viz obr. 2.3), která toto sloučení umí provést.



Obrázek 2.3: Hlavní okno aplikace Audio360 Encoder



Obrázek 2.4: Sférické video zobrazené v ekvidistantní válcové projekci (převzato z [38])

Kapitola 3

Implementované pracoviště ambisonie a laboratorní úlohy

3.1 Struktura pracoviště

V rámci bakalářské práce jsem navrhl jednoduché pracoviště ambisonie, jehož bloková struktura je na obr. 3.1. Toto pracoviště se skládá z propojení následujících komponent

- ambisonického mikrofону Sennheiser AMBEO VR Mic,
- mikrofону Neumann KU100 (Dummy head)
- libovolný neambisonický zdroj zvuku (klopový mikrofón, handka ad.),
- mixážního pultu Behringer X32 Compact,
- PC se softwarem Cubase 10 a balíčkem pluginů Ambi Bundle HD.¹

Pracoviště umožňuje zejména

- nahrávání prostorového zvuku pomocí ambisonického mikrofónu,
- zpracování ambisonických mixů v SW Cubase.

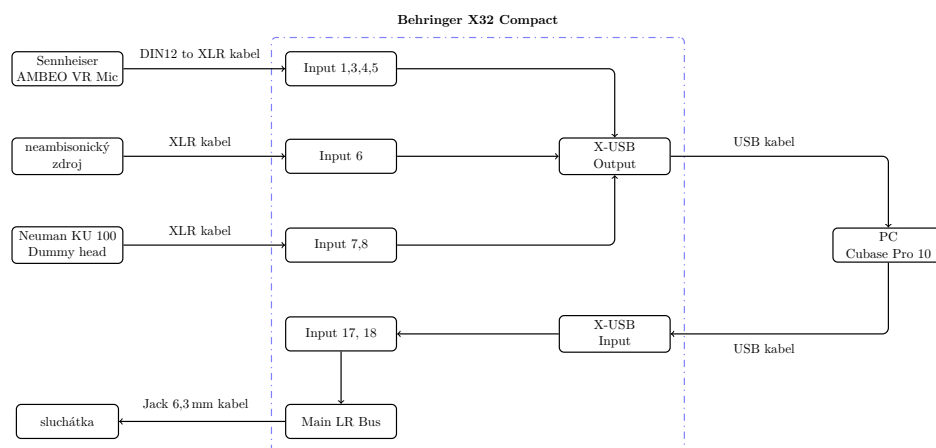
Jednotlivé komponenty pracoviště byly vybrány s ohledem na materiální vybavení katedry radioelektroniky při FEL, ČVUT v Praze, na které pracoviště ambisonie vznikalo. Je ale pravdou, že pracoviště je možné realizovat prakticky s jakoukoliv zvukovou kartou, která umožňuje záznam 4 a více zvukových stop (nejlépe s digitálně nastavitelným ziskem vstupního předzesilovače).

Podrobný návod pro použití pracoviště, zapojené v konfiguraci z obr. 3.1, je v příloze C, fotografie pracoviště jsou na obr. 3.2.

¹Pro řešení některých z laboratorních úloh na pracovišti ambisonie je dále potřeba

- balíček pluginů Audio360,
- SW MATLAB,
- SW VVMic,
- SW Viveport Video.

Tento software ale neřadím do „základní výbavy“ pracoviště, neboť pracoviště případně může fungovat i bez nutnosti instalace tohoto SW.



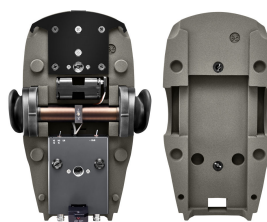
Obrázek 3.1: Obecná bloková struktura ambisonického pracoviště

3.1.1 Funkce mikrofonu Dummy head Neumann KU100

Mikrofon Dummy head Neumann KU100 je stereofonní mikrofon, který umožňuje nahrávat velmi věrné zachycení binaurálního obrazu zvukového pole (pro dané natočení mikrofonu). Věrnosti binaurálního zachycení je dosaženo pomocí dvou kondenzátorových mikrofonních kapslí s kulovou směrovou charakteristikou, jejichž umístění v podstatě simuluje lidské uši - jednotlivé kanály nahrávky tedy v podstatě odpovídají signálům, které by přicházely na pravé a levé ucho „skutečného posluchače“, který by stál na místě mikrofonu². Nevýhodou tohoto mikrofonu je jeho velká cena, která se pohybuje okolo Kč 200 000,-.



(a) : Vzhled mikrofonu Dummy head Neumann KU100



(b) : Pohled na vnitřek mikrofonu Dummy head Neumann KU100

Obrázek 3.3: Mikrofon Dummy head Neumann KU100 (převzato z [40])

²Samozřejmě toto je velmi velké zjednodušení, v naprosto obecném případě se musí počítat s tím, že každý člověk má rozdílné HRTF.

■ 3.2 Laboratorní úlohy

K vytvořenému pracovišti ambisonie jsem v rámci bakalářské práce navrhl i sadu laboratorních úloh. Přesné znění úloh je možné vidět v příloze D. Jednotlivé laboratorní úlohy jsem se snažil volit tak, aby vždy popisovaly jednu z částí ambisonického zpracování (nahrávání, polohování neambisonických zvuků, mastering ad.) a byly na sobě téměř vzájemně nezávislé - z toho důvodu je u každé laboratorní úlohy podrobný teoretický rozbor, ve kterém jsou řešitelé seznámeni s potřebnými základy ambisonické teorie a s popisem použitých pluginů.

V následujících oddílech shrnu stručný obsah, přínosy, použité pluginy a vytvořené materiály pro jednotlivé laboratorní úlohy. Není-li uvedeno jinak, jedná se o materiály, které jsem sám pro potřeby laboratorních úloh vytvářel.

■ 3.2.1 Ambisonický mikrofon

První úloha seznamuje řešitele s ambisonickým mikrofonem - principem jeho funkce a možnostmi nahrávání. Dále se věnuje binaurálnímu dekódování ambisonie s využitím HRTF v pluginu Ambi Head. Výstupem úlohy je vyexportovaná stereofonní zvuková stopa, která odpovídá výstupnímu signálu z ambisonického mikrofonu pro dané natočení virtuální hlavy.

Pro realizaci laboratorní úlohy je zapotřebí

- ambisonický mikrofon Sennheiser AMBEO VR MIC,
- mixážní pult Behringer X32 Compact s USB audio rozhraním,
- DAW Cubase Pro 10 s pluginy
 - AMBEO A-B converter plugin,
 - AMBI Head HD.

Konkrétní návod k laboratorní úloze je v příloze D.1. V datové příloze k laboratorní úloze se nachází soubory

- LP01.cpr resp. LP01_ELEM.cpr - šablona projektu pro SW Cubase³,
- Ambisonics.scn - šablona pro mixážní pult Behringer X32 Compact,
- LP01_ambi_A_format.wav - vzorová ambisonická nahrávka ve formátu A.

Ambisonickou nahrávku lze využít k řešení postprodukční části laboratorní práce, pokud řešitel nebude mít k dispozici ambisonický mikrofon a nebude tak schopný vytvořit ambisonickou nahrávku.

³U každé laboratorní úlohy využívající se SW Cubase se ještě nachází projekt LPXX_ELEM.cpr. Tento projekt slouží pro otevření na „omezených“ verzích Cubase - viz 3.3.

■ 3.2.2 Polohování neambisonických stop a beamforming

Druhá úloha seznamuje řešitele s možnostmi polohování neambisonických stop pomocí pluginu Ambi Pan. Následně se řešitel pokusí o přesně opačnou úlohu - z ambisonického mixu oddělit jednotlivé zvukové zdroje (hudební nástroje) pomocí principu beamformingu v SW VVMic. Výstupem z první části úlohy je ambisonický mix, který je možné nasadit k přiloženému sférickému videu, výstupem z druhé části úlohy je poté několik monofonních souborů s jednotlivými nástroji.

Pro realizaci laboratorní úlohy je zapotřebí

- DAW Cubase Pro 10 s pluginem Ambi Pan HD,
- SW VVMic.

Podrobný návod k úloze je v příloze D.2. V datové příloze k laboratorní úloze se nachází soubory

- LP02.cpr resp. LP02_ELEM.cpr - šablona projektu pro SW Cubase,
- LP02_spherical_video.mp4 - sférické video pro polohování zdrojů zvuku,
- LP02_beamforming.wav - soubor s ambisonickým mixem ve formátu B pro beamforming,
- LP02_LS_feeds - složka se zvukovými soubory pro „buzení reproduktorů“ (zvukové soubory jsem převzal z volně přístupné databáze zvukových samplů),
- LP02_default_files - složka s původními zvukovými soubory, ze kterých vznikl ambisonický mix pro beamforming (vč. MONO downmixu ambisonického mixu).

■ 3.2.3 Mastering audia pro sférická videa

Ve třetí úloze se řešitelé seznámí s možnostmi masteringu v ambisonii a přidáním jednoduchých efektů (reverb, limiter ad.). Dále se úloha věnuje spojení sférického videa s ambisonickým audiem a přidáním metadat (přes plugin Audio360 Encoder). Výstupem z úlohy je sférické video s přidáním prostorovým audiem (vč. head-locked stopy), které je možné zhlédnout na brýlích pro VR (např. VR headset HTC Vive).

Pro realizaci laboratorní úlohy je zapotřebí

- DAW Cubase Pro 10 s pluginy
 - AMBI Verb HD,
 - AMBI Limiter HD,
- plugin Audio360 Encoder,

- VR headset HTC Vive.

Laboratorní práci je případně možné absolvovat i bez VR headsetu (výstupní sférická videa lze přehrát např. v přehrávači VLC). Podrobný návod k úloze je v příloze D.3.

V datové příloze k laboratorní úloze se nachází soubory

- LP03.cpr resp. LP03_ELEM.cpr - šablona projektu pro Cubase,
- LP03_spherical_video.mp4 - sférické video (převzato z [41]),
- LP03_ambi_B_mix.wav - ambisonický mix ve formátu B (převzato z [42]),
- LP03_head_locked.wav - head-locked stopa (převzato z ukázek hudby pro Windows),
- LP03_IR - složka s impulzovými odezvami pro plugin Ambi Verb HD (převzato z [43] a [44]).

■ 3.2.4 Ambisonie vyšších řádů a kvalita binaurální reprodukce

Čtvrtá úloha uvede řešitele do problematiky ambisonie vyšších řádů. Náplní úlohy je porovnání výstupů z ambisonického mikrofonu, dummy head a neambisonického zdroje (zakódovaného do ambisonie prvního, druhého a třetího řádu). Následně je zkoumán vliv HRTF na výstupní signál. Výstupem z úlohy je několik stereofonních signálů, které odpovídají výstupům z ambisonického mikrofonu popř. napolohovanému neambisonickému zdroji pro dané natočení hlavy či samotnému výstupu z mikrofonu Neumann KU100 (dummy head).

Pro realizaci laboratorní úlohy je zapotřebí

- ambisonický mikrofon Sennheiser AMBEO VR MIC,
- libovolný neambisonický zdroj zvuku,
- Dummy head Neumann KU100,
- mixážní pult Behringer X32 Compact s USB audio rozhraním,
- DAW Cubase Pro 10 s pluginy
 - AMBEO A-B converter plugin,
 - AMBI Pan HD,
 - AMBI Head HD.

Podrobný návod k úloze je v příloze D.4. V datové příloze k laboratorní úloze se nachází soubory

- LP04.cpr resp. LP04_ELEM.cpr - šablona projektu pro Cubase,
- Ambisonics.scn - šablona pro mixážní pult Behringer X32 Compact,

- LP04_ambi_A_format.wav - ambisonický zvuk ve formátu A,
- LP04_nonAmbi_source.wav - neambisonický zdroj zvuku,
- LP04_dummy_head.wav - záznam z mikrofону Dummy head Neumann KU100,
- LP04_HRTF - složka s HRTF ve formátu SOFA pro plugin Ambi Head HD (převzato z [45]).

Vzorové nahrávky jsem převzal z nahrávání ke cvičení předmětu B0M37TAV (nahráváno Ing. Františkem Rundem, Ph.D.). Tyto nahrávky lze využít k řešení postprodukční části laboratorní práce, pokud řešitel nebude mít k dispozici ambisonický mikrofón či Dummy head a nemohl by tak provést daný záznam.

■ 3.2.5 Matematická podstata ambisonie

V páté úloze se řešitelé seznámí s matematickou podstatou ambisonie a v SW MATLAB se pokusí o implementaci jednoduchých funkcí pro realizaci ambisonického enkodéru a dekodéru a převodníku mezi ambisonickým formátem A a B. Výstupem z úlohy je možnost provést jednoduché zpracování ambisonie v SW MATLAB (jinými slovy se vlastně jedná o implementaci jednoduchých variant pluginů použitých v předchozích laboratorních úlohách).

Pro realizaci laboratorní úlohy je zapotřebí pouze PC se SW MATLAB. Podrobný návod k úloze je v příloze D.5. V datové příloze k laboratorní úloze se nachází soubory

- Spherical_harmonics_single.m - skript na vykreslování sférických harmonických funkcí (dle zadaného řádu a stupně),
- Spherical_harmonics_multi.m - skript na vykreslování sférických harmonických funkcí (všechny do udaného řádu)⁴
- LP05_ambi_A_format.wav - ambisonický zvuk ve formátu A,
- LP05_nonAmbi_source.wav - neambisonický monofonní zdroj zvuku (převzato z volně přístupné databáze zvukových samlů),
- LP05_ambi_FINAL.wav - výstupní soubor pro ověření správnosti realizace jednotlivých funkcí,
- plotter.m - funkce na vykreslování výsledného obrázku pro skript Spherical_harmonics_multi.m
- Solved - složka se vzorovým řešením jednotlivých funkcí z návodu k laboratorní úloze

⁴Výstupy vypadají nejlépe, pokud jsou zobrazeny sférické harmonické funkce nejvýše do 3. řádu. Pro vyšší řády je výsledný obrázek nepřehledný, proto je ve skriptu zakázáno jejich vykreslování.

- `ambiConvert.m` - převodník mezi ambisonickým formátem typu A a B,
 - `ambiLS.m` - funkce pro výpočet signálů pro virtuální reproduktory
 - `ambiPan.m` - ambisonický panner,
 - `ambiRotate.m` - rotace zvukového pole kolem jednotlivých souřadných os,
 - `normalise.m` - normalizace dle standardu SN3D.
- `Function_skeletons` - složka s kostrami funkcí pro implementaci v praktické části laboratorní úlohy (obsah stejný jako u složky `Solved`).

Kódy vytvořených skriptů a funkcí jsou také v příloze B (bez bližšího slovního popisu, neboť považuji přidané komentáře v jednotlivých funkcích a skriptech za dostatečně vysvětlující).

3.3 Problémy při implementaci a jejich řešení

Při realizaci ambisonického pracoviště jsem samozřejmě narazil na několik problémů, kterým jsem musel čelit. Rozhodl jsem se zde uvést dva největší problémy (vč. jejich řešení), které měly vliv na současnou podobu pracoviště (ovlivnění výběru pluginů, použitého SW a zvukové karty) a dále jsem si dovilil přidat zmínku o kompatibilitě vytvořených vzorových projektů s „omezenými“ verzemi Cubase (AI).

■ Využití SW DaVinci Resolve

V původním návrhu pracoviště ambisonie jsem uvažoval o využití volně dostupného softwaru DaVinci Resolve od firmy Blackmagic Design. Protože tento SW nepodporuje audio pluginy ve formátu VST3 (což je formát, ve kterém je dostupný např. Spatial workstation od Audio 360), musel jsem zvolit takový balíček, který je distribuován ve formátu VST, a tak padla volba na poměrně přehledný balíček pluginů od firmy Noise Makers, se kterými jsem celý proces zpracování odzkoušel na svém domácím PC.

Při samotném zprovoznění v laboratoři ale došlo k problémům s poměrně náročnými softwarovými požadavky SW DaVinci Resolve, a tak jsem místo SW DaVinci Resolve využil SW Cubase od firmy Steinberg (a to z toho důvodu, že katedra má k dispozici licenci k tomuto programu). Zde odpadl problém s pluginy ve formátu VST3, ale z toho důvodu, že jsem již celý proces odzkoušel s pluginy od firmy Noise Makers a byl jsem s jejich použitím spokojen, rozhodl jsem se je používat i nadále.

■ Kalibrace pracoviště a rozhraní zvukové karty

V původním návrhu ambisonického pracoviště jsem pracoval se zvukovou kartou RME Fireface 800. Výhodou tohoto výběru byla poměrně vysoká variabilita pracoviště - tj. nebylo těžké pracoviště sestavit prakticky

kdekoliv. Po několika pokusech jsem však zjistil dva velké problémy tohoto přístupu, a to

- komunikace zvukové karty přes rozhraní FireWire,
- nemožnost digitálního nastavení úrovní vstupních předzesilovačů.

První bod je zmíněn hlavně z důvodu absence FireWire portu na mnoha moderních počítačích (kdy je FW rozhraní nahrazováno více rozšířeným USB rozhraním). Toto ale není hlavní problém, neboť existuje mnoho převodníků mezi oběma rozhraními.

Jako mnohem větší problém se nakonec ukázal druhý bod, tedy nemožnost digitálního nastavení úrovní předzesilovačů, neboť správné nastavení úrovní je velmi důležité kvůli zachování prostorové informace - pokud by byly úrovně vstupních předzesilovačů nastaveny na každém z kanálů ambisonického mikrofону jinak, došlo by k nerovnoměrnému zesílení signálu z jednotlivých mikrofonních kapslí, což by dle vztahu (1.7) samozřejmě mělo vliv na zkreslení prostorové informace. Z tohoto důvodu jsem se po konzultaci s vedoucím rozhodl zvukovou kartu RME Fireface 800 nahradit mixážním pultem Behringer X32 Compact s USB zvukovým rozhraním, který má katedra k dispozici. Užitím tohoto mixážního pultu a jeho USB zvukového rozhraní odpadl problém s digitálním řízením úrovní vstupních předzesilovačů, což samozřejmě částečně napomohlo zvýšit věrnost zaznamenané prostorové informace. Na druhou stranu toto opatření vedlo k tomu, že pracoviště ztratilo možnost snadného „přenosu“, což dle mého názoru není až takový problém.

■ Využití SW Cubase AI

Při návrhu laboratorních úloh se počítalo s jejich využitím během výuky, tedy aby na jedné laboratorní úloze případně mohlo pracovat více studentů zároveň. Z tohoto důvodu jsem ke každé úloze (kde je to zapotřebí) přidal vzorové nahrávky, které se mohou použít při nedostupnosti ambisonického mikrofону apod. Toto by tedy nebyl až takový problém. Při zkoušení jednotlivých Cubase projektů v učebně T2:B3-554 jsem však narazil na jiný problém, a to s dostupnými verzemi SW Cubase - na několika počítačích je verze Cubase AI 10, na zbytku je verze Cubase AI 9 (kvůli dostupným licencím). Po testu na PC s Cubase AI 10 jsem nenarazil na větší problémy (pouze jsem musel trochu upravit projekty tak, aby vyhovovaly podmínkám „omezené“ verze Cubase - tedy přesunul jsem pluginy do PRE-FADE INSERT stop, neboť ve „omezené“ AI verzi je možné mít pouze 4 PRE-FADE INSERTy - z tohoto důvodu je u každé laboratorní úlohy ještě verze projektu LPXX_ELEM.cpr, která již zahrnuje zmíněné posunutí pluginů).

Při zkoušce na Cubase AI 9 jsem však zaznamenal větší problémy - v této verzi totiž neexistuje 1st/2nd/3rd ambisonics stopa, kterou využívám u vzorových projektů a při zběžném prohlédnutí se mi nepodařila najít

náhrada za tyto stopy. Z tohoto důvodu musím prohlásit že **SW Cubase AI 9** dostupný v učebnách **není vhodný pro práci s ambisonií**.



(a) : Část pracoviště s mixpultem a PC



(b) : Část pracoviště s ambisonickým mikrofonem a dummy head

Obrázek 3.2: Pohledy na pracoviště ambisonie



Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit pracoviště ambisonie pro katedru radioelektroniky FEL, ČVUT v Praze a vymyslet několik laboratorních úloh, které budou demonstrovat základní práci s pracovištěm se zaměřením na sférická videa.

Když se nyní za celou práci ohlédnu, tak musím říct, že i přes prvotní problémy, například s kalibrací pracoviště či s výběrem použitých pluginů a jejich kompatibilitou s použitým DAW (které se mi z větší části podařilo vyřešit již v bakalářském projektu) jsem vytyčené cíle práce naplnil a navržené pracoviště je funkční a je možné zpracovávat a exportovat ambisonickou zvukovou stopu, která je kompatibilní se současnými normami pro sférická videa (například pro YouTube či Facebook). Funkčnost pracoviště také dokládá jeho částečné využití v rámci cvičení předmětu B0M37TAV. Hardwarová část implementovaného pracoviště je v současné době tvořena

- ambisonickým mikrofonom Sennheiser AMBEO VR MIC,
- Dummy Head Neumann KU100,
- mixážním pultem Behringer X32 Compact,
- VR headsetem HTC Vive,
- PC,

softwarová část pracoviště je poté tvořena

- SW Cubase Pro 10,
- pluginem AMBEO A-B Convertor,
- balíčkem pluginů Ambi Bundle od Noise Makers,
- balíčkem pluginů Audio360 od Facebook360,
- SW MATLAB,
- SW VVMic.

Co se týká laboratorních úloh, tak zde si myslím, že je rozhodně přínosem, že v kostce shrnují základní princip procesu zpracování ambisonického zvuku pro sférická videa, včetně náznaku matematické podstaty ambisonie v SW MATLAB. Je pravdou, že by možná bylo pro příště dobré ještě více zmínit další užití ambisonie, jako například beamforming ad. Na druhou stranu, přínos beamformingu je významnější u mikrofonů pro ambisonii vyšších řádů (jako např. Eigenmike), které jsem bohužel neměl, vzhledem k jejich ceně, při řešení práce k dispozici.

I přes výše zmíněné nedostatky si ale myslím, že všechny cíle vytyčené v zadání práce byly splněny a věřím, že navržené pracoviště ambisonie najde uplatnění - ať už při výuce, vědecké činnosti či jakékoliv jiné práci spojené s ambisonií.



Literatura

- [1] Ambisonics. *Media Arts and Technology: University of California, Santa Barbara* [online]. [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <http://w2.mat.ucsb.edu/240/D/notes/Ambisonics.html>
- [2] ARTEAGA, Daniel. Introduction to Ambisonics. In: *ResearchGate: Share and discover research* [online]. June 2018 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280010078_Introduction_to_Ambisonics
- [3] KRONLACHNER, Matthias a Franz ZOTTER. Spatial transformations for the enhancement of Ambisonic recordings. In: *ResearchGate: Share and discover research* [online]. 2014 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/262826740_Spatial_transformations_for_the_enhancement_of_Ambisonic_recordings
- [4] NACHBAR, Christian, Franz ZOTTER, Etienne DELEFLIE a Alois SONTACCHI. *AMBIX- A suggested ambisonics format* [online]. 2011 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://iem.kug.ac.at/fileadmin/media/iem/projects/2011/ambisonics11_nachbar_zotter_sontacchi_deleflie.pdf
- [5] YUE, Cedric a Teun DE PLANQUE. 3-D Ambisonics Experience for Virtual Reality. In: *EE267: Virtual Reality* [online]. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: https://web.stanford.edu/class/ee267/Spring2017/report_yue_planque.pdf
- [6] CHAPMAN, Michael a Philip COTTERELL. Towards a Comprehensive Account of Valid Ambisonic Transformations. In: *Ambisonics Symposium 2009* [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: https://iaem.at/ambisonics/symposium2009/proceedings/ambisym09-chapmancotterel-ambitransformations.pdf@@download/file/AmbiSym09_ChapmanCotterel_AmbiTransformations.pdf
- [7] Eigenbeam Data: Specification for Eigenbeams. In: *MH acoustics* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://mhacoustics.com/sites/default/files/Eigenbeam%20Datashheet_R01A.pdf

- [8] OKAMOTO, T., Y. IWAYA, S. SAKAMTO a Y. SUZUKI. Implementation of higher order Ambisonics recording array with 121 microphones. In: *Takuma OKAMOTO, Ph.D.* [online]. 2010 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.okamotocamera.com/soim10.pdf>
- [9] BATES, Enda a Francis M. BOLAND. Spatial Music, Virtual Reality, and 360 Media. In: *Audio Engineering Society* [online]. September 21, 2016 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18496>
- [10] HOA TECHNICAL NOTES - B-FORMAT ROTATION. *Blue ripple sound* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.blueripplesound.com/rotations>
- [11] *Sennheiser AMBEO VR MIC - Microphone 3D AUDIO capture* [online]. [cit. 2019-01-23]. Dostupné z: <https://en-us.sennheiser.com/microphone-3d-audio-ambeco-vr-mic>
- [12] Recording Native B-format. *Ambisonic Info* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://ambisonic.info/practical/recording.html>
- [13] A-format to B-format conversion. *Ambisonics Pages by Angelo Farina* [online]. [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/B-format/A2B-conversion/A2B.htm>
- [14] SoundField SPS200 Software Controlled Microphone. *SoundField: Microphones and Processors with unique surround capabilities* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.soundfield.com/#/products/sps200>
- [15] Neve VR - ambisonic microphone. *Neve* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://neve.com/product/neve-vr-ambisonic-microphone/>
- [16] RODE Microphones - NT-SF1. *RODE Microphones* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.rodemicrophones.com/microphones/ntsf1>
- [17] 8 capsule 2nd Order ambisonic mic. *Brahma Microphones: Versatile ambisonic recording systems* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://brahmamic.com/products/2nd-order/>
- [18] ZYLIA ZM-1 microphone. *ZYLIA* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://www.zylia.co/zylia-zm-1-microphone.html>
- [19] Ambisonic Studio: Fifth Order Planar B-Format Encoding and Decoding. *Radio UQAM* [online]. 2018 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <http://www.radio.uqam.ca/ambisonic/5b.html>
- [20] Ambisonics Component Ordering. *Audiokinetic* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: https://www.audiokinetic.com/fr/library/edge/?source=Help&id=ambisonics_channel_ordering

- [21] ORTOLANI, Francesca a Aurelio UNCINI. A new approach to acoustic beamforming from virtual microphones based on ambisonics for adaptive noise cancelling. *2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* [online]. IEEE, 2016, 2016, , 337-342 [cit. 2019-05-07]. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493080. ISBN 978-1-5090-1431-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7493080/>
- [22] VVMic. *VVAudio* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vvaudio.com/products/VVMic>
- [23] Ambisonic Localisation - Part 2. In: *Aaron J. Heller: Home page* [online]. [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: <http://www.ai.sri.com/ajh/ambisonics/BLaH2.pdf>
- [24] The multi-multi-channel surround environment of Arup SoundLab puts Ambisonics into action. *SonicScoop* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://sonicscoop.com/2012/02/20/be-lou-reed-for-64-minutes-how-3d-sound-met-metal-machine-music/arup-soundlab/>
- [25] HRTF - Introduction. In: *Ramani Duraiswami* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: http://users.umiacs.umd.edu/~ramani/cmssc828d_audio/HRTF_INTR0.pdf
- [26] ŠTOREK, Dominik. *Source localization by virtual acoustic reality*. Praha, 2016. Disertační práce. ČVUT FEL.
- [27] RUMSEY, Francis. Virtual reality: Mixing, rendering, believability. In: *ResearchGate: Share and discover research* [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/316474529_Virtual_reality_mixing_rendering_believability
- [28] Ambi Manual. In: *Noise Makers* [online]. [cit. 2019-01-23]. Dostupné z: <https://www.noisemakers.fr/Downloads/AmbiManual.pdf>
- [29] Spatial workstation. *Facebook 360 video* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://facebook360.fb.com/spatial-workstation/>
- [30] AXPanner. *SSA Plugins* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.ssa-plugins.com/product/aXPanner/>
- [31] B360 Ambisonics Encoder Plugin. *Waves Audio: Mixing, Mastering & Music Production Tools* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.waves.com/plugins/b360-ambisonics-encoder>
- [32] Audio Ease 360pan suite. *Audio Ease: awesome software for music and sound pros* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.audioease.com/360/>

- [33] O3A Core. *Blue Ripple Sound* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.blueripplesound.com/products/o3a-core>
- [34] Cubase Operation Manual. *Steinberg user manuals* [online]. [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: https://steinberg.help/cubase_pro_artist/v10/en/
- [35] Jak můžu nahrát 360 video. *Centrum nápovědy na Facebooku* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/help/828417127257368>
- [36] Use spatial audio in 360-degree and VR videos. *YouTube Help* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://support.google.com/youtube/answer/6395969?hl=en>
- [37] VIVE Virtual reality system. *VIVE: Discover Virtual Reality Beyond Imagination* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vive.com/us/product/vive-virtual-reality-system/>
- [38] Immersive images combining: Phenomenon and Body Of Water. *360 player* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://360player.io/immersive/body-of-water/phenomenon/1/>
- [39] X32 Compact Digital Mixer: User manual. In: *Behringer* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://media63.musictribe.com/media/PLM/data/docs/POAAP/X32-COMPACT_M_EN.pdf
- [40] Neumann Dummy head KU100. *Neumann.Berlin* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://en-de.neumann.com/ku-100>
- [41] 360/VR Master Series | Free Download | Crystal Shower Falls. *Vimeo* [online]. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://vimeo.com/215984159>
- [42] Harpex - Examples. *Harpex* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://harpex.net/examples.html>
- [43] Aachen Impulse Response database. *IKS: Institute of Communication Systems* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.iks.rwth-aachen.de/fileadmin/user_upload/downloads/forschung/tools-downloads/air_database_release_1_4.zip
- [44] Room Impulse Response Data Set. *Isophonics* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://isophonics.net/content/room-impulse-response-data-set>
- [45] ARI HRTF Database. *Sofaconventions* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://sofacoustics.org/data/database/ari/>

Příloha A

Struktura přiloženého DVD

```
/
├── Bakalarska_prace.pdf
├── Laboratorni_ulohy
│   ├── LP01
│   │   ├── LP01_Data.zip
│   │   ├── LP01_LaTeX_files.zip
│   │   └── LP01_pracovni_list.pdf
│   ├── LP02
│   │   ├── LP02_Data.zip
│   │   ├── LP02_LaTeX_files.zip
│   │   └── LP02_pracovni_list.pdf
│   ├── LP03
│   │   ├── LP03_Data.zip
│   │   ├── LP03_LaTeX_files.zip
│   │   └── LP03_pracovni_list.pdf
│   ├── LP04
│   │   ├── LP04_Data.zip
│   │   ├── LP04_LaTeX_files.zip
│   │   └── LP04_pracovni_list.pdf
│   └── LP05
│       ├── LP05_Data.zip
│       ├── LP05_LaTeX_files.zip
│       └── LP05_pracovni_list.pdf
├── Sablony
│   ├── Cubase
│   │   ├── Ambisonics_1st_order.cpr
│   │   ├── Ambisonics_1st_order_ELEM.cpr
│   │   ├── Ambisonics_2nd_order.cpr
│   │   └── Ambisonics_2nd_order_ELEM.cpr
│   └── Behringer_X32_Compact
│       └── Ambisonics.scn
├── Navod_k_pracovisti
│   ├── Navod_k_pracovisti_LaTeX_files.zip
│   └── Navod_k_pracovisti.pdf
```


Příloha B

Vytvořené kódy v SW MATLAB

V následujících sekcích této přílohy jsou zdrojové kódy pro vytvořené skripty a funkce v SW MATLAB. Jednotlivé kódy nechávám bez bližšího slovního popisu, neboť považuji přidané komentáře v jednotlivých funkcích a skriptech za dostatečně vysvětlující. Jenom doplním, že při implementaci předpokládám, že audio vzorky budou ve formě sloupcových vektorů (tj. v jednom sloupci se pod sebou nacházejí všechny ambisonické kanály pro jeden vzorek).

B.1 Skripty

B.1.1 Spherical harmonics single

Kód B.1: Skript Spherical_harmonics_single.m

```
1 %% Script for computing spherical harmonics (NEED PATH TO
  FUNCTION NORMALISE!!!)
2 close all; clear; clc;
3
4 %% Get data
5 delta_ph = pi/100; %angle step
6 az = -pi:delta_ph:pi; %azimuth
7 alt = -pi/2:delta_ph:pi/2; %altitude (elevation)
8 [phi, theta] = meshgrid(az, alt); %2D grid of parameters (
  azimuth and altitude)
9
10 %% USER INPUT
11 l = -5; %polynomial order
12 m = 13; %polynomial degree
13
14 %% Calculate Legendre polynomials
15 % Compute legendre polynomial and select only the desired one
  (based on prameters l and m)
16 % MATLAB uses Cordon-Shortley phase  $(-1)^m$  by definition,
  but this parameter does
17 % not have an influence on the shape of spherical harmonic
```

```

18
19 if l<0
20     l=0;
21     fprintf('Doslo ke zmene parametru l, nyi je l = %d.\n',
22             l);
23 end
24 Plm = legendre(l, sin(theta));
25
26 % Check user input (no negative l and m>l)
27 if l==0 && m==0
28     P = 1;
29 elseif l==0 && m~=0
30     m = l;
31     fprintf('Doslo ke zmene parametru m, nyi je m = %d.\n',
32             m);
32     P = 1;
33 elseif m>l %case when m>l and l!=0
34     m = l;
35     fprintf('Doslo ke zmene parametru m, nyi je m = %d.\n',
36             m);
36     P = reshape(Plm(abs(m)+1, :, :), size(phi)); %reshape to
37     find desired polynomial
37 else
38     P = reshape(Plm(abs(m)+1, :, :), size(phi));
39 end
40
41 %% Calculate normalisation and desired spherical harmonics
42
43 % Get normalization factor (SN3D)
44 norm = normalise(l,m);
45
46 %Compute desired spherical harmonic
47 if m<0
48     Y = norm.*P.*sin(abs(m)*phi);
49 else
50     Y = norm.*P.*cos(abs(m)*phi);
51 end
52
53 %% Plot spherical harmonic and compute its ACN
54 ACN = l.^2+l+m; %ACN number
55 [x,y,z] = sph2cart(phi, theta, abs(Y)); % transform spherical
56     coordinates to carthesian
57
58 %Plot desired spherical harmonic
59 figure

```

```

59 surf(x,y,z);
60 axis equal;
61 view(140,20); %default azimuth and altitude
62 xlabel('x');
63 ylabel('y');
64 zlabel('z');
65 title(sprintf('$Y_{%d}^{%d}$ spherical harmonic (ACN = %d)',
    1, m, ACN), 'interpreter', 'latex');

```

B.1.2 Spherical harmonics multi

Kód B.2: Skript Spherical_harmonics_multi.m

```

1  %% Script for plotting all spherical harmonics to order l (
    NEED PATH TO FUNCTION NORMALISE AND PLOTTER !!!)
2  close all; clear; clc;
3
4  %% Get data
5  delta_ph = pi/100; %angle step
6  az = -pi:delta_ph:pi; %azimuthal angle
7  alt = -pi/2:delta_ph:pi/2; %altitude (elevation) angle
8  [phi, theta] = meshgrid(az, alt); %2D grid of parameters (
    azimuth and altitude)
9
10 %% USER INPUT
11 max_l = 3; %spherical harmonic order (best results for max_l
    <=3)
12
13 %% Computing and plotting the spherical harmonics up to order
    max_l
14 % Checking, if the spherical harmonic order is plotable (not
    too high or
15 % negative)
16
17     if max_l>3
18         fprintf('Prilis velky rad, zkuste zmensit rad (<= 3)
    ci zobrazit\njen nejake z harmonickych pomoci pluginu\n"
    Spherical_harmonics_signle"!\n');
19         max_l=-1;
20     elseif max_l<0
21         fprintf('Chybne zadani parametru. Zkuste to znovu.\n'
    );
22     else
23         ACN = 0;
24         figure;
25     end

```

```

26
27 % Calculating the Legendre polynomial and reshaping it for
    current degree
28 % and order
29
30 for l=0:max_l
31     Plm = legendre(l, sin(theta));
32     if l==0
33         Y = 1;
34         m=0;
35         ACN = plotter(phi, theta, Y, ACN, l, m, max_l); %
    plotting the spherical harmonic
36     else
37         for m=-1:l %spherical harmonic degree
38             P = reshape(Plm(abs(m)+1, :, :), size(phi));
39             norm = normalise(l,m); %SN3D normalisation
40
41             if m<0
42                 Y = norm.*P.*sin(abs(m)*phi);
43             else
44                 Y = norm.*P.*cos(abs(m)*phi);
45             end
46
47             ACN = plotter(phi, theta, Y, ACN, l, m, max_l);
48         end
49     end
50 end

```

B.2 Funkce

B.2.1 ambiConvert

Kód B.3: Funkce ambiConvert.m

```

1 function [B_form] = ambiConvert(A_form)
2 %% AMBICONVERT - conversion from ambisonics A format to
    ambisonics B format
3 %
4 % Input parameters:
5 %   A_form - input signal in ambisonics A format (1st
    order)
6 %
7 % Output parameters:
8 %   B_form - output signal in ambisonics B format (1st
    order)

```



```

9
10 %% FUNCTION IMPLEMENTATION
11 % Define conversion matrix
12 conv_mat = [1 1 1 1; 1 1 -1 -1; 1 -1 1 -1; 1 -1 -1 1];
13
14 % Get the output signal
15 B_form = conv_mat*A_form;
16 end

```

■ B.2.2 ambiLS

Kód B.4: Funkce ambiLS.m

```

1 function [LS_feed] = ambiLS(B_form, phi, theta, N)
2 %% AMBILS - compute virtual loudspeaker feeds (Max-re)
3 %
4 % Input parameters:
5 % B_form - input signal in ambisonics B format (1st
6 % phi - azimuth of loudspeaker
7 % theta - elevation of loudspeaker
8 % N - number of virtual loudspeakers
9 %
10 % Output parameters:
11 % LS_feed - signal for selected loudspeaker
12
13 %% FUNCTION IMPLEMENTATION
14 % Get constants and transform degrees to radians
15 n = 1/sqrt(N);
16 az = deg2rad(phi);
17 elev = deg2rad(theta);
18
19 % Define transform matrix
20 D = [n n*(sqrt(3/2)*cos(az)*cos(elev)) n*(sqrt(3/2)*sin(
21 az)*cos(elev)) n*(sqrt(3/2)*sin(elev))];
22
23 % Get the output signal
24 LS_feed = D*B_form;

```

B.2.3 ambiPan

Kód B.5: Funkce ambiPan.m

```

1 function [ambi_out] = ambiPan(s, phi, theta)
2
3     %% AMBIPAN - ambisonics panner of MONO sources for 1st
4     order ambisonics
5     %
6     % Input parameters:
7     %   s - input signal
8     %   phi - azimuth
9     %   theta - elevation
10    %
11    % Output parameters:
12    %   ambi_out - ambisonics audio in B format
13
14    %% FUNCTION IMPLEMENTATION
15
16    % Get normalisation factor for 1st order ambisonics
17    norm_coeff_SN3D = normalise(1,0); %normalising factor is
18    equal for all spherical harmonics with order 1
19    s = s';
20
21    % Compute desired spherical harmonics and output signal
22    W = s;
23    X = s.*cos(phi).*cos(theta)*norm_coeff_SN3D;
24    Y = s.*sin(phi).*cos(theta)*norm_coeff_SN3D;
25    Z = s.*sin(theta)*norm_coeff_SN3D;
26
27    % Get output signal
28    ambi_out = [W X Y Z]';
29 end

```

B.2.4 ambiRotate

Kód B.6: Funkce ambiRotate.m

```

1 function [ambi_out] = ambiRotate(s, roll, pitch, yaw)
2 %% AMBIROTATE - rotate whole ambisonics soundfield
3 %
4 % Input parameters:
5 %   s - input signal
6 %   roll - x-axis rotation angle (deg)
7 %   pitch - y-axis rotation angle (deg)
8 %   yaw - z-axis rotation angle (deg)
9 %

```

```

10 %
11 % Output parameters:
12 %   ambi_out - rotated ambisonics audio in B format
13
14 %% FUNCTION IMPLEMENTATION
15 % Convert degrees to radians
16 alpha = deg2rad(roll);
17 beta = deg2rad(pitch);
18 gamma = deg2rad(yaw);
19
20 % Definition of rotation matrices
21 roll_matrix = [1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 cos(alpha) -sin(
alpha); 0 0 sin(alpha) cos(alpha)];
22 pitch_matrix = [1 0 0 0; 0 cos(beta) 0 sin(beta); 0 0 1 0;
0 -sin(beta) 0 cos(beta)];
23 yaw_matrix = [1 0 0 0; 0 cos(gamma) -sin(gamma) 0; 0 sin(
gamma) cos(gamma) 0; 0 0 0 1];
24
25 % Get the output signal
26 ambi_out = roll_matrix*pitch_matrix*yaw_matrix*s;
27 end

```

B.2.5 normalise

Kód B.7: Funkce normalise.m

```

1 function [normalised_factor] = normalise(l,m)
2 %% NORMALISE - compute SN3D normalising factor
3 %
4 % Input parameters:
5 % l - order of spherical harmonic
6 % m - degree of spherical harmonic
7 %
8 % Output parameters:
9 % normalised_factor - computed normalised factor (SN3D
normalisation)
10
11 %% FUNCTION IMPLEMENTATION
12
13 %simulate Kronecker delta
14 if m==0
15     delta = 1;
16 else
17     delta = 0;
18 end
19

```

```

20     %Compute normalising factor
21     num = (2-delta)*factorial(1-abs(m));
22     den = 4*pi*factorial(1+abs(m));
23     normalised_factor = sqrt(num/den);
24 end

```

B.2.6 plotter

Kód B.8: Funkce plotter.m

```

1 function ACN_high = plotter(phi, theta, Y, ACN, l, m, max_l)
2 %% PLOTTER - plotting spherical harmonic functions on one
   figure
3   %
4   % Input parameters:
5   % phi - azimuth (rad)
6   % theta - elevation (rad)
7   % Y - spherical harmonic in spherical coordinates
8   % ACN - ambisonics channel numbering
9   % l - desired order
10  % m - desired degree
11  % max_l - maximal order
12  %
13  % Output parameters:
14  % ACN_high - input ACN number enlarged by one
15
16  %% FUNCTION IMPLEMENTATION
17  [x,y,z] = sph2cart(phi, theta, abs(Y));
18  subplot(max_l+1, max_l+1, ACN+1);
19  surf(x,y,z);
20  axis equal;
21  view(140,20); %default azimuth and altitude
22  xlabel('x');
23  ylabel('y');
24  zlabel('z');
25  title(sprintf('$Y_{%d}^{\%d}$ spherical harmonic (ACN = %d
   )', l, m, ACN), 'interpreter', 'latex');
26
27  ACN_high = ACN+1;
28 end

```



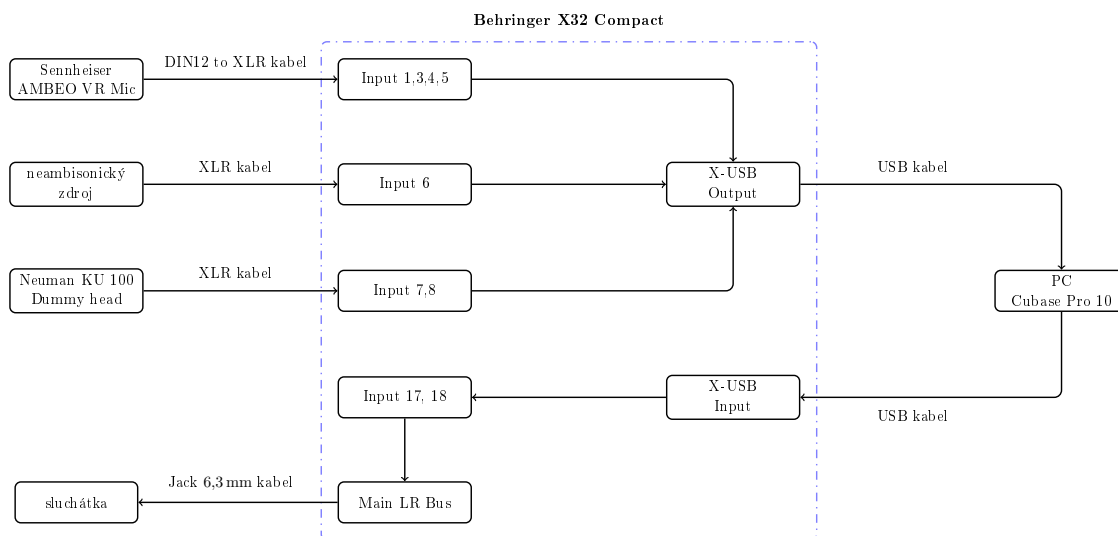
Příloha C

Návod k použití ambisonického pracoviště

Na následujících stránkách se nachází návod k použití ambisonického pracoviště. Návod je schválně psán poměrně podrobně, aby každý, kdo bude muset pracovat s ambisonickým pracovištěm mohl mít „opěrnou berličku“. Je ale pravdou, že návod neposkytuje bližší seznámení se SW Cubase či s použitým mixážním pultem Behringer X32 Compact. Pokud by se čtenář zajímal i o tuto problematiku, mohu ho odkázat na návody k jednotlivým produktům (viz [34] a [39]), kde lze najít vše potřebné.

Návod k pracovišti ambisonie

Struktura pracoviště



Obrázek 1: Obecná struktura pracoviště ambisonie

Možnosti pracoviště

Pracoviště ambisonie na katedře radioelektroniky FEL, ČVUT v Praze umožňuje zejména

- nahrávání a úpravu zvukových stop z ambisonického mikrofonu,
- mixáž a mastering zvuku pro sférická a VR videa až pro ambisonii 3. řádu,
- porovnání výstupů z ambisonického mikrofonu a tzv. dummy head.

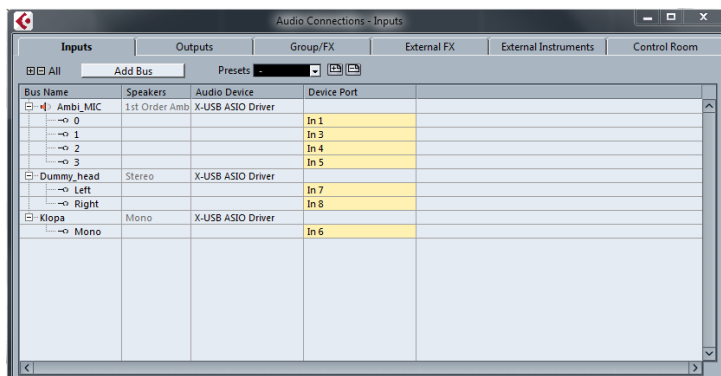
Kromě základních možností uvedených výše je samozřejmě možné na pracovišti zaznamenávat libovolné neambisonické zdroje zvuku či s využitím SW MATLAB provádět jednoduché analýzy ambisonických mixů.

Základní nastavení pracoviště

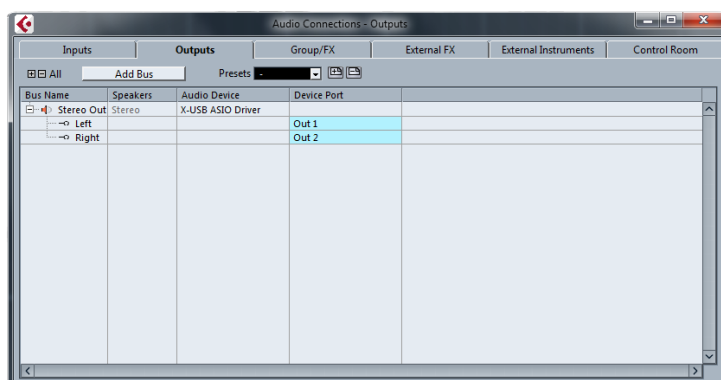
Pro základní nastavení pracoviště byly v rámci bakalářské práce vytvořeny šablony, které umožňují rychle a jednoduše provést potřebná nastavení uvedená níže. Jedná se o soubory

- pro mixážní pult: `Ambisonics.scn`,
- pro SW Cubase: `Ambisonics_1st_order.cpr`, `Ambisonics_2nd_order.cpr`.

Tyto soubory lze najít na datovém disku přiloženém k bakalářské práci. Šablonu pro mixážní pult je možné buď načíst pomocí ovládacího SW dodávaného k pultu (aplikace `X32-EDIT`; nahrání šablony lze provést pomocí tlačítka `LOAD` na hlavním panelu - viz obr. 3) nebo pomocí USB portu na mixážním pultu - zde je nutné se dostat do menu `Scenes` (nejlépe pomocí tlačítka `View` v sekci `SCENES` na mixážním pultu - viz obr. 4; sekce `SCENES` se nachází na pravém kraji mixážního pultu). Šablony pro Cubase stačí pouze jednoduše otevřít pomocí SW Cubase - po otevření



(a) Nastavení vstupních cest



(b) Nastavení výstupních cest

Obrázek 2: Správné nastavení vstupních a výstupních cest ve vzorovém projektu

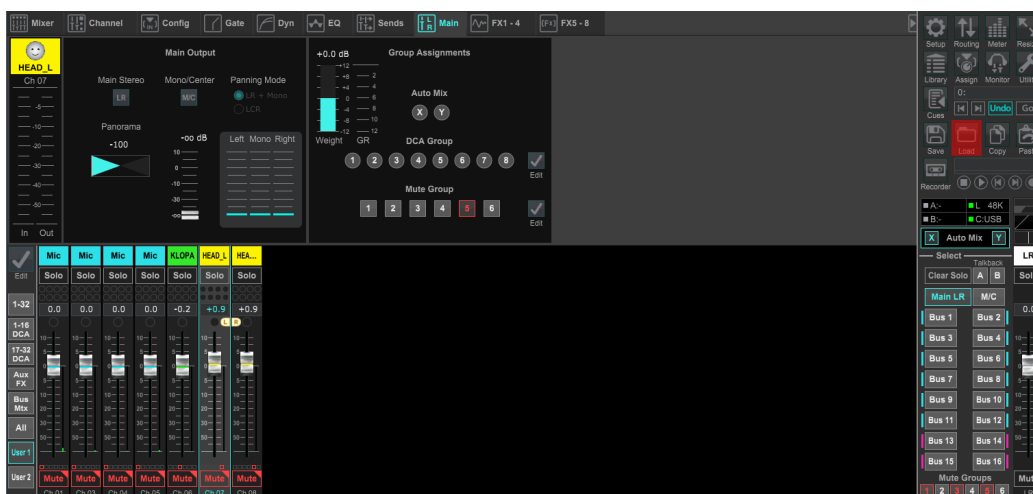
byste měli dostat prázdný projekt se strukturou jako je na obr. 5. Pro jistotu doporučuji zkontrolovat mapování vstupů a výstupů (klávesová zkratka F4 či cesta **Studio>Audio connections**) - nastavení vstupů a výstupů by mělo odpovídat obr. 2

Šablona pro mixážní pult nastavuje uniformní zisk vstupního předzesilovače pro jednotlivé kanály ambisonického mikrofonu a směřuje výstupy z PC tak, aby odpovídaly blokové struktuře z obr. 1. Šablona pro Cubase pak vytváří základní strukturu pro ambisonickou mixáž daného řádu, spolu s nahráním všech základních potřebných pluginů a směřování jednotlivých stop, vstupů a výstupů. **Pro správnou funkci všech šablon je nutné pracoviště zapojit podle blokové struktury, která je zachycena na obr. 1.** Po provedení základního nastavení pracoviště je možné pracoviště ihned používat.

Struktura vzorových projektů v Cubase

Po otevření vzorového projektu v Cubase byste měli vidět kromě stopy pro sférické video celkem 3 složky pro ambisonické audio (viz obr. 5), a to

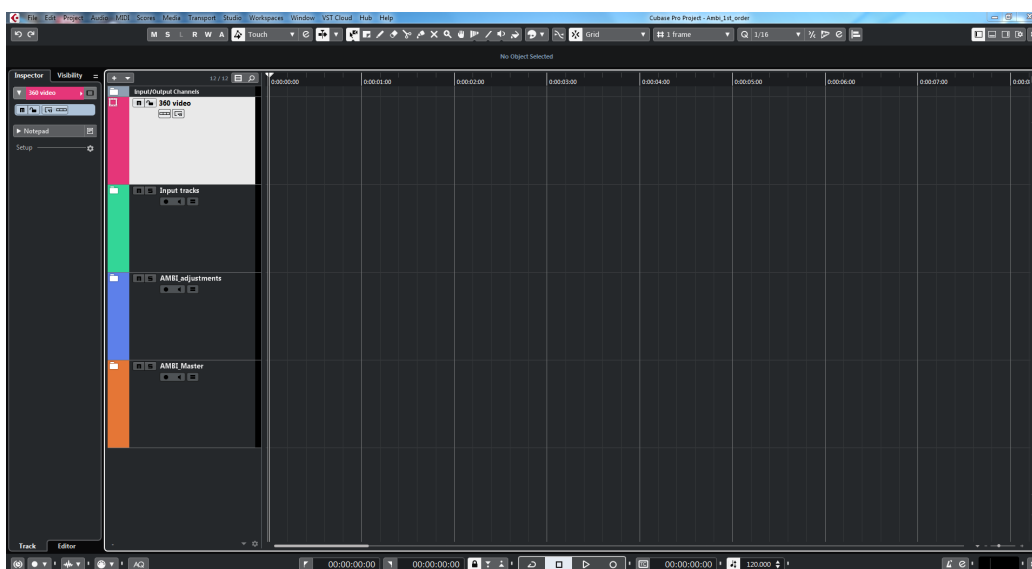
- Input tracks,
- AMBI_adjustments,
- AMBI_Master.



Obrázek 3: Hlavní okno programu X32-EDIT po nahrání šablony



Obrázek 4: Sekce SCENES na mixážním pultu





Obrázek 5: Základní struktura vzorového projektu pro Cubase

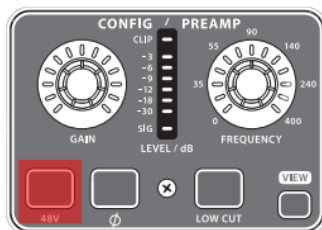
Ve složce **Input tracks** najdete celkem 3 zvukové stopy, které odpovídají jednotlivým vstupním kanálům (ambisonický mikrofon, neambisonický zdroj zvuku, dummy head) dle obr. 1. Výstup z ambisonického mikrofonu (zvuková stopa **AMBI_microphone**) je přes plugin AMBEO A-B Converter převeden do ambisonického formátu typu B (formát **ambiX**) a přímo poslán do sběrnice **AMBI_MASTER** ve složce **AMBI_Master**. Výstup z neambisonického zdroje zvuku (zvuková stopa **nonAMBI_source**) je poslán do sběrnice **nonAMBI_source**, která se nachází ve složce **AMBI_adjustments**. Tento „oslí můstek“ je zde udělán z toho důvodu, že Cubase nepodporuje vyšší počet výstupních kanálů než kanálů vstupních a výstupních kanálů, a tak byla vytvořena sběrnice v prvním ambisonickém formátu, aby byl Cubase spokojen a my mohli bez problémů aplikovat ambisonický panner (Ambi Pan HD). Výstup z této sběrnice je poté poslán do sběrnice **AMBI_MASTER**, kam jsou přidány efekty Ambi Verb HD a Ambi Limit HD a celá tato sběrnice je jedna ku jedné posílána do sběrnice **AMBI_HDPH**, kde dochází k binaurálnímu downmixu pomocí pluginu Ambi Head HD.

Pro „omezené“ verze Cubase jsou k dispozici obecné projekty se zakončením **_ELEM.cpr**. Struktura těchto projektů je shodná s projekty pro plnou verzi, liší se pouze posunem pluginů do „horní části“ **INSERTŮ** (neboť „omezená“ verze Cubase AI 10 podporuje nejvýše 4 první **INSERTY** ve stopě).

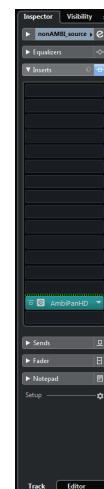
Obecný popis procesu zpracování

V následujících bodech se pokusím shrnout postup při nahrávání a exportu ambisonického zvuku na pracovišti ambisonie po provedení základního nastavení.


1. Zapnout phantomové napájení na požadovaných kanálech - pomocí tlačítka **48V** v sekci **CONFIG/PREAMP** (viz obr. 6)
2. Povolit záznam dané stopy (tj. stisknout tlačítko **Record** u dané stopy .
3. Provést záznam zvuku z jednotlivých „record enabled“ zdrojů (je nutné povolit „celkové“ nahrávání v projektu na transportním panelu .
4. Provést konverzi z formátu A do formátu B (**ambiX**) v pluginu Ambeo ve stopě **AMBI_microphone**¹.

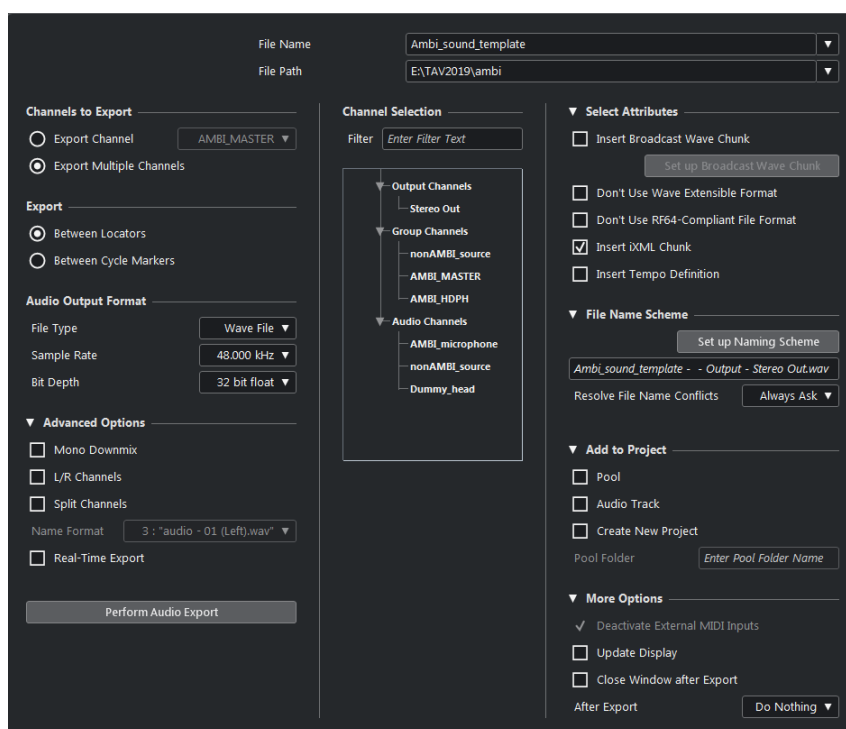


Obrázek 6: Sekce **CONFIG/PREAMP** s možností zapnutí phantomového napájení



Obrázek 7: Submenu **Inserts** na kartě **Inspector**

¹Jednotlivé pluginy je možné najít po kliknutí na danou stopu v submenu **Inserts** - viz obr. 7. Prvních 14 insertů je tzv. pre-fade, zbylé dva inserty jsou post-fade. Tlačítkem  je možné daný efekt dočasně vypnout (funkce bypass).



Obrázek 8: Okno exportu projektu

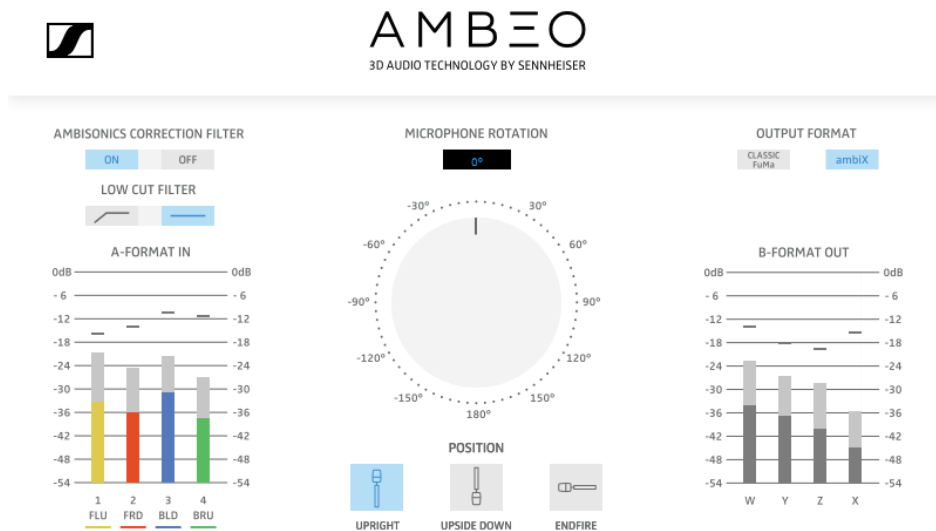
5. Pomocí vybraného pluginu (Ambi Pan, FB360 Spatiliser ad.) napolohovat jednotlivé neambisonické zdroje zvuku (ve složce **AMBI_adjustments** pro každý zdroj zvuku samostatně).
6. Provést korekce ambisonického mixu (např. pomocí pluginů Ambi Limit či Ambi Verb) ve stopě **AMBI_MASTER**.
7. Zběžně si poslechnout binaurální downmix (vstupy 17 a 18 na mixážním pultu) pro libovolnou pozici hlavy - kvůli eliminaci základních chyb (přebuzení zdroje, zkraslení prostorového efektu ad.). Pozici hlavy je možné upravit v submenu **Inserts** ve stopě **AMBI_HDPH**.
8. V případě spokojenosti vyexportovat danou MASTER stopu (**File>Export>Audio mixdown**). V okně exportu (viz obr. 8) si vyberte požadovanou výstupní cestu a parametry výstupního souboru (typ souboru, vzorkovací frekvence a bitová hloubka). V prostředním sloupci si poté můžete vybrat stopu resp. stopy k exportu a samotný export se provede stisknutím tlačítka **Perform Audio Export**.
9. Výstupní ambisonický soubor spojit se sférickým videem (např. za pomoci pluginu Audio360 Encoder či SW **ffmpeg**).
10. Prohlédnout si výstupní sférické video v libovolném prohlížeči a zkontrolovat prostorovou věrnost audia.

Podrobný popis jednotlivých pluginů

Ambeo A-B Format Converter

Plugin Ambeo A-B Format Converter, jehož hlavní obrazovku můžete vidět na obr. 9, slouží ke konverzi mezi ambisonickým formátem A a B. Plugin mimo jiné umožňuje


- o aplikovat optimalizační filtr pro ambisonii (možnost **AMBISONICS CORRECTION FILTER**),





Obrázek 9: Hlavní okno pluginu Ambeo

- o zařadit filtr typu horní propust pro eliminaci nízkofrekvenčních ruchů (možnost LOW CUT FILTER),
- o nastavit horizontální natočení mikrofonu (možnost MICROPHONE ROTATION),
- o vybrat pozici mikrofonu při natáčení (možnost POSITION),
- o vybrat oba běžně používané formáty pro ambisonii (formáty FuMa a ambiX; možnost OUTPUT FORMAT).

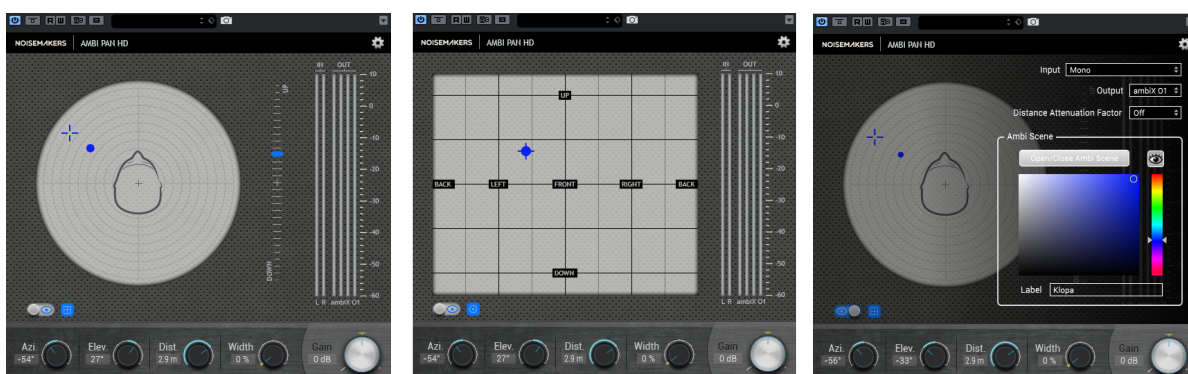
Ambi Pan HD

Plugin Ambi Pan HD slouží ke směřování neambisonických zdrojů zvuku. Jeho jednotlivé vzhledy můžete vidět na obr. 10. Před použitím pluginu je ještě nutné nastavit typ vstupní stopy a tvar výstupu². K tomuto nastavení se dostaneme pomocí tlačítka  v pravé horní části pluginu (viz pravý výstřižek na obr. 10). Uživatel může dále ovlivnit chování pluginu pomocí následujících možností

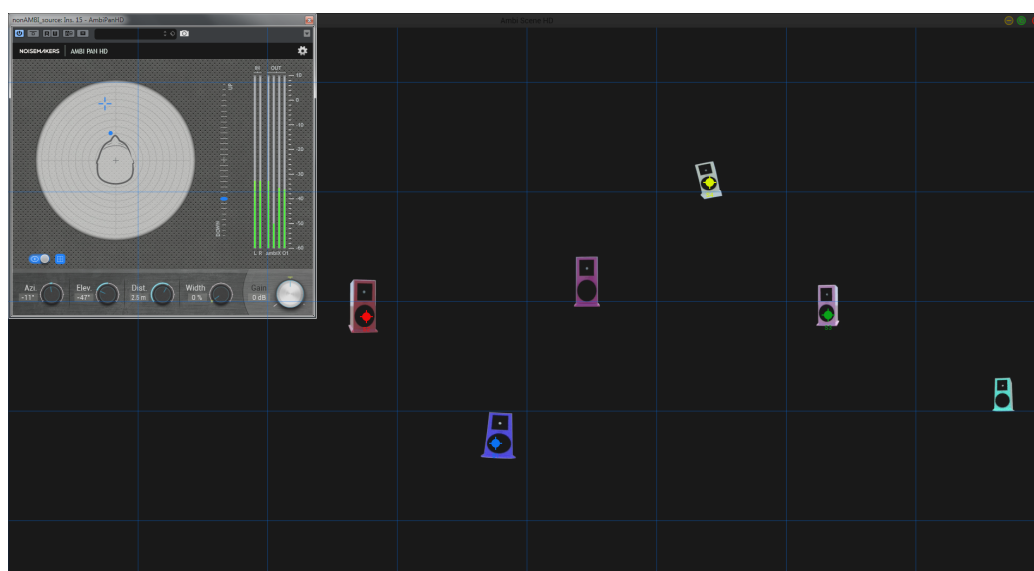
- o **Azi.** - azimut φ zdroje,
- o **Elev.** - výškový úhel θ zdroje,
- o **Dist.** - vzdálenost zdroje od posluchače r ,
- o **Width** - velikost prostorového efektu,
- o **Gain** - zesílení výsledného ambisonického výstupu.

Tyto parametry je možné buď nastavit pomocí potenciometrů ve spodní části pluginu, nebo pomocí dvou interaktivních GUI (viz levý a prostřední výřez na obr. 10), kde přímo nastavíme polohu daného zdroje - obě možnosti jsou vzájemně provázané (tj. změna v potenciometrech se projeví na GUI a naopak). Mezi jednotlivými GUI je možno přepínat pomocí tlačítka  resp. tlačítka . Dále je možné v sekci nastavení nastavit útlumový faktor a zvolit barvu a název zdroje pro doplněk Ambi Scene, který se hodí použít, máme-li k dispozici sférické video a několik neambisonických zdrojů zvuku, na které je aplikovaný plugin Ambi Pan. Pomocí pluginu Ambi Scene pak můžeme jednotlivé zdroje zvuku polohovat přímo podle daného sférického videa - viz obr. 11.

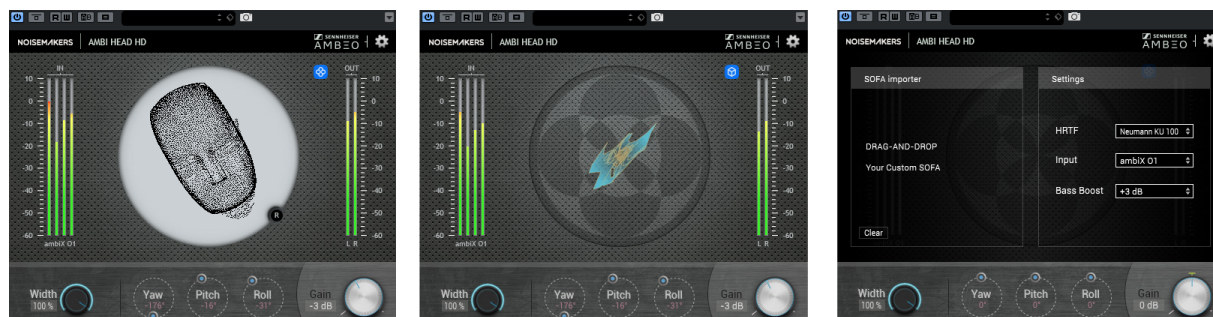
²Pluginy od firmy NoiseMakers podporují v současné době (tj. květen 2019) pouze formát ambiX, a to maximálně do třetího řádu ambisonie.



Obrázek 10: Plugin Ambi Pan HD




Obrázek 11: Doplněk Ambi Scene pro plugin Ambi Pan



Obrázek 12: Plugin Ambi Head HD

Ambi Head HD



Plugin Ambi Head HD slouží k binaurálnímu downmixu pomocí HRTF z ambisonického formátu typu B. Jeho jednotlivé vzhlady můžete vidět na obr. 12. Před použitím pluginu je ještě nutné nastavit řád ambisonie na vstupu a vybrat HRTF, pomocí které se bude výstupní stereofonní soubor dopočítávat. K tomuto nastavení (viz pravý výstřižek na obr. 12 se lze dostat po kliknutí na tlačítko  v pravé horní části pluginu. Na výběr jsou 3 základní typy HRTF

- Neumann KU100,
- Youtube,
- Facebook.

Pokud by byly tyto HRTF nedostatečné, je možné do pluginu nahrát libovolnou HRTF ve formátu SOFA. Uživatel může dále ovlivnit chování pluginu pomocí následujících možností

- **Roll** - natočení hlavy kolem souřadné osy x proti směru hodinových ručiček,
- **Pitch** - natočení hlavy kolem souřadné osy y proti směru hodinových ručiček,
- **Yaw** - natočení hlavy kolem souřadné osy z proti směru hodinových ručiček,
- **Width** - velikost prostorového efektu (možnost Width),
- **Gain** - zesílení výsledné stereofonní stopy.

Tyto parametry je možné nastavit jak pomocí potenciometrů ve spodní části pluginů, tak i pomocí GUI (kde lze virtuální hlavou natočit do libovolné polohy).

Kromě GUI pro polohování virtuální hlavy je také v pluginu možné pozorovat rozložení prostorového zvukového pole (viz prostřední výstřižek na obr. 12). K tomuto rozložení pluginu je možné se dostat po stisknutí tlačítka . Zpět na GUI pro polohování virtuální hlavy je pak možné se dostat tlačítkem .

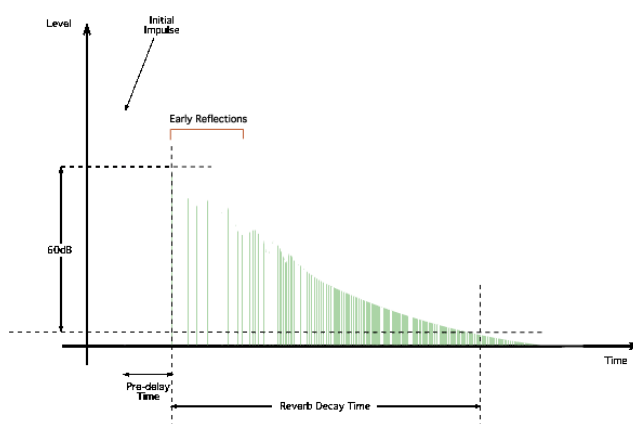
Ambi Verb HD

Plugin Ambi Verb HD slouží k přidání efektu reverb na ambisonický mix. Jeho uživatelské prostředí je vidět na obr. 13. Před použitím pluginu je nutné vybrat, jaká impulzová odezva má být při výpočtu efektu použita - je možné vybrat jak z předdefinovaných odezev, tak není problém nahrát vlastní impulzovou odezvu (ve formátu wav). Uživatel může dále ovlivnit chování pluginu pomocí následujících možností

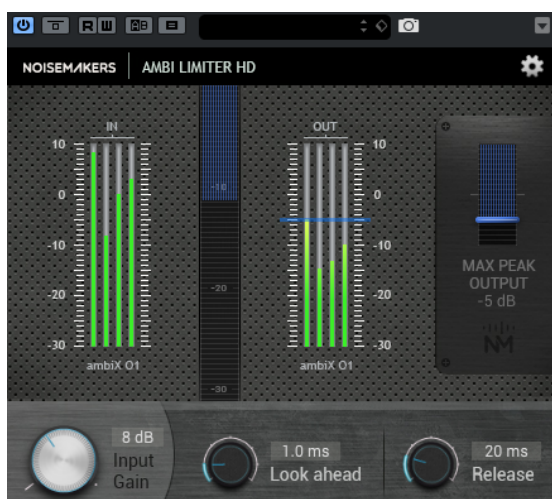
- **Dry/wet** - poměr „dry“ (neupraveného) a „wet“ (upraveného) signálu,
- **Decay** - doba trvání efektu reverb (vztaženo k celkové délce impulzové odezvy; pro lepší představu o významu parametru viz obr. 14),
- **Spread** - parametr udávající „hloubku“ výsledného ambisonického efektu,
- **Pre-Dly** - doba, za kterou je možné slyšet přidávaný efekt po ukončení buzení (tzv. *pre-delay*; pro lepší představu o významu parametru viz obr. 14),
- **Gain** - zesílení výstupního ambisonického mixu.



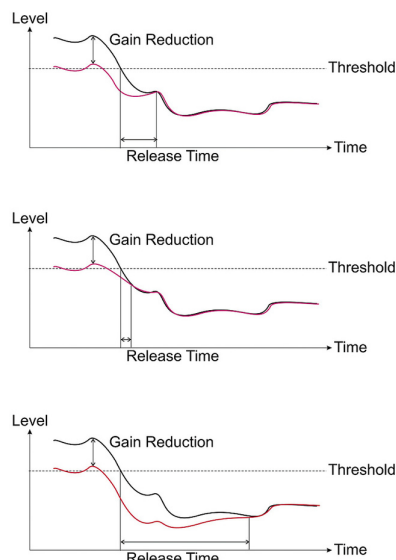
Obrázek 13: Plugin Ambi Verb HD



Obrázek 14: Grafické vysvětlení významu parametrů pre-delay a decay



Obrázek 15: Plugin Ambi Limit HD

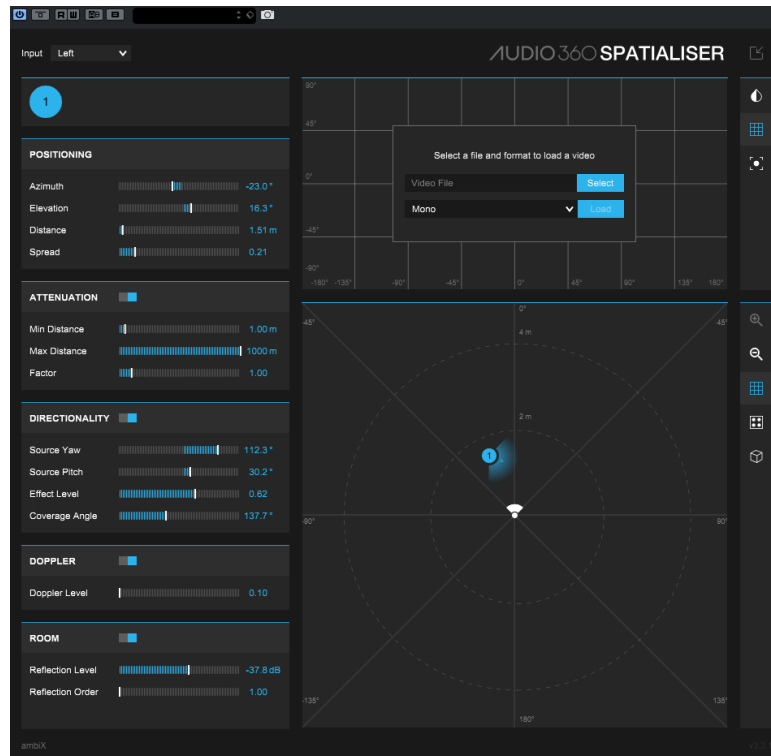


Obrázek 16: Grafické vysvětlení významu parametru release

Ambi Limiter HD

Plugin Ambi Limit HD pomáhá při masteringu zvukové stopy - jedná se vlastně o ambisonický limiter. Uživatelské prostředí pluginu je k vidění na obr. 15. Uživatel může ovlivnit chování pluginu pomocí následujících parametrů

- o **MAX PEAK OUTPUT** - nastavení nejvyšší možné úrovně signálu na výstupu,
- o **Input Gain** - zesílení signálu na vstupu pluginu,
- o **Look ahead** - čas, po který se dívá plugin dopředu na příchozí stopu, aby mohl v případě překročení nastavené úrovně včas zasáhnout,




Obrázek 17: Plugin Audio360 Spatialiser

- o **Release** - nastavení času, po který bude docházet k aplikaci limiteru po překročení nastavené úrovně (pro lepší představu o významu parametru viz obr. 16).

Audio360 Spatialiser

Plugin Audio360 Spatialiser je v podstatě analogií k pluginu Ambi Pan HD - jeho úkolem je tedy „převést“ neambisonické zdroje zvuku do ambisonického formátu typu B (druhého řádu), a to na základě udané polohy neambisonických zdrojů. Uživatelské prostředí pluginu je zachyceno na obr. 17. Uživatel má v pluginu k dispozici velkou množinu parametrů, kterými lze manipulovat. Mezi základní parametry patří

- o **Input** - zvolení typu vstupu (mono stopa, stereo stopa, 5.1 ad.)
- o **Azimuth** - nastavení azimutu φ zdroje zvuku,
- o **Elevation** - nastavení výškového úhlu θ zdroje zvuku,
- o **Distance** - nastavení vzdálenosti r zdroje zvuku od pozorovatele.

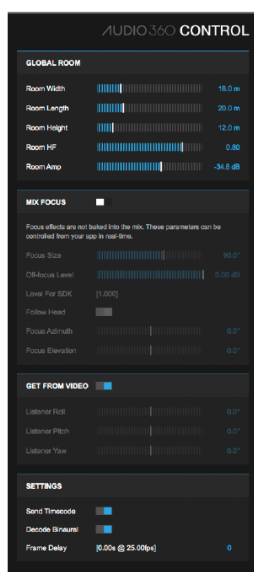
Dále lze v pluginu nastavit např. množství útlumu v závislosti na vzdálenosti (sekce ATTENUATION), směrovost zdroje (sekce DIRECTIONALITY) či povolení reverb efektu a jeho nastavení (sekce ROOM). Do pluginu je také možné nahrát libovolné sférické video a jednotlivé zvukové stopy přiřadit jednotlivým zdrojům na video, které je poté možné automaticky trackovat (tzn. měnit parametry pluginu na základě pohybu daného zdroje zvuku ve video) - tento proces je možné provést po stisknutí tlačítka .

Audio360 Control

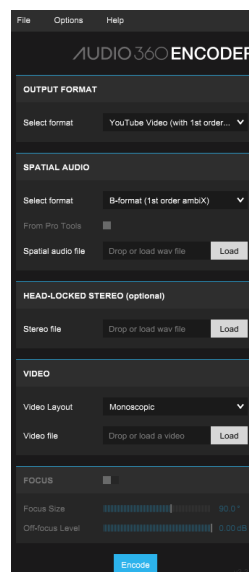
Plugin Audio360 Control je analogií k pluginům Ambi Head HD a Ambi Verb HD, jeho úkolem je tedy vytvořit binaurální downmix (je-li zaškrtnuté příslušné tlačítko) a přidat efekt reverb. Uživatelské prostředí pluginu je zachyceno na obr. 18. Uživatel může v sekci GLOBAL ROOM nastavit parametry místnosti (rozměry, citlivost na vysoké frekvence, pohlcení signálu). Po nastavení těchto parametrů se na všechny stopy, u nichž je povolen parametr ROOM (viz plugin Audio360 Spatiliser) přidá efekt reverb. Dále je možné v sekci GET FROM VIDEO natáčet pohled posluchače (analogie pluginu Ambi Head HD) - je buď možné zvolit dopočetění parametrů z pozice sledování videa v pluginu Audio360 Spatiliser, nebo je možné nastavit libovolnou jinou pozici. V poslední sekci - SETTINGS je poté důležitý parametr **Decode Binaural**. Tento parametr ovlivňuje, zdali je výstup z pluginu Audio360 Control binaurálním downmixem pro dané parametry (sepnutý stav) či jestli je na výstupu pluginu ambisonický zvuk ve formátu B druhého řádu (vypnutý stav).

Audio360 Encoder

Plugin Audio360 Encoder slouží ke spojení sférického videa se sférickým audiem. Uživatelské prostředí pluginu je na obr. 19. Tento plugin kromě samotného spojení doplní i do metadat výsledného souboru informaci o tom, že se jedná o sférické video (jinak by přehrávače nebyly schopné video správně přehrát). Kromě spojení sférického audia a videa je možné do pluginu nahrát tzv. head-locked stopu. Jedná se o (typicky stereo) stopu, která je umístěna do počátku souřadného systému, takže není závislá na konkrétním natočení diváka. Tato stopa se hodí například pro podkresovou muziku či monolog vypravěče apod.



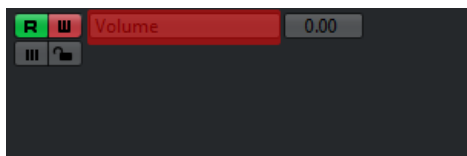
Obrázek 18: Plugin Audio360 Control



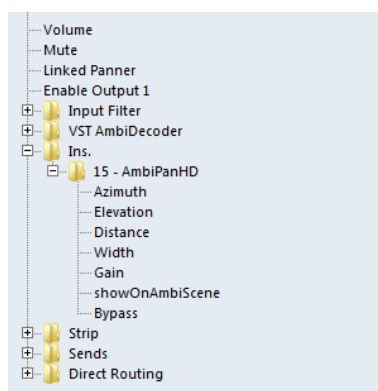
Obrázek 19: Plugin Audio360 Encoder

Využití automatizace DAW v ambisonii

Jak bylo vidět v sekci výše, každý z pluginů má velké množství parametrů, které je možné nastavit. Je ale pravdou, že např. u ambisonických pannerů (Ambi Pan HD, Audio360 Spatiliser ad.) musíme předpokládat, že dochází k pohybu daného zdroje zvuku a musíme být tedy schopni plynule měnit (nejlépe všechny) parametry jednotlivých pluginů - zde se dostává ke slovu automatizace DAW. Pomocí této funkce DAW můžeme jednoduše nastavovat v průběhu postprodukčního procesu ambisonického audia hodnoty jednotlivých parametrů pluginů (samozřejmě za předpokladu, že daný parametr podporuje automatizaci - což je možné vyčíst z návodů jednotlivých pluginů).




Obrázek 20: Automatizační stopa a výběr parametru pro automatizaci



Obrázek 21: Výběr parametrů pro automatizační stopu u pluginu Ambi Pan HD

V SW Cubase 10 je možné přidat libovolné množství automatizačních stop - a to po kliknutí pravým tlačítkem myši na danou stopu a vybrání možnosti **Show Automation**. Po stisknutí tohoto tlačítka se nám pod danou stopou objeví automatizační stopa (viz obr. 20), kde si můžeme zvolit libovolný parametr, který budeme v rámci automatizace měnit (v základním nastavení je vždy první zobrazovaný parametr pro automatizaci „Volume“). Možnosti výběru parametrů pro automatizaci u pluginu Ambi Pan HD je k vidění na obr. 21.

K tomu, abychom na dané stopě mohli automatizaci používat, je nutné v možnostech dané stopy zaškrtnout tlačítka **R** a **W**, kde tlačítko R je pro režim čtení (zaškrtně se automaticky při stisku tlačítka W) a tlačítko W je pro režim zápisu. Nyní je již možné na jednotlivých automatizačních stopách vytvořit tzv. klíčové snímky (*keyframes*), ve kterých je možné měnit hodnoty parametrů popř. si lze navolit tvar průběhu (exponenciála, lineární funkce ad.), či pomocí funkce pera , která se nachází na hlavním panelu nástrojů, je možné průběh parametru přímo nakreslit.

Použitá a doplňková literatura

- [1] Cubase Operation Manual. *Steinberg user manuals* [online]. Dostupné z: https://steinberg.help/cubase_pro_artist/v10/en/
- [2] Ambi Manual. In: *Noise Makers* [online]. Dostupné z: <https://www.noisemakers.fr/Downloads/AmbiManual.pdf>
- [3] Spatial workstation. *Facebook 360 video* [online]. Dostupné z: <https://facebook360.fb.com/spatial-workstation/>



Příloha D

Pracovní listy k laboratorním úlohám

Na následujících stránkách se nachází pracovní listy k jednotlivým laboratorním úlohám. Veškeré podkladové materiály k laboratorním úlohám (šablony pro Cubase, zvukové soubory, skripty pro MATLAB aj.) je možné nalézt na přiloženém datovém disku (vždy ve složce LPXX_Data.zip).

Jak bylo uvedeno výše, laboratorní úlohy by měly seznámit všechny řešitele s matematickou podstatou ambisonie a s univerzálním postupem, pomocí kterého je možné vytvořit zvukovou stopu pro libovolné sférické či VR video.

Ambisonický mikrofon

Úkoly práce

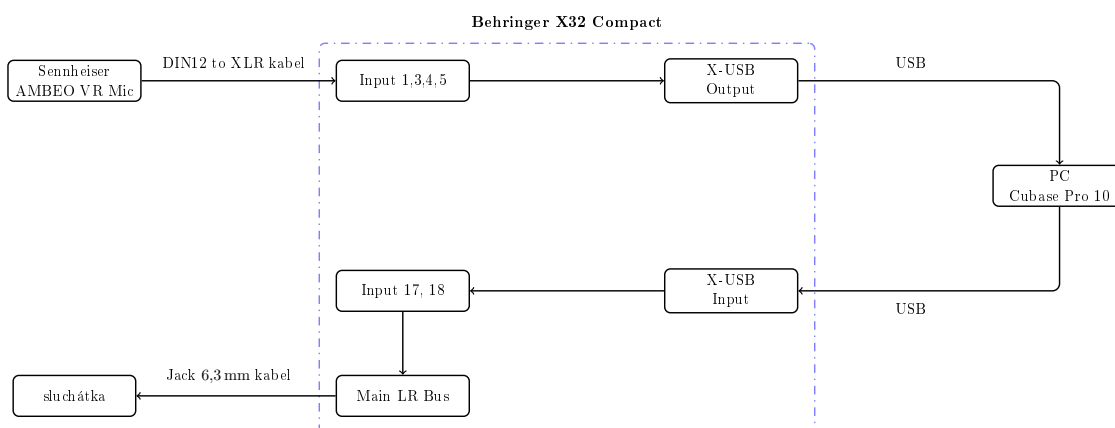
1. Seznamte se se strukturou ambisonického mikrofonu.
2. Proveďte záznam z ambisonického mikrofonu a jeho převod do ambisonického formátu typu B (s využitím pluginu AMBEO A-B converter).
3. Seznamte se s funkcí pluginu Ambi Head HD.
4. Poslechněte si stereo downmix vytvořený výpočtem přes virtuální hlavu s použitím HRTF.

Potřebný HW a SW

Pro realizaci laboratorní úlohy je zapotřebí

- ambisonický mikrofon Sennheiser AMBEO VR MIC,
- mixážní pult Behringer X32 Compact s USB audio rozhraním,
- DAW Cubase Pro 10 s pluginy
 - ◇ AMBEO A-B converter plugin,
 - ◇ AMBI Head HD,
- kabely k propojení jednotlivých periférií
 - ◇ XLR - XLR,
 - ◇ DIN12 - XLR (4×)

Zapojení pracoviště



Obrázek 1: Bloková struktura pracoviště ambisonie pro laboratorní úlohu 1

Obsah datové přílohy

V datové příloze k laboratorní úloze se nachází soubory

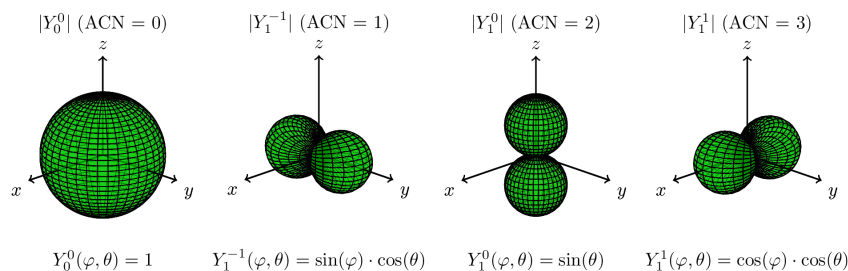
- LP01.cpr resp. LP01_ELEM.cpr - šablona projektu pro SW Cubase (pro plnou resp. „omezenou“ verzi),
- Ambisonics.scn - šablona pro mixážní pult Behringer X32 Compact,
- LP01_ambi_A_format.wav - vzorová ambisonická nahrávka ve formátu A.

Ambisonickou nahrávku lze využít k řešení postprodukční části laboratorní práce, pokud nebudete mít k dispozici ambisonický mikrofon.

Teoretický rozbor

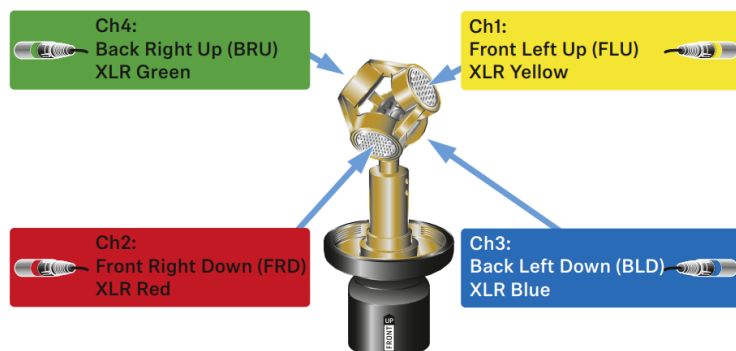
Ambisonické mikrofony

Ambisonie využívá mapování prostorového zvuku pomocí sférických harmonických funkcí. Tyto funkce jsou řešením úhlové části Laplaceovy rovnice ve sférických souřadnicích, která splňuje podmínku ortogonality. Přesný matematický popis těchto sférických harmonických funkcí je možné dohledat v následujících laboratorních úlohách. Pro naši potřebu je důležité se podívat na tvar sférických harmonických funkcí pro první řád ambisonie - viz obr. 2. Z obr. 2 plyne, že pro záznam prostorového zvuku v ambisonii prvního řádu by v podstatě stačily 4 mikrofonní kapsle, konkrétně jedna kulová a tři osmičkové (každá pro jednu osu souřadného systému). Takovému mikrofonu se říká „native B-format microphone“ a jeho vytvoření je velmi složité, a to hlavně z toho důvodu, že pro správnou funkci by všechny mikrofonní kapsle musely být umístěny v počátku souřadného systému, což je fyzikálně nemožné realizovat.



Obrázek 2: Tvar sférických harmonických funkcí pro první řád ambisonie

Proto se tedy běžně používá jiný princip - prostorový zvuk je zaznamenán alespoň $(N + 1)^2$ mikrofonními kapslemi, kde N symbolizuje požadovaný řád ambisonie. Výstup jednotlivých mikrofonů tvoří tzv. ambisonický zvuk řádu N ve formátu A. Tento zvuk je poté řadou matematických operací převeden na ambisonický zvuk řádu N ve formátu B (tedy na signály které jsou váhovány danými sférickými harmonickými funkcemi určenými podle obr. 2). Pro použitý ambisonický mikrofon prvního řádu, kde se využívají 4 kondenzátorové mikrofonní kapsle s kardioidní směrovou charakteristikou s rozložením podle obr. 3, se převod mezi ambisonickým formátem A a B zjednoduší na následující maticové násobení



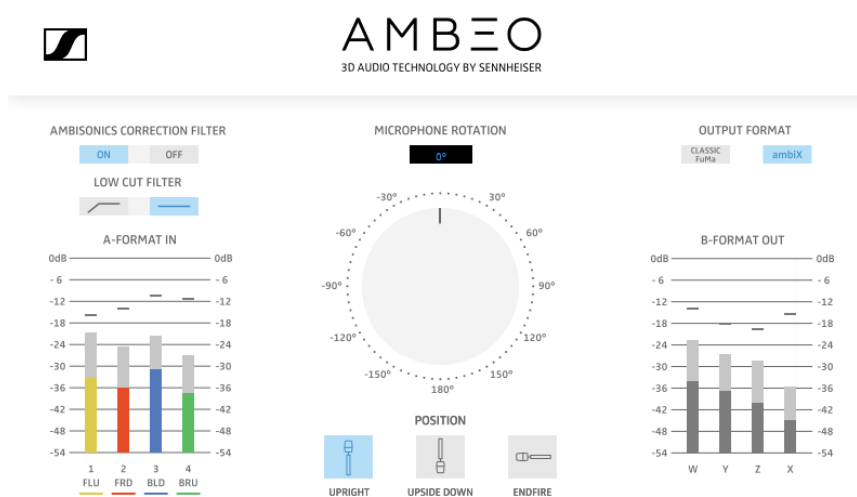
Obrázek 3: Struktura mikrofону Sennheiser AMBEO VR Mic

$$\begin{pmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{FLU} \\ \text{FRD} \\ \text{BLD} \\ \text{BRU} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Ambeo A-B Format Converter

Plugin Ambeo A-B Format Converter, jehož hlavní obrazovku můžete vidět na obr. 4, slouží ke konverzi mezi ambisonickým formátem A a B. Plugin mimo jiné umožňuje

- aplikovat optimalizační filtr pro ambisonii (možnost AMBISONICS CORRECTION FILTER),
- zařadit filtr typu horní propust pro eliminaci nízkofrekvenčních ruchů (možnost LOW CUT FILTER),
- nastavit horizontální natočení mikrofону (možnost MICROPHONE ROTATION),
- vybrat pozici mikrofону při natáčení (možnost POSITION),
- vybrat oba běžně používané formáty pro ambisonii (formáty FuMa a ambiX; možnost OUTPUT FORMAT).



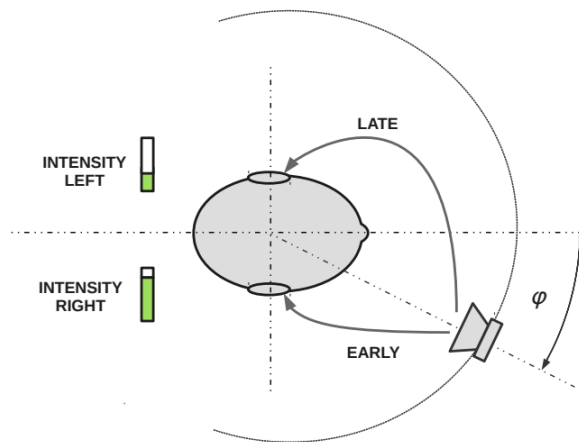
Obrázek 4: Hlavní okno pluginu Ambeo

Binaurální reprodukce zvuku

Pokud máme k dispozici libovolný zdroj zvuku v prostoru, jsme schopni pomocí signálů, které nám přicházejí do uší lokalizovat jeho polohu, a to díky

- rozdílu intenzity zvuku mezi jednotlivými ušima,
- rozdílu času dopadu zvuku na jednotlivé uši.

Principy této lokalizace zdroje zvuku jsou naznačeny na obr. 5.



Obrázek 5: Základní principy lokalizace zvuku

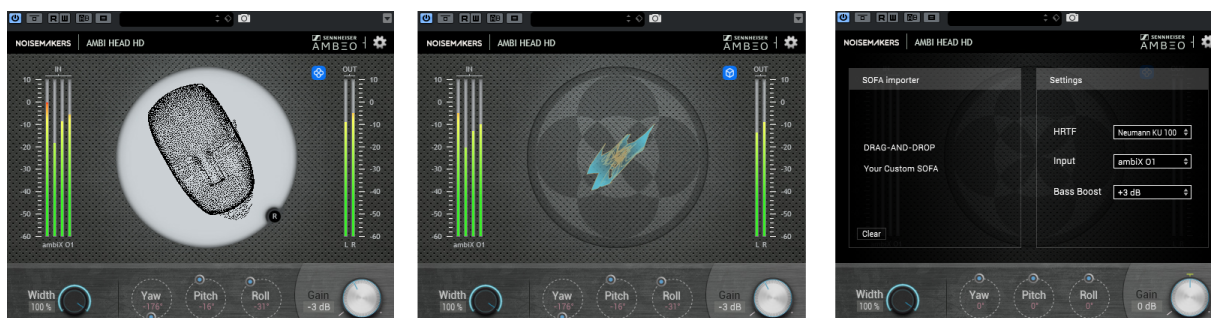
Díky těmto principům je možné vytvořit obecnou funkci, která, zjednodušeně řečeno, popisuje, jakým způsobem vnímáme zvuky dopadající z různých úhlů a o různých frekvencích. Těto funkci se říká HRTF (*Head Related Transfer Function*). HRTF je pro každého posluchače velmi individuální, protože závisí např. na

- rozměrech hlavy,
- tvaru ušního boltce ad.

Výstupní signál pro poslech v levém uchu s_L resp. pravém uchu s_R poté získáme prostou filtrací signálů z jednotlivých reproduktorů pomocí HRTF a jejich následným součtem, tedy jako


$$\begin{aligned}
 s_L(t) &= \sum_{n=1}^N h_L(t, \varphi, \theta) * s_{LS_n}(t, \varphi, \theta) \\
 &= \sum_{n=1}^N \mathcal{F}^{-1}\{H_L(\omega, \varphi, \theta) \cdot S_{LS_n}(\omega, \varphi, \theta)\},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

kde $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ značí inverzní Fourierovu transformaci, H_L značí HRTF pro levé ucho, h_L značí HRIR (*Head Related Impulse Response*) pro levé ucho, N počet reproduktorů a $*$ operaci konvoluce. Pro pravé ucho bychom dostali analogický předpis, pouze bychom změnili HRIR resp. HRTF z levého ucha na pravé.



Obrázek 6: Plugin Ambi Head HD

Ambi Head HD



Plugin Ambi Head HD slouží k binaurálnímu downmixu pomocí HRTF z ambisonického formátu typu B. Jeho jednotlivé vzhledy můžete vidět na obr. 6. Před použitím pluginu je ještě nutné nastavit řád ambisonie na vstupu a vybrat HRTF, pomocí které se bude výstupní stereofonní soubor dopočítávat. K tomuto nastavení (viz pravý výstřížek na obr. 6 se lze dostat po kliknutí na tlačítko  v pravé horní části pluginu. Na výběr jsou 3 základní typy HRTF

- Neumann KU100,
- Youtube,
- Facebook.

Pokud by byly tyto HRTF nedostatečné, je možné do pluginu nahrát libovolnou HRTF ve formátu SOFA. Uživatel může dále ovlivnit chování pluginu pomocí následujících možností

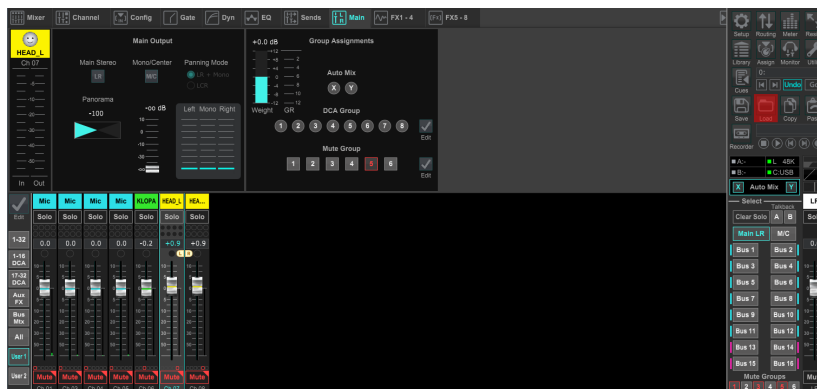
- **Roll** - natočení hlavy kolem souřadné osy x proti směru hodinových ručiček,
- **Pitch** - natočení hlavy kolem souřadné osy y proti směru hodinových ručiček,
- **Yaw** - natočení hlavy kolem souřadné osy z proti směru hodinových ručiček,
- **Width** - velikost prostorového efektu (možnost Width),
- **Gain** - zesílení výsledné stereofonní stopy.

Tyto parametry je možné nastavit jak pomocí potenciometrů ve spodní části pluginů, tak i pomocí GUI (kde lze virtuální hlavou natočit do libovolné polohy).

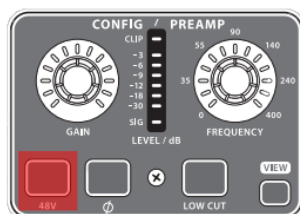
Kromě GUI pro polohování virtuální hlavy je také v pluginu možné pozorovat rozložení prostorového zvukového pole (viz prostřední výstřížek na obr. 6). K tomuto rozložení pluginu je možné se dostat po stisknutí tlačítka . Zpět na GUI pro polohování virtuální hlavy je pak možné se dostat tlačítkem .

Postup realizace



1. Zapojte pracoviště podle předlohy na obr. 1. Dbejte na správné zapojení mikrofonu tak, aby jeho ukazatele FRONT a UP ukazovaly dle pokynů (tj. dopředu a nahoru - viz obr. 3).
2. Načtěte do mixážního pultu přednastavenou scénu **Ambisonics.scn** (pomocí tlačítka LOAD v programu X32-Edit po spárování mixážního pultu s PC - viz obr. 7).

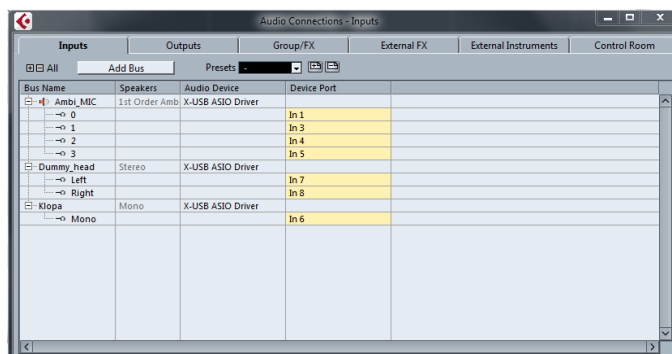


Obrázek 7: Načtení přednastavené scény do mixážního pultu pomocí programu X32 Edit

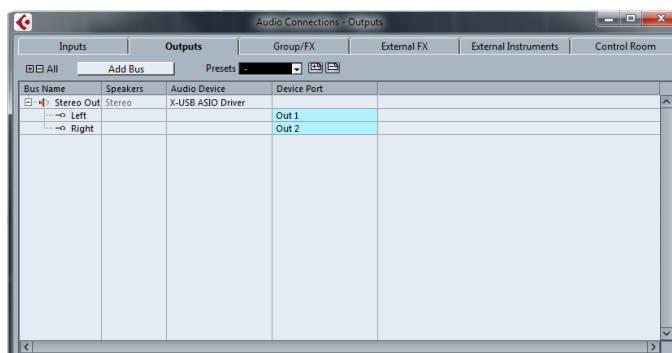


Obrázek 8: Možnosti nastavení vstupního předzesilovače kanálu

3. Zapněte phantomové napájení na kanálech 1, 3, 4 a 5 (tlačítko 48V v sekci CONFIG/PREAMP - viz obr. 8)
4. V SW Cubase otevřete vzorový projekt LP01.cpr a zkontrolujte správné nastavení vstupů a výstupů (klávesová zkratka F4 či cesta Studio>Audio connections) dle obr. 9.
5. Umožněte nahrávání ve stopě AMBI_Mic stiskem tlačítka record  u dané stopy a zapněte si odposlech stopy (pomocí tlačítka .
6. Zkontrolujte přítomnost signálu (pomocí VU metru vedle stopy) a v případě potřeby upravte citlivost vstupního předzesilovače na kanálech 1, 3, 4 a 5. **Dbejte na to, aby byla citlivost na všech kanálech nastavena na stejnou hodnotu, jinak dojde ke zkreslení prostorové informace.**
7. Provedte nahrávání prostorového zvuku pomocí ambisonického mikrofonu.
 - o Přijďte před mikrofon a představte se.
 - o Pomalu se projděte kolem mikrofonu a říkejte směr, kterým se pohybujete. Po zhruba 90° se vždy zastavte a řekněte svoji polohu (vlevo, vpravo, za mikrofonem, před mikrofonem).
 - o Jděte do rohů místnosti a řekněte v jakém rohu jste (pravý horní roh, levý spodní rod ad.).
8. Otevřete plugin AMBEO A-B converter (submenu INSERT na levé straně ve stopě AMBI_microphone).
9. Provedte konverzi mezi ambisonickým formátem A a B. Vyzkoušejte jednotlivá nastavení pluginu (formáty FuMa a ambiX, poloha mikrofonu - viz obr.) a popište, k jaké změně (vizuálně) došlo.
10. Vyberte stopu AMBI_HDPH, odmutujte ji a otevřete plugin Ambi Head HD (v submenu INSERT).
11. Seznamte se s pluginem Ambi Head HD (viz obr. 10) a experimentálně určete význam jednotlivých parametrů (yaw, roll, pitch)

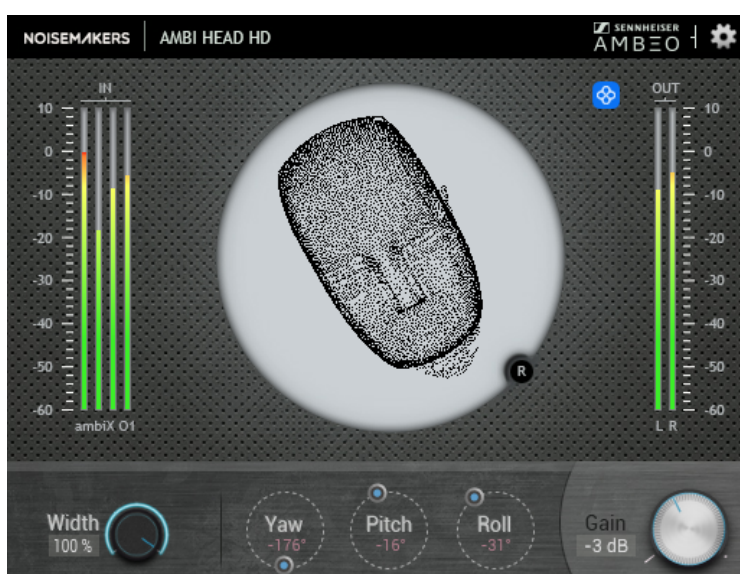


(a) Nastavení vstupních cest



(b) Nastavení výstupních cest

Obrázek 9: Správné nastavení vstupních a výstupních cest ve vzorovém projektu




Obrázek 10: Detail hlavního prostředí pluginu Ambi Head

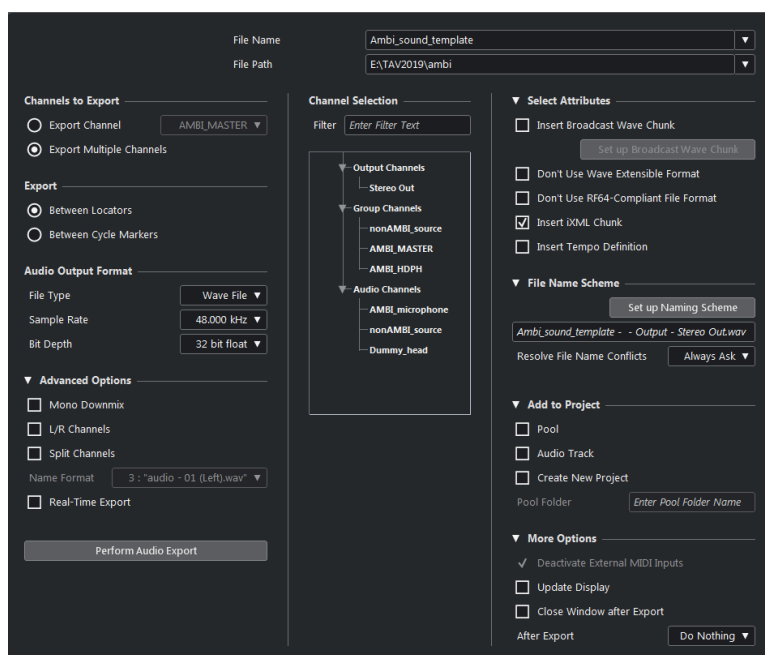
12. Nasadíte si sluchátka a pro defaultní nastavení pluginu (dvojklik na virtuální hlavu) přehrajte celou vaši nahrávku. Popište jestli přehrávaný signál odpovídá vašim předpokladům a vysvětlete případné rozdíly.
13. Nastavte v pluginu následující hodnoty
 - yaw = 180°,
 - roll = 0°,
 - pitch = 0°,
 - width = 0 %.

Na základě pozice virtuální hlavy rozhodněte, jakým způsobem by měl zvuk znít a svůj předpoklad si ověřte poslechem. Vysvětlete případné rozdíly.
14. Zkuste postupně zvyšovat parametr width (s krokem 25 %) a poslouchejte vaši nahrávku. Na základě poslechu vysvětlete význam parametru width.
15. Nastavte parametry virtuální hlavy tak, aby byla rotována
 - o 30° okolo osy x ,
 - o -125° okolo osy y ,
 - o 55° okolo osy z .

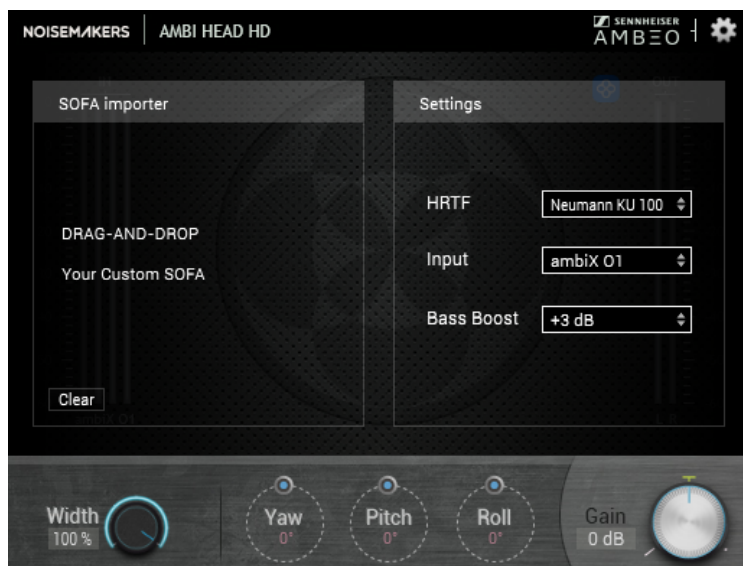
Natočení ověřte poslechem.
16. Proveďte export binaurálního downmixu.
 - K menu exportu se dostanete pomocí cesty **File>Export>Audio mixdown**
 - V menu exportu (viz obr. 11) vyberte v prostředním sloupci stopu pro export (AMBI_HDPH) a zadejte místo uložení.
17. Poslechněte si vyexportovanou stopu (např. pomocí přehrávače VLC).

Doplňkové úkoly

1. Vraťte se do defaultního nastavení pluginu (dvojklik na virtuální hlavu) a poslechem porovnejte, jaký vliv má na výsledný downmix nastavení následujících parametrů v pluginu AMBEO A-B converter (ve stopě AMBI_MIC)
 - Position: upright, upside down, endfire;
 - microphone rotation;
 - low cut filter;
2. V nastavení pluginu Ambi Head HD (lze se do něj dostat pomocí symbolu ozubeného kola v pravé horní části pluginu  viz obr. 12) vyberte jednotlivé předdefinované možnosti HRTF. Popište, jakým způsobem se mění výstupní signál a pokuste se vysvětlit, proč tomu tak je.
3. V nastavení pluginu Ambi Head HD zvolte možnost Bass Boost. Poslechem rozhodněte, jakým způsobem se tento parametr projeví na výstupním signálu.
4. Pomocí automatizace (viz [3]) modifikujte parametry tak, aby prostorový zvuk zněl stále ze stejného místa (tj. aby se virtuální hlava pohybovala společně s pozorovatelem).



Obrázek 11: Okno exportu projektu



Obrázek 12: Detail nastavení pluginu Ambi Head HD

Kontrolní otázky

1. Popište strukturu běžného ambisonického mikrofonu 1. řádu. Napadá vás jiný způsob realizace ambisonického mikrofonu 1. řádu?
2. Vysvětlete rozdíl mezi ambisonickým formátem typu A a ambisonickým formátem typu B. V jakém formátu je výstup z ambisonického mikrofonu a proč?
3. Vysvětlete základní rozdíly mezi běžně používanými ambisonickými formáty **FuMa** a **ambiX**.
4. Vysvětlete pojem **HRTF**. Jaký je její význam u ambisonického zpracování zvuku?

Použitá a doplňková literatura

- [1] *Sennheiser AMBEO VR MIC - Microphone 3D AUDIO capture* [online]. Dostupné z: <https://en-us.sennheiser.com/microphone-3d-audio-ambeo-vr-mic>
- [2] ŠTOREK, Dominik. *Source localization by virtual acoustic reality*. Praha, 2016. Disertační práce. ČVUT FEL.
- [3] Cubase Operation Manual. *Steinberg user manuals* [online]. Dostupné z: https://steinberg.help/cubase_pro_artist/v10/en/
- [4] Ambi Manual. In: *Noise Makers* [online]. Dostupné z: <https://www.noisemakers.fr/Downloads/AmbiManual.pdf>

Polohování neambisonických stop a beamforming

Úkoly práce

1. Seznamte se s funkcí pluginu Ambi Pan HD.
2. Z dodaných zvukových stop vytvořte pomocí pluginu Ambi Pan HD zvukovou stopu pro dodané sférické video.
3. Pomocí principu beamformingu se v SW VVMic pokuste experimentálně co nejvíce oddělit jednotlivé kanály v dodaném ambisonickém souboru ve formátu B LP02_beamforming.wav. Jedná se o samplý 4 hudebních nástrojů, konkrétně
 - o kytara,
 - o bubny,
 - o piano,
 - o basa.

Potřebný HW a SW

Pro realizaci laboratorní úlohy je zapotřebí

- o DAW Cubase Pro 10 s pluginem Ambi Pan HD,
- o SW VVMic.

Obsah datové přílohy

V datové příloze k laboratorní úloze se nachází soubory

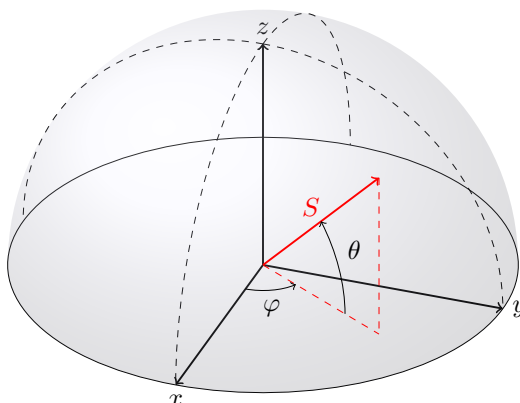
- o LP02.cpr resp. LP02_ELEM.cpr - šablona projektu pro SW Cubase (pro plnou resp. „omezenou“ verzi),
- o LP02_spherical_video.mp4 - sférické video pro polohování zdrojů zvuku,
- o LP02_beamforming.wav - soubor s ambisonickým mixem ve formátu B pro beamforming,
- o LP02_LS_feeds - složka se zvukovými soubory pro „buzení reproduktorů“ (zvukové soubory jsem převzal z volně přístupné databáze zvukových samplů),
- o LP02_default_files - složka s původními zvukovými soubory, ze kterých vznikl ambisonický mix pro beamforming (vč. MONO downmixu ambisonického mixu).

Teoretický rozbor

Polohování neambisonických zdrojů zvuků

Pokud máme k dispozici neambisonický zdroj signálu, můžeme ho libovolně umístit do prostoru (pro jednoduchost předpokládáme umístění na jednotkovou kouli, v případě uvažování i rozdílných vzdáleností by bylo nutné uvažovat nelineární útlum a vztahy níže by se zdatelně zkomplikovaly). K popisu polohy se velmi často používají sférické souřadnice (lehce upravené pro ambisonii oproti matematické definici¹, viz obr. 1). Úhel $\varphi \in [-\pi; \pi]$ značí azimut a úhel $\theta \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ značí výškový úhel. Každému zdroji zvuku tedy můžeme přiřadit azimut φ_n a výškový úhel θ_n .

¹Jedná se o to, že pro ambisonii se používá nulová hodnota úhlu θ pro bod, který leží v rovině vytyčené souřadnicovými osami x a y oproti standardní matematické definici, kde nulová hodnota úhlu θ odpovídá bodu, který leží na ose z



Obrázek 1: Souřadný systém pro ambisonii

Na základě těchto úhlů je pak možné dopočítat danou sférickou harmonickou funkci dle vztahu


$$Y_l^m(\varphi, \theta) = N_l^{|m|} \cdot P_l^{|m|}[\sin(\theta)] \cdot \begin{cases} \sin(|m|\varphi), & \text{pro } m < 0, \\ \cos(|m|\varphi), & \text{pro } m \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

kde $l \in \mathbb{N}_0$ značí řád sférické harmonické funkce a $m \in \mathbb{Z} \wedge -l \leq m \leq l$ značí stupeň sférické harmonické funkce, člen $N_l^{|m|}$ značí normalizační koeficient a člen $P_l^{|m|}[\sin(\theta)]$ označuje přidruženou Legendrovu funkci řádu l a stupně $|m|$. Výsledný ambisonický kanál, který bude odpovídat napoložovanému zdroji zvuku pak získáme jako součin dané sférické harmonické funkce s původním (neambisonickým) signálem - zapsáno matematicky



$$s_{\text{ACN}}(t) = Y_l^m(\varphi, \theta) \cdot s(t), \quad (2)$$

kde s_{ACN} je výstupní ambisonický kanál, $Y_l^m(\varphi, \theta)$ je daná sférická harmonická funkce a $s(t)$ je původní signál.

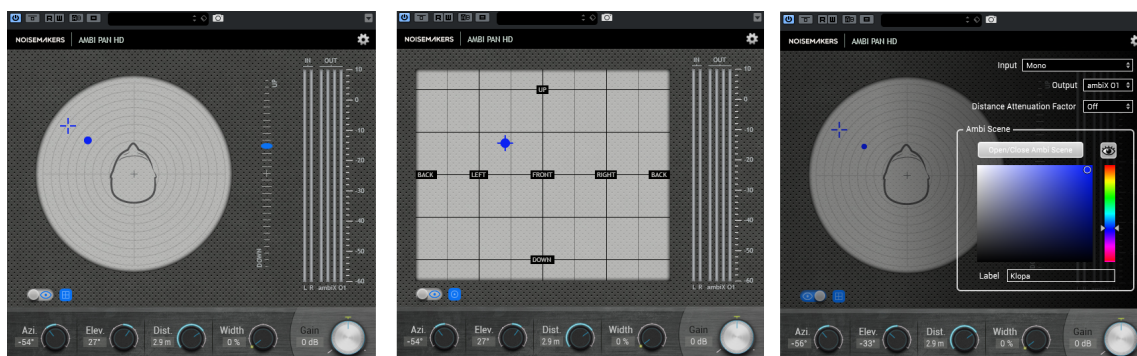
Plugin Ambi Pan HD

Plugin Ambi Pan HD slouží ke směřování neambisonických zdrojů zvuku. Jeho jednotlivé vzhledy můžete vidět na obr. 2. Před použitím pluginu je nutné nastavit typ vstupní stopy (mono, stereo, 5.1 ad.) a tvar výstupu². K tomuto nastavení se dostaneme pomocí tlačítka  v pravé horní části pluginu (viz pravý výstřižek na obr. 2). Uživatel může dále ovlivnit chování pluginu pomocí následujících možností

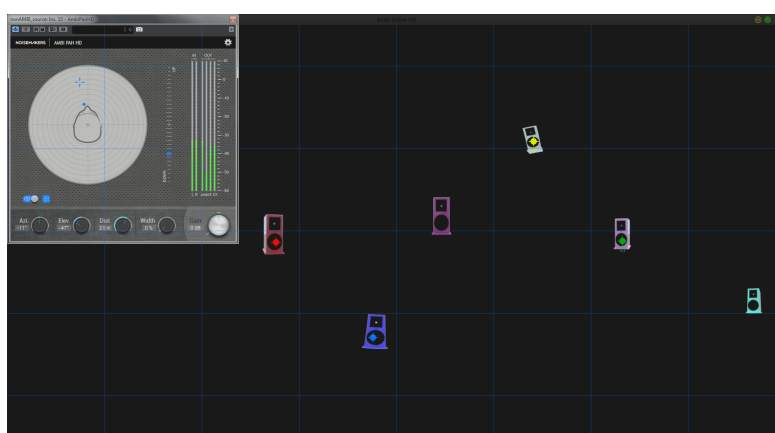
- **Azi.** - azimut φ zdroje,
- **Elev.** - výškový úhel θ zdroje,
- **Dist.** - vzdálenost zdroje od posluchače r ,
- **Width** - velikost prostorového efektu,
- **Gain** - zesílení výsledného ambisonického výstupu.

Tyto parametry je možné buď nastavit pomocí potenciometrů ve spodní části pluginu, nebo pomocí dvou interaktivních GUI (viz levý a prostřední výřez na obr. 2), kde přímo nastavíme polohu daného zdroje - obě možnosti jsou vzájemně provázané (tj. změna v potenciometrech se projeví na GUI a naopak). Mezi jednotlivými GUI je možno přepínat pomocí tlačítka  resp. tlačítka . Dále je možné v sekci nastavení nastavit útlumový faktor a zvolit

²Pluginy od firmy NoiseMakers podporují v současné době (tj. květen 2019) pouze formát **ambiX**, a to maximálně do třetího řádu ambisonie.




Obrázek 2: Plugin Ambi Pan HD



Obrázek 3: Doplněk Ambi Scene pro plugin Ambi Pan

barvu a název zdroje pro doplněk Ambi Scene, který se hodí použít, máme-li k dispozici sférické video a několik neambisonických zdrojů zvuku, na které je aplikovaný plugin Ambi Pan. Pomocí pluginu Ambi Scene pak můžeme jednotlivé zdroje zvuku polohovat přímo podle daného sférického videa - viz obr. 3.

Ambi Head HD

Plugin Ambi Head HD slouží k binaurálnímu downmixu pomocí HRTF z ambisonického formátu typu B. Jeho jednotlivé vzhledy můžete vidět na obr. 4. Před použitím pluginu je ještě nutné nastavit řád ambisonie na vstupu a vybrat HRTF, pomocí které se bude výstupní stereofonní soubor dopočítávat. K tomuto nastavení (viz pravý výstřižek na obr. 4 se lze dostat po kliknutí na tlačítko  v pravé horní části pluginu. Na výběr jsou 3 základní typy HRTF

- o Neumann KU100,
- o Youtube,
- o Facebook.

Pokud by byly tyto HRTF nedostatečné, je možné do pluginu nahrát libovolnou HRTF ve formátu SOFA. Uživatel může dále ovlivnit chování pluginu pomocí následujících možností



- o **Roll** - natočení hlavy kolem souřadné osy x proti směru hodinových ručiček,



Obrázek 4: Plugin Ambi Head HD

- **Pitch** - natočení hlavy kolem souřadné osy y proti směru hodinových ručiček,
- **Yaw** - natočení hlavy kolem souřadné osy z proti směru hodinových ručiček,
- **Width** - velikost prostorového efektu (možnost Width),
- **Gain** - zesílení výsledné stereofonní stopy.

Tyto parametry je možné nastavit jak pomocí potenciometrů ve spodní části pluginů, tak i pomocí GUI (kde lze virtuální hlavou natočit do libovolné polohy).

Kromě GUI pro polohování virtuální hlavy je také v pluginu možné pozorovat rozložení prostorového zvukového pole (viz prostřední výstřižek na obr. 4). K tomuto rozložení pluginu je možné se dostat po stisknutí tlačítka . Zpět na GUI pro polohování virtuální hlavy je pak možné se dostat tlačítkem .

Beamforming

Máme-li k dispozici libovolný ambisonický zvuk ve formátu B, znamená to, že máme informace o rozložení zvukového pole v daném prostoru (tím přesnější, čím vyšší je řád ambisonie). Z tohoto důvodu si vlastně můžeme v rámci postprodukčních úprav ambisonického zvuku vybrat jen tu část prostoru, kterou potřebujeme. Toto lze udělat pomocí tzv. virtuálních mikrofonů. Tyto mikrofony umístíme do počátku souřadného systému a na základě jejich směrovosti (viz tab. 1) a úhlu snímání můžeme poté dopočítat výsledný signál. Pro jednoduchý virtuální mikrofón pro ambisonii prvního řádu lze např. dle [3] určit výstupní signál $s(t)$ jako

$$s(t) = \frac{1}{2} \cdot [(2 - D) \cdot W(t) + D \cdot (r_x \cdot X(t) + r_y \cdot Y(t) + r_z \cdot Z(t))], \quad (3)$$

kde D je směrovost virtuálního mikrofonu a r_x , r_y a r_z jsou směrové kosiny natočení virtuálního mikrofonu vzhledem k jednotlivým souřadným osám.

Tabulka 1: Přehled základních směrovostí mikrofonů (převzato z [3])




směrovost	směrová charakteristika
$D = 0$	kulová
$D = 0,5$	superkardiodní
$D = 1$	kardiodní
$D = 1,5$	hyperkardiodní
$D = 2$	osmičková



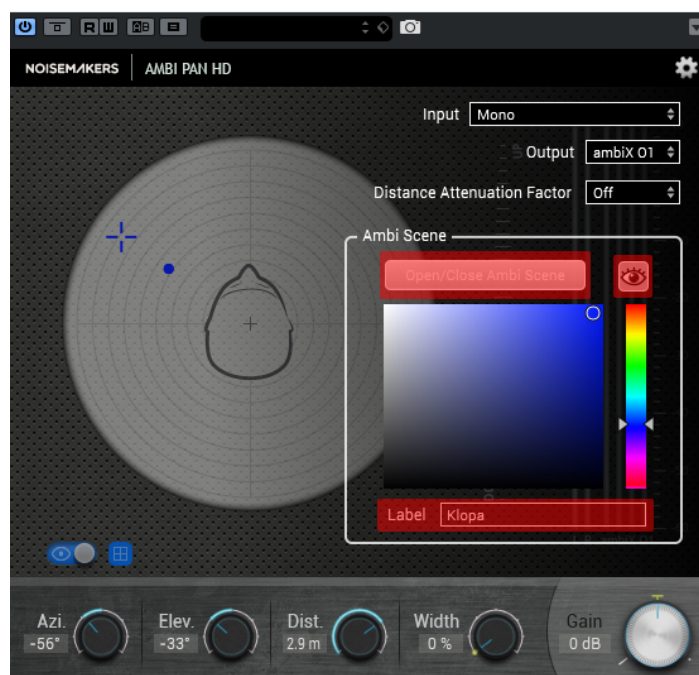
Obrázek 5: Pool Window v programu Cubase

Postup realizace

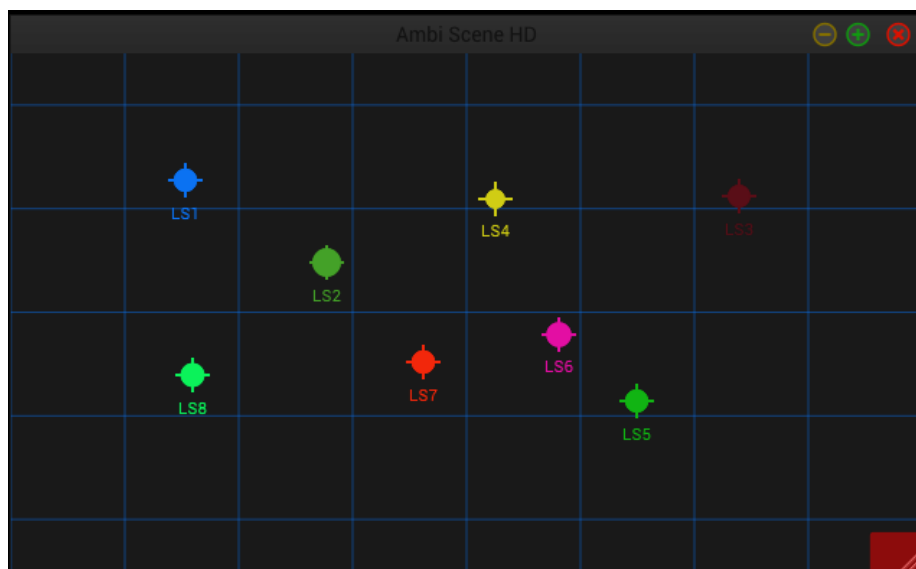
Polohování neambisonických zdrojů zvuku

1. Otevřete vzorový projekt LP02.cpr, nahrajte do něj všechny soubory ze složky LP02_LS_feeds a sférické video LP02_spherical_video.mp4, obojí je v příloze laboratorní práce. Nahrání souboru provedete tlačítkem Input v Pool Window (cesta Media>Open Pool Window) - viz obr. 5.
2. Přetáhněte soubor se sférickým videem do stopy 360 video, jednotlivé audio soubory do stop LSXX_signal, které symbolizují signály pro jednotlivé reproduktory.
3. U každé stopy ve složce Ambi_adjustments otevřete plugin Ambi Pan HD (nachází se v submenu INSERTS) a pomocí tlačítka  v pravém horním rohu pluginu přejděte do nastavení pluginu.
4. V nastavení pluginu Ambi Pan HD v možnosti Label pojmenujte každou stopu (např. LS1, LS2 ad.), přiřaďte jí barvu a ověřte si, že oko je nakresleno plnou silnou čarou³ (viz obr. 6).
5. Po nastavení poslední scény klikněte v pluginu Ambi Pan HD na tlačítka Open/Close Ambi Scene. Po kliknutí na tlačítko by se vám měla otevřít průsvitná vrstva - tzv. Ambi Scene HD, na které byste měli vidět celkem osm „puntíků“ (jejichž barva a jméno závisí na nastavení z kroku 4), které značí jednotlivé zdroje zvuku - viz obr. 7. Pokud jste při nastavování vůbec nehýbali s parametry pluginu, je velmi pravděpodobné, že jednotlivé „puntíky“ budou přes sebe - proto případně klikněte na jednotlivé „puntíky“ a přesuňte je tak, abyste viděli všech osm.
6. Dvojklikem na sférické video ve stopě 360 video si otevřete interní videopřehrávač SW Cubase.
7. Přesuňte průsvitnou vrstvu Ambi Scene HD na video přehrávač a pomocí pravého dolního rohu (viz označení na obr. 7) ji rozšiřte tak, aby pokrývala celý video přehrávač.
8. Napoložte jednotlivé neambisonické zdroje zvuku tak, aby odpovídaly jednotlivým reproduktorům a na základě polohy jednotlivých zdrojů určete souřadnice jednotlivých reproduktorů.
9. S pomocí automatizace (např. v hlasitosti, viz [1] či obecný návod k ambisonickému pracovišti) či s pomocí stříhových nástrojů (nástroj , který lze najít na hlavním panelu ) vytvořte zvukovou stopu k předloženému ambisonickému videu tak, aby postupně hrály reproduktory zleva doprava (bráno dle zobrazovaného snímku v ekvidistantní válcové projekci), každý jiný nástroj.

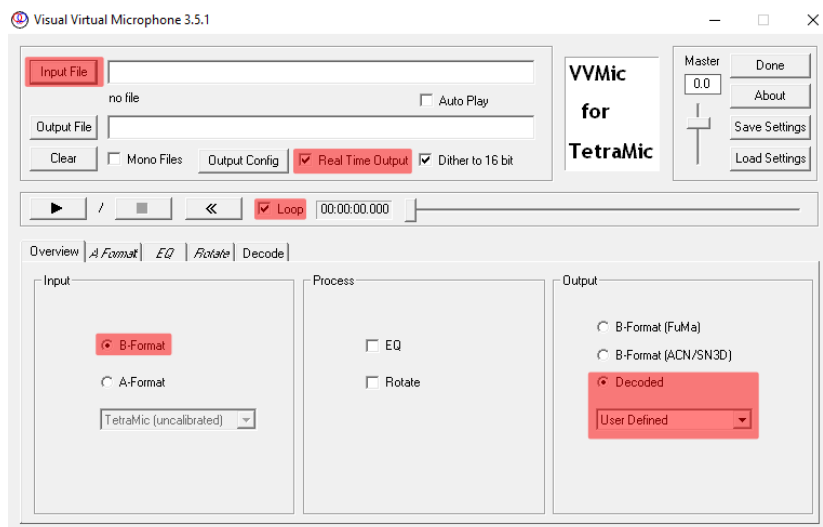
³Jedná se o povolení viditelnosti v rámci „odkuku“ - Ambi Scene HD, který budeme v práci používat.



Obrázek 6: Plugin Ambi Pan HD



Obrázek 7: Plugin Ambi Pan HD



Obrázek 8: Hlavní okno programu VVMic

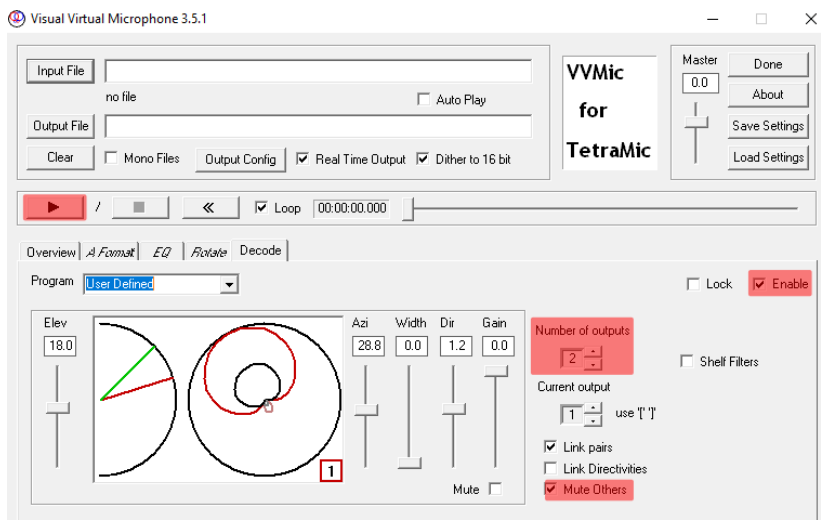
- Po konečném nastavení si poslechněte binaurální downmix výsledného ambisonického mixu pomocí pluginu Ambi Head HD, který je umístěný v submenu INSERTS u stopy AMBI_HDPH. Na základě poslechu určete, jak bude vypadat výsledné sférické video (tzn. jakým způsobem se „spojí“ obraz z ekvidistantní válcové projekce, podle které jste nasazovali jednotlivé zdroje zvuku). Své domněnky si ověřte zhlédnutím videa v libovolném přehrávači, který podporuje sférická videa (např. VLC).

Beamforming

- Otevřete si program VVMic a nahrajte do něj zvukovou stopu LP02_beamforming.wav a proveďte základní nastavení programu podle obr. 8.
- Po provedení základního nastavení se přesuňte do karty Decode. Na této kartě, jak ukazuje obr. 9, je možné vytvořit svůj libovolný virtuální mikrofon, kterým budeme snímat daný prostor. Kvůli možnosti přehrávání v reálném čase je nutné vytvořit sudý počet mikrofonů - z tohoto důvodu nastavíme parametr Number of outputs na hodnotu 2 a zaškrtneme tlačítko Mute Others (které zatlumí všechny virtuální mikrofony, které nepoužíváme).
- Nyní můžete pomocí parametrů
 - o **Elev.** - výškový úhel,
 - o **Azi.** - azimut,
 - o **Dir.** - směrovost,
 - o **Gain** - zisk,

nastavit libovolnou polohu virtuálního mikrofonu. Po spuštění tlačítka „Play“ tak uslyšíte pouze výstupní signál z našeho výstupního mikrofonu.

- Po nastavení programu VVMic se pokuste experimentálně oddělit jednotlivé zdroje zvuku. Pokud budete s polohou mikrofonu spokojeni, můžete (po zastavení přehrávání) kliknout na tlačítko Output file a vytvořit novou zvukovou stopu, do které se vám nahraje výstup z daného virtuálního mikrofonu. Výstupem by měly být 4 stopy, každá se samostatným nástrojem.



Obrázek 9: Okno Decode programu VVMic

5. Výsledné stopy porovnejte s originálními stopami popř. MONO downmixem, které najdete ve složce LP02_default_files a vysvětlete případné odchylky.

Doplňkové úkoly

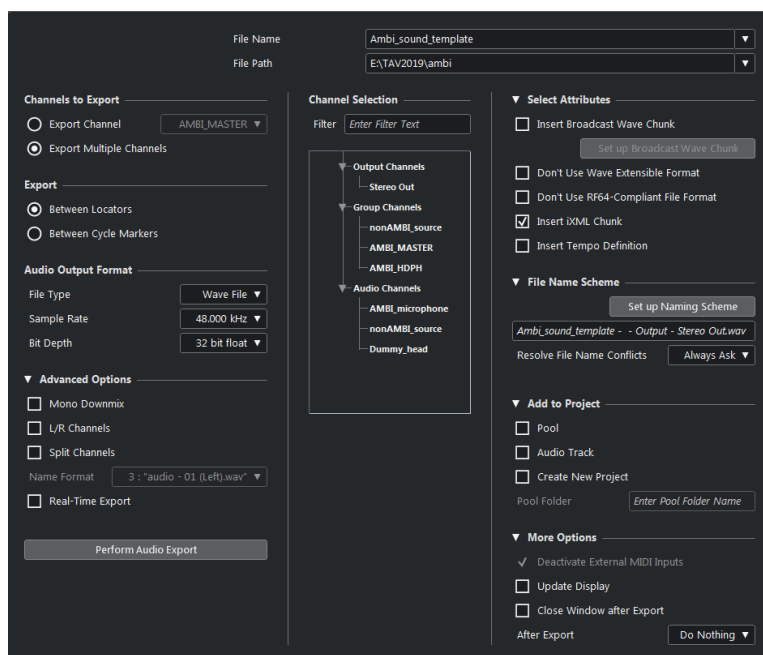
1. V SW Cubase protáhněte (popř. rozkopírujte) audio stopy u jednotlivých reproduktorů na stejnou délku a proveďte export výsledného ambisonického mixu.
 - o K menu exportu se dostanete pomocí cesty **File>Export>Audio mixdown**.
 - o V menu exportu (viz obr. 10) vyberte v prostředním sloupci stopu pro export (**AMBI_HDPH**) a zadejte místo uložení.
2. Nahrajte výsledný ambisonický mix do programu VVMic a na základě polohy jednotlivých reproduktorů určené v kroku 8 se pokuste o separaci jednotlivých kanálů. Jsou výstupní soubory z virtuálních mikrofonů naprosto totožné jako soubory vstupní (importované na začátku laboratorní úlohy do SW Cubase)? Vysvětlete důvod případných rozdílů.

Kontrolní otázky

1. Vysvětlete obecný princip polohování neambisonických zdrojů zvuku. Jak je ho dosaženo v pluginu Ambi Pan HD?
2. Vysvětlete pojem ekvidistantní válcová projekce. Jak ji lze získat ze sférického videa?
3. Vysvětlete pojem beamforming a popište, k čemu ho lze použít.

Použitá a doplňková literatura

- [1] Cubase Operation Manual. *Steinberg user manuals* [online]. Dostupné z: https://steinberg.help/cubase_pro_artist/v10/en/



Obrázek 10: Okno exportu projektu

- [2] Ambi Manual. In: *Noise Makers* [online]. Dostupné z: <https://www.noisemakers.fr/Downloads/AmbiManual.pdf>
- [3] ORTOLANI, Francesca a Aurelio UNCINI. A new approach to acoustic beamforming from virtual microphones based on ambisonics for adaptive noise cancelling. *2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* [online]. IEEE, 2016, 2016, , 337-342. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493080. ISBN 978-1-5090-1431-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7493080/>
- [4] VVMic. *VVAudio* [online]. Dostupné z: <https://www.vvaudio.com/products/VVMic>

Mastering audia pro sférická videa

Úkoly práce

1. Seznamte se s funkcí pluginů Ambi Verb HD, Ambi Limiter HD a Audio360 Encoder.
2. Proveďte požadované úpravy ambisonického zvuku.
3. Proveďte export ambisonického masteru a pomocí pluginu Audio360 Encoder proveďte spojení sférického videa a audia vč. head-locked stopy.
4. Zobrazte výsledné sférické video pomocí SW VLC.

Potřebný HW a SW

Pro realizaci laboratorní úlohy je zapotřebí

- DAW Cubase Pro 10 s pluginy
 - ◇ AMBI Verb HD,
 - ◇ AMBI Limiter HD,
- plugin Audio360 Encoder
- VR headset HTC Vive

Obsah datové přílohy

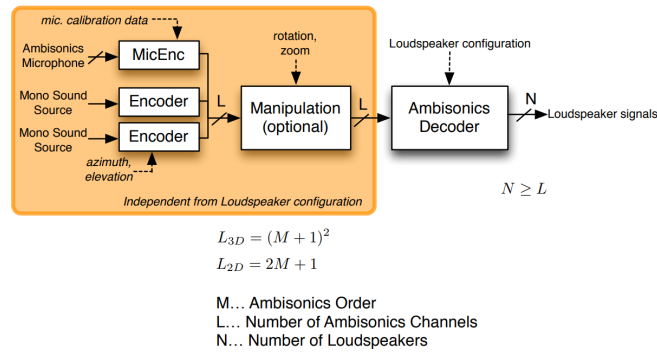
V datové příloze k laboratorní úloze se nachází soubory

- LP03.cpr resp. LP03_ELEM.cpr - šablona projektu pro Cubase (pro plnou resp. „omezenou“ verzi),
- LP03_spherical_video.mp4 - sférické video,
- LP03_ambi_B_mix.wav - ambisonický mix ve formátu B,
- LP03_head_locked.wav - head-locked stopa,
- LP03_IR - složka s impulzovými odezvami pro plugin Ambi Verb HD.

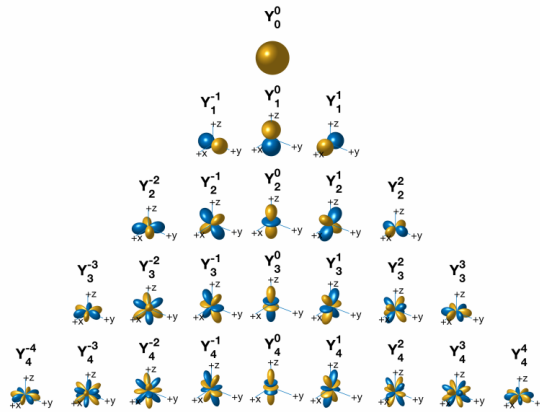
Teoretický rozbor

Postup vzniku zvukové stopy pro sférická videa

Prostorový zvuk v ambisonii nám dává mnohem větší možnosti postprodukčních úprav, a to hlavně díky přítomnosti vertikální složky zvukového pole. Není proto překvapivé, že proces zpracování ambisonického mixu se bude v mnohém lišit od zpracování klasických mixů. Bloková struktura celého procesu je znázorněna na obr. 1. Je vidět, že při vytváření výsledného ambisonického mixu je třeba brát v potaz, že kromě zvukových dat z ambisonického mikrofonu máme často k dispozici i data z neambisonických zdrojů (např. z klopových mikrofonů, které mají jednotliví aktéři ve sférickém videu). Bohužel data z neambisonických zdrojů neobsahují informace o poloze, proto je potřeba je před dalším zpracováním umístit do zvukového prostoru. K tomuto účelu existuje velké množství pluginů - tzv. ambisonických pannerů (za všechny uvedu např. Ambi Pan HD či Audio360 Spatialiser) Všechny pannery využívají váhování původního „dry“ zvuku sférickými harmonickými funkcemi (viz obr. 2) na základě zvolené polohy zdroje (udané typicky pomocí prostorových úhlů φ a θ a vzdálenosti r).



Obrázek 1: Obecná bloková struktura zpracování ambisonických signálů



Obrázek 2: Tvar sférických harmonických funkcí využívaných do ambisonie 4. řádu

Po napolohování jednotlivých neambisonických zdrojů zvuku a vytvoření výsledné ambisonické informace v daném formátu dochází k masteringu celého ambisonického mixu - úpravy dynamiky, frekvenční korekce popř. jiné efekty. Po kontrole finálního masteru je nutné danou ambisonickou stopu vyexportovat a posléze ji spojit s požadovaným sférickým videem - buď pomocí SW `ffmpeg` nebo pomocí libovolné aplikace třetích stran - např. pluginu Audio360 Encoder (který ale také využívá `ffmpeg`, jen poskytuje trochu více přívětivější uživatelské prostředí) a přidat potřebná metadata, aby byly přehrávače schopny rozpoznat, že se jedná o sférické video s prostorovým zvukem.

Ambi Verb HD

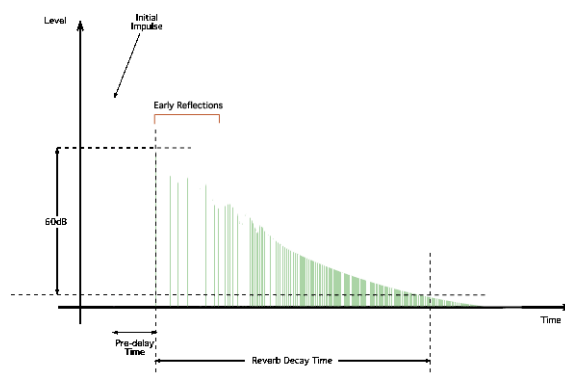
Plugin Ambi Verb HD slouží k přidání efektu reverb na ambisonický mix. Jeho uživatelské prostředí je vidět na obr. 3. Před použitím pluginu je nutné vybrat, jaká impulzová odezva má být při výpočtu efektu použita - je možné vybrat jak z předdefinovaných odezev, tak není problém nahrát vlastní impulzovou odezvu (ve formátu `wav`). Uživatel může dále ovlivnit chování pluginu pomocí následujících možností

- **Dry/wet** - poměr „dry“ (neupraveného) a „wet“ (upraveného) signálu,
- **Decay** - doba trvání efektu reverb (vztaženo k celkové délce impulzové odezvy; pro lepší představu o významu parametru viz obr. 4),
- **Spread** - parametr udávající „hloubku“ výsledného ambisonického efektu,

- o **Pre-Dly** - doba, za kterou je možné slyšet přidáný efekt po ukončení buzení (tzv. *pre-delay*; pro lepší představu o významu parametru viz obr. 4),
- o **Gain** - zesílení výstupního ambisonického mixu.



Obrázek 3: Plugin Ambi Verb HD

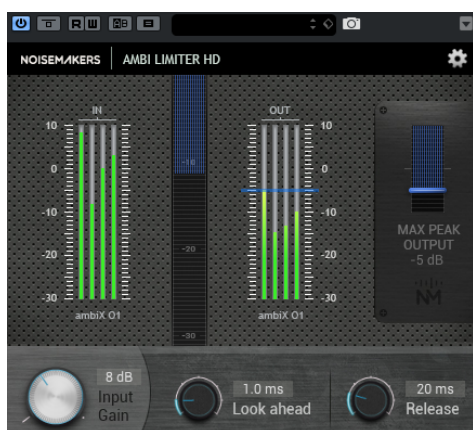


Obrázek 4: Grafické vysvětlení významu parametrů pre-delay a decay

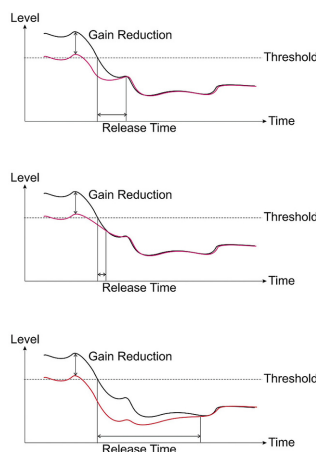
Ambi Limiter HD

Plugin Ambi Limit HD pomáhá při masteringu zvukové stopy - jedná se vlastně o ambisonický limiter. Uživatelské prostředí pluginu je k vidění na obr. 5. Uživatel může ovlivnit chování pluginu pomocí následujících parametrů

- o **MAX PEAK OUTPUT** - nastavení nejvyšší možné úrovně signálu na výstupu,
- o **Input Gain** - zesílení signálu na vstupu pluginu,
- o **Look ahead** - čas, po který se dívá plugin dopředu na příchozí stopu, aby mohl v případě překročení nastavené úrovně včas zasáhnout,
- o **Release** - nastavení času, po který bude docházet k aplikaci limiteru po překročení nastavené úrovně (pro lepší představu o významu parametru viz obr. 6).



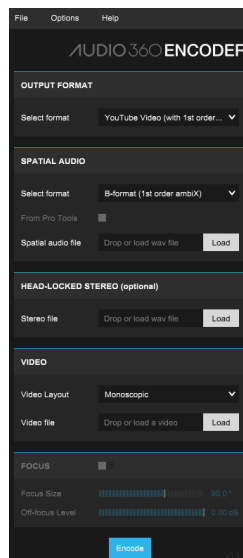
Obrázek 5: Plugin Ambi Limit HD



Obrázek 6: Grafické vysvětlení významu parametru release

Audio360 Encoder

Plugin Audio360 Encoder slouží ke spojení sférického videa se sférickým audiem. Uživatelské prostředí pluginu je na obr. 7. Tento plugin kromě samotného spojení doplní i do metadat výsledného souboru informaci o tom, že se jedná o sférické video (jinak by přehrávače nebyly schopné video správně přehrát). Kromě spojení sférického audia a videa je možné do pluginu nahrát tzv. head-locked stopu. Jedná se o (typicky stereo) stopu, která je umístěna do počátku souřadného systému, takže není závislá na konkrétním natočení diváka. Tato stopa se hodí například pro podkresovou muziku či monolog vypravěče apod.



Obrázek 7: Plugin Audio360 Encoder

Postup realizace

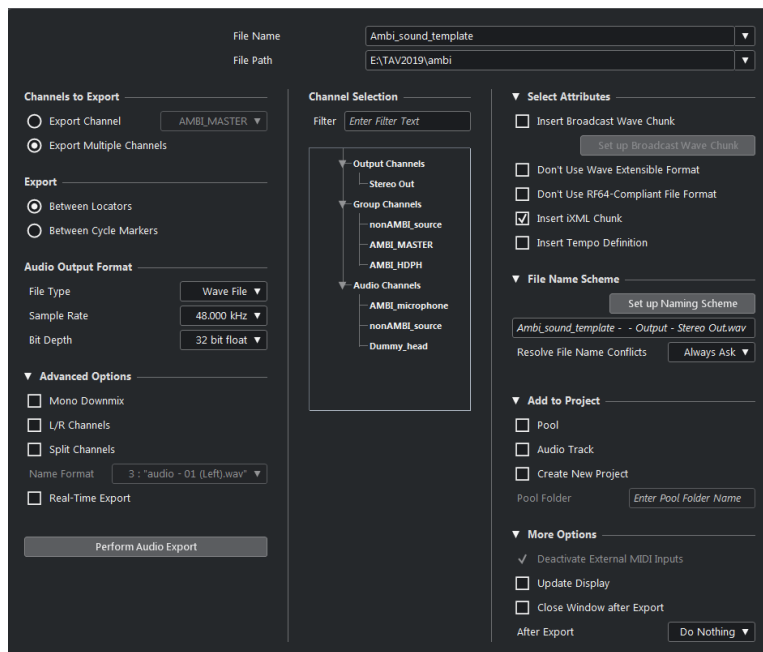
1. Otevřete vzorový projekt LP03.cpr, nahrajte do něj dodaný ambisonický mix LP03_ambi_B_mix.wav, přetáhněte ho do stopy AMBI_Mix a poslechněte si binaurální downmix tohoto souboru ve stopě AMBI_HDPH. Nahrání souboru provedete tlačítkem Input v Pool window (cesta Media>Open Pool Window) - viz obr. 8.
2. Ve stopě AMBI_Master v submenu INSERTS otevřete přidání pluginu Ambi Verb HD.
3. Do pluginu Ambi Verb HD přetáhněte na dané místo (viz obr. 3) jednu z dodaných impulzových odezvy ze složky LP03_IR, všechny parametry nastavte do výchozích hodnot (dvojklik na daný fader s parametrem) a poslechněte si binaurální downmix ve stopě AMBI_HDPH. Popište rozdíly oproti předchozímu poslechu.
4. Nastavte parametry pluginu na následující hodnoty
 - o Dry/wet = 0%,
 - o Decay = 100%,
 - o Spread = 50%,
 - o Pre-Dly = 30 ms,

poslechněte si binaurální downmix a porovnejte s prvním poslechem (bez aplikace pluginu). Jsou soubory podobné či odlišné? Vysvětlete proč.



Obrázek 8: Pool window v SW Cubase

5. Zvyšujte parametr Dry/wet (s krokem 25 %) a průběžně poslouchejte binaurální výstup. Určete význam parametru Dry/wet.
6. Experimentálně se pokuste určit významy zbylých parametrů pluginu. Své závěry porovnejte s teoretickým rozbohem.
7. Nastavte jednotlivé parametry pluginu Ambi Verb HD tak, aby byl binaurální downmix příjemný na poslech (tzn. ani moc ani málo reverbu).
8. Ve stopě **AMBI_Master** v submenu INSERTS otevřete přidávaný plugin Ambi Limit HD.
9. Experimentálně se pokuste určit významy jednotlivých parametrů pluginu (viz obr. 5). Své závěry porovnejte s teoretickým rozbohem.
10. Nastavte plugin tak, aby
 - o amplituda signálu na vstupu limiteru byla zvýšena na dvojnásobek,
 - o výstupní signál nepřekročil -3 dB,
 - o aplikoval útlum na výstupu ještě po dobu 30 ms od posledního překročení rozhodovací úrovně -3 dB,
 - o měl na aplikaci limitu čas alespoň 2 ms.
11. Proveďte export výsledného ambisonického mixu.
 - o K menu exportu se dostanete pomocí cesty **File>Export>Audio mixdown**
 - o V menu exportu (viz obr. 9) vyberte v prostředním sloupci stopu pro export (**AMBI_MASTER**) a zadejte místo uložení.
12. Výsledný ambisonický mix spojte v pluginu Audio360 Encoder s ambisonickým videem (jako výstupní formát zvolte YouTube Video (with 1st order ambiX)).
13. Přehrajte si výsledné sférické video v přehrávači VLC.
14. Přidejte do sférického videa dodanou head-locked stopu **LP03_head_locked.wav** (pomocí pluginu Audio 360 Encoder), přehrajte si nové výstupní video a popište, jak se head-locked stopa projeví.



Obrázek 9: Okno exportu projektu

Doplňkové úkoly

1. Zapůjčte si od vyučujícího VR headset HTC Vive a dle návodu uvedeného v ho zapojte (pro správnou funkci je nutné být přihlášen do účtu Steam).
2. Pomocí SW Viveport Video si na VR headsetu přehrajte výstupní video.
3. Vyzkoušejte, jakým způsobem se projeví nahrání impulzové odezvy v ambisonii prvního řádu porovnání s impulzovou odezvou nahranou v MONO souboru (viz soubory Hall_ambi_IR_ambiX.wav a Hall_OMNI.wav ve složce LP03_IR).

Kontrolní otázky

1. Vysvětlete pojem *head-locked* stopa. K jakému účelu se využívá u sférického videa?
2. Vysvětlete pojem *impulzová odezva*. Jakým způsobem je využita v pluginu Ambi Verb HD?
3. Jaký je význam parametru Dry/wet u pluginu Ambi Verb HD?
4. Vysvětlete význam pluginu Ambi Limiter HD. V jaké části zpracování je vhodné ho zařadit a proč?
5. Jakým způsobem pozná video přehrávač že se jedná o sférické video?

Použitá a doplňková literatura

- [1] RUMSEY, Francis. Virtual reality: Mixing, rendering, believability. In: *ResearchGate: Share and discover research* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/316474529_Virtual_reality_mixing_rendering_believability

-
- [2] Cubase Operation Manual. *Steinberg user manuals* [online]. Dostupné z: https://steinberg.help/cubase_pro_artist/v10/en/
- [3] Ambi Manual. In: *Noise Makers* [online]. Dostupné z: <https://www.noisemakers.fr/Downloads/AmbiManual.pdf>
- [4] Spatial workstation. *Facebook 360 video* [online]. Dostupné z: <https://facebook360.fb.com/spatial-workstation/>

Ambisonie vyšších řádů a kvalita binaurální reprodukce

Úkoly práce

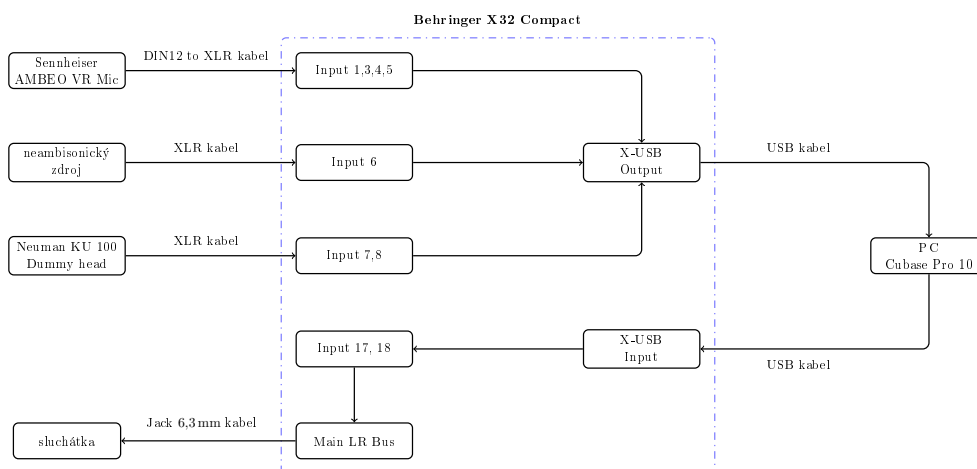
1. Seznamte se s principem dummy head Neumann KU100.
2. Proveďte záznam zvuku s dummy head, ambisonickým mikrofonom a neambisonickým zdrojem zvuku.
3. Sluchem porovnejte výstup z dummy head a binaurálního downmixu z ambisonického mikrofону pro různé typy HRTF
4. Sluchem porovnejte výstupy z dummy head a napolohovaného neambisonického mikrofónu pro různé řády ambisonie a typy HRTF.

Potřebný HW a SW

Pro realizaci laboratorní úlohy je zapotřebí

- ambisonický mikrofón Sennheiser AMBEO VR MIC,
- libovolný neambisonický zdroj zvuku,
- Dummy head Neumann KU100,
- mixážní pult Behringer X32 Compact s USB audio rozhraním,
- DAW Cubase Pro 10 s pluginy
 - ◇ AMBEO A-B converter plugin,
 - ◇ AMBI Pan HD
 - ◇ AMBI Head HD,
- kabely k propojení jednotlivých periférií
 - ◇ XLR - XLR,
 - ◇ DIN12 - XLR (4×)

Struktura pracoviště



Obrázek 1: Bloková struktura pracoviště ambisonie pro laboratorní úlohu 4

Obsah datové přílohy

V datové příloze k laboratorní úloze se nachází soubory

- LP04.cpr resp. LP04_ELEM.cpr - šablona projektu pro Cubase,
- Ambisonics.scn - šablona pro mixážní pult Behringer X32 Compact,
- LP04_ambi_A_format.wav - ambisonický zvuk ve formátu A,
- LP04_nonAmbi_source.wav - neambisonický zdroj zvuku,
- LP04_dummy_head.wav - záznam z mikrofonu Dummy head Neumann KU100,
- LP04_HRTF - složka s HRTF ve formátu SOFA pro plugin Ambi Head HD.

Vzorové nahrávky lze využít k řešení postprodukční části laboratorní práce, pokud nebudete mít při řešení k dispozici ambisonický mikrofón či Dummy head a nemohli byste tak provést daný záznam.

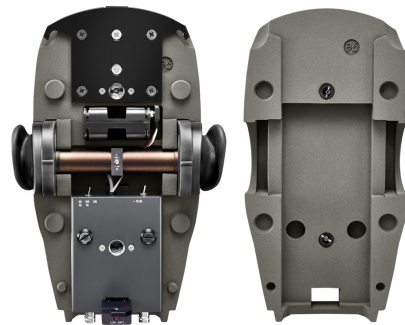
Teoretický rozbor

Funkce mikrofonu Dummy head Neumann KU100

Mikrofon Dummy head Neumann KU100 je stereofonní mikrofón, který umožňuje nahrávat velmi věrné zachycení binaurálního obrazu zvukového pole (pro dané natočení mikrofonu). Věrnosti binaurálního zachycení je dosaženo pomocí dvou kondenzátorových mikrofonních kapslí s kulovou směrovou charakteristikou, jejichž umístění v podstatě simuluje lidské uši - jednotlivé kanály nahrávky tedy v podstatě odpovídají signálům, které by přicházely na pravé a levé ucho „skutečného posluchače“, který by stál na místě mikrofonu¹. Nevýhodou tohoto mikrofonu je jeho velká cena, která se pohybuje okolo Kč 200 000,-.



(a) Vzhled mikrofonu Dummy head Neumann KU100



(b) Pohled na vnitřek mikrofonu Dummy head Neumann KU100

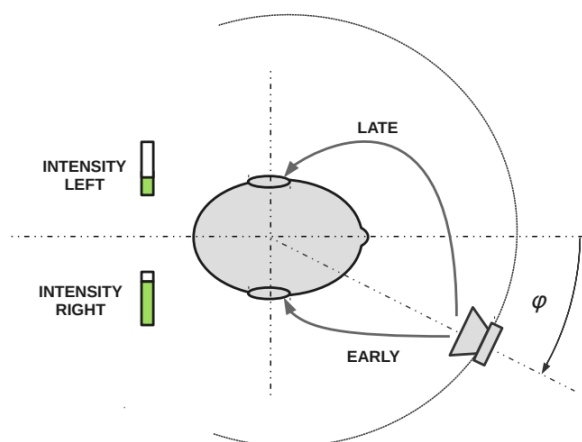
Obrázek 2: Mikrofon Dummy head Neumann KU100

Binaurální reprodukce ambisonického zvuku

Pokud máme k dispozici libovolný zdroj zvuku v prostoru, jsme schopni pomocí signálů, které nám přicházejí do uší lokalizovat jeho polohu, a to díky

- rozdílu intenzity zvuku mezi jednotlivými ušima,

¹Samozřejmě toto je velmi velké zjednodušení, v naprosto obecném případě se musí počítat s tím, že každý člověk má rozdílné HRTF.



Obrázek 3: Základní principy lokalizace zvuku

- o rozdílu času dopadu zvuku na jednotlivé uši.

Principy této lokalizace zdroje zvuku jsou naznačeny na obr. 3. Díky těmto principům je možné vytvořit obecnou funkci, která, zjednodušeně řečeno, popisuje, jakým způsobem vnímáme zvuky dopadající z různých úhlů a o různých frekvencích. Těto funkci se říká HRTF (*Head Related Transfer Function*). HRTF je pro každého posluchače velmi individuální, protože závisí např. na

- o rozměrech hlavy,
- o tvaru ušního boltce ad.

Výstupní signál pro poslech v levém uchu s_L resp. pravém uchu s_R poté získáme prostou filtrací signálů z jednotlivých reproduktorů pomocí HRTF a jejich následným součtem, tedy jako

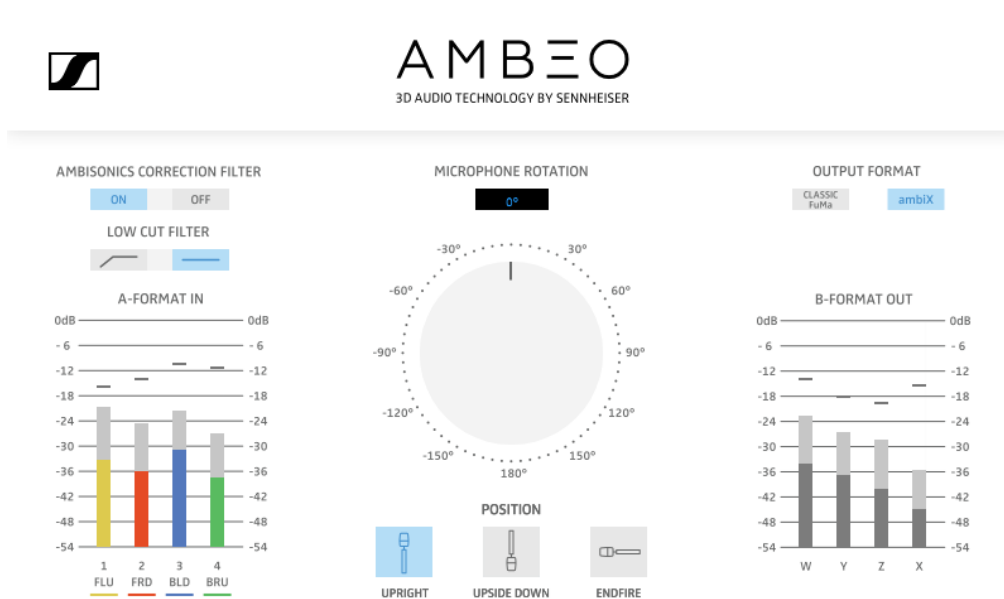
$$\begin{aligned}
 s_L(t) &= \sum_{n=1}^N h_L(t, \varphi, \theta) * s_{LS_n}(t, \varphi, \theta) \\
 &= \sum_{n=1}^N \mathcal{F}^{-1}\{H_L(\omega, \varphi, \theta) \cdot S_{LS_n}(\omega, \varphi, \theta)\},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

kde $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ značí inverzní Fourierovu transformaci, H_L značí HRTF pro levé ucho, h_L značí HRIR (*Head Related Impulse Response*) pro levé ucho, N počet reproduktorů a $*$ operaci konvoluce. Pro pravé ucho bychom dostali analogický předpis, pouze bychom změnili HRIR resp. HRTF z levého ucha na pravé.

Ambeo A-B Format Converter

Plugin Ambeo A-B Format Converter, jehož hlavní obrazovku můžete vidět na obr. 4, slouží ke konverzi mezi ambisonickým formátem A a B. Plugin mimo jiné umožňuje


- o aplikovat optimalizační filtr pro ambisonii (možnost AMBISONICS CORRECTION FILTER),
- o zařadit filtr typu horní propust pro eliminaci nízkofrekvenčních ruchů (možnost LOW CUT FILTER),
- o nastavit horizontální natočení mikrofonu (možnost MICROPHONE ROTATION),





Obrázek 4: Hlavní okno pluginu Ambeo

- vybrat pozici mikrofonu při natáčení (možnost POSITION),
- vybrat oba běžně používané formáty pro ambisonii (formáty FuMa a ambiX; možnost OUTPUT FORMAT).

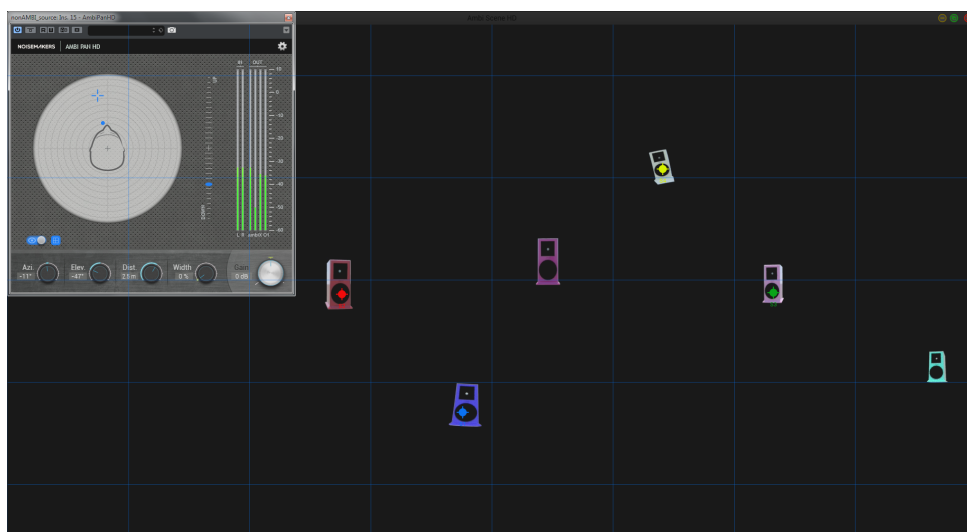
Ambi Pan HD

Plugin Ambi Pan HD slouží ke směřování neambisonických zdrojů zvuku. Jeho jednotlivé vzhledy můžete vidět na obr. 5. Před použitím pluginu je ještě nutné nastavit typ vstupní stopy a tvar výstupu². K tomuto nastavení se dostaneme pomocí tlačítka  v pravé horní části pluginu (viz pravý výstřihok na obr. 5). Uživatel může dále ovlivnit chování pluginu pomocí následujících možností

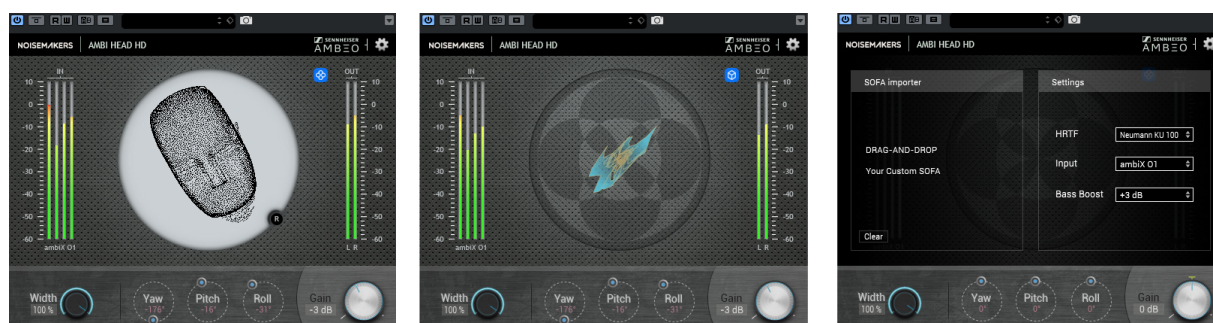
- **Azi.** - azimut φ zdroje,
- **Elev.** - výškový úhel θ zdroje,
- **Dist.** - vzdálenost zdroje od posluchače r ,
- **Width** - velikost prostorového efektu,
- **Gain** - zesílení výsledného ambisonického výstupu.

Tyto parametry je možné buď nastavit pomocí potenciometrů ve spodní části pluginu, nebo pomocí dvou interaktivních GUI (viz levý a prostřední výřez na obr. 5), kde přímo nastavíme polohu daného zdroje - obě možnosti jsou vzájemně provázané (tj. změna v potenciometrech se projeví na GUI a naopak). Mezi jednotlivými GUI je možno přepínat pomocí tlačítka  resp. tlačítka . Dále je možné v sekci nastavení nastavit útlumový faktor a zvolit barvu a název zdroje pro doplněk Ambi Scene, který se hodí použít, máme-li k dispozici sférické video a několik neambisonických zdrojů zvuku, na které je aplikovaný plugin Ambi Pan. Pomocí pluginu Ambi Scene pak můžeme jednotlivé zdroje zvuku polohovat přímo podle daného sférického videa - viz obr. 6.

²Pluginy od firmy NoiseMakers podporují v současné době (tj. květen 2019) pouze formát ambiX, a to maximálně do třetího řádu ambisonie.



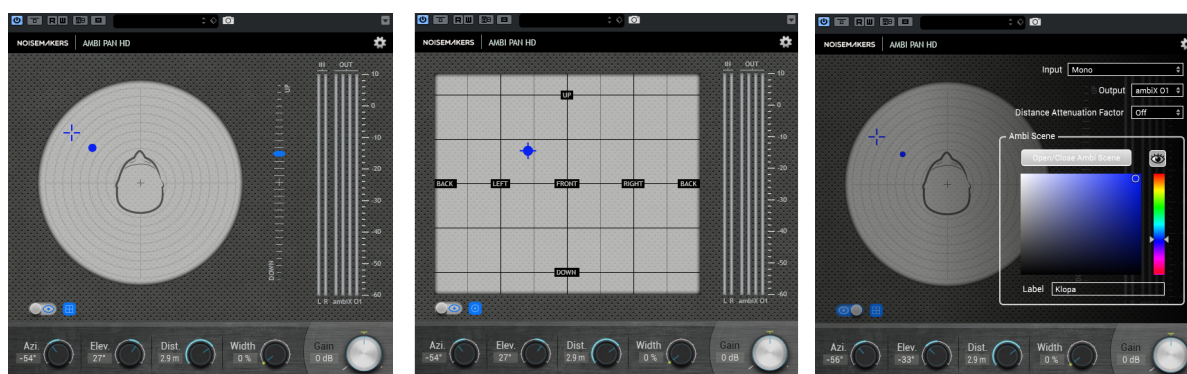
Obrázek 6: Doplněk Ambi Scene pro plugin Ambi Pan




Obrázek 7: Plugin Ambi Head HD

Ambi Head HD

Plugin Ambi Head HD slouží k binaurálnímu downmixu pomocí HRTF z ambisonického formátu typu B. Jeho jednotlivé vzhledy můžete vidět na obr. 7.



Obrázek 5: Plugin Ambi Pan HD



Před použitím pluginu je ještě nutné nastavit řád ambisonie na vstupu a vybrat HRTF, pomocí které se bude výstupní stereofonní soubor dopočítávat. K tomuto nastavení (viz pravý výstřížek na obr. 7 se lze dostat po kliknutí na tlačítko  v pravé horní části pluginu. Na výběr jsou 3 základní typy HRTF

- Neumann KU100,
- Youtube,
- Facebook.

Pokud by byly tyto HRTF nedostatečné, je možné do pluginu nahrát libovolnou HRTF ve formátu SOFA. Uživatel může dále ovlivnit chování pluginu pomocí následujících možností

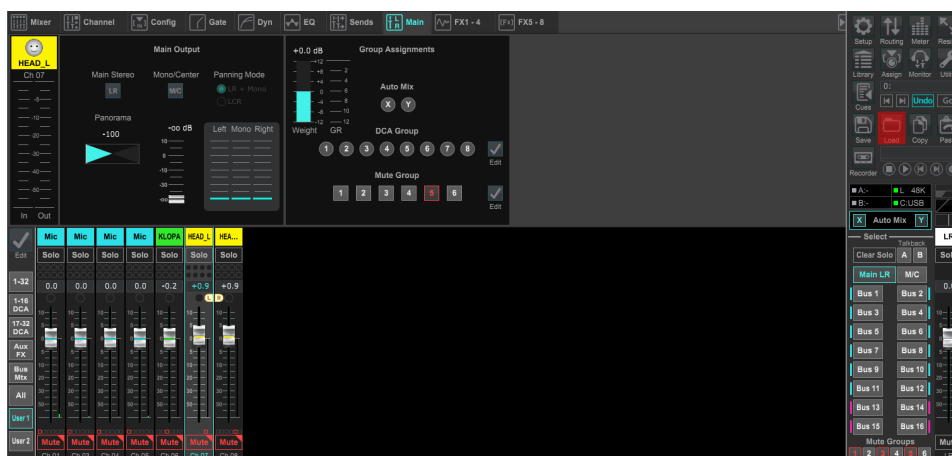
- **Roll** - natočení hlavy kolem souřadné osy x proti směru hodinových ručiček,
- **Pitch** - natočení hlavy kolem souřadné osy y proti směru hodinových ručiček,
- **Yaw** - natočení hlavy kolem souřadné osy z proti směru hodinových ručiček,
- **Width** - velikost prostorového efektu (možnost Width),
- **Gain** - zesílení výsledné stereofonní stopy.

Tyto parametry je možné nastavit jak pomocí potenciometrů ve spodní části pluginů, tak i pomocí GUI (kde lze virtuální hlavou natočit do libovolné polohy).

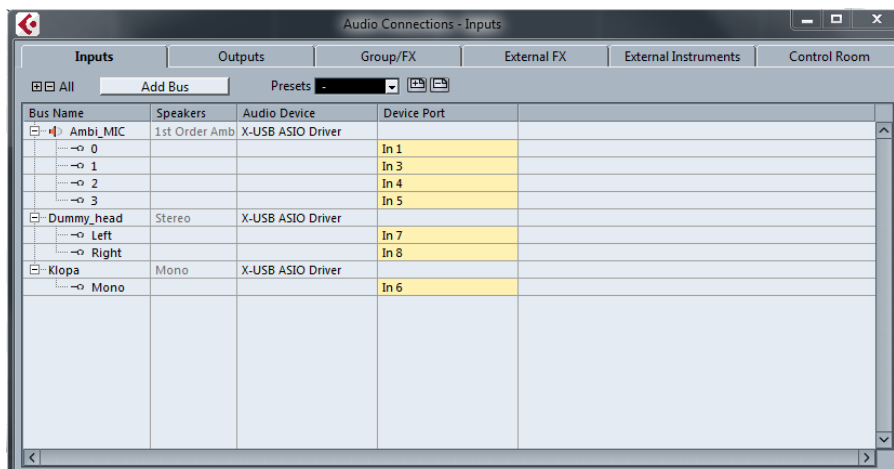
Kromě GUI pro polohování virtuální hlavy je také v pluginu možné pozorovat rozložení prostorového zvukového pole (viz prostřední výstřížek na obr. 7). K tomuto rozložení pluginu je možné se dostat po stisknutí tlačítka . Zpět na GUI pro polohování virtuální hlavy je pak možné se dostat tlačítkem .

Postup realizace

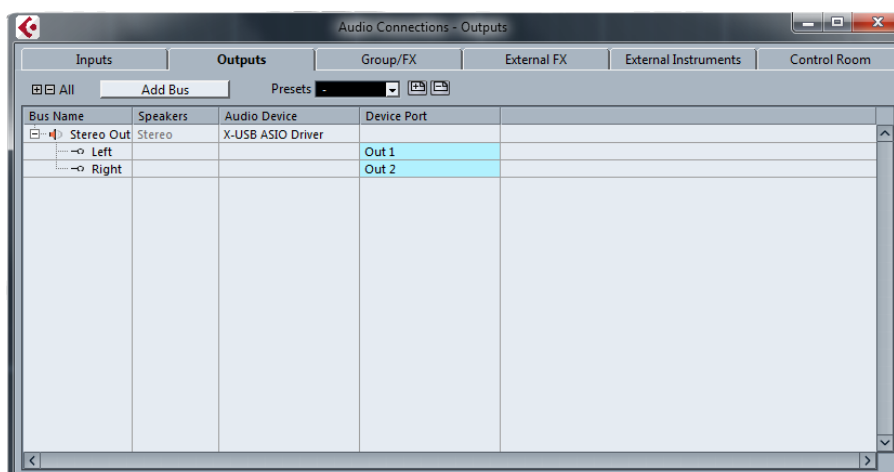
1. Zapojte pracoviště podle předlohy na obr. 1. Dbejte na správné zapojení mikrofону tak, aby jeho ukazatele FRONT a UP ukazovaly dle pokynů (tj. dopředu a nahoru).
2. Načtěte do mixážního pultu přednastavenou scénu **Ambisonics.scn** (pomocí tlačítka LOAD v programu X32-Edit po spárování mixážního pultu s PC - viz obr. 8).



Obrázek 8: Načtení přednastavené scény do mixážního pultu pomocí programu X32 Edit





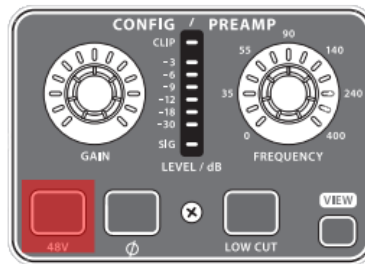
(a) Nastavení vstupních cest



(b) Nastavení výstupních cest

Obrázek 9: Správné nastavení vstupních a výstupních cest ve vzorovém projektu

- V SW Cubase otevřete vzorový projekt LP04.cpr a zkontrolujte si nastavení vstupních a výstupních cest (klávesová zkratka F4 popř. cesta Studio>Audio connections) dle obr. 9.
- Zapněte phantomové napájení na všech potřebných kanálech (tlačítko 48V v sekci CONFIG/PREAMP na mixážním pultu - viz obr. 10).
- Umožněte nahrávání ve všech audio stopách stiskem tlačítka record u dané stopy  a zapněte si odposlech všech stop tlačítkem .
- Zkontrolujte přítomnost signálu (pomocí VU metru vedle stopy) a v případě potřeby upravte citlivost vstupních předzesilovačů na jednotlivých kanálech. **U ambisonického mikrofону dbejte na to, aby byla citlivost na všech kanálech nastavena na stejnou hodnotu, jinak dojde ke zkreslení prostorové informace.**
- Proveďte nahrávání prostorového zvuku pomocí všech tří dostupných mikrofónů

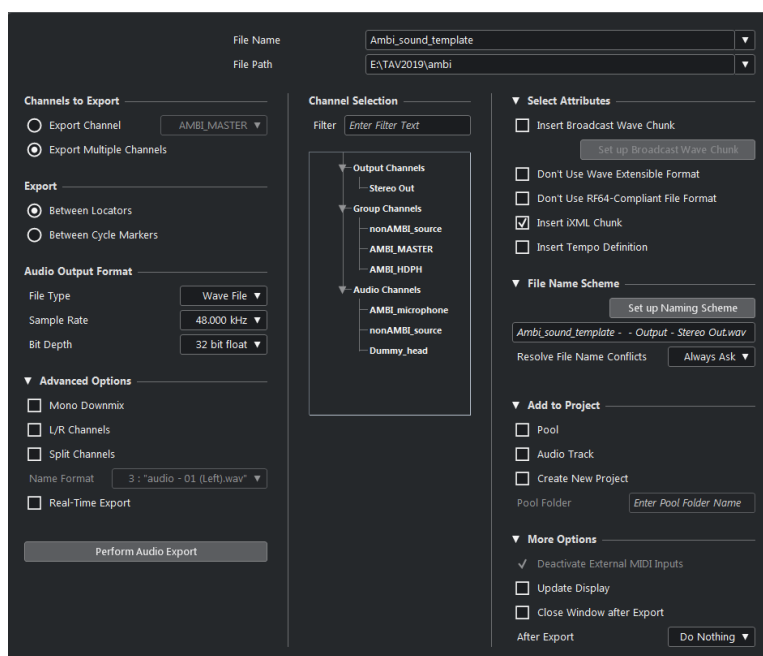


Obrázek 10: Možnosti nastavení vstupního předzesilovače kanálu

- Přijďte před mikrofon a představte se.
 - Pohybuje se v kruhu kolem dummy head a ambisonického mikrofonu s krokem zhruba 30°. Vždy řekněte váš úhel vzhledem k přední straně ambisonického mikrofonu a dummy head. Neambisonický mikrofon (handka, klopový mikrofon) mějte stále u sebe.
8. Proveďte utlumení stopy `nonAmbi_source` tlačítkem vedle stopy.
 9. Otevřete plugin AMBEO A-B converter (kolonka INSERT na levé straně ve stopě `AMBI_microphone`) a proveďte konverzi mezi ambisonickým formátem typu A a B (výstupní formát nastavte v pluginu AMBEO `ambiX`).
 10. Poslechněte si výstup z Dummy head (Neumann KU100), která se nachází ve stopě `Dummy_head` (tlačítko vedle stopy)
 11. Pomocí modifikace parametrů pluginu Ambi Head HD ve stopě `AMBI_HDPH_1st` se pokuste vytvořit zvukovou stopu, která se bude co nejvíce přibližovat výstupu z Dummy head.
 12. Pro „ideální nastavení pluginu“ (tj. takové nastavení, kdy se výstup z binaurálního downmixu nejvíce podobá výstupu z Dummy head) přejděte do nastavení pluginu Ambi Head HD (viz obr. 11) a přidejte na požadované místo HRTF ve formátu SOFA (vybranou ze složky `LP04_HRTF` v příloze laboratorní práce popř. jakoukoliv vlastní) a v nabídce HRTF vyberte možnost `Custom SOFA`. Porovnejte výstup z binaurálního downmixu s předchozím nastavením (HRTF Neumann KU100) a vysvětlete proč došlo ke změně.
 13. Podobně vyzkoušejte změnu popsanou v kroku 12 pro více dostupných HRTF a porovnejte je s výstupem z Dummy Head. Dokážete najít jinou HRTF po jejíž aplikaci se binaurální downmix z ambisonického mikrofonu přibližuje výstupu ze skutečné Dummy Head?
 14. Proveďte export výsledného „ideálního“ binaurálního downmixu z ambisonického mikrofonu a výstupu ze skutečné Dummy Head
 - K menu exportu se dostanete pomocí cesty `File>Export>Audio mixdown`
 - V menu exportu (viz obr. 12) vyberte v prostředním sloupci stopy pro export (`AMBI_HDPH_1st` a `Dummy_head`) a zadejte místo uložení.
 15. Povolte poslech stopy `nonAmbi_source` a utlumte stopu `Ambi_Microphone`.
 16. Pro ambisonii prvního řádu (stopa `nonAmbi_source_adjustments_1st_order`) pro jeden vybraný úhel napoložte v pluginu Ambi Pan HD daný zdroj zvuku.
 17. Ve stopě `Ambi_MASTER` si zpřístupněte plugin Ambi Head HD a pro HRTF Neumann KU100 (viz obr. 11)



Obrázek 11: Detail nastavení pluginu Ambi Head HD



Obrázek 12: Okno exportu projektu

si poslechněte binaurální downmix pro daný úhel³. Pokuste se najít „ideální nastavení pluginu“, ve kterém bude zvuk znít nejlépe výstupu z Dummy head.

18. Pro „ideální nastavení pluginu“ zkuste provést změnu HRTF (viz krok 12) a porovnejte jednotlivé výstupy. Dokážete najít jinou HRTF po její aplikaci se binaurální downmix z ambisonického mikrofonu přibližuje výstupu ze skutečné Dummy Head?
19. Proveďte export výsledného nejvěrnějšího binaurálního downmixu (v porovnání s výstupem z Dummy Head) z napolohovaného neambisonického zdroje zvuku pro ambisonii 1. řádu.
20. Kroky 16 až 19 proveďte pro ambisonii 2. resp. 3. řádu (stopa `nonAmbi_source_adjustments_2nd_order` resp. `nonAmbi_source_adjustments_3rd_order`) a poslechem určete vliv řádu ambisonie na kvalitu prostorové reprodukce zvuku.

Doplňkové úkoly


1. K polohování neambisonických stop využijte plugin Audio360 Spatiliser. Porovnejte jeho binaurální downmix s downmixem při polohování s pomocí Ambi Pan HD pro ambisonii druhého řádu.
2. Pomocí automatizace DAW se pokuste nastavit plugin Ambi Pan HD tak, aby se poloha zdroje zvuku měnila průběžně s pohybem kolem Dummy head ve vaší nahrávce.

Kontrolní otázky

1. Popište základní rozdíly mezi ambisonií prvního, druhého a třetího řádu.
2. Lze pomocí dostupného ambisonického mikrofonu dosáhnout stejného prostorového efektu jako s pomocí Dummy head? Vysvětlete svoji odpověď.
3. Vysvětlete pojem HRTF. Z jakého důvodu lze najít v databázích mnoho různých HRTF?

Použitá a doplňková literatura

- [1] *Sennheiser AMBEO VR MIC - Microphone 3D AUDIO capture* [online]. Dostupné z: <https://en-us.sennheiser.com/microphone-3d-audio-ambeco-vr-mic>
- [2] Neumann Dummy head KU100. *Neumann.Berlin* [online]. Dostupné z: <https://en-de.neumann.com/ku-100>
- [3] ŠTOREK, Dominik. *Source localization by virtual acoustic reality*. Praha, 2016. Disertační práce. ČVUT FEL.
- [4] Ambi Manual. In: *Noise Makers* [online]. Dostupné z: <https://www.noisemakers.fr/Downloads/AmbiManual.pdf>

³Doporučuji si na časové ose pomocí markerů (kterými lze hýbat po kliknutí na časovou osu) vybrat body, odkud kam, se vám má daná stopa přehrávat a v transportním panelu ve spodní části projektu zaškrtnout možnost loop . Nyní by se vám měla stopa přehrávat pouze mezi zvolenými markery na časové ose.

Matematická podstata ambisonie

Úkoly práce

1. Na základě teoretického rozboru vytvořte v prostředí MATLAB funkci `normalise`, která slouží k normalizaci jednotlivých sférických harmonických funkcí podle standardu SN3D
2. Prohlédněte si tvar jednotlivých sférických harmonických funkcí.
3. Do prostředí MATLAB nahrajte příložený soubor `LP05_ambi_A_format.wav` obsahující ambisonickou nahrávku prvního řádu ve formátu A a soubor `LP05_nonAmbi_source.wav` obsahující monofonní záznam a vytvořte funkce, které budou realizovat
 - o převod mezi ambisonickým formátem A a B,
 - o polohování monofonního zvuku o obecné úhly φ a θ dle obr. 1.
 - o rotaci celkového zvukového pole o obecné úhly kolem jednotlivých os souřadného systému,
 - o dopočet signálů pro matici reproduktorů.

Potřebný HW a SW

Pro realizaci laboratorní úlohy je zapotřebí

- o PC se SW MATLAB.

Obsah datové přílohy

V datové příloze k laboratorní úloze se nachází soubory

- o `Spherical_harmonics_single.m` - skript na vykreslování sférických harmonických funkcí (dle zadaného řádu a stupně),
- o `Spherical_harmonics_multi.m` - skript na vykreslování sférických harmonických funkcí (všechny do udaného řádu)¹
- o `LP05_ambi_A_format.wav` - ambisonický zvuk ve formátu A,
- o `LP05_nonAmbi_source.wav` - neambisonický monofonní zdroj zvuku,
- o `LP05_ambi_FINAL.wav` - výstupní soubor pro ověření správnosti realizace jednotlivých funkcí,
- o `plotter.m` - funkce na vykreslování výsledného obrázku pro skript `Spherical_harmonics_multi.m`
- o `Solved` - složka se vzorovým řešením jednotlivých funkcí z návodu k laboratorní úloze
 - ◇ `ambiConvert.m` - převodník mezi ambisonickým formátem typu A a B,
 - ◇ `ambiLS.m` - funkce pro výpočet signálů pro virtuální reproduktory
 - ◇ `ambiPan.m` - ambisonický panner,
 - ◇ `ambiRotate.m` - rotace zvukového pole kolem jednotlivých souřadných os,
 - ◇ `normalise.m` - normalizace dle standardu SN3D.
- o `Function_skeletons` - složka s kostrami funkcí pro implementaci v praktické části laboratorní úlohy (obsah stejný jako u složky `Solved`).

¹Výstupy vypadají nejlépe, pokud jsou zobrazeny sférické harmonické funkce nejvýše do 3. řádu. Pro vyšší řády je výsledný obrázek nepřehledný, proto je ve skriptu zakázáno jejich vykreslování.

Teoretický rozbor

Sférické harmonické funkce

Ambisonie využívá mapování prostorového zvuku pomocí sférických harmonických funkcí. Tyto funkce jsou řešením úhlové části Laplaceovy rovnice ve sférických souřadnicích, která splňuje podmínku ortogonality. Reálnou část jednotlivých sférických harmonických funkce lze určit vztahem

$$Y_l^m(\varphi, \theta) = N_l^{|m|} \cdot P_l^{|m|}[\sin(\theta)] \cdot \begin{cases} \sin(|m|\varphi), & \text{pro } m < 0, \\ \cos(|m|\varphi), & \text{pro } m \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

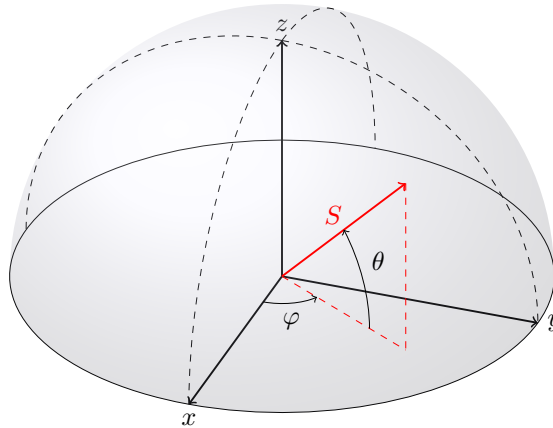
kde $l \in \mathbb{N}_0$ značí řád sférické harmonické funkce a $m \in \mathbb{Z} \wedge -l \leq m \leq l$ značí stupeň sférické harmonické funkce, člen $N_l^{|m|}$ značí normalizační koeficient, člen $P_l^{|m|}[\sin(\theta)]$ označuje přidruženou Legendrovu funkci řádu l a stupně $|m|$, úhel $\varphi \in [-\pi; \pi]$ značí azimut a úhel $\theta \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ značí výškový úhel. Význam jednotlivých úhlů plyne z obr. 1.

V ambisonii se typicky používá normalizace SN3D (u často používaného ambisonického formátu **ambix**), pro kterou můžeme vyjádřit normalizační koeficient $N_l^{|m|}$ jako

$$N_l^{|m|} = \sqrt{\frac{2 - \delta_m}{4\pi} \cdot \frac{(n - |m|)!}{(n + |m|)!}}, \quad (2)$$

kde člen δ_m značí tzv. Kroneckerovo delta v proměnné m , pro které platí vztah

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & \text{pro } m = 0, \\ 0, & \text{pro } m \neq 0. \end{cases} \quad (3)$$



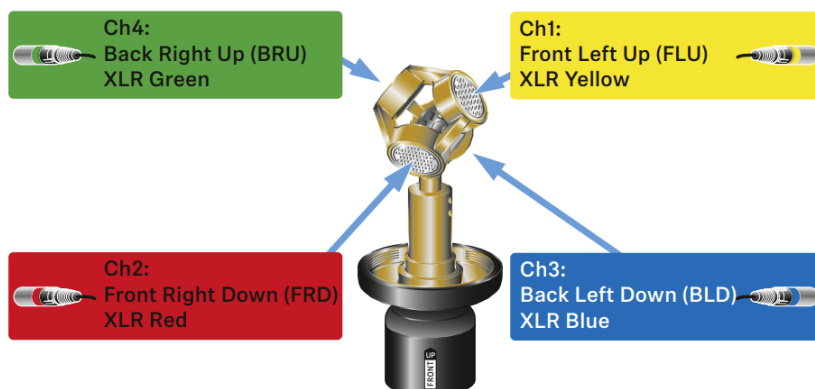
Obrázek 1: Souřadný systém pro ambisonii

Řazení sférických harmonických funkcí

S nástupem formátu **ambix** se přešlo na nový způsob řazení sférických harmonických funkcí, a to pomocí tzv. koeficientu ACN (*Ambisonics Channel Numbering*). Toto číslo, které jednoznačně určuje jednotlivé sférické harmonické funkce, je možné jednoduše vypočítat z řádu a stupně sférické harmonické funkce jako

$$\text{ACN} = l^2 + l + m. \quad (4)$$

Formát **ambix** pak používá řazení ambisonických kanálů podle vzestupně podle ACN.



Obrázek 2: Struktura mikrofonu Sennheiser AMBEO VR Mic

Převod mezi ambisonickým formátem A a B

Jak bylo naznačeno v předchozích laboratorních úlohách, ambisonické mikrofony nenahrávají přímo zvuk, který odpovídá váhování sférickými harmonickými funkcemi podle vztahu (1) (teoreticky lze pro ambisonii prvního řádu definovat tzv. Native B-format mikrofon, který již přímo nahrává zvuk, který je váhovaný sférickými harmonickými funkcemi; takovýto mikrofon je ale fyzicky nemožné realizovat a to z toho důvodu, že by všechny mikrofonní kapsle musely být na stejném místě - ve středu souřadného systému). Z tohoto důvodu je nutné před další práci signál z ambisonického mikrofonu (tzv. ambisonický signál formátu A) převést do formátu, který splňuje váhování sférickými harmonickými funkcemi podle vztahu (1). Pro ambisonii prvního řádu má převodní matice mezi formátem A a B pro použitý ambisonický mikrofon poměrně jednoduchý tvar, a to (názvy jednotlivých kanálů pro A formát jsou převzaty z datasheetu k mikrofonu Sennheiser Ambeo VR MIC - viz obr.2)

$$\begin{pmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{FLU} \\ \text{FRD} \\ \text{BLD} \\ \text{BRU} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Polohování neambisonických zdrojů zvuku

Pokud máme k dispozici neambisonický zdroj signálu, můžeme ho libovolně umístit do prostoru (pro jednoduchost předpokládáme umístění na jednotkovou kouli). K popisu polohy můžeme opět s výhodou použít dříve definované sférické souřadnice (viz obr. 1) - každému zdroji zvuku tedy přiřadíme azimut φ_n a výškový úhel θ_n . Na základě těchto úhlů je pak možné do počítat danou sférickou harmonickou funkci dle vztahu (1). Výsledný ambisonický kanál, který bude odpovídat napolohovanému zdroji zvuku, pak získáme jako součin dané sférické harmonické funkce s původním (neambisonickým) signálem - zapsáno matematicky

$$s_{\text{ACN}}(t) = Y_l^m(\varphi, \theta) \cdot s(t), \quad (6)$$

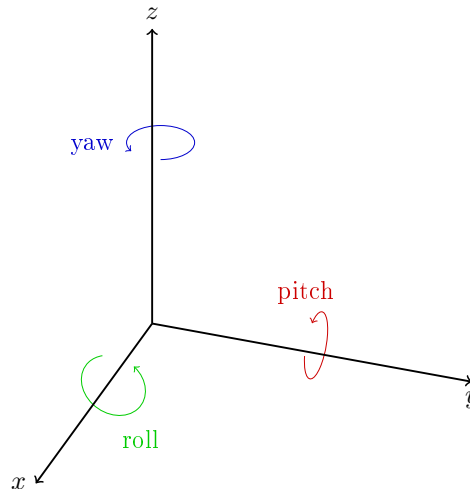
kde s_{ACN} je výstupní ambisonický kanál, $Y_l^m(\varphi, \theta)$ je daná sférická harmonická funkce a $s(t)$ je původní signál.

Základní transformace ambisonického zvuku

Kromě základních úprav, jakými jsou například ekvalizace či úpravy dynamiky² je možné celé zvukové pole rotovat. Pro jednodušší implementaci se zavádějí tři typy rotací (kladné úhly proti směru hodinových ručiček), a to

- o **roll** - rotace kolem osy x ,

²Pro nezkraslení prostorového efektu je nutné aplikovat tyto efekty na všechny kanály ambisonického mixu rovnoměrně.



Obrázek 3: Pojmenování základních typů rotací kolem jednotlivých souřadných os

- **pitch** - rotace kolem osy y ,
- **yaw** - rotace kolem osy z ,

které názorně demonstruje obr. 3. Obecně lze rotovaný výstupní signál získat pomocí maticového násobení jako

$$\mathbf{A}' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{A}, \quad (7)$$

kde \mathbf{A}' je vektor s rotovanými signály, \mathbf{R} je rotační matice a \mathbf{A} je vektor s původními signály. Pro rotaci kolem osy x o úhel α tak vztah (7) pro ambisonii prvního řádu přejde do tvaru

$$\begin{pmatrix} W' \\ X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (8)$$

Dekódování ambisonických signálů pomocí virtuálních reproduktorů

Pokud máme k dispozici ambisonický zvuk ve formátu B, můžeme dopočítat rozložení zvukového pole v libovolném místě v prostoru vůči středu souřadného systému. Zvukové pole ve středu souřadného systému si tedy inverzně můžeme představit jako součet signálů z reproduktorů, které vydávají zvuk odpovídající rozložení zvukového pole v daném bodě - a to přesně je tzv. princip virtuálních reproduktorů.

Matematicky je poté možné dopočítat signál pro jednotlivé reproduktory s_{LS} jako

$$\mathbf{S}_{LS} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{A}, \quad (9)$$

kde vektor \mathbf{S}_{LS} obsahuje signály pro jednotlivé reproduktory, \mathbf{D} značí matici pro dekodování a vektor \mathbf{A} označuje daný ambisonický signál. Matice pro dekodování má mnoho tvarů, její koeficienty se liší hlavně podle rozmístění reproduktorů a použitého typu dekodování (psychoakustické, fyzikální). Například pro tzv. Max- r_e dekodování s rovnoměrným rozložením reproduktorů na jednotkové kouli se řádek matice \mathbf{D} (odpovídající váhovacím koefici-

entům pro jeden reproduktor) promění pro ambisonii prvního řádu na

$$\mathbf{D}^T = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{N}} \\ \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \cos(\varphi_n) \cdot \cos(\theta_n) \right] \\ \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \sin(\varphi_n) \cdot \cos(\theta_n) \right] \\ \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \sin(\theta_n) \right] \end{pmatrix}, \quad (10)$$

kde N je počet použitých reproduktorů.

Základní úkoly

1. Seznamte se s implementací skriptu pro vykreslení sférických harmonických funkcí.
2. Implementujte v prostředí MATLAB funkci `normalise` tak, aby prováděla normalizaci podle standardu SN3D.
3. S implementovanou funkcí `normalise` si nechte vykreslit tvar jednotlivých sférických harmonických funkcí (řád a stupeň sférických harmonických funkcí lze měnit změnou parametrů l a m). Na základě tvaru sférických harmonických funkcí pro ambisonii prvního řádu se zkuste zamyslet, jakým způsobem by bylo možné vytvořit tzv. Native B-format mikrofon.
4. Vytvořte nový skript v MATLABu a pomocí funkce `audioread`³ načtěte soubory `LP05_ambi_A_format.wav` (pořadí kanálů je FLU, FRD, BLD, BRU) a `LP05_nonAmbi_source.wav` a dle teoretického rozboru implementujte funkce

- o `[ambi_out] = ambiPan(s, phi, theta)` - ambisonický panner,
- o `[B_form] = ambiConvert(A_form)` - převodník mezi ambisonickým formátem A a B,
- o `[out] = ambiRotate(s, roll, pitch yaw)` - rotace zvukového pole,
- o `[LS_feed] = ambiLS(B_form, phi, theta, N)` - výpočet signálu pro virtuální reproduktor.

Významy jednotlivých parametrů jsou popsány v daných kostrách funkcí. Správnost implementace si můžete ověřit porovnáním se vzorovým souborem `LP05_ambi_FINAL.wav`, který vznikl

- o zkrácením obou vstupních zvukových stop na přesně 10 s (od počátku).
- o polohováním neambisonického zvuku na jednotkové kouli s parametry
 - ◇ $\varphi = -18^\circ$,
 - ◇ $\theta = 73^\circ$,
- o dále součtem s ambisonickým souborem `LP05_ambi_A_format.wav` ve formátu B,
- o posléze natočením celého ambisonického mixu o úhly
 - ◇ `roll` = -126° ,
 - ◇ `pitch` = 32° ,

³Syntaxe: `[sig, fs] = audioread(filename)`, kde

- o `sig` - výstupní signál,
- o `fs` - vzorkovací frekvence,
- o `filename` - cesta k souboru.

Pro více informací o dané funkci zkuste příkaz `help audioread`.

- ◊ $\text{yaw} = 154^\circ$.
- nakonec výpočtem signálů pro 4 virtuální reproduktory umístěné na
 - ◊ LS1: $\varphi = 15^\circ, \theta = -35^\circ$,
 - ◊ LS2: $\varphi = -135^\circ, \theta = 12^\circ$,
 - ◊ LS3: $\varphi = 78^\circ, \theta = 80^\circ$,
 - ◊ LS4: $\varphi = 30^\circ, \theta = -40^\circ$.

Doplňkové úkoly

1. Pro soubor `LP05_ambi_A_format.wav` experimentálně určete jaký vliv má zesílení jednotlivých kanálů na věrnost prostorové informace (vstupní soubor berte za správně nahraný).

Kontrolní otázky

1. Načrtněte tvar sférických harmonických funkcí pro ambisonii prvního řádu.
2. Popište princip mapování prostoru pomocí sférických harmonických funkcí.
3. Vysvětlete rozdíl mezi ambisonickým signálem ve formátu A a ve formátu B. Kdy se který formát používá a proč?
4. Vysvětlete princip virtuálních reproduktorů. Jakým způsobem je obecně získáván signál pro jednotlivé reproduktory?
5. Vysvětlete, z jakého důvodu je nutné při natáčení dbát na stejné hodnoty citlivosti vstupních předzesilovačů u jednotlivých kanálů ambisonického mikrofonu.

Použitá a doplňková literatura

- [1] ARTEAGA, Daniel. Introduction to Ambisonics. In: *ResearchGate: Share and discover research* [online]. June 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280010078_Introduction_to_Ambisonics
- [2] KRONLACHNER, Matthias a Franz ZOTTER. Spatial transformations for the enhancement of Ambisonic recordings. In: *ResearchGate: Share and discover research* [online]. 2014. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/262826740_Spatial_transformations_for_the_enhancement_of_Ambisonic_recordings
- [3] NACHBAR, Christian, Franz ZOTTER, Etienne DELEFLIE a Alois SONTACCHI. *AMBIX- A suggested ambisonics format* [online]. 2011. Dostupné z: https://iem.kug.ac.at/fileadmin/media/iem/projects/2011/ambisonics11_nachbar_zotter_sontacchi_deleflie.pdf
- [4] YUE, Cedric a Teun DE PLANQUE. 3-D Ambisonics Experience for Virtual Reality. In: *EE267: Virtual Reality* [online]. Dostupné z: https://web.stanford.edu/class/ee267/Spring2017/report_yue_planque.pdf