

Akademie múzických umění v Praze

Hudební a taneční fakulta

Hudební umění (N8201)

Zvuková tvorba

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Formát prostorového zvuku: Dolby Atmos

Ing. Jana Jelínková

Vedoucí práce: doc. Ing. MgA. Ondřej Urban, Ph.D.

Přidělovaný akademický titul: Mgr.

Praha, červen 2023

Zadání diplomové práce

Zadání kvalifikační práce na AMU je realizováno v souladu s čl. 28 odst. 2 Studijního a zkušebního řádu AMU a čl. 2 výnosu rektorky č. 2/2023

Jméno studentky: Jana Jelínková
Osobní číslo: 141950
Katedra: Katedra zvukové tvorby a hudební režie

Studijní program: Hudební umění (N8201)
Typ programu: magisterský navazující na bakalářský
Specializace: Zvuková tvorba

Název práce:

Formát prostorového zvuku: Dolby Atmos

Název práce v anglickém jazyce: Format of surround sound: Dolby Atmos
Téma práce: Formát prostorového zvuku: Dolby Atmos
Jazyk práce: česky
Vedoucí práce: doc. Ing. MgA. Ondřej URBAN, Ph.D.
Oponent práce:

.....
studentka
(datum podpis)

.....
vedoucí katedry
(datum podpis)

.....
prof. Ivan Klánský
děkan
(datum podpis)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem magisterskou práci s názvem

Formát prostorového zvuku: Dolby Atmos

vypracoval(a) samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a s použitím pouze uvedené literatury a pramenů a že práce nebyla využita v rámci jiného vysokoškolského studia či k získání jiného nebo stejného titulu. Souhlasím s tím, aby práce byla zveřejněna v souladu se zákonem a vnitřními předpisy AMU.

Praha, dne

.....

[Jméno Příjmení, podpis]

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu práce doc. Ing. MgA. Ondřeji Urbanovi, PhD. za flexibilitu a ochotu. Dále bych ráda poděkovala vedoucí katedry Zvukové tvorby doc. MgA. Sylvě Stejskalové, PhD. za pomoc a trpělivost a PhDr. Aleši Dvořákovi za cenné rady.

Abstrakt

Formát Dolby Atmos se v posledních letech dostává do popředí nejen v oblasti filmové produkce, ale také v oblasti hudebního umění. Na rozdíl od filmové produkce je hudební umění velmi různorodým polem, a to ve všech fázích výroby hudební nahrávky v tomto formátu. Cílem této práce shrnutí dostupných informací o Dolby Atmos v českém jazyce. Tato práce se zaměřuje na možnosti postprodukce v tomto prostorovém formátu a na technická doporučení týkající se režijních místností a jejich technického vybavení. Zároveň také popisuje problematiku instalace systému Dolby Atmos do již existujících režijních místností. Jelikož většina koncových posluchačů poslouchá prostorový zvuk na sluchátka, je zařazena také kapitola popisující binaurální poslech a binaurální formát. Dále se práce zabývá základním prvkem prostorového poslechu, tj. schopností lokalizace lidského sluchového orgánu. Na závěr se také zabývá mikrofonními systémy pro záznam prostorového zvuku. Tím shrnuje informace ze všech součástí postprodukce v daném formátu.

Abstract

Popularity of Dolby Atmos increased greatly in recent years not only amongst film production but also in the music-only field. On the contrary to film production, music-only field is much more variable and that applies to all stages of the production. The aim of this thesis is to present available information about Dolby Atmos format in Czech language. The thesis focuses on possibilities of Dolby Atmos postproduction and describes technical and acoustical requirements for control rooms and workstations. As majority of the listeners uses headphones to be able to enjoy immersive sound, part of this thesis is dedicated to binaural format and binaural listening. It also touches the fundamental elements of listening to immersive sound such as principles of localization in human ear. The last chapter is dedicated to spatial microphone techniques used for recording immersive formats. The thesis is a summary of information from all areas around Dolby Atmos format.

Obsah

Úvod.....	1
1. Oblasti využívající prostorový zvuk.....	2
1.1. Filmová produkce pro kina.....	2
1.2. Televize a domácí kina.....	2
1.3. Herní průmysl a virtuální realita.....	2
1.4. Streamovací služby a jiná využití.....	2
2. Typy prostorového zvuku.....	3
2.1. Channel-based audio.....	3
2.2. Object-based audio.....	3
2.3. Scene-based audio.....	3
2.4. Hybridní systémy.....	3
3. Prostorová lokalizace.....	5
3.1. Lokalizace zdroje zvuku v horizontální rovině.....	5
3.2. Lokalizace zdroje zvuku ve vertikální rovině.....	6
3.3. Určení vzdálenosti zdroje zvuku.....	6
3.4. Vnímání prostoru.....	7
3.5. Chyby lokalizace zdroje zvuku.....	8
4. Poslech na sluchátka.....	10
4.1. Lokalizace při poslechu na sluchátka.....	10
4.1.1. HRTF (Head-Related Transfer Function, přenosová funkce hlavy).....	10
4.1.2. IHL (Inside-the-Head Locatedness).....	11
4.2. Binaurální poslech.....	12
4.3. Kategorie sluchátek.....	13
4.4. HpTF (Headphone Transfer Function).....	14
5. Prostory určené k postprodukcí ve formátu Dolby Atmos.....	15
5.1. Dabingová studia (dubbing stage, dubbing theatre).....	15
5.2. Nahrávací studia.....	17
5.2.1. Režijní místnosti s krátkou dobou dozívání (Non-Environment Control Room).....	17

5.2.2. Live-End Dead-End	18
5.3. <i>Režijní místnosti s vícekanálovým zvukem</i>	19
5.3.1. Umístění sub-wooferu	19
5.4. <i>Požadavky na režijní místnosti pro formát Dolby Atmos</i>	20
5.4.1. Prostorové požadavky	21
5.4.2. Akustické požadavky	21
5.4.3. Obecná doporučení k umístění poslechových monitorů	22
5.4.4. Výběr poslechových monitorů	25
6. Object-based audio	27
6.1. <i>Prostorová reprezentace objektově orientovaných systémů</i>	27
6.2. <i>Velikost objektů</i>	28
6.3. <i>Rendering</i>	28
7. Postprodukce a technické požadavky Dolby Atmos	29
7.1. <i>Pojmy zavedené v souvislosti s Dolby Atmos</i>	29
7.1.1. Audio Bed	29
7.1.2. Audio Object	29
7.1.3. Object Audio Metadata (OAMD)	29
7.1.4. Dolby Atmos Renderer a Object Audio Renderer (OAR)	29
7.1.5. Prostorové kódování (Spatial Coding)	30
7.1.6. Měření hlasitosti	30
7.1.7. Soubor dat Dolby Atmos Master File (DAMF)	31
7.1.8. Monitoring v Dolby Atmos	31
7.2. <i>Dolby Atmos Renderer</i>	32
7.2.1. Základní funkce	32
7.2.2. Technické požadavky na Dolby Atmos Renderer	32
7.2.3. Synchronizace	35
7.2.4. Ovládací prvky Rendereru	35
7.2.5. Panning v Dolby Atmos	37
7.2.6. Binaurální mix	37
8. Prostorové mikrofonní techniky	38
8.1. <i>Prostorový zvuk v hudebním umění</i>	38
8.2. <i>Parametry prostorového zvuku</i>	38
8.3. <i>Techniky snímání</i>	39
8.3.1. <i>Technika rozloženého snímání</i>	39
8.3.2. <i>Techniky blízké koincidence</i>	42

8.3.3. Koincidenční techniky.....	43
8.4. <i>Další vývoj</i>	43
Závěr	45
Seznam použitých zdrojů	47

Úvod

Dolby Atmos je prostorový formát známý především ze světa kin a filmu, kde debutoval v roce 2012. V posledních letech se začíná objevovat i v hudebním umění. Patří mezi objektové formáty spolu s jinými prostorovými formáty, jako je například Auro-3D nebo Sony 360 Reality Audio. Auro-3D vyniká svým kodekem a obecně je na tento formát potřeba sestava s méně reproduktory, což se ale může odrazit na reálnosti vjemu a přesnosti lokalizace zdrojů zvuku. Sony 360 naopak staví na tom, že informace přicházející k posluchači ze spodní části prostoru je stejně důležitá jako informace přicházející z horní části. Celý systém je tedy obohacen o ještě jednu vrstvu reproduktorů, které zajišťují vykrytí zesponu. Dolby Atmos vyniká v tom, že poskytuje velmi reálný vjem prostoru s ne příliš vysokým počtem reproduktorů. Přičemž ale reproduktorová sestava může být téměř jakkoliv velká. Mezi konkurencí (Auro, Sony) tvoří „zlatou střední cestu“. Tato skutečnost a patrně také fakt, že formát uvedla právě společnost Dolby Laboratories, která má na trhu dlouhodobě stabilní pozici, zapříčinili velkou popularitu tohoto formátu. Formát se postupně objevuje v různých odvětvích od streamovacích služeb po automobilový průmysl. [40] Poptávka po Dolby Atmos nahrávkách se tedy zvyšuje a pozvolna dochází k instalaci tohoto formátu do stávajících nahrávacích studií a vznikají také studia nová. Zatímco však Dolby Atmos určený pro kina a film pracuje s relativně uniformním vybavením na straně produkce. Dolby Atmos v hudebním umění musí počítat s tím, že všechny fáze tvorby nahrávky se potýkají se značnou různorodostí – od nahrávaného hudebního tělesa, přes akustiku sálu, po typ a technické vybavení studiové režie.

Tato práce si klade za cíl shrnout dostupné informace o formátu Dolby Atmos se zaměřením na nahrávání a postprodukci čistě hudebních děl a zároveň je prezentovat v českém jazyce. Vzhledem k tomu, že vývoj v oblasti prostorového zvuku probíhá velmi rychle, tato práce obsahuje informace, které byly aktuální v čase dokončení, tedy v červnu 2023.

Jak již bylo výše zmíněno, Dolby Atmos je formát, který na trh uvedla společnost Dolby Laboratories. Část, především technických, informací k formátu a Dolby Atmos Rendereru je v práci zobrazena. Tyto informace buď nejsou veřejně dostupné nebo je nelze zveřejnit.

1. Oblasti využívající prostorový zvuk

Estetická i technická kritéria prostorového zvuku jsou velmi specifická pro jednotlivá odvětví jeho využití.

1.1. Filmová produkce pro kina

Toto odvětví je považováno za první, které se začalo prostorovým zvukem zabývat. Od počátku prostorového zvuku do dnešní doby proběhlo mnoho změn a inovací. Základním principem stále zůstává to, že nejdůležitější zvuková informace přichází k divákovi zepředu, odkud zároveň přichází i vizuální informace. Všechny ostatní směry jsou využívány především pro efekty. Je zde také předpoklad, že výsledný zvukový mix bude produkován v kinech s téměř uniformní akustickou situací. Totéž se týká technického vybavení kin. Mix je připravován s ohledem na velký dynamický rozsah, který u zvukových stop pro film bývá od 30 dBA po 105 dBC. Co se týče poslechu, je nutné vytvořit vyrovnaný mix pro relativně velký počet posluchačů – neexistuje žádný pevně daný sweetspot.

1.2. Televize a domácí kina

Stejně jako u filmové produkce pro kina, i zde platí, že nejdůležitější zvuková informace přichází z prostoru před diváky. Narozdíl od kin je ale značně snížen dynamický rozsah programu a zvukové stopy musí splňovat standardy jednotlivých vysílacích a streamovacích služeb. Také je nutné předpokládat, že přehrávání nemusí probíhat za pomoci profesionální techniky, a navíc v akusticky neupravených místnostech.

1.3. Herní průmysl a virtuální realita

Prostorový zvuk je zde velmi důležitou součástí. Kromě schopnosti vtáhnout a emocionálně zapojit účastníka do hry či virtuální reality, mají zvukové stopy důležitý informativní charakter. Ve hře či virtuální realitě má viditelné okolí úhel cca 120° o zbylých 240° je hráč informován pouze zvukovou složkou. Zřetelná lokalizace a jednoznačnost zvuků je tedy velmi důležitá. Především u virtuální reality nejde jen o emocionální prožitek, dobře navržené virtuální prostředí by mělo účastníka mentálně pohltit. Obecně platí, že čím více smyslových podnětů prostředí nabízí, tím více účastníka dokáže mentálně zapojit. [31]

1.4. Streamovací služby a jiná využití

V posledních letech mnoho streamovacích služeb oznámilo zavedení možnosti poslouchat streamovaný obsah v prostorových formátech (Tidal, Amazon Music, Apple Music...). K tomu se vztahuje několik dalších odvětví zabývajících se prostorovým zvukem (prostorový zvuk pro sluchátka, prostorový zvuk pro automobily).

2. Typy prostorového zvuku

Na poli prostorového zvuku rozlišujeme tři základní skupiny systému. Tyto tři skupiny jsou definovány následujícím způsobem ve směrnici ITU-R BS.2051.

2.1. Channel-based audio

Jedná se o systémy, ve kterých je hudební program míchán do předdefinovaných kanálů. Každý kanál má přidělený vlastní reproduktor. Reproduktor je umístěn ve specifické statické pozici. Celý systém je tak definovaný právě sestavou reproduktorů. Jedná se o všechny systémy definované v doporučení ITU-R BS.775 (5.1 Surround Sound, 7.1 apod.). [13]

2.2. Object-based audio

V tomto případě je hudební program rozdělen na elementy (objekty), kterým jsou přidělena metadata popisující jejich vlastnosti, umístění v prostoru, vztah k ostatním elementům a stav. Renderer potom na základě těchto metadat generuje signály do dostupné sestavy reproduktorů. Metadata jsou proměnná v čase. Tímto je také umožněna interakce uživatele s audio systémem (umožňuje využití v herním průmyslu a virtuální realitě). Do této skupiny spadá Sony 360 Reality Audio, Auro-3D a Dolby Atmos. [13]

2.3. Scene-based audio

Hudební program je u těchto systémů reprezentován pomocí matematických koeficientů. Příkladem takového systému je například HOA (High-Order Ambisonics). Určení směru a velikosti zdroje zvuku probíhá na základě teorie sférických harmonických funkcí. Prostor je v případě ambisonie vnímán jako koule na jejímž povrchu dochází ke změnám akustického tlaku. Body na povrchu této koule jsou popsány souřadnicemi ve formě směrových kosinů – je tedy vytvořen vektor směřující ze středu (z počátku souřadného systému) ke zdroji zvuku, a tím je definováno umístění tohoto zdroje. Velikost zdroje je komplexní funkcí směru. Při reprodukci není systém vázán na určitou sestavu reproduktorů. [13,16]

2.4. Hybridní systémy

Pomyslnou čtvrtou skupinou jsou veškeré kombinace předchozích tří. Nejčastěji je možné se potkat s hybridním systémem, který některé signály přiděluje fyzickým reproduktorům a některé zachovává bez přidělení. Příkladem takového systému je Dolby Atmos, který může kombinovat object-based audio a channel-based audio. Signály přidělené fyzickým reproduktorům se v tomto případě nazývají „audio bed“ a nepřidělené signály se

nazývají „audio object“. Hybridního systému lze docílit také kombinací scene-based audia a channel-based audia. [13]

3. Prostorová lokalizace

Prostorová lokalizace je schopnost člověka detekovat existenci a směr zdroje zvuku v prostoru, a to i v případě, že je těchto zdrojů více. Narozdíl od zrakového a hmatového vjemu, není prostorová informace v případě sluchového vjemu kódována přímo ve vjemu samotném. Prostorová informace je ze sluchového vjemu dekodována porovnáváním zpoždění, fáze a jiných parametrů vnímaných zvuků.

Umístění bodu v prostoru se standardně popisuje třemi parametry – elevace, azimut a vzdálenost. Pokud se jedná o zdroj zvuku a jeho lokalizaci vůči posluchači, azimut je definován jako úhel, který svírá mediánní (střední) anatomická rovina lidského těla s pozicí zdroje zvuku zobrazeného v horizontální rovině. Nulový azimut je pozice zdroje zvuku přímo proti posluchači. Azimut dosahuje kladných hodnot napravo od posluchače a záporných hodnot nalevo od posluchače. Přímo za posluchačem má azimut hodnotu 180° . Elevace je úhel, který svírá pozice zdroje zvuku, která je zobrazena v mediánní rovině s horizontální anatomickou rovinou posluchače. Elevace nabývá kladných hodnot ve směru nahoru a záporných hodnot ve směru dolů. Vzdálenost je definována jako velikost vektoru vytvořeného azimutem a elevací zdroje zvuku ve směru od posluchače (počátku souřadnic).

V terminologii lokalizace zdroje zvuku se také rozlišuje ipsilaterální (přivrácená) a kontralaterální (odvrácená) strana (nebo ucho) vůči zdroji zvuku. K určení azimutu zdroje zvuku používá lidské ucho jiný mechanismus než k určení elevace. To způsobuje rozdílnou přesnost určení polohy v horizontálním a vertikálním směru.)

3.1. Lokalizace zdroje zvuku v horizontální rovině

V horizontální rovině používá lidské ucho k detekci polohy zdroje zvuku mechanismus ITD (Interaural Time Difference) a mechanismus IID (Interaural Intensity Difference, po převodu na dB – Interaural Level Difference). ITD popisuje časový rozdíl, který vzniká mezi sluchovým vjemem v přivráceném a odvráceném uchu. Do přivráceného ucha dorazí zvukový podnět dříve, do odvráceného později a v jiné fázi. Sluchové centrum následně vyhodnotí vzniklý časový a fázový rozdíl, a určí směr přicházejícího zvuku. Tento mechanismus se u jednoduchých zvuků uplatňuje do 1400 Hz, u komplexních zvuků do 4000 Hz. IPD (Interaural Phase Difference) se uplatňuje spolu s ITD do cca 1000 Hz.

IID popisuje rozdíl v intenzitě vnímaného zvuku mezi přilehlým a odvráceným uchem. Tento rozdíl vzniká kvůli akustickému stínu hlavy a uplatňuje se pro všechny frekvence, jejichž vlnová délka je menší než vzdálenost mezi ušima (obecně se používá vzdálenost 17 cm). IID se tedy začíná uplatňovat na hranici cca 2000 Hz a s rostoucí frekvencí zdroje zvuku roste i účinnost tohoto mechanismu. IID také závisí na azimutu zdroje zvuku, nejúčinnější je v azimutu 90° a směrem k azimutu 0° a 180° exponenciálně klesá. Změřený pokles intenzity způsobený akustickým stínem hlavy v azimutu 90° byl pro měřené frekvence následující:

3000 Hz = -10 dB, 6000 Hz = -20 dB a 10000 Hz = -35 dB. [20] Kromě azimutu závisí IID také na vzdálenosti posluchače od zdroje zvuku. Pro blízké zdroje zvuku má IID výpovědní hodnotu už pro frekvence od 200 Hz. [35]

3.2. Lokalizace zdroje zvuku ve vertikální rovině

Hlavním mechanismem, který se uplatňuje při detekci elevace zdroje zvuku je filtrace zvukového podnětu strukturou vnějšího ucha spojená s odrazy od ramene a torza. Filtrace strukturou vnějšího ucha se projevuje především na vyšších frekvencích a je zásadně závislá na směru. U komplexních zvuků tedy dochází k filtraci vyšších harmonických složek. Dle několika studií je struktura vnějšího ucha také částečně odpovědná za externalizaci přicházejících zvukových podnětů. [9,25,26,27]

Při měření schopnosti lokalizace zdroje zvuku se uplatňují níže uvedené parametry:

- MAA (minimum audible angle) - minimální detekovatelný úhel, pod kterým lidské ucho rozlišuje dva statické zdroje zvuku. Tento úhel může dosahovat minimální velikosti 1° pro zdroje zvuku přímo před posluchačem a naopak 20° i více pro zdroje zvuku přicházející přímo zprava nebo zleva.
- MAMA (minimum audible moving angle) - minimální postřehnutelná změna směru přicházejícího zvukového podnětu. Tento parametr je závislý na rychlosti. Pro rychlost $90^\circ/\text{s}$ odpovídá přesnost 8° , pro rychlost $360^\circ/\text{s}$ odpovídá 21° . [35]

3.3. Určení vzdálenosti zdroje zvuku

Primárními parametry, které pomáhají k určení vzdálenosti, ve které se zdroj zvuku nachází, jsou úroveň hlasitosti a dozvuk. Dalšími parametry jsou barva zvukového podnětu, jeho obálka (především attack a decay) a skutečnost, zda má posluchač se zvukovým podnětem již předchozí poslechovou zkušenost. Kromě zkušenosti tedy vychází schopnost určit vzdálenost také z prostředí, ve kterém se zvukový podnět a posluchač vyskytují. Okolní prostředí tedy funguje pro posluchače jako tzv. kognitivní nápověda.

Určení vzdálenosti může být buď absolutní nebo relativní. Absolutní v případě, že posluchač určuje vzdálenost jednoho zdroje zvuku od sebe sama. Relativní je potom určení vzdálenosti mezi dvěma zdroji zvuku. Pro zvukovou produkci v prostorových formátech je schopnost posluchače určit relativní vzdálenost zásadní. Pokud se ale jedná o virtuální zdroje odloučené od prostředí jako je tomu u zvukové produkce, jediným parametrem k určení vzdálenosti zůstává pouze vnímaná hlasitost. Úbytek intenzity vnímaného zvukového podnětu s rostoucí vzdáleností lze spočítat ze zákona převrácených čtverců, který říká, že intenzita klesá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje. To znamená, že s dvojnásobným nárůstem vzdálenosti od zdroje zvuku, jeho intenzita poklesne o 6 dB. To se však reálně vztahuje pouze

na všesměrové zdroje zvuku. Pro směrové zdroje zvuku bývá pokles menší (cca 3 dB). Navíc některé studie poukazují na to, že zákonem převrácených čtverců se počítá intenzita a z ní hladina akustického tlaku, tedy čistě fyzikální veličiny. Pokud zůstává intenzita zvukového podnětu jediným určujícím parametrem vzdálenosti, je podle těchto studií efektivnější pracovat s psychoakustickými veličinami jako je vnímaná hlasitost s jednotkou son. Percepčně se potom jeví dvojnásobná vzdálenost od zdroje jako pokles jeho hlasitosti na polovinu, což po převodu na stupnici v dB odpovídá spíše poklesu o 10 dB, ne pouze o 6 dB. [1,32]

Při zvukových produkcích v prostorových formátech bývá nejčastěji rozlišeno to, co je vpředu a vzadu. Málodky je nutné klást důraz na přesné určení relativní vzdálenosti (nebo celkově vztahů) mezi jednotlivými zvukovými podněty. V hudbě i ve filmu jsou vztahy mezi zvukovými podněty v prostoru upraveny tak, aby splňovaly svůj účel - např. blížící se kroky mohou být hlasitější, než by v reálném prostředí byly, a je tomu tak proto, aby byla zvuková složka dostatečně podpořila vizuální scénu. V klasické hudbě se často využívá spotových kontaktních mikrofonů u nástrojů v orchestru k podpoření jejich barvy a prezence, byť v reálném prostředí posluchač daný nástroj slyší z dálky. Ne vždy je tedy nutné při mixu v prostorových formátech dodržet vztahy mezi zvukovými podněty, které jsou posluchači známé z reálného světa.

3.4. Vnímání prostoru

Posluchač dokáže identifikovat prostor i monaurálně na základě zvukového backgroundu. Například, během telefonního hovoru posluchač dokáže identifikovat na základě ruchů v pozadí odkud volající telefonuje. Vjem obklopení prostorem neboli imerze však nastává tehdy, má-li posluchač ke zvukovému podnětu k dispozici více prostorových parametrů. Jak bylo již výše zmíněno, k identifikaci vzdálenosti zdroje zvuku od posluchače slouží především vnímaná hlasitost podnětu. Bez dalších parametrů však mohou nastat situace, kde bude mít posluchač se správnou identifikací problém. Příkladem může být například ulice, kde posluchač slyší svůj zvonící telefon v kapse a zároveň projíždějící autobus. Pokud by detekoval vzdálenost jen na základě hlasitosti podnětů, autobus by se jevil blíže než telefon. K úspěšné identifikaci situace je tedy potřeba nějaká poslechová zkušenost a další faktory spektrálního a dozvukového charakteru. To platí i pro tvorbu prostředí v prostorových zvukových formátech – podněty by v prostoru měly být implementovány s ohledem na možné kognitivní asociace posluchače. Nejnáročnější je potom implementace podnětů, které jsou syntetického charakteru a posluchačům nejsou známé. Nejjednodušší je to naopak obecně u řečového signálu. Zde ale zase dochází k možnému zmatení posluchače, a to díky způsobu, kterým mluvčí mluví. [37,38]

Při měření v bezodrazové komoře bylo zjištěno, že při reprodukci řeči přes reproduktor, byla posluchači identifikovaná vzdálenost závislá více na akustickém tlaku než na samotném umístění reproduktoru. Při identifikaci vzdálenosti reálného mluvčího hrál naopak roli způsob

řeči, ne intenzita. Šepot byl obecně více identifikován mnohem blíže, než se šeptající mluvčí ve skutečnosti nacházel a křik byl identifikován naopak dále než ve skutečnosti. [8]

K určení prostorovosti a vzdálenosti zvukového podnětu využívá lidské ucho také poměr přímého a odraženého zvuku. Bližší zvuky mají jasnější přímou složku a méně zastoupené odrazy. Vzdálenější zvuky jsou tvořeny především odrazy. Nicméně zapojení poměru přímého a odraženého zvuku do určení vzdálenosti je natolik komplexní, že dosud nebyl přesně popsán jeho vliv. Různé studie přikládají tomuto parametru rozličnou důležitost v určení vzdálenosti, ale zároveň se shodují, že je důležitý vjem prostorovosti.

Výzkum Von Békésyho ukázal, že při zvětšení poměru přímého zvuku oproti odraženému, způsobil u posluchačů vjem bližšího zvukového podnětu, přičemž byla zachována jeho intenzita. Posluchači se také shodli na tom, že se jim více prezenční zdroj zvuku zdá menší, naopak zdroj s větším poměrem odraženého zvuku se zdál větší. Stejná studie však poukazuje na to, že vjem vzdálenosti existuje i v bezodrazových komorách, proto se poměr přímého a odraženého zvuku na detekci vzdálenosti podílí, ale není zásadní. [3]

Na detekci typu okolního prostoru se výrazně podílí prvotní odrazy a platí, že lokalizace podnětu v prostoru se zlepšuje na základě poslechové zkušenosti. Jakmile si posluchač na daný prostor zvykne, zlepšuje se jeho schopnost v tomto prostoru lokalizovat podněty. [30] Ve sluchovém orgánu vzniká pocit imerze v prostoru díky interaurální křížové korelaci. Tato korelace popisuje vztah mezi signálem v pravém a levém uchu, respektive jejich proměnlivé zpoždění vůči sobě a koresponduje s vjemem prostorovosti a imerzí.

Dalším faktorem ovlivňujícím vjem prostorovosti je difúzní část dozvuku. Pokud je prostor neustál buzen signálem, slyšitelná část dozvuku (v závislosti na typu budícího signálu) je pouze do poklesu o 10-20 dB. Pokud je přestane být buzen, kompletní dozvuk pomůže odhalit posluchači nejen velikost, ale také materiálové složení prostoru (odrazivé a pohltivé materiály). Tento faktor více popisuje prostor, ve kterém se podnět nachází a zásadně nepřispívá k lokalizaci tohoto podnětu. [35]

3.5. Chyby lokalizace zdroje zvuku

Často pozorované chyby při lokalizaci zdroje zvuku by se daly rozdělit do následujících dvou skupin:

- Blur (rozostření) - jedná se o drobné nepřesnosti v lokalizaci, číselně od 5° do 20°.
- Záměna – jedná se o časté záměny v předo-zadní rovině, ale také záměny ve vertikálním směru (co je nahoře, se jeví jako dole). Tyto záměny jsou patrně důsledkem toho, že dva zvukové podněty přicházející z jiného směru mají stejné ITD a/nebo IID. Například zdroj zvuku s azimutem 30° může mít podobnou hodnotu ITD jako zdroj zvuku s azimutem 150°. Prostor kolem posluchače, ve kterém častěji vznikají tyto záměny byl pojmenován jako kužel nejistoty (cone of confusion).

Přesnost lokalizace je také závislá na složení zvukového podnětu. Obecně se lépe lokalizují složené komplexní zvuky. Pro mechanismus lokalizace, který je závislý na spektrální filtraci (především u elevace) hraje také zásadní roli předchozí znalost spektra zvukového podnětu. U podnětů, které jsou posluchači již známé, je filtrace spektra detekována lépe, a tím je i přesněji lokalizován zdroj. Přesnost lokalizace pomocí spektrální filtrace lze tedy posluchače naučit.

Dále přesnost lokalizace ovlivňují odrazy. Zatímco v některých případech může poměr přímého a odraženého zvuku fungovat jako určitá nápověda k přesnější lokalizaci. V jiných případech naopak detekce odrazů lokalizaci znesnadňuje nebo úplně znemožňuje určit správný směr přicházejícího zvukového podnětu.

Z výše uvedeného je evidentní, že lidský sluchový orgán je tzv. neuroplastický, tj. jeho nervový systém je neustále aktualizovaný. Zdokonaluje se na základě získané poslechové zkušenosti a mění se v závislosti na poslechovém prostředí. [35]

4. Poslech na sluchátka

Reprodukce zvuku skrze sluchátka je nejvíce přímá metoda reprodukce zvuku vůbec. V rámci prostorového zvuku je cílem reprodukce na sluchátka vyvolat v posluchači vjem, který je co nejvíce podobný vjemu v reálných poslechových podmínkách.

Reprodukce zvuku na sluchátka má oproti jiným způsobům reprodukce několik výhod. První výhodou je, že se jedná o plně kontrolovatelné poslechové podmínky. Signál určený pro levé ucho je směřován přímo do levého ucha, signál určený pro pravé ucho, přímo do pravého – celý systém tedy funguje bez přeslechů. Zároveň je tato metoda reprodukce nezávislá na poloze hlavy posluchače – posluchač se vždy nachází ve sweetspotu (pokud se nejedná o head-tracking, tedy detekci a sledování polohy hlavy vůči zdroji zvuku).

Další výhodou je vysoká úroveň izolace uší od okolního prostředí. Pokud není reálné poslechové prostředí velmi dobře izolované od okolních ruchů, je pravděpodobné že tyto ruchy, naruší poslech natolik, že zničí posluchačem vytvořenou představu o prostoru a zvukové situaci v něm. Izolace těchto ruchů v případě sluchátek je mnohem lépe kontrolovatelná.

Reprodukce zvuku na sluchátka má však i své nevýhody. Například centralizace posluchače do sweetspotu je na jednu stranu výhodou, na druhou stranu může způsobovat nepřírozený poslechový vjem, jelikož se celý prostor pohybuje neustále s posluchačem. Další nevýhodou je poměrně častý a známý jev, kdy se posluchači při poslechu na sluchátka zdá, že veškeré zvuky vychází ze středu hlavy – internalizace zvuku. Další nevýhodou mohou potom být případy extrémní izolace posluchače od okolního prostředí u některých sluchátek. Extrémní izolace působí nepříjemně a může u posluchače způsobovat únavu již po krátké době poslechu.

4.1. Lokalizace při poslechu na sluchátka

Z podstaty mechanismů lokalizace zvuku vyplývá, že lze zajistit věrohodná lokalizace zdroje zvuku i při poslechu na sluchátka. Je však nutné zohlednit změny, kterými zvuk projde, než se dostane k bubínku.

4.1.1. HRTF (Head-Related Transfer Function, přenosová funkce hlavy)

Veškeré změny, kterými prochází zvuk, než se dostane k bubínku, lze vyjádřit pomocí přenosové funkce a technicky je zpracovat ve formě filtru. Prakticky lze tuto přenosovou funkci získat měřením při kterém se mikrofonní sondy zavedou do zvukovodů měřeného subjektu. Z naměřených dat pak vznikají dva filtry s konečnou impulzní odezvou (HRIR, Head-Related Impulse Response), Jeden pro každé ucho. Jejich porovnáním je možné získat interaurální difference. Přenosová funkce hlavy je individuální pro každý subjekt a liší se také umístěním zdroje zvuku v či prostorem, ve kterém měření probíhalo (nejčastěji bez odrazů).

Přenosovou funkci hlavy lze z naměřených výsledků (audio nahrávka) získat podle vzorce:

$$H_{RTF} = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)S(\omega)M(\omega)},$$

kde Y je výsledná audio nahrávka, X je spektrum zdroje zvuku, S je přenosová funkce použitého reproduktoru a M je přenosová funkce mikrofону. Systémy sloužící k měření HRTF mají několik různých podob. Může se jednat o statický subjekt, rotující sestavu reproduktorů (např. CIPIC) nebo naopak rotující subjekt vůči statické sestavě reproduktorů (např. IRCAM).

Filtrací zvuku pomocí HRIR filtrů pak dochází k aplikaci spektrálních změn, které vznikají díky IID a filtraci strukturou vnějšího ucha. Filtrovaný zvuk je pak vnímán jako vyzařovaný z požadovaného směru. Díky aplikaci HRTF je tedy možné simulovat buď pohyb zvukového podnětu nebo pohyb hlavy posluchače.

Spektrální filtrace získaná mikrofonní sondou v horizontální rovině je způsobena především mechanismem IID a ITD a je charakteristická úbytky přes poměrně velká frekvenční pásma. Oproti tomu filtrace ve vertikální rovině je charakteristická propady na velmi úzkých frekvenčních pásmech. Pozice tohoto propadu ve frekvenční odezvě je přímo závislá na tvaru vnějšího ucha. Užitím cizí HRTF je tedy možné dosáhnout relativně dobré lokalizace v horizontální rovině (pokud nemá ani jeden subjekt abnormální rozměry hlavy). Ve vertikální rovině bude však určení elevace zhoršeno.

Pro prostorové informace typu HRTF, BRIR, směrové odezvy prostorů či odezvy mikrofonních polí je standardizován formát SOFA (Spatially Oriented Format for Acoustics). [28]

4.1.2. IHL (Inside-the-Head Locatedness)

Jedná se o častý případ selhání externalizace při poslechu na sluchátka. Zvuk se jeví uprostřed hlavy posluchače. Často se jedná o případ tzv. diotického poslechu – na obě uši je přiváděn signál, který je téměř totožný (např. virtuální zdroj zvuku je umístěn přímo před posluchačem). Pro sluchový orgán je toto uměle vytvořená situace, která jej přirozeně vede ke kognitivnímu závěru, že zvuk vzniká uvnitř hlavy.

Častěji bývá IHL také zaznamenáno u zvukových podnětů, které mají být reprodukovány velmi blízko uší posluchače. Na vině, je dle dostupných studií převážně alternace přenosové charakteristiky ušního boltce, která vzniká například používáním nepersonalizované HRTF, měřené na modelu hlavy.

Dalším faktorem, který k IHL může přispívat je samotné nasazení sluchátka na ucho. Vzniká tím totiž dutina s vlastní přenosovou charakteristikou. Některé studie zkoumající internalizaci řeči uvádí, že přidáním vhodného dozvuku k mluvenému slovu je možné IHL potlačit. Dále je IHL možné potlačit použitím správné HRTF a sluchátky ekvalizovanými

na volné pole, popř. také head-tracking. Dle subjektivních testů na posluchačích bývá stereo poslech běžně lokalizovaný na přímce spojující obce uší. [2]

Binaurální poslech je v případě zdrojů zvuku za umístěných posluchačem lokalizován opravdu za hlavou, ale přední část prostoru bývá také lokalizována na přímce mezi ušima. Nejvěrnější a nejkompaktnější externalizace bylo dosaženo použitím binaurálního poslechu s detekcí polohy hlavy. Obecně je však obtížné potlačit IHL úplně. Některé studie se shodují, že je to proto, že skrze sluchátka je možné krom přehrávaných zvuků stále v malé míře vnímat i zvuky z okolí. [28]

4.2. Binaurální poslech

Termín binaurální zvuk se užívá pro filtrovaný dvoukanálový zvuk, který je určen pro pravé a levé ucho posluchače. Filtrace bývá kombinací časových zpoždění, spektrálních a intenzitních diferencí. Jedná se o mimiku filtrace, kterou používá k lokalizaci zdrojů zvuku v prostoru lidské ucho.

Při pokusech o vylepšení stereo poslechu, bylo uděláno několik studií, které se zabývaly implementací přeslechů mezi ušima s cílem vytvořit přirozenější stereo poslech. Přeslechy byly rozděleny na ty, které vznikají v blízkém poli a na ty, které vznikají ve vzdáleném poli. Přeslechy v blízkém poli byly řešeny stejně jako by měl posluchač v blízkosti hlavy dva reproduktory a poslouchal jejich přirozené přeslechy. Dle studie [19] by někteří posluchači preferovali stereo obohacené o přeslechy v blízkém poli. Nicméně stereo poslech obohacený o přeslechy ve vzdáleném poli posluchači nepreferovali vůbec. [18] Z těchto studií vyplývá, že obohacením klasického sterea o přeslechy není možné dosáhnout zásadního vylepšení. Z tohoto důvodu vznikl binaurální poslech.

Simulace virtuálních reproduktorů v binaurálním formátu je řešena stejným způsobem jako probíhá poslech reálných reproduktorů v případě reálného posluchače v reálném prostoru. Zvuk, který doléhá k uším posluchače je ovlivněn umístěním reproduktorů v prostoru, akustickými vlastnostmi prostoru a filtrací, která probíhá při samotném sluchovém vjemu. Při tvorbě binaurálního poslechu je tedy nutné zohlednit vlastnosti reproduktoru, akustické vlastnosti prostoru a HRTF posluchače. Kombinací těchto informací vzniká binaurální impulzová odezva prostoru (BRIR – Binaural Room Impulse Response). Tato odezva je konvolucí aplikována na zvukový materiál. Výsledkem reprodukce na sluchátka je tedy virtuální zdroj zvuku ve virtuálním prostoru. Pokud tímto způsobem reprodukuje více než jeden virtuální zdroj vznikne, jejich společným působením vznikne ve virtuálním prostředí třetí zdroj, tzv. fantomový zdroj.

Vytvoření virtuálního prostoru, který bude věrně reprezentovat reálný systém prostorového zvuku, je založeno na konvoluci zvukových dat určených pro daný reproduktor v systému s příslušnou impulsovou odezvou tohoto reproduktoru.

Příklad: základní potup pro získání virtuálního zdroje reprezentujícího levý reproduktor (L):

- $L_{-30} * L(t) \rightarrow \sum(L)$
- Konvoluce zvukového materiálu určeného pro levý reproduktor s HRIR pro azimut -30° . Výsledek je určen pro levé ucho. Následuje sumace všech signálů pro levé ucho.
- $R_{-30} * L(t) \rightarrow \sum(R)$
- Konvoluce signálu určeného pro levý reproduktor v azimutu -30° s impulzovou odezvou měřenou pro tento azimut pravou ušní mikrofonní sondou. Výsledek je určený pro pravé ucho. Následuje sumace všech signálů pro pravé ucho.

Získávání HRTF a BRIR pro plošné využití probíhá především pomocí různých modelů lidské hlavy s detailně modelovaným vnějším uchem. Někdy se využívají modely KEMAR (Knowles Electronic Manikin for Acoustic Research), které mají detailněji modelovanou celou obličejovou část a také část ramen a torzo. Lze také změřit HRTF reálného posluchače, a to vložením mikrofonních sond do zvukovodů. V praxi se užívají dvě metody měření HRTF. První je tzv. blocked meatus (zablokovaný zvukovod), kdy je zvukovod zablokován pomocí pěnového kroužku, do kterého je vsazen binaurální mikrofon. Tato metoda měří charakteristiku hlavy a vnějšího ucha. Druhou metodou je použití mikrofonní sondy, která se vloží do zvukovodu. Touto metodou se zaznamenává i charakteristika zvukovodu. Získaná data umožňují personalizovaný binaurální poslech. Při získávání dat je však hlava měřeného subjektu statická a získaná data tak neumožňují virtuální pohyb hlavy.

Motion-Tracked Binaural (MTB) je metoda měření sluchového vjemu posluchače, která umožňuje pohyb hlavou. K získávání se používá systém mikrofonů rozmístěných na sférickém tělese, které aproximuje hlavu posluchače. Systém MTB je následně spárovatelný s head-trackingovými daty. Podle pozice hlavy je určený mikrofon, který odpovídá pozici uší posluchače a tento signál je použit jako výchozí. Pokud pozice ucha spadá mezi dva mikrofony, výchozí data jsou interpolací dat z nejbližších mikrofonů. [28]

4.3. Kategorie sluchátek

Při poslechu binaurálního zvuku na sluchátka hraje roli izolace od okolního prostředí a vjem prostoru, který sluchátka poskytují. Vzhledem k těmto dvěma parametrům bývají rozlišovány následující skupiny sluchátek:

- Sluchátka s konstrukcí circum-aural, kde sluchátko obklopuje celé ucho. Tato konstrukce izoluje od okolí cca o 10 dB.
- Sluchátka s konstrukcí supra-aural, kde sluchátko přiléhá přímo na ušní boltce. Zpravidla poskytují nižší izolaci od okolního prostředí než sluchátka s konstrukcí circum-aural. Míra izolace je závislá na podložce sluchátka a tvaru ušního boltce – je tedy silně individuální.

- Sluchátka s konstrukcí in-ear, kde je sluchátkem přímo izolován zvukovod. In-ear sluchátka bývají standardně uzavřená a poskytují izolaci cca 23 dB. [28]
- Noise-cancelling sluchátka – kterákoliv kategorie z výše uvedených s aktivním potlačením okolních zvuků.

Dle míry uzavření sluchátek dále dělíme sluchátka na:

- otevřená,
- uzavřená,
- polootevřená.

4.4. HpTF (Headphone Transfer Function)

Pro správný binaurální vjem je podstatné zachování přesné spektrální filtrace i ve fázi reprodukce zvuku přes sluchátka. Sluchátka však ovlivňují zvukový materiál tím, že spolu s vnějším uchem vytváří víceméně uzavřený prostor. Díky fyzickým vlastnostem ucha mohou mezi měničem a vnějším uchem vznikat dodatečné rezonance, které následně vedou ke spektrálnímu zabarvení zvukového materiálu. To má za následek zhoršení lokalizace zvukových podnětů, popř. IHL. Přenosová funkce sluchátek (HpTF) je shrnutí charakteristik všech komponentů sluchátkového řetězce (sluchátkový zesilovač, frekvenční charakteristika, morfologie vnějšího ucha). HpTF je měřitelná pomocí reálného subjektu nebo modelu a daných sluchátek. Ze studií vyplývá, že zásadní spektrální rozdíly způsobené díky HpTF se nachází v pásmu 4 kHz - 10 kHz. Kompenzace HpTF je řešena sluchátkovým kompenzačním filtrem.

HpTF je ale navíc závislá na pozici sluchátek vůči uchu posluchače. Při opětovném nasazení sluchátek byly měřeny jiné HpTF. Způsobené rozdíly mezi měřenými HpTF byly nejzásadnější především kolem 4 kHz. Z toho vyplývá, že výše zmíněný kompenzační filtr, dokáže celkový vjem zlepšit, ale nedokáže HpTF odstranit úplně. Sluchový vjem se ale pravděpodobně částečně dokáže nově vzniklé situaci za určitou dobu přizpůsobit. [17,28]

5. Prostory určené k postprodukcí ve formátu Dolby Atmos

Počátky hudební produkce ve formátu Dolby Atmos souvisely s filmem, jednalo se tedy především o zpracování filmových soundtracků. Vzniká tedy otázka, proč je nutné implementovat systémy Dolby Atmos do nahrávacích studií, když je obsahují kina a studia zabývající se tvorbou a postprodukcí zvukových stop a hudby k filmovým snímkům určeným do kin.

Formát Dolby Atmos debutoval v roce 2012 s animovaným filmem Rebelka (angl. Brave) z dílny Pixar.

Jednou ze zásadních postav na poli záznamu a zpracování filmové hudby je americký zvukový inženýr Dennis S. Sands, který byl od počátku proti užívání dabingových studií. Jeho argumentem byl fakt, že standardní dabingová studia mají instalované plátno a přední reproduktory umístěny za ním. To způsobuje ztrátu vyšších frekvencí. Dále také upozorňoval na zásadní rozdíly v technických i poslechových podmínkách, kterými se liší dabingová studia od standardních postprodukčních studií. V roce 2014 Dennis S. Sand vytvořil první postprodukční studio s instalací Dolby Atmos, jednalo se tedy o první takto vybavené studio v soukromém vlastnictví. [7]

5.1. Dabingová studia (dubbing stage, dubbing theatre)

K prvním místnostem určeným k postprodukcí a zároveň vybaveným systémy Dolby Atmos patřila dabingová studia ve smyslu dubbing stage nebo dubbing theatre. Tyto dva pojmy se dají do českého jazyka přeložit jako „dabingové studio“. Jedná se ale o větší a co do odrazivosti živější prostor určený k postprodukcí zvukových stop a hudby k filmovým snímkům určeným pro kina. Nejedná se o jakoukoliv akusticky upravenou místnost s mikrofonom a počítačem, jak tomu může někdy být v našich podmínkách. Studia typu dubbing stage/theatre jsou často navržena tak, aby co nejvíce simulovala akustickou situaci v kině. Což mimo jiné znamená, že obsahují plátno, které způsobuje úbytek na vyšších frekvencích. Studie také ukazují, že i často se vyskytující perforovaná plátna způsobují jednak úbytek vyšších frekvencí díky pohlcování, ale také hřebenový filtr ovlivňující tyto vyšší kmitočty. Zvuk z hlavního LCR reproduktorového systému umístěného za plátnem tedy částečně prochází skrz, částečně je pohlcen a částečně se odráží zpět k reproduktoru, kde následně dochází ke vzniku hřebenového filtru. Tento problém, lze nicméně alespoň z části řešit detailní ekvalizací. Stále však platí, že plátno samo o sobě může způsobovat úbytek až 10 dB na kmitočtu 10 kHz. [21,22]

V kinech obecně se však již historicky uplatňuje odlišná zvuková estetika. Kromě modifikace a pohlcování vyšších frekvencí samotným plátnem, zde dochází ještě k přirozenému úbytku vyšších frekvencí díky relativně velkým vzdálenostem mezi reproduktory a divákem. Při prvotních pokusech o kompenzaci ztráty vyšších kmitočtů se zjistilo, že taková

kompenzace není technicky možná bez výrazného zkreslení zvuku či poškození měničů. Takový zvuk se u diváků setkal s horším ohlasem a za lepší variantu byl samozřejmě zvolen nekompensovaný zvuk s úbytkem vyšších frekvencí. Z tohoto důvodu vznikla v roce 1972 křivka definující přirozeně znějící zvuk pro kina. Tato křivka bývá nazývána X, či X-curve a ukazuje doporučený úbytek či později doporučené zbytky na vyšších kmitočtech. V následujících letech přichází snaha o „unifikaci“ zvuku v kinech a křivka X-curve začala sloužit jako standard, kterému se snažila všechna kina přiblížit. To se samozřejmě týkalo také všech dabingových studií, která se snažila svými akustickými podmínkami co nejvíce přiblížit kinům, aby umožňovala co nejlepší mix filmových soundtracků. S rozvojem měřicí techniky a poznatků na poli akustiky začalo být evidentní, že tato unifikace na základě X-curve není možná, křivka však po 50 letech své existence stále definuje zvukovou estetiku v kinech. Kompensace celkového úbytku vyšších frekvencí stále není v některých kinech technicky dosažitelná ze strany reproduktorových systémů. X-curve ale již neslouží jako absolutní standard pro kina a neustále probíhá snaha o dosažení vyrovnané frekvenční charakteristiky, a to především experimentováním s tkanými plátny. V době vzniku této práce však vyrovnaná frekvenční charakteristika stále není v kinech standardem, a tomu se přizpůsobují dabingová studia. [22]

Dalším parametrem dabingových studií, který není pro mix hudebních děl příliš výhodný je samotný poslech, respektive jeho hlasitost. V dabingových studiích probíhá mix často bez možnosti úpravy hlasitosti poslechu. Přičemž hlasitost poslechu by měla být rovna hlasitosti poslechu v kalibrovaných kinech (podle SMPTE RP200:2012). Standardně užívaná hladina akustického tlaku je -20 až -18 dBFS (v závislosti na použitém růžovém šumu, SMPTE doporučuje ke kalibraci využít standardní SMPTE růžový šum, aby se zvýšila přesnost měření). Kalibrace reproduktorů probíhá na základě měření, která jsou prováděna v místě poslechu. Standardně jsou přední reproduktory kalibrovány na hladinu 85 dBC, surroundové reproduktory na hladinu 82 dBC a LFE kanál na hladinu 95 dBC. Což ale znamená, že pokud hladina akustického tlaku dosáhne hodnoty 0 dBFS, tak v místě poslechu (respektive mixu) je hladina hlasitosti z předních reproduktorů rovna 105 dBC, ze surroundových 102 dBC a z LFE až 110 dBC. Pokud převedeme tyto hodnoty do stupnice v dBA, která bere v potaz citlivost lidského ucha. Dostaneme v LFE kanálu maximální hodnoty hlasitost v rozsahu 70 až 94 dBA v závislosti na frekvenci, a v ostatních kanálech hodnoty v rozsahu 65 až 106 dBA v závislosti na frekvenci. Je evidentní, že hlasitost poslechu nemusí být pohodlná. Zvláště vezmeme-li v úvahu, že únava ucha nastává při hladině 85 dBA již po dvaceti minutách poslechu. [22,33]

Dabingová studia se ve své snaze se akusticky přiblížit velkým kinosálům, často vyznačují také živější akustikou. Tento fakt rovněž nemusí přispívat k pohodlnému a pravdivému poslechu při mixu hudebních děl. S rozvojem surroundových systémů však přichází tendence dozvuk v dabingových studiích zkracovat a odrazivost použitých materiálů snižovat. V surroundových systémech hrají odrazy nemalou roli a obecně vzato, komplikují

poslech. Dobrá místnost na mix prostorových formátů by měla být co nejvíce ztlumená, ideálně až anechoická.

Z výše zmíněných důvodů je evidentní, že dabingová studia, byť jsou většinou již vybavena systémem Dolby Atmos, nejsou svými vlastnostmi příliš vhodná pro mix pouze hudebních děl v tomto formátu. Na druhou stranu, v praxi k tomuto účelu dabingová studia občasné slouží a mix je tedy možný. Záleží především na osobních preferencích zúčastněných inženýrů, režisérů či producentů.

5.2. Nahrávací studia

V režii nahrávacích studií se můžeme běžně setkat se dvěma základními přístupy k akustickému řešení.

5.2.1. Režijní místnosti s krátkou dobou dozívání (Non-Environment Control Room)

Jedná se o místnosti, které jsou akusticky řešeny tak, aby se co nejvíce podobaly volnému poli. Motivace za tímto principem je především zbavení se odrazů, jakožto nežádoucích jevů, které zapříčiňují nižší čitelnost poslouchaného materiálu. Kvůli citlivosti a subjektivitě lidského vnímání lze při tvorbě režii s optimálním dozívkem docílit prostorů, které znějí velmi odlišně, což vede k diametrálně odlišným poslechovým zkušenostem, a tedy i mixům. [24]

Technické řešení režii s krátkou dobou dozívání standardně vypadá tak, že je přední strana režie tvořena tvrdým, kompaktním, odrazivým materiálem, do kterého jsou zapuštěny přední reproduktory. Zapuštění reproduktorů do přední stěny režie, je obecně doporučovanou praxí. Zamezuje se tím návratu zpožděných vln, které jsou vyzařeny ze zadní strany reproduktorů a jejich následnému sečtení s přímou vlnou. V případě volně stojících reproduktorů u stěny se tomuto jevu nemůžeme nikdy úplně vyhnout. Dostupná a používaná obložení stěn nepohlcují dostatečně pásmo nižších frekvencí. U volně stojících reproduktorů se také projevuje vliv přední strany ozvučnice o konečných rozměrech – na jejich rozích vznikají sekundární zdroje a dochází k difrakci vyzařovaného zvuku. Výrobci studiových monitorů se snaží tento problém řešit zaoblením ozvučnice (Genelec, Bowers&Wilkins...). Zapuštění reproduktoru do stěny je však účinnější. Stěna zároveň může fungovat jako rozšířená ozvučnice, což vede k vyšší efektivitě vyzařování, rovnější frekvenční charakteristice na nízkých kmitočtech a také čitelnějšímu stereu. Zároveň se také zamezuje pohybu samotného reproboxu, často vznikajícího v důsledku vyzařování nízkých kmitočtů o vysoké hlasitosti.

Kromě kompaktní, odrazivé přední stěny, režie standardně obsahují také tvrdou, odrazivou podlahu, která však může obsahovat ve své přední a zadní části otvory

napomáhající dodatečné absorpci zvukových vln. Zbytek místnosti je zatlumen tak, aby nevznikaly žádné další odrazy, a to se týká často také mixážního pultu či jiného vybavení. Účelem místnosti je co nejčistší poslech z monitorů. Studiové režie se často, co do plochy, pohybují v rozmezí 25–35 m². Akustické podmínky se zásadně liší pro zvuky, které jsou vytvářeny uvnitř místnosti (mluvené slovo, ruchy apod.) a pro zvuk přicházející do místnosti z monitorového systému. Zatímco u zvuků tvořených v místnosti vznikají díky odlišným rozměrům a tvarům místností zásadní rozdíly, zvuk přicházející do místnosti z monitorů je tímto ovlivněn mnohem méně. Díky absenci odrazů je tedy více zaručena akustická kompatibilita napříč podobně řešenými režiiemi.

Tento typ režijních místností se rovněž typicky vyznačuje větší čitelností spodních frekvencí, ale kvůli krátké době doznívání a minimalizaci odrazů uvnitř místnosti většinou velmi úzkým sweetspotem se stabilním poslechem ve stereu. [24]

5.2.2. Live-End Dead-End

Režijní místnost je v tomto případě rozdělena na části s odlišnou akustickou funkcí. Účelem je přidat akustiku místnosti poslouchanému materiálu. Ideální režijní místnost by měla být vůči poslouchanému materiálu neutrální. To se týká také režijních místností s minimální dobou dozvuku. Rozdílem mezi těmito dvěma přístupy je uchopení slova „neutrální“. Režijní místnosti s minimální dobou dozvuku se vůči poslouchanému materiálu chovají neutrálně v tom slova smyslu, že k němu nepřidávají nic. Live-End Dead-End režijní místnosti naopak zachovávají neutrální, tedy standardní, poslechové podmínky. To znamená, že jejich akustika není ani příliš suchá ani příliš živá. Zůstává zachován přirozený dozvuk.

Aby nebyl poslouchaný materiál příliš ovlivněn či poškozen akustikou režijní místnosti, je nutné zbavit se především prvotních odrazů, a to hlavně v poslechovém sweetspotu. Oblast s potlačenými prvotními odrazy se nazývá reflection-free zone. Prvotní odrazy mohou nejvíce poškodit, zabarvit, či jinak ovlivnit poslouchaný materiál. Ve chvíli, kdy zvuková vlna dorazí po odrazu do sweetspotu, měla by být už co nejvíce roztříštěná. V ideálním případě by tedy odrazy měly do sweetspotu dorazit co nejpozději, v co nejnižší hlasitosti a v co nejvyšším počtu. Bude-li zvuková vlna správně roztříštěna, odrazy, které dorazí do sweetspotu si budou minimálně podobné. V případě, že jsou poslechové monitory upevněny v přední stěně, vznikají prvotní odrazy odrazem od stropu, bočních stěn a zadní stěny. Místa, kde se tvoří prvotní odrazy, je nutné na těchto plochách najít a vhodnou instalací pohltivých a difuzních prvků je ošetřit. Přední stěna režijní místnosti bývá zpravidla co nejvíce zatlumená. Celá přední polovina místnosti tedy tvoří tzv. mrtvý konec (dead end). Tímto způsobem je možné dosáhnout toho, že akustika místnosti nebude negativně ovlivňovat poslouchaný materiál, ale přidá k němu přirozený dozvuk, na který je lidské ucho zvyklé. Při eliminaci prvotních odrazů vychází vlastnosti poslouchaného materiálu přímo z nahrávky, nejsou tvořeny ani měněny akustikou místnosti, ve které nahrávku posloucháme.

Zbývající mnohonásobné odrazy musí zůstat zachovány, jelikož se stále jedná o místnost s konečnými rozměry. Také je nutné, aby byl tento dozvuk napříč frekvenčním spektrem co nejvíce vyrovnaný. Pokud se difuzní mnohonásobné odrazy vracejí ze zadní části místnosti zpět do přední části spektrálně nevyrovnané, mají na poslouchaný materiál podobný vliv jako prvotní odrazy (interference, barevné změny). Zadní část místnosti je tedy nutné vhodně vybavit pohltivými a difuzními prvky, aby bylo možné dosáhnout vyrovnaného dozvuku. Obecně platí, že nízkých frekvencí bývá v dozvuku nadbytek a je třeba je pohlcovat. Střední a vyšší frekvence je naopak třeba odrážet. Zadní polovina místnosti potom tvoří tzv. živý konec (live end).

Vliv módů místnosti (axiální, tangenciální a šikmé) je třeba minimalizovat. V praxi existují dva přístupy k řešení jejich minimalizace. První přístup říká, že je dobré mít přední polovinu místnosti asymetrickou. Důvodem je, že asymetrické místnosti nemají pravidelnou modální odezvu. Nepravidelná modální odezva je sluchem hůře detekovatelná než pravidelná a lépe se tedy schová. Naproti tomu druhý přístup říká, že poslechový sweetspot by neměl být ovlivněn módy vůbec. Využívá se tedy symetrie místnosti k tomu, aby byly všechny její módy přesně spočítány, a mohly být tedy co nejvíce eliminovány.

Výsledným produktem metody LEDE by měla být stereo-symetrická místnost s RFZ (reflection free zone) v okolí poslechového sweetspotu. [23]

5.3. Režijní místnosti s vícekanálovým zvukem

Řešení režijních místností pro prostorový zvuk je náročná akustická disciplína. Prostorové sestavy reproduktorů obsahují daný počet fyzických zdrojů zvuku, přičemž každá kombinace těchto zdrojů vytváří virtuální zdroj. Pro sestavu 5.0 je počet fyzických zdrojů zvuku 5, ale fantomových zdrojů je 26. Pokud jsou k reprodukci využity vícepásmové reproduktory celá situace se ještě více komplikuje. Byť specificky pro orchestrální nebo varhanní hudbu bývají preferovány vícepásmové reproduktory, v případě prostorového zvuku bývá užití jednopásmových reproduktorů v kombinaci se sub-wooferem lepší řešení. Akustická situace je přehlednější a dá se lépe „odladit“.

Umístěním jednotlivých reproduktorů v režijních místnostech řeší doporučení ITU-R BS.2051-3.

5.3.1. Umístění sub-woofery

Obecně není doporučeno umístit sub-woofer na střed k centrálnímu monitoru, ale raději po jeho levé či pravé straně. Sub-woofer umístěný na stranu vybuzuje místnost asymetricky. Přestože i tak pravděpodobně dojde k vytvoření pole stojatých vln, vzniklé uzly a kmity mají mnohem nižší energii a celková odezva místnosti je tedy mnohem vyrovnanější. Běžnou praxí ve studiích zaměřených na zpracování orchestrálních nahrávek (klasická hudba,

filmová hudba) je umísťovať sub-woofer na pravú stranu od centrálného monitoru. Dôvodom je, že nástroje spodní časti frekvenčného spektra (kontrabasy, violoncella) bývajú v orchestrech umiestnené vpravo. Stejným umiestnením zaujímajú i v následnom mixu. U jiných žánrů, kde se běžně orientuje basová složka do středu nahrávky, nehraje zásadní roli, zda je sub-woofer od centru nalevo či napravo.

U systémů prostorové reprodukce hraje také roli časová synchronizace všech použitých reproduktorů. Pokud má sub-woofer oproti zbytku sestavy nějaký časový offset, celá spodní část frekvenčného spektra zvukového materiálu ztrácí přehlednost, attacky a může docházet také k barevným změnám (klasickým důsledkem je nevyrovnaný mix basy a velkého bubnu). Zvukový materiál míchaný v režijních místnostech s časovým offsetem sub-wooferu je nepřenositelný do jiných režijních místností. Časový offset nemusí být nutně způsoben pouze špatnou synchronizací reproduktorů, ale třeba také typem ozvučnice sub-wooferu. Typicky problematická je v tomto směru ozvučnice typu band-pass.

Další často řešenou problematikou je frekvenční hranice, od jaké by se měl zvuk do sub-wooferu směřovat. Bude-li hranice příliš nízko, frekvenční odezva reproduktorové soustavy nebude vyrovnaná. Bude-li naopak příliš vysoko, začne se sub-woofer projevovat jako směrový zdroj zvuku. Hranice se nejčastěji pohybuje v rozmezí 40 Hz - 80 Hz. Dolby pro formát Atmos doporučuje používat hranici 80 Hz. [22]

5.4. Požadavky na režijní místnosti pro formát Dolby Atmos

Složitost řešení formátu Dolby Atmos v již zavedených režijních místnostech podtrhuje fakt, že z dlouhodobého hlediska neexistuje pro režijní místnosti žádný standard. Některé jsou řešeny metodou Live-End Dead-End, jiné sledují spíše model s krátkou dobou dozvání. Existuje však řada režijních místností řešených staršími metodami nebo kombinacemi předešlých dvou. Dalo by se říct, že akustika studiových režii nese jakýsi podpis svého tvůrce. V případě mnoha předních akustických inženýrů to tak je. Každá místnost má tím pádem své silné a slabé stránky. Některé místnosti podporují ambientní vjem poslouchaného materiálu, zatímco jiné umožňují sluchem detekovat nejjemnější detaily. Vesměs ale mají jednu vlastnost společnou, a tím je akustická bidirekcionálnost. Přední část režie se chová jinak než zadní část. Tato vlastnost prospívá stereofonnímu poslechu, ale není výhodná pro prostorový zvuk. Akustická bidirekcionálnost způsobuje, že přestěhováním reproduktoru z přední strany na zadní stranu místnosti získáváme velmi odlišný poslech. Tento fakt samozřejmě prostorovému sluchovému vjemu nijak neprospívá. Na druhou stranu v plně symetrických místnostech nebude stereofonní poslech tak dobrý, jako v bidirekcionálních. Z tohoto a z předchozích kapitol (Nahrávací studia) vyplývá, že místnosti s dobrým stereofonním poslechem v podstatě znemožňují dobrý poslech prostorového zvuku a naopak.

Vzhledem k tomu, že i v prostorovém zvuku hraje zásadní roli především dění lokalizované před posluchačem, je zachování kvalitního předního poslechu nezbytné. Jedná

se tedy o kompromis mezi „prostorovostí“ a kvalitně fungujícím předním poslechem (někdy nazýván sound stage). Jedná-li se o čistě hudební prostorový zvuk, většina informace vždy přichází k posluchači zepředu a pokud jsou užity zdroje zvuku z jiných směrů mají často éterický charakter. Pro tento účel jsou tedy bidirekcionálně řešené režijní místnosti dostačující. Cílem by vždy mělo být zachování kvalitního stereofonního poslechu a „sound stage“ oblasti v případě prostorového zvuku a zároveň získat co nejlepší zvuk ze zadní části prostorového systému. Nejčastěji probíhají úpravy bidirekcionálních režijních místností tak, že bývá pozměněna přední stěna. Zůstává stále pevná, jako je tomu u stera, ale přidávají se na ni difúzní prvky, tak aby byly veškeré diskrétní odrazy rozbity a nešířily se do zadní části místnosti. [22]

5.4.1. Prostorové požadavky

Přestože neexistuje žádný pevný standard pro režijní místnosti ve formátu Dolby Atmos, existují doporučení, ze kterých lze při konstrukci, či rekonstrukci, místnosti vycházet. Mnohá doporučení platí pro prostorový zvuk obecně.

Co se týče tvaru místnosti, doporučení jej přesně nespecifikují. Rozlišují však rozložení sestavy reproduktorů a hraniční rozměry. Sestava může být rozložena následující způsobem:

- Ekvidistantní: reproduktory jsou od sweet spotu ve stejné vzdálenosti. Pozice zvukaře se tedy nachází ve středu systému nebo v jeho blízkém okolí.
- Ortogonální: odpovídá spíše místnostem s větší délkou než šířkou. Pozice zvukaře se potom následně nachází v zadní části místnosti, a to zhruba ve 2/3 rozměru reproduktorového systému. Reproduktory se u tohoto rozložení musí zpozdit tak, aby se neprojevila latence těch, které jsou od sweet spotu dál.

Hraniční rozměry velikosti sestavy reproduktorů (měřeno od membrán):

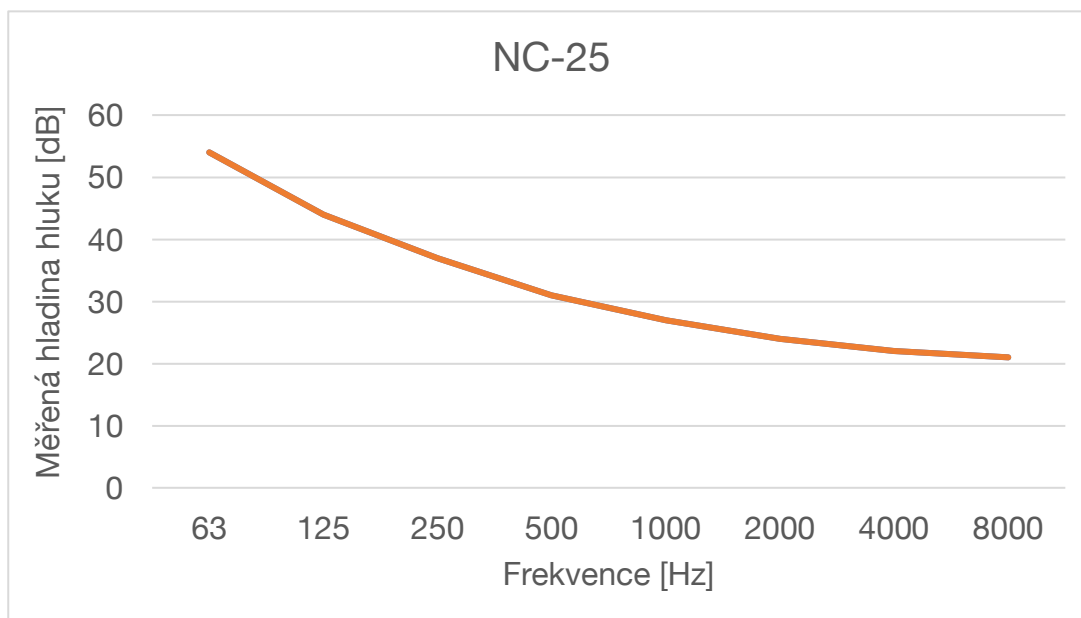
- Minimálně 2,4 m od podlahy k membránám nadhlavových reproduktorů, ideálně 3 m,
- Minimálně 3 m na šířku, ideálně 5,5 m.
- Minimálně 3,5 m na délku, ideálně 6,4 m.
- Minimální doporučený objem místnosti 50 m³.
- Reproduktory by neměly být od pozice zvukaře vzdáleny více než 5 m.
- Pozice zvukaře, resp. jeho uší, by se měla nacházet ve výšce cca 1,2 m od podlahy.

[4,5]

5.4.2. Akustické požadavky

Stejně jako pro režijní místnosti s vícekanálovým zvukem i zde platí, že musí být co nejvíce potlačeny diskrétní prvotní odrazy, a to buď difúzními nebo absorbčními materiály.

Režie by měly rovněž splňovat kritérium NC25. Jedná se o akustické kritérium určující maximální hladinu hluku v místnostech podle jejich využití. Při měření v režii studia je nutné mít v provozu veškeré přístroje vydávající jakýkoliv hluk nebo šum (aktivní chlazení, vzduchotechnika apod.). Kritérium NC-25 se měří ve frekvenčním rozsahu 63 Hz až 8000 Hz.



Obr.1: Křivka hladiny hluku odpovídající normě NC-25

Co se týče doby dozvuku, měří se parametr RT60. Jedná se o dobu, za kterou poklesne hladina akustického tlaku v místnosti o 60 dB, po vypnutí budícího zdroje zvuku. RT60 je doporučeno měřit pro frekvence 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz a 8 kHz. Porovnání naměřených výsledků s doporučenými hodnotami je možné provést v excelovém programu Dolby Audio Room Design Tool, který je volně dostupný na webu Dolby. Tento nástroj zároveň umožňuje porovnání parametrů v závislosti na typu a velikosti místnosti, na sestavě a modelu instalovaných reproduktorů apod. [4,5]

5.4.3. Obecná doporučení k umístění poslechových monitorů

V mnoha režijních místnostech nelze instalovat monitorový systém přesně podle doporučených pravidel, ať už kvůli vybavení či tvaru dané místnosti. Pro úspěšnou instalaci je tedy nutné umístění jednotlivých reproduktorů mírně modifikovat.

Výška monitorů by ideálně měla být ve výšce uší mistra zvuku (cca 1,2 m). Pokud toho nelze dosáhnout je možné umístit monitory výše s mírným náklonem dolů, uvádí se maximálně 20°. Za každých okolností by měl však zůstat zachován dostatečný rozdíl mezi monitory v úrovni hlavy a mezi monitory nad hlavou. Pokud jsou monitory patřící do úrovně hlavy instalovány příliš vysoko, mistr zvuku je přestává vnímat v úrovni hlavy. Jejich výška by tedy neměla přesáhnout 7/10 výšky monitorů nad hlavou.

Režijní místnosti s plátnem nebo větší obrazovkou mohou mít problémy s vhodným umístěním předních reproduktorů. Platí, že trojice předních reproduktorů (L, C, R) by měla být ve stejné výšce. Toho je možné docílit i položením centru nebo krajních monitorů horizontálně. Jedná-li se o dabingové studio, kde plátno slouží k promítání videa, trojice předních monitorů by neměla být výše než v půlce plátna.

Surroundové monitory, tedy Ls, Lrs, Rrs a Rs, by pak měly být odděleny minimálně úhlem 30°. Pokud je nutná případná elevace u zadní dvojice monitorů, tedy Lrs a Rrs, je možné je umístit do 3/4 výšky reproduktorů nad hlavou pod úhlem maximálně 25°.

Následuje seznam doporučovaných zkratk pro označení jednotlivých monitorů v sestavách Dolby Atmos. Tato označení mohou sloužit jak pro monitory, tak pro mikrofony v mikrofonních sestavách či pro natáčené stopy spadající do daných bedů.

Sestava 7.1.4:

Zkratka	Název	Azimut	Elevace
C	Center	0°	0° až 20°
L	Left	-30°	0° až 20°
R	Right	30°	0° až 20°
Ls	Left surround	-90° až -110°	0° až 20°
Rs	Right surround	90° až 110°	0° až 20°
Lrs	Left rear surround	-120° až -150°	0° až 25°
Rrs	Right rear surround	120° až 150°	0° až 25°
Ltf	Left top front	-30° až -60°	45° + E/2
Rtf	Right top front	30° až 60°	45° + E/2
Ltr	Left top rear	-120° až -150°	45° + E/2
Rtr	Right top rear	120° až 150°	45° + E/2
LFE1	Low-frequency effect 1	mimo střed	0°

Tab.1: Azimut a elevace monitorů v sestavě 7.1.4.

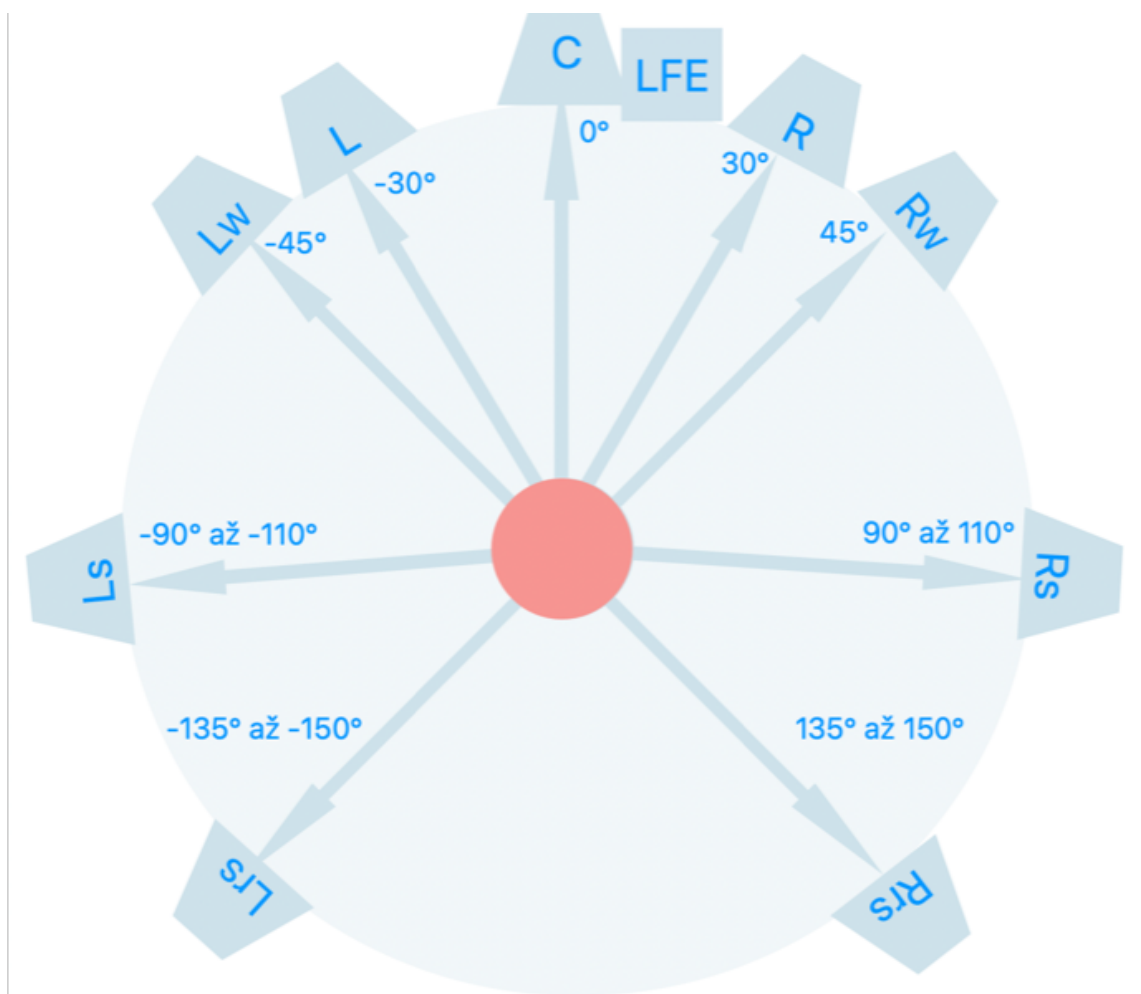
E představuje elevaci monitorů v úrovni hlavy. Co se týče elevace monitorů nad hlavou je možné se pohybovat v rozmezí 30°+*E* až 55°+*E*/4.

Větší typ sestavy 9.2.6 je obohacen o následující monitory:

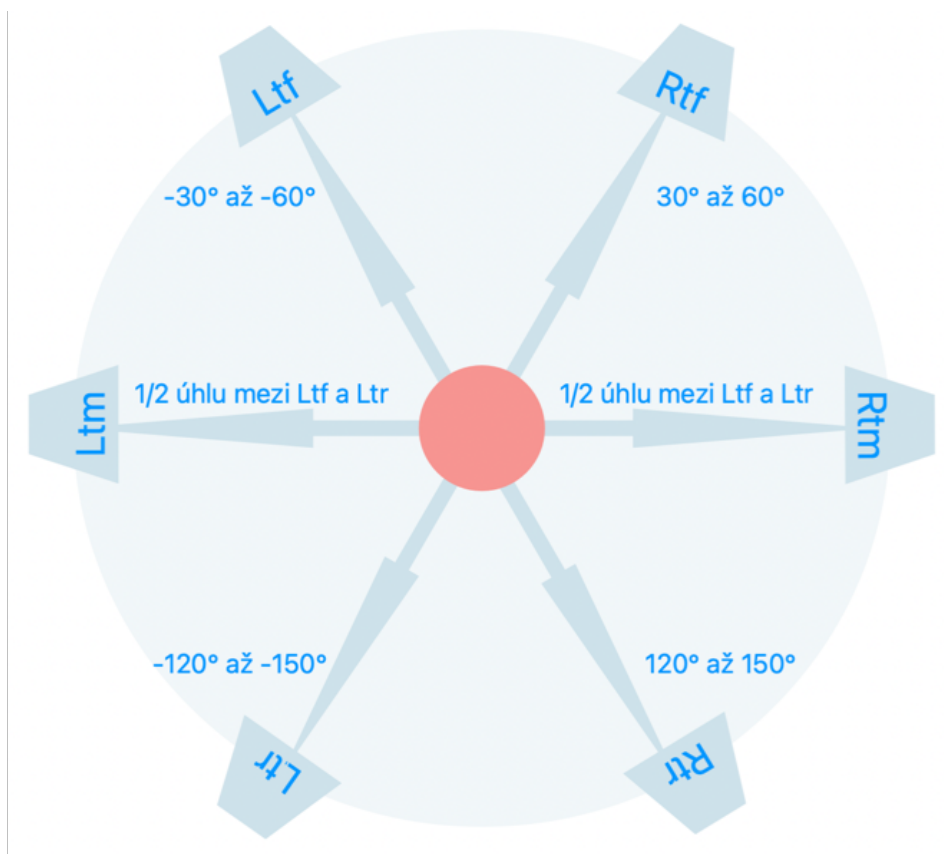
Zkratka	Název	Azimut	Elevace
Lw	Left wide	-45° (-10° až -20° od L)	0° až 20°
Rw	Right wide	45° (10° až 20° od R)	0° až 20°
Ltm	Left top middle	-75° až -110°	45° + E/2
Rtm	Right top middle	75° až 110°	45° + E/2
LFE2	Low-frequency effect 2	symetricky s LFE1	0°

Tab.2: Azimut a elevace doplňkových monitorů v sestavě 9.2.6.

Výše uvedené azimuty [Tab.1,2] platí pro ekvidistantní rozložení sestavy monitorů v místnosti. U ortogonálních sestav se mohou některé úhly mírně lišit. Je také možné instalovat sestavu monitorů se sérií monitorů, tzv. array. Array vzniká tehdy, pokud se po jedné nebo obou stranách monitorů Ls, Rs, Lrs nebo Rrs přidají doplňkové vykrývací monitory. Tyto velké sestavy se uplatňují především ve velkých režijních místnostech nebo v dabingových studiích. Pro sestavy se sériemi monitorů nebo jiné rozšířené sestavy jsou bližší informace a doporučení uvedeny v dokumentech Dolby Atmos Music Room z listopadu 2021 a Dolby Atmos Home Entertainment Studio z května 2021. [4,5]



Obr.2: Doporučované rozložení reproduktorů v rozšířené sestavě 9.1.X



Obr.3: Doporučené rozložení horní vrstvy reproduktorů pro sestavu 9.1.6

5.4.4. Výběr poslechových monitorů

Na trhu se postupně objevuje více a více výrobců nabízejících konfigurovatelné sestavy monitorů a zesilovačů určené pro prostorový zvuk. Jak již bylo zmíněno, je možné používat i vícepásmové monitory. Akustickou situaci to však může značně zkomplikovat, a proto jsou momentálně velmi populární sestavy monitorů s jedním pásmem obohacené o sub-woofer.

Doporučovaná frekvenční odezva u monitorů s výjimkou sub-wooferu je 40 Hz až 18 kHz s tím, že by na celém pásmu neměla být odchylka větší než ± 3 dB. Doporučovaná frekvenční odezva sub-wooferu je 31,5 Hz až 150 Hz. Vzhledem k tomu, že by celý systém měl být co nejvíce kompaktní, je vhodné používat set od jednoho výrobce. Je také dobré, aby dvojice (nebo přední trojice) monitorů byly stejného modelu.

Dolby blíže specifikuje také akustický tlak, kterého by měl být každý monitor v sestavě schopen dosáhnout bez zkreslení a headroom. Pro všechny monitory s výjimkou sub-wooferu platí, že referenční hodnota akustického tlaku pro komerční hudební studia je 85 dBC s headroomem minimálně 20 dB. Sub-woofer by měl mít stálé zesílení +10 dB oproti centrálnímu monitoru a měl by být schopen bez zkreslení vytvořit headroom 20 dB.

Úhel vyzařování monitorů vhodných do sestav pro prostorový zvuk by neměl klesnout pod 45° ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 10 kHz.

Výše zmiňovaný nástroj Dolby Audio Room Design Tool obsahuje seznam používaných modelů reproduktorů, a je pomocí něj možné posoudit, jak vhodná je daná sestava do určeného prostoru.

Dolby uvádí, že veškeré měření referenčních hodnot SPL by mělo probíhat s růžovým šumem, který poskytuje Dolby Atmos Renderer. Neuvádí však, zda je daný růžový šum totožný se standardizovaným růžovým šumem SMPTE. [4,5]

6. Object-based audio

Objekty jsou definovány jako zvukové elementy, které jsou popsány metadaty. Metadata v sobě nesou informaci o uměleckém záměru souvisejícím s daným elementem. Objekt může být buď zvuk vytvořený klasickou cestou, tedy záznamem, nebo může být vytvořen synteticky. Objekty jsou po vytvoření následně postprodukovány v DAW, kde také dochází k jejich umístění do prostoru. V DAW standardně odpovídá jeden objekt jednomu tracku. Systém práce s objekty je velmi podobný audio enginům, které bývají součástí herních enginů (Unity, Unreal Engine...) - zde se rovněž pracuje s objekty ve formě bodových zdrojů zvuku, které dohromady tvoří zvukovou kulisu okolního prostředí (soundscape).

Oproti běžným surroundovým systémům (channel-based audio) poskytuje objektový prostorový zvuk lepší začlenění posluchače do prostoru (imerze) a díky přidaným výškovým kanálům je tento systém mnohem flexibilnější v renderingu zvuků v prostoru. Tím, že není objektové audio vázané na danou sestavu reproduktorů, je také více adaptabilní. Zvukový materiál může být optimalizován pro širokou škálu zařízení. Vysoká prostorová flexibilita a vysoký stupeň imerze však s sebou nesou také větší míru komplikovanosti, větší nároky na čas a s tím spojené větší nároky na finanční stránku projektů.

6.1. Prostorová reprezentace objektově orientovaných systémů

Aby mohly být objekty definovány v prostoru, musí být určena nějaká prostorová reference. Používá se buď reference alocentrická nebo egocentrická. V případě alocentrické reference se pozice objektů vztahují k jiným objektům v prostoru. Tato reference je běžná v popisu různých akustických prostředí. Může se jednat například o tvorbu zvukových kulis nezávislých na pozici posluchače nebo o zvukovou kulisu pro větší množství posluchačů. V těchto případech se pozice objektů popisuje pomocí kartézských souřadnic. Egocentrická prostorová reference vztahuje pozice objektů vůči pozici posluchače a vyjadřuje tak prostorovou situaci v souvislosti s jeho vjemem. Pozice objektu je potom popsána azimutem, elevací a vzdáleností od posluchače. V praxi se nejčastěji užívá alocentrická prostorová reference. Při užívání egocentrické reference může totiž docházet k výrazným záměnám umístění zdroje zvuku se změnou místnosti, ve které je zvukový objekt reprodukován. Nominálními body alocentrické reference jsou reproduktory nebo hranice prostoru, který je reproduktory vymezen. Metadata nesoucí informaci o umístění objektu jsou potom generována a dekodována na základě stejné reference.

V případě hybridního objektového systému Dolby Atmos je umístění objektů řešeno buď nativním pannerem v DAW nebo plug-inem Dolby Atmos Panner. V případě Dolby Atmos Panneru probíhá panning ve vykresleném prostoru čtvercového půdorysu, uprostřed se nachází posluchač, vůči kterému pohyb objektů probíhá. Dolby Atmos Renderer vykresluje naopak prostor obdélníkového půdorysu (typičtější pro sály a kina) a poskytuje možnost zvolit

buď prostor s plátnem (kinosál, hudební sál) nebo s posluchačem (čistě hudební Atmos). Mezi čtvercovým Pannerem a obdélníkový vykreslením v Rendereru probíhá škálování. [34]

6.2. Velikost objektů

Prostorový systém musí být schopen reprodukovat, jak bodové zdroje, tak větší objekty. Řešením bývá kombinace rozšíření objektu mezi sousedící reproduktory a zároveň dekorelace signálu na jejich vstupech, aby se zamezilo vytvoření nového fantomového zdroje.

Prakticky je v Atmos systému řešena velikost v plug-in Dolby Atmos Panner, kde lze tuto vlastnost nastavit vlastním knobem s názvem Size. [34]

6.3. Rendering

Rendering je klíčový proces tvorby prostorového zvuku. Renderový algoritmus mapuje monofonní audio signál na sestavu reproduktorů, které generují zvukový podnět z požadovaného směru. Renderery pro objektové audio aproximují interaurální časové a intenzitní diference pro dané umístění zvukového podnětu. Většina renderových algoritmů využívá k panningu metodu amplitudového panoramování. Jedná se o výpočet normalizovaného vektoru, který reprezentuje zesílení pro reproduktory ze sestavy. Vstupní signál je násoben tímto vektorem pro daný počet reproduktorů. Fantomový zdroj zvuku, v tomto případě objekt, je tedy formován signálem z těchto reproduktorů. Díky tomu lze dosáhnout potřebných interaurálních diferencí k tomu, aby mohl posluchač identifikovat umístění objektu.

Pro pohyblivé objekty je tento vektor získáván s určitou frekvencí a mezi získanými vektory probíhá interpolace. Výpočty vektorů zesílení mohou probíhat synchronně i asynchronně s dalšími složkami audio processingu v rendereru. Aktualizace souřadnic jsou standardně fixovány na snímkovou frekvenci projektu, což může být například 24 fps nebo 30 fps. Renderer standardně resampluje tuto frekvenci na obnovovací frekvenci koncových zařízení (např. 100 Hz), přičemž výpočet vektorů zesílení probíhá na této frekvenci a je dále interpolován na vzorkovací frekvenci audia (většinou 48 kHz). Je to z toho důvodu, že výpočet vektorů zesílení s každým vzorkem audia, představuje příliš velkou výpočetní zátěž.

Mezi běžně používané metody amplitudového panoramování patří VBAP (Vector-based Amplitude Panning), DBAP (Distance-based Amplitude Panning). [34]

7. Postprodukce a technické požadavky Dolby Atmos

Formát Dolby Atmos pracuje s vlastním Rendererem, který funguje jako standalone aplikace na tožném počítači jako DAW (Digital Audio Workstation) nebo zvlášť na dedikovaném počítači.

7.1. Pojmy zavedené v souvislosti s Dolby Atmos

K postprodukci a Rendereru se vztahují následující pojmy. Vzhledem k nedostatku české terminologie a zároveň globálního užívání té anglické, zůstaly základní termíny ve své anglické podobě.

7.1.1. Audio Bed

Tímto pojmenováním se označují kanály určené pro fyzické reproduktory, které obsahuje výstupní sběrnice mixu. V případě Dolby Atmos rozlišujeme nejčastěji 7 reproduktorů v úrovni uší, 1 LFE kanál a minimálně 2 reproduktory nad hlavou.

7.1.2. Audio Object

Jedná se o zvukový objekt, jehož poloha není určena pouze standardním panningem mezi fyzickými reproduktory, ale metadaty, která obsahují informaci o poloze objektu vůči osám x, y a z. Takový objekt je tedy možné přesně směřovat kamkoliv ve 3D prostoru, který je fyzickými reproduktory tvořen.

7.1.3. Object Audio Metadata (OAMD)

Metadata, která definují polohu objektů jsou dynamická a obsahují pro daný moment přesnou informaci o poloze objektu ve 3D prostoru. Použití metadat se souřadnicemi umožňuje adresovat každý reproduktor v dané sestavě zvlášť – lokalizace a směřování objektu v prostoru se tedy oproti standardnímu panorámování zpřesní. Je možné zohlednit jakou soustavu daný uživatel má.

7.1.4. Dolby Atmos Renderer a Object Audio Renderer (OAR)

Renderer slouží k překladu dat z mixu do sestavy fyzických reproduktorů. Pro profesionální podmínky je doporučena sestava 7.1.4, tedy 7 reproduktorů v úrovni uší, 4 reproduktory nad úrovní hlavy a jeden reproduktor zpracovávající nízké frekvence. V praxi však Renderer překládá data pro různé typy reprodukce (binaurálního poslechu na sluchátka, různé setupy reproduktorů u koncových uživatelů). Momentálně zpracovává maximálně 128 stop, 10 stop je určeno pro audio body a 118 stop je určeno pro objekty či dodatečné body.

OAR směřuje audio body do dostupných fyzických reproduktorů a audio objekty umísťuje do prostoru dle jejich souřadnic OAMD. Díky použití překladače OAR dosahuje Dolby Atmos vyššího rozlišení než systémy s diskretním směřováním signálu mezi kanály.

Mezi koncové uživatele Dolby Atmos patří často lidé s domácím kinem. V případě velkých komerčních kinosálů (soustavy do 64 reproduktorů) probíhá rendering Dolby Atmos masteru přes dedikovaný procesor (Dolby Cinema Processor), který umožňuje překlad všech dat v dostatečné rychlosti. Ke čtení masteru je využíván kinoserver s dostatečnou šířkou pásma.

V případě domácích kin toto vybavení není dostupné, a proto musí docházet k redukci dat. Čtení masteru probíhá buď z disku Blu-ray, kde je značně omezená maximální velikost dat nebo se jedná o internetový stream (over-the-top, OTT), kde je omezena šířka pásma. Dolby redukci dat řeší pomocí prostorového kódování (spatial coding). Jedná se o redukci dostupných stop ze 128 na 12 až 16 dynamických elementů s metadaty OAMD. [7,37]

7.1.5. Prostorové kódování (Spatial Coding)

Jedná se o redukci dat na straně koncového uživatele. Jak již bylo výše zmíněno, k redukci dat dochází díky vytvoření 12, 14 nebo 16 elementů, které shlukují aktivní stopy s body a objekty umístěné v blízkém okolí. Momentální umístění elementů je definováno pomocí OAMD. Bedy i objekty se mohou pohybovat mezi elementy. Toto kódování zachovává transparentní rozlišení pro většinu aplikací u sestavy 7.1.4 a domácích kin. Pro ověření, zda prostorová informace zůstává opravdu zachována obsahuje Dolby Atmos Renderer emulaci prostorového kódování, kde je možné emulovat výsledek s kódováním na 12, 14 i 16 elementů. [7,34]

7.1.6. Měření hlasitosti

Měření celkové hlasitosti Dolby Atmos masteru neprobíhá ve formátu Dolby Atmos, ale ve formátu 5.1. Zatím neexistuje žádné efektivní měření celkové hlasitosti kompletního Dolby Atmos masteru. [40] Měření hlasitosti ve formátu 5.1 navíc zajišťuje hlasitostní kontinuitu napříč obsahem, který nebyl vytvářen primárně pro Dolby Atmos. Úroveň požadované výsledné hlasitosti se liší (často -18 LUFS, -23 LUFS, -24 LKFS, -27 LKFS). Měření True Peak je ještě náročnější, a to především proto, že při renderingu do 5.1 dochází k těžko předvídatelným sumacím signálu. Díky sumacím je také značně snížena efektivnost případné limitace v Dolby Atmos masteru. Dolby doporučuje hodnotu True Peak udržovat na -2 dBTP s tím, že TP nesmí překročit hodnotu -1 dBTP. S tímto nastavením lze zabránit slyšitelnému zkreslení (clippingu). Měření hlasitosti lze provádět přímo v Dolby Atmos Rendereru, který již obsahuje limiter. U filmových projektů je změřená hodnota hlasitosti používána k nastavení důležitého parametru dialnorm (dialog normalization). Jedná se o parametr, který určuje zesílení při přehrávání na straně uživatele. Při používání externí měřicí aplikace se doporučuje

používat 5.1 re-render (jedná se o rendering z Dolby Atmos do jiného prostorového formátu) s limiterem. [7,39]

7.1.7. Soubor dat Dolby Atmos Master File (DAMF)

Jedná se o formát, se kterým pracuje renderer a skládá se ze tří částí:

- XML (eXtensible Markup Language – soubor popisující strukturu dat) obsahující informace o reprezentaci Dolby Atmos a také jsou zde indexovány veškeré soubory obsažené v DAMF. Dále také obsahuje informaci o počtu použitých inputů (bedy a objekty), snímkovací frekvenci, počet elementů použitých pro prostorové kódování apod. Příponou je .atmos. S tímto formátem pracuje Dolby Atmos Renderer.
- XML obsahující OAMD pro každý objekt a nastavení metadat pro binaurální poslech. Přípona souboru je .atmos.metadata.
- Core Audio Format (CAF), který obsahuje vlastní audio stopy v nejvyšším počtu 128 stop. Přípona souboru je .atmos.audio.

Další formáty, které se používají v souvislosti s Dolby Atmos:

- ADM BWF (Audio Definition Model Broadcast Wav Format) je alternativní formát ve kterém lze distribuovat master Dolby Atmos. Veškeré informace standardně obsažené ve formátech .atmos a .atmos.metadata jsou vepsány do headeru souboru WAV. Výhodou tohoto formátu je fakt, že se jedná pouze o jeden soubor, ne o tři jako v předchozím případě. Další výhodou pak skýtá možnost importovat soubor do DAW, přičemž zůstávají zachovány veškeré informace o panoramě bedů i objektů. To usnadňuje další postprodukční úpravy. U filmů se toho využívá při výměně jazyka, cenzuře apod. ADM BWF je díky svým výhodám nejvíce používaný formát pro streamovací služby či Blue-ray. Dolby Atmos Renderer může tento formát otevřít a s omezeními s ním pracovat, je možné do tohoto formátu také exportovat.
- IMF.IAB (Interoperability Mastering Format, Immersive Audio Bitstream) - mezzaninový formát (slouží k unifikaci formátů; komprimovaný formát, ale zachovává vysokou kvalitu – vizuálně bezztrátový), týká se především videa. [7,39]

7.1.8. Monitoring v Dolby Atmos

Doporučovaná konfigurace reproduktorů pro monitoring Dolby Atmos je 7.1.4, ale může být rozšířena až na 9.1.6. Minimem je potom setup 5.1.4. Dá se očekávat, že většina posluchačů bude prostorové formáty poslouchat na sluchátka. Je tedy vhodné kontrolovat i binaurální poslech. Základní nastavení (např. mute, úprava hlasitosti) poslechových monitorů je možné provést přímo v Dolby Atmos Rendereru. Renderer dále nabízí také možnost kalibrace, byť reproduktorové systémy určené pro monitoring prostorového zvuku často mají

vlastní ovladač s grafickým rozhraním, kde je možné sestavu kalibrovat (např. Genelec GLM Software). V Rendereru lze nastavit typ sestavy, zesílení jednotlivých monitorů, časové zpoždění a ekvalizaci. [7,39]

7.2. Dolby Atmos Renderer

7.2.1. Základní funkce

Mezi základní funkce Dolby Atmos Rendereru patří následující:

- Nahrávání a ukládání bedů a objektů do master souboru (Master File) synchronizovaného podle LTC.
- Mix a přizpůsobení metadat pro bitový stream Dolby Digital Plus s Dolby Atmos (15 kanálů/objektů a jeden LFE kanál).
- Export master souboru do mezinárodních formátů (ADM BWF s příponou .wav, IMF IAB s příponou .mxr).
- Export do formátu MP4 (slouží především pro kontrolu přehrávání u koncových uživatelů).
- Měření hlasitosti programu v reálném čase i offline. K měření se využívá re-renderovaný program ve formátu 5.1.
- Monitorovací poslech mixu nebo master souboru ve formátu Dolby Atmos na dostupné konfiguraci reproduktorů se zapnutým prostorovým kódováním nebo bez něj.
- Monitorovací poslech re-renderovaných mixů ve formátech 5.1, 7.1, stereo atd.
- Monitorovací poslech určený pro sluchátka ve formátu stereo a binaural.
- Vytvoření re-renderovaných mixů a jejich export (vytvoření mixu v jiných prostorových formátech, menších než Dolby Atmos). Re-renderovat je možné celý mix nebo jen určité skupiny stop.

7.2.2. Technické požadavky na Dolby Atmos Renderer

Dolby Atmos Renderer může standardně fungovat ve třech režimech.

- Interně na stejném počítači jako DAW.
- Externě na dedikovaném hardwaru.
- Nativně (na stejném CPU) přímo v DAW.

K základním požadavkům Dolby Atmos Rendereru na DAW je minimální počet stop, které dokáže DAW do Rendereru odesílat. Počet stop je stanoven na 128. Dosažení tohoto počtu stop není bezpodmínečně nutné pro správnou činnost Rendereru, ale jednak poskytuje určitou flexibilitu a také zaručuje kompatibilitu v případě, že bude projekt v nějaké fázi post-produkce odeslán jinam.

Vzhledem k tomu, že projekty natáčené pro formát Dolby Atmos mají standardně více stop, klade jejich zpracování také vyšší požadavky na úložiště – to se týká především případů, kdy Renderer běží interně na stejném počítači jako DAW. Vzhledem k výpočetní náročnosti Dolby obecně doporučuje, aby Renderer fungoval na jiném zařízení než používané DAW. Momentálně existují verze této konfigurace využívající protokol MADI a Dante jak na platformě Windows, tak na platformě Mac/OS.

Příklad systému určeného pro postprodukci ve formátu Dolby Atmos s oddělenými zařízeními pro DAW a Renderer:

MADI

- Zařízení s Rendererem:
 - Zařízení na platformě Windows nebo Mac/OS v doporučené konfiguraci.
 - Rozhraní s MADI (např. RME MADIface XT USB nebo jiné z doporučených)
 - Software Dolby Atmos Renderer.
- Zařízení s DAW:
 - Podporované DAW s nativním Atmos panningem (nebo s plug-inem Dolby Atmos Music Panner) a přímým propojením do rendereru.
 - Rozhraní na propojení 128 stop přes MADI.
 - Software Dolby Atmos Renderer Remote.
- Hardware pro synchronizaci (Word Clock a LTC, případně lze jako generátor LTC využít plug-in Dolby LTC Generator).

Dante

- Zařízení s Rendererem:
 - Zařízení na platformě Windows nebo Mac/OS v doporučené konfiguraci.
 - PCIe Dante karta MADI (např. Focusrite RedNet PCIeR Dante, buď přímo nebo přes Thunderbolt šasi)
 - Software Dolby Atmos Renderer.
 - Analog-to-Dante konvertor pro LTC (Audinate Analog-to-Dante Converter)
- Zařízení s DAW:
 - Podporované DAW s nativním Atmos panningem (nebo s plug-inem Dolby Atmos Music Panner) a přímým propojením do Rendereru.
 - Rozhraní na propojení 128 stop přes Dante.
 - Software Dolby Atmos Renderer Remote.
- Hardware pro synchronizaci (Word Clock a LTC, případně lze jako generátor LTC využít plug-in Dolby LTC Generator).

- Síťový switch kompatibilní s Dante. Všechny zařízení by měly být ke switchi zapojeny hvězdnicově.

Dolby Atmos Renderer Remote je ovladač komunikující s Rendererem přes ethernet a je možné jej pro usnadnění práce nainstalovat na zařízení s DAW, či jakékoliv jiné zařízení v síti. Grafické rozhraní je téměř identické s Rendererem.

Další, ekonomicky méně náročnou variantou je provozovat Renderer na stejném zařízení jako DAW. Má to však několik omezení. V první řadě je rozhodně výpočetní náročnost – což se může negativně odrazit především na komplexnějších projektech. Vyšší počet stop, hodně aktivní automatizace panningu, větší množství plug-inů – všechny tyto skutečnosti mohou zatěžovat procesor natolik, že bude docházet k problémům s přetížením. Další nevýhodou je fakt, že lze k Rendereru připojit pouze to DAW, které je nainstalováno na stejném zařízení. Běží-li Renderer na zařízení samostatně, je možné k němu připojit vícero různých DAW.

Příklad systému určeného pro postprodukci ve formátu Dolby Atmos na jednom zařízení:

- Zařízení na platformě Mac/OS (v této konfiguraci zatím nelze použít platformu Windows – platí pro Dolby Atmos Renderer V5).
- Dolby Atmos Renderer.
- Dolby Renderer Send/Return plug-iny.
- Dolby Audio Bridge.

Informace o umístění (panningu) jednotlivých objektů a metadata jsou do Rendereru posílána interně (adresa Rendereru je v tomto případě localhost).

Propojení mezi DAW a Rendererem je realizováno dvěma způsoby. Prvním způsobem je využití plug-inů Return a Send (je doporučeno použití jako insertu na aux tracku). V Rendereru pak musí být plug-in Return/Send nastavený jako driver. Nevýhodou využití těchto pluginů je, že jsou určeny pouze pro Avid ProTools Ultimate a s nastavením je spojeno více routingů. Naopak výhodou je, že, alespoň v případě Avid ProTools, zůstane funkční DSP processing a je tedy možné dále využívat HDX PCIe kartu. Další výhodou je možnost využít funkce return – tedy návratu z Rendereru zpět do DAW, a to v reálném čase.

Druhou možností, jak poslat audio data z DAW do Rendereru je využít emulaci Dolby Audio Bridge, která umožňuje vytvořit výstup z DAW o 130 kanálech bez nutnosti dalšího manuálního routingů. Což ovšem znamená, že v ProTools je emulace zařazená, co by Playback Engine, a tím znemožňuje DSP processing a také připojení veškerých dalších komponent, které se ve studiových provozech připojují za HDX PCIe kartu (synchronizační jednotka apod.). Pro jiné DAW to vesměs znamená obdobný problém. Výhodou použití Dolby Atmos Bridge může být to, že lze jednoduše využít jakýkoliv připojený audio hardware s alespoň deseti výstupy na monitoring ve formátu Atmos. [7,39]

7.2.3. Synchronizace

Pokud Renderer běží na dedikovaném počítači či hardwaru, je nutné zabezpečit synchronizaci všech součástí řetězce generátorem synchronizačního signálu (Word Clock), přičemž řazení zařízení sériově za sebe se nedoporučuje. Word Clock by měl být distribuován mezi zařízení z jednoho zdroje (někdy nazýváno hvězdicové zapojení). Bez stabilní synchronizace mezi zařízeními nastanou rozdíly mezi LTC a pozicemi jednotlivých vzorků, což se projeví výpadky Rendereru. Pokud Renderer běží na stejném počítači jako DAW, synchronizační signál nemusí být potřeba. LTC je do Rendereru posílán z DAW – může se jednat o jakékoliv rozhraní s generátorem LTC. Pokud není žádné takové zařízení zapojeno, je možné využít plug-in generátor (Dolby LTC Generator). LTC signál obvykle přichází do Rendereru na kanálu 129, popř. 130. V závislosti na tom, jak je LTC generován, se mění latence mezi posílanými audio daty a LTC. Renderer obsahuje několik přednastavených konfigurací, které toto zpoždění kompenzují. [7]

7.2.4. Ovládací prvky Rendereru

Renderer je rozdělen na dvě části – horní část obsahuje nastavení a informace, ve spodní části se nachází vizuální znázornění momentální situace v mixu.

- Informace o souboru obsahujícím master – v této sekci je situováno ovládání a nastavení master souboru, např. nastavení umístění FFOA (First Frame of Action – filmový termín, první frame s vizuálním obsahem). Lze také nastavit umístění nahrávaného či používaného master souboru a jeho status – pouze pro čtení (read) a čtení + zápis (read/write). Status čtení a zápisu lze využít jednak při nahrávání master souboru, ale také pro drobné opravy, v již existujícím souboru formou punch-in/out nahrávání.
- Nastavení monitoringu – lze nastavit formát dostupné sestavy monitorů, vzorkovací frekvence a prostorové kódování. Zvolená sestava monitorů se zobrazuje v okně Room Configuration. Je také možné definovat vlastní sestavu, která ale vždy musí být menší nebo rovna počtu fyzických monitorů. Rozšířená nastavení monitorů lze nalézt ve speciálním okně (Room Setup), kde je možné přizpůsobit jednak routing a také zpoždění určená pro jednotlivé výstupy.
- Nastavení aktuálního vstupu – Renderer může monitorovat vstup z DAW (režim input) nebo otevřený master soubor. Při nahrávání punch-in/out z DAW do master souboru se Renderer automaticky přepíná z režimu master, do režimu input (vstup) a zpět.
- Synchronizace z externím zdrojem – pokud je připojen externí zdroj vysílající LTC, Renderer se řídí podle tohoto zdroje. Možnost zastavení/spuštění přehrávání je zakázána a řídí se podle DAW.
- Nahrávání punch in/out – lze nastavit timecode, kde má punch in začít a skončit.

- Ovládací prvky monitorů – Renderer dokáže odbavit základní ovládání sestavy monitorů. Dostupná je například možnost nastavení celkového útlumu (attenuation). Útlum se provádí až za sekci měření hlasitostních parametrů – nemá tedy vliv na naměřené hodnoty. Jedná se jen o ztlumení poslechu. Renderer také obsahuje útlum zařazený před sekci měření hlasitostních parametrů – jedná se o „dim“, který má hodnotu -20 dB. Také je možné využít klasického „mute“ na výstupu do monitorů. Mute je možné aplikovat buď na kompletní projekt nebo pro potřebu kontroly pouze na objekty nebo pouze na body.
- Indikace signálů na vstupech – přítomnost signálu na vstupech Rendereru je vizuálně indikována pomocí pole bodů. Barva bodu znázorňuje úroveň signálu (zelená: více než -93 dB, žlutá v rozsahu -20 až -6 dB, oranžová: více než -6 dB, červená: 0 dB). Body znázorňují objekty a body, kolem bodů objektů je barevný kruh, který znázorňuje status vstupu (modrá: definovaný a naroutovaný aktivní vstup, šedá: definovaný a naroutovaný neaktivní vstup, bez barvy (bez kruhu): nenaroutovaný vstup, žlutá: indikuje buď nedefinovaný vstup s příchozími metadaty nebo definovaný vstup bez příchozích metadat – indikuje tedy většinou problém v routingu).
- Vizuální reprezentace konfigurace monitorů s možností rychlého sólování či mutování jednoho či více reproduktorů. Úroveň signálu indikují opět barvy, stejně jako je tomu v případě úrovní signálu na vstupech.
- Metry a limiter – vizuální znázornění úrovně signálu odcházející do monitorů a sluchátek a vizuální znázornění limitace signálu (monitory, sluchátka a výstup s prostorovým kódováním). Limiter lze deaktivovat. Pokud je aktivní limituje pouze signál odcházející do monitorů, sluchátek nebo úroveň re-renderovaných souborů (rande materiálu do jiných formátů). Limiter nemá žádný vliv na úroveň hlasitosti master souboru.
- Měření hlasitostních parametrů – probíhá, pokud je přítomen synchronizační LTC signál ze vstupu nebo pokud probíhá přehrávání načteného master souboru. Měření může probíhat ve dvou režimech, a to Stereo a Dolby Atmos.
- Měřené parametry hlasitosti:
 - Krátkodobá hlasitost (LKFS): hlasitost měřená v okně s délkou 3 s.
 - Momentální hlasitost (LKFS): právě změřená úroveň signálu.
 - Integrovaná hlasitost (LKFS): měření podle ITU BS 1770-4.
 - Integrovaná hlasitost dialogu (LKFS): aplikován gate na všechny ostatní složky.
 - Speech: procentuální zastoupení mluveného slova v programu, detekce probíhá algoritmem detekce řeči od Dolby.
 - Range (LU): jedná se o dynamický rozsah programu.
 - True Peak (dBTP): maximální hodnota true peak.

- Vizuelní znázornění objektů v prostoru – znázorněny jsou kromě umístění v prostoru také vlastnosti objektů – velikost, úroveň hlasitosti, umístění objektu pro binaurální poslech (lze nastavit ve speciálním okně Binaural Render Mode) nebo rozřazení objektů do skupin (nastavení v okně Input Configuration).
- Indikace změn – pokud se momentální nastavení Rendereru liší od nastavení použitého pro otevřený master soubor, veškeré změny jsou vizuálně indikovány. [7,39]

7.2.5. Panning v Dolby Atmos

Pro panoramování ve formátu Atmos je možné využít nativních pannerů v DAW, pokud jsou kompatibilní s prostorovými formáty. Nezávisle na tom, zda DAW poskytuje nativní prostorový panner, je možné využít plug-in Dolby Atmos Music Panner. Plugin umožňuje umístění objektu do tří dimenzionálního prostoru, nastavení velikosti objektu a obsahuje také sekvencer, který synchronizuje pohyb objektu s nastaveným tempem projektu v DAW.

7.2.6. Binaurální mix

Převod do binaurálního poslechu je využíván při monitoringu na sluchátka. V balíčku Dolby Atmos Renderer je obsažen rovněž plugin sloužící k nastavení binaurálního poslechu – Dolby Atmos Binaural Settings. Binaurální poslech v Dolby Atmos Rendereru je vytvořený přímo pro potřeby monitoringu formátu Atmos a je zde možné nastavit vzdálenost objektů i bedů od posluchače (blízká/near, střední/mid, vzdálená/far). Nastavením vzdálenosti lze také dosáhnout různé míry prostorovosti mixu. Automaticky je nastavena střední vzdálenost zdrojů zvuku od posluchače, což odpovídá poslechu zdroje zvuku ve vzdálenosti cca 1,5 m. Z kreativního hlediska lze větší vzdáleností zdroje zvuku od posluchače dosáhnout pocitu většího prostoru, či větší velikosti objektu. Přiblížením objektu lze naopak dosáhnout pocitu intimity. V hudbě je obecně lepší míchat objekty, které se podílí na rytmu skladby do bližší, či střední oblasti, aby byl zachován jejich účinek na posluchače. Naopak objekty již obsahující dozvuk může být lepší míchat do vzdálené oblasti (syntetizéry, kytary...).

8. Prostorové mikrofonní techniky

Prostorové mikrofonní techniky slouží v záznamu hudebních děl především k zaznamenání dozvuku a akustiky prostoru.

8.1. Prostorový zvuk v hudebním umění

Zásadním milníkem v historii záznamu zvuku byl začátek sterea (1950-1960). Z praktického hlediska to znamenalo, že jednotlivé nástroje v nahrávce mohou být prostorově odděleny, a tím vyniknou detaily jednotlivých partů hudebních nástrojů. Podobnou změnu způsobil příchod prostorového zvuku, který přidal nahrávkám druhou dimenzi. 2D prostorový zvuk (systémy 5.0, 5.1, 7.0, 7.1) poskytoval možnost umístit zdroje zvuku i za posluchače. Této možnosti nicméně z větší části využívala jen filmová produkce. Valná většina hudebních děl je tvořena za účelem poslechu kompletního tělesa, které je umístěno před posluchačem. Z tohoto důvodu neprobíhá mix ani nahrávání hudebních ansámbků do prostorových formátů tak, že by byl posluchač obklopen hudebníky. Prostorový vjem spočívá v tom, že je posluchač ponořen do akustiky hudebního sálu, chrámu, či jiného autentického prostoru. Výjimku tvoří skladby komponované do prostorových formátů, které záměrně obsahují zdroje zvuku přicházející k posluchači zezadu a také často opery, kde lze surroundových kanálů využít pro umístění efektů, akcí mimo scénu, sborů, či také fanfár.

Rozšířením 2D prostorového zvuku o další dimenzi, tedy o vertikální rovinu, vzniká kolem posluchače kompletní prostor. Zatímco u 2D prostorového zvuku jsou všechny odrazy probíhající ve vertikální rovině (odrazy od stropu) reprodukovány do roviny horizontální, v případě 3D prostorového zvuku mohou zůstat ve vertikální rovině. To posluchači poskytuje lepší přehled o dynamické stránce posluhaného hudebního díla. Zároveň to znamená, že můžou být věrněji reprodukovány dynamické vrcholy nahrávky, jelikož díky rozmístění v prostoru zůstávají veškerá exponovaná místa nahrávky stále přehledná i ve vysoké hlasitosti.

V klasické hudbě lze díky prostorovému zvuku dosáhnout velkého estetického efektu i přes to, že jsou možnosti prostorového zvuku využívány jen velmi citlivě. Mix by měl vždy probíhat s ohledem na autora a instrumentaci, ne proto, aby byly posluchačům předvedeny technické možnosti daných formátů. [10]

8.2. Parametry prostorového zvuku

Mikrofonní systém užívaný k záznamu prostorového zvuku by měl zabezpečit co nejlepší splnění následujících parametrů:

- reálný vjem prostorovosti,
- zachování barvy zvuku,
- lokalizace zdroje zvuku v oblasti před, za i po stranách posluchače,

- lokalizace zdroje zvuku před posluchačem.

Při poslechu živé hudby je 3D prostorový efekt posluchači zprostředkován díky třem akustickým složkám zvuku: přímá zvuková vlna, prvotní odrazy a mnohonásobné odrazy. Jednotlivé akustické složky mají různý vliv na výše zmíněné parametry. V následující tabulce [Tab.3] je tento vliv naznačen:

	Přímý zvuk	Prvotní odrazy	Mnohonásobné odrazy
Lokalizace v oblasti před posluchačem	velký	střední	malý
Lokalizace v oblasti za, nahoře i po stranách posluchače	velký	střední	malý
Vjem prostorovosti	malý	velký	velký
Barva zvuku	velký	střední	střední

Tab.3: Vliv akustických složek zvuku na parametry prostorového hudebního záznamu [11]

Na vjemu prostorovosti se značně podílí prvotní odrazy, a to především jejich hustota, síla a počet. Je tedy nasnadě umístit horní a zadní mikrofony prostorového mikrofonního systému tak, aby zaznamenaly tyto prvotní odrazy (od stropu a stěn) věrně. Účelem horních a zadních dvojic mikrofonů je tedy, v ideálním případě, zachycení dozvuku. V praxi však rovněž zachycují i přímý zvuk, což může, v závislosti na jeho síle a povaze, narušit výsledný prostorový vjem.

Barva zvuku není přímo spojena s vjemem prostorovosti, ale její zachování je nutné pro celkovou kvalitu nahrávky. Důvodem, proč se ve stereofonních mikrofonních systémech používají převážně všesměrové mikrofony je bohatost spodního frekvenčního pásma. Ze stejného důvodu je dobré použít všesměrovou charakteristiku i v prostorových mikrofonních systémech. Pokud jsou použity směrové mikrofony je dobré spodní frekvenční pásmo podpořit. [11]

8.3. Techniky snímání

Stejně jako v případě stereofonního snímání se i ve snímání prostorového zvuku uplatňují tři základní techniky snímání.

8.3.1. Technika rozloženého snímání

Techniky rozloženého snímání (spaced recording techniques) slouží k zachycení prostorové informace pomocí časového rozdílu, který při snímání vzniká díky větším vzdálenostem mezi mikrofony. U těchto technik je většinou zachována rovnost mezi počtem mikrofonů a počtem kanálů daného prostorového systému (v případě Dolby Atmos se jedná

o počet „audio bedů“). Takové systémy se nazývají „Native-D“. Většina výzkumů, které se zabývají technikami rozloženého snímání pro 3D zvuk, klade důraz na prostorové oddělení horních a zadních mikrofonů tak, aby se korelace jejich signálů blížila nule. Zároveň poukazují na problematiku přítomnosti přímé zvukové vlny v těchto kanálech. V závislosti na povaze a parametrech může přítomnost přímé vlny způsobit potíže při mixu, které se projeví nestabilitou zvukového obrazu před posluchačem. Ohledně této problematiky existuje několik různých doporučení. Jedním z nich je využití akustického tlakového ekvalizéru, často ve formě pasivního nástavce na mikrofonní kapsli, kde díky povrchové difrakci dochází k frekvenční filtraci zvuku dopadajícího na membránu a zároveň k drobné změně směrové charakteristiky celého mikrofonu. Jiná doporučení uvádí použití směrových mikrofonů směřujících v případě horních mikrofonů akustickou osou směrem ke stropu nebo nejméně citlivým bodem směrové charakteristiky směrem k hudebnímu tělesu. [12]

Vzhledem k tomu, že techniky rozloženého snímání poskytují největší vjem prostorovosti, k natáčení prostorového zvuku bývají používány nejčastěji. V závislosti na akustice prostoru lze použít také techniky blízké koincidence, které budou zmíněny níže.

Mezi techniky patřící do této skupiny spadá rozšířený Hamasakiho čtverec (3D Hamasaki square), kde hlavní vrstvu tvoří standardní Hamasakiho čtverec s osmičkovými mikrofony a tento stejný systém je následně zopakován v horní vrstvě. Horní vrstva ale může být také tvořena směrovými mikrofony s kardioidní či užší charakteristikou.[15]

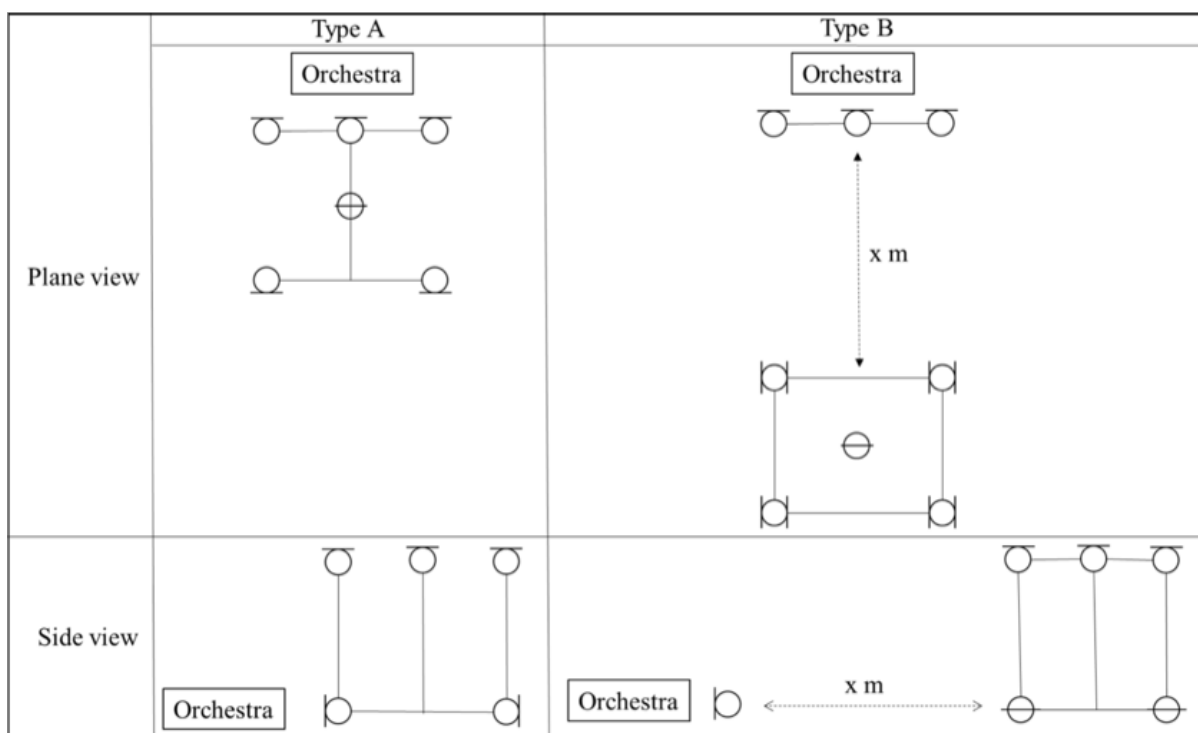
Dalším publikovaným systémem je Twins Cube, který je tvořen hlavní vrstvou čtyřech kardioidních mikrofonů směřujících akustickou osou směrem dolů a horní vrstvou osmi kardioidních mikrofonů, ze kterých čtyři směřují dolů a čtyři nahoru. Autorem systému byly k vytvoření horní vrstvy doporučovány mikrofony Sennheiser MKH800 Twin. [14]

Přímé spojení mezi mikrofony a reproduktory navrhuje ve svém systému Lindberg. 2L – Cube je systém tvořený všesměrovými tlakovými mikrofony. V hlavní vrstvě obsahuje čtyři (LR) nebo pět (LCR) mikrofonů tvořící čtverec, resp. Decca-tree obohacenou o zadní pár mikrofonů. Akustická osa předních mikrofonů směřuje dopředu, osa zadních mikrofonů dozadu. Horní vrstva je tvořena čtyřmi všesměrovými mikrofony, které jsou umístěny v rozích pomyslného čtverce tvořeného hlavní vrstvou. Směr akustických os je nastavený stejně jako v hlavní vrstvě. [14]

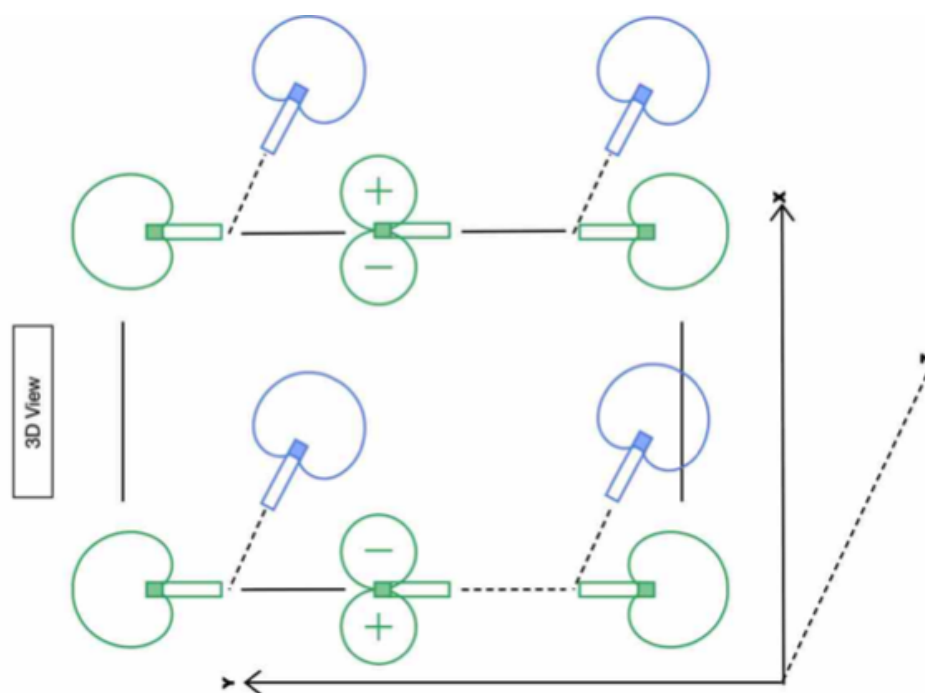
Jiný systém publikoval Kobayashi. Jedná se o systém, který je ve své hlavní vrstvě tvořen obdélníkem s šesti mikrofony, přičemž v rozích jsou kardioidní mikrofony a uprostřed delších stran osmičkové. Horní vrstva je tvořena čtyřmi kardioidními mikrofony směřujícími vzhůru.[15]

Hamasaki ve spolupráci s Baelenem vytvořili dva další návrhy systémů pro záznam akustické hudby do prostorových formátů. První systém, tzv. „typ A“, se skládá ze směrových a všesměrových mikrofonů, přičemž počet mikrofonů může být změněn v závislosti na zamýšleném prostorovém formátu. Druhý systém, tzv. „typ B“, je kombinací prostorového

systemu a tradičního hlavního systému (např. u natáčení orchestru). Je zaměřen na získání více různých možností výsledného mixu, kterých lze využít během postprodukce či v případě, že na setup techniky není příliš velké množství času a ideální systém prostorového zvuku nelze postavit a odzkoušet před natáčením. [11]



Obr.4: Hamasakiho prostorové mikrofonní systémy [11]



Obr.5: Prostorový mikrofonní systém navržený Kobayashi Ritchem [15]

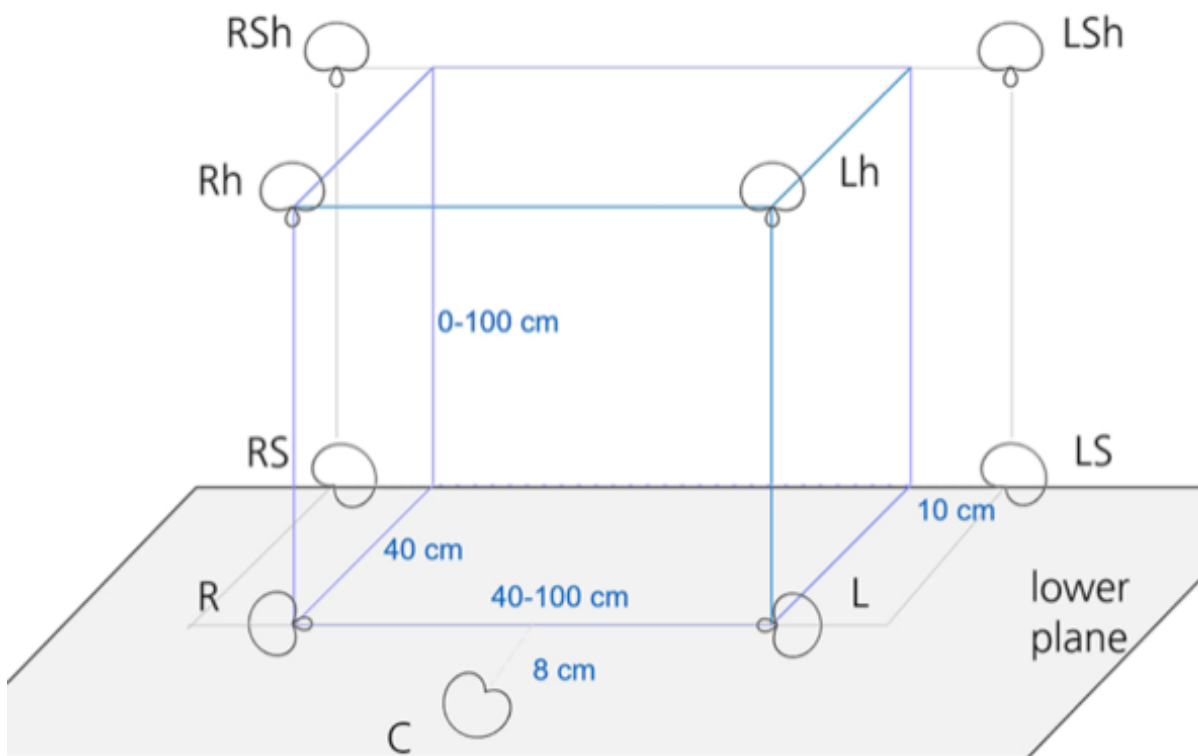
V případě mnohých systémů se jedná o modifikace a kombinace již existujících systémů využívaných k natáčení:

- Dozvuku pro surroundové 2D formáty:
 - Hamasaki Square,
 - IRT Cross,
 - Double ORTF,
- Kombinace přímého a odraženého zvuku pro surroundové 2D formáty:
 - Fukada Tree,
 - Hamasakiho systém,
 - OCT Surround,
 - Perception Control Microphone Array,
 - A jiné, popř kombinace systémů (OCT+Hamasaki Square, OCT+IRT).

Rozšířením systému o horní vrstvu vznikne systém schopný zaznamenat zvukový materiál vhodný pro mix 3D prostorového zvuku. Přičemž vrstva tvořená výše zmíněnými systémy se nazývá „hlavní“ (main layer) a přidaná vyšší vrstva se nazývá „horní“ (upper layer). Horní vrstva bývá z pravidla tvořena mikrofonním systémem, který je určen pro záznam dozvuku, či modifikacemi těchto systémů.

8.3.2. Techniky blízké koincidence

Techniky blízké koincidence používají menší vzdálenosti mezi jednotlivými mikrofony. Výsledný prostorový obraz je vytvořen díky časovým diferencím a také díky rozdílům akustického tlaku na jednotlivých mikrofonech v systému. Stejně jako v předchozím případě je doporučeno řešit přeslechy v jednotlivých mikrofonech, a to především mezi vertikálními vrstvami. Mikrofonní systémy spadající do této kategorie jsou například 3D Multiformat Microphone Array publikovaný Michaelem Wallisem. Tento systém je založen na použití různě směrových mikrofonů a za cíl si klade co nejpřesnější lokalizaci v horizontální i vertikální rovině, přičemž se zároveň snaží o minimalizaci přeslechů mezi jednotlivými vertikálními vrstvami. Ve výsledku by se tedy mělo jednat o systém umožňující dosažení velmi stabilního zvukového obrazu ve vertikální rovině. Dalším systémem je OCT-3D (Optimized Cardioid Triangle 3D) sestávající se z hlavní vrstvy kardioidních (C, zadní L, zadní R) a hyperkardioidních (L, R) mikrofonů. Horní vrstvu tvoří čtyři hyperkardioidy s akustickou osou směrem vzhůru. Relativně nově publikovaným systémem je 3D ORTF, který se skládá ze čtyřech dvojic ORTF v hlavní vrstvě a čtyřech mikrofonů pro horní kanály. [12,14,36]



Obr.6: Verze systému OCT-3D, kterou prodává výrobce Schoeps Mikrofone [29,36]

8.3.3. Koincidenční techniky

Koincidenční mikrofonní techniky pro záznam 3D zvuku jsou zaměřeny především na ambisonické prostorové formáty (scene-based audio). Zajímavou technikou pro záznam sólového akustického hudebního nástroje je Double-XY, který je tvořen jednou standardní dvojicí XY a jednou koincidenční dvojicí instalovanou vertikálně. Výsledkem je zvukový obraz stabilní jak ve vertikální, tak horizontální rovině. To může sloužit k vytvoření realistického až hyperrealistického obrazu hudebního nástroje. Tato technika neobsahuje žádné mikrofony zachycující zvukovou situaci v zadní části poslechové oblasti, proto není určena pro kompletní zachycení prostoru.

Jinou koincidenční technikou je Double MS+Z, která je, jak naznačuje název, tvořena dvěma systémy MS s přidaným vertikálně orientovaným mikrofonom s osmičkovou charakteristikou. [12]

8.4. Další vývoj

Byť je formát Dolby Atmos (a vedle něj i jiné prostorové formáty) známý z kin a filmu již od roku 2012, v hudebním umění se objevil relativně nedávno. Díky tomu, že jeho popularita stále roste, se dá očekávat, že poptávka po nahrávkách v tomto formátu bude častější. Výzkum stále probíhá téměř ve všech výše zmíněných oblastech a nové poznatky se objevují v podstatě téměř každý měsíc. Jedná se o velmi rychle se rozvíjející oblast zvukové praxe.

Výše zmíněné techniky snímání prostorového zvuku byly publikovány na odborných konferencích, ale to nemusí nutně znamenat, že jsou aplikovatelné na jakoukoliv situaci či jakýkoliv prostor. Tak jako u stereofonních technik, i zde platí, že mistr zvuku odpovědný za natáčení, se musí sám rozhodnout, která technika či modifikace techniky, bude v daném případě nejvíce vhodná pro akustiku prostoru a pro natáčené hudební dílo a s ohledem na dostupnou techniku.

V nejbližší době se očekává publikování dalších mikrofonních systémů, a to i například návrh pro řešení spotových mikrofonů ve 3D zvuku (ORTF-2plus2) nebo návrh systému mikrofonů, který bude přenositelný mezi žánry (2L Microphone Array).

Závěr

Cílem práce bylo získat a shrnout aktuální informace týkající se prostorového formátu Dolby Atmos a popsat jeho použití v hudebním umění. Jak již bylo výše zmíněno, prostorový zvuk je velmi rychle se vyvíjející oblast zvukové produkce. Rychlý rozvoj této oblasti je spojen s rozvojem virtuální reality a technickým pokrokem v oblasti reprodukce zvuku, především přes sluchátka. Momentálně se prostorový zvuk jako novinka rozšířil také do automobilového průmyslu.

V první kapitole práce pojednává o různých oblastech, ve kterých se uplatňuje koncept prostorového zvuku a krátce popisuje náležitosti a účel jeho použití v těchto odvětvích. Na to navazuje druhá kapitola definující jednotlivé typy prostorového zvuku podle doporučení ITU-R BS.2051-3.

Ve třetí kapitole jsou informace k principům lokalizace zvuku v lidském sluchovém orgánu. Tyto principy úzce souvisí s vývojem reproduktorových sestav pro poslech prostorového zvuku a také s vývojem formátů pro poslech na sluchátkách. Na základě těchto principů také vznikají náležitosti, kterými se musí řídit mistr zvuku při natáčení nebo mixu prostorových formátů. Čtvrtá kapitola pojednává o binaurálním formátu a binaurálním poslechu. V současnosti se odhaduje, že více než 90 % nahrávek ve formátu Dolby Atmos poslouchají koncoví posluchači na sluchátka. [40] Úprava a kontrola mixu pro binaurální formát je tedy nezbytný krok v hudební produkci Dolby Atmos.

Kapitola pátá shrnuje informace o prostorech určených k postprodukci formátu Dolby Atmos. Byť vznikají i nová studia s režii uzpůsobenými tomuto formátu, častěji dochází k rekonstrukci stávajících režii, které byly původně určeny pro mix stereofonních nahrávek. Cílem těchto rekonstrukcí většinou je získání prostoru vhodného pro postprodukci stereofonního i prostorového zvuku, což je z akustického hlediska problematické. V páté kapitole jsou kromě popisu nejčastějších konstrukcí studiových režii uvedena také doporučení pro rekonstruované prostory. Zároveň kapitola obsahuje technická doporučení pro režie ve formátu Dolby Atmos.

V šesté kapitole je definován pojem „object-based audio“. Na to navazuje sedmá kapitola, která detailně pojednává o základním nástroji postprodukce ve formátu Dolby Atmos, což je Dolby Atmos Renderer. Řeší technické požadavky na studiový počítač, či počítače a možnosti a funkce, které Dolby Atmos Renderer nabízí.

Poslední kapitola se zabývá mikrofonními technikami, které se užívají k záznamu prostorového zvuku. Do této doby bylo definováno mnoho různých systémů, přičemž jejich použití je závislé na technickém vybavení, akustické situaci v koncertním sále či jiném autentickém prostoru a estetickém záměru daného projektu.

V rámci této diplomové práce byla shrnuta teorie a principy lokalizace zvuku, typy reprodukce formátu Dolby Atmos, možnosti postprodukce v tomto formátu a mikrofonní techniky k jeho natáčení. Přičemž některé informace technické povahy jsou zobecněny, jelikož

Dolby Atmos je formát vlastněný firmou Dolby Laboratories a některé informace tím pádem nejsou dostupné nebo je zakázáno je zveřejňovat. Kapitola o mikrofonních technikách je vesměs zobecněna na techniky pro 3D zvuk, jelikož valná většina těchto technik je využitelná nejen pro natáčení do Dolby Atmos, ale zároveň také pro jiné, konkurenční formáty.

Seznam použitých zdrojů

- [1] BEGAULT, Durand R. Preferred Sound Intensity Increase for Sensation of Half Distance. *Perceptual and Motor Skills*. 1991, **72**(3), 1019-1029. ISSN 0031-5125. Dostupné z: doi:10.2466/pms.1991.72.3.1019
- [2] BEGAULT, Durand R, Elizabeth M WENZEL a Mark R ANDERSON. Direct Comparison of the Impact of Head Tracking, Reverberation, and Individualized Head-Related Transfer Functions on the Spatial Perception of a Virtual Speech Source. *Journal of the Audio Engineering Society*. 2001, **49**(10), 904-916. ISSN 1549-4950.
- [3] BÉKÉSY, Georg von. *Experiments in Hearing*. New York: Acoustical Society of America, 1989. ISBN 978-0883186305.
- [4] *Dolby Atmos Music Room*. 1. San Francisco, CA, USA: Dolby Laboratories, 2021.
- [5] *Dolby Atmos Home Entertainment Studio*. 1. San Francisco, CA, USA: Dolby Laboratories, 2021.
- [6] *Dolby: Sound, Visual, & Display Technology: Dolby Learning* [online]. Dolby Laboratories, 2023 [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://learning.dolby.com/>
- [7] ELLIS-GEIGER, Robert Jay. Music Production for Dolby Atmos and Auro 3D. *Proceedings of the 141st AES Convention*. Los Angeles, USA, 2013.
- [8] GARDNER, Mark B. Distance Estimation of 0° or Apparent 0°-Oriented Speech Signals in Anechoic Space. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1969, **45**(1), 47-53. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1911372
- [9] GARDNER, Mark B. a Robert S. GARDNER. Problem of localization in the median plane: Effect of pinnae cavity occlusion. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1973, **53**(2), 400-408. ISSN 0001-4966. Dostupné z:10.1121/1.1913336
- [10] HAIGH, Caroline, John DUNKERLEY a Mark ROGERS. *Classical Recording*. 1. Oxon, UK: Taylor & Francis, 2021. ISBN 978-0-367-31280-0.
- [11] HAMASAKI, Kimio a Wilfried VAN BAELEN. Natural Sound Recording of an Orchestra with Three-dimensional Sound. *Proceedings of the 138th AES Convention*. Varšava, PL, 2015.
- [12] HOWIE, Will, Denis MARTIN, David H BENSON, Jack KELLY a Richard KING. Subjective and objective evaluation of 9ch three-dimensional acoustic music recording techniques. *Proceedings of the International Conference on Spatial Reproduction: esthetics and Science*. Tokio, Japan, 2018.
- [13] *Recommendation ITU-R BS.2051-3: Advanced sound system for programme production*. Geneva: International Telecommunication Union, 2022.
- [14] KIM, Sungyoung a Paul GELUSO, ROGINSKA, Agnieszka, ed. *Immersive Sound: Height Channels*. 14. Oxon, UK: Taylor & Francis, 2018. ISBN 978-1-138-90000-4.

- [15] KOBAYASHI RITCH, Aron. Design and Application of a Native-D Recording Format for Optimal Dolby Atmos Reproduction. *Proceedings of the 149th AES Convention*. Online, 2020.
- [16] KURC, David. *Snímání a zpracování akustických signálů technologií B Format* [online]. Brno, 2009 [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/11700>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Jiří Schimmel.
- [17] LINDAU, Alexander a Fabian BRINKMANN. Perceptual Evaluation of Headphone Compensation in Binaural Synthesis Based on Non-Individual Recordings. *Journal of the Audio Engineering Society*. 2012, **60**(1), 54-62. ISSN 1549-4950.
- [18] LORHO, Gaëtan. Evaluation of Spatial Enhancement Systems for Stereo Headphone Reproduction by Preference and Attribute Rating. In: *Proceedings of the 118th Audio Engineering Society Convention*. Barcelona, 2005.
- [19] MANOR, Ella, William MARTENS, Atsushi MARUI a Densil CABRERA. Nearfield Crosstalk Increases Listener Preferences for Headphone-Reproduced Stereophonic Imagery. *Journal of the Audio Engineering Society*. 2015, **63**(5), 324-335. ISSN 1549-4950.
- [20] MIDDLEBROOKS, John C. a David M. GREEN. Sound localization by human listener. In: *Annual Review of Psychology*. 42(1). 1991, s. 135-159. ISSN 0066-4308.
- [21] MURRAY, John A. A Perspective On The Evolution Of Sound-System Equalization And Its Possible Impact On New Recommended Practices For B-Chain Calibration. *SMPTE 2013 Annual Technical Conference & Exhibition*. IEEE, 2013.
- [22] NEWELL, Philip. *Recording Studio Design*. 3. New York: Philip Newell, 2017. ISBN 978-1-138-93607-2.
- [23] NEWELL, Philip, Tim GOODYER a David BELL. *Recording Studio Design: The Live-End, Dead-End Approach*. 3. New York, USA: Philip Newell, 2017. ISBN 978-1-138-93607-2.
- [24] NEWELL, Philip, Keith HOLLAND a Tom HIDLEY. Control room reverberation is unwanted noise. *Reproduced Sound 10*. Windermere, UK, 1994.
- [25] OLDFIELD, PARKER, Simon R. a Simon P. A. Acuity of Sound Localisation: A Topography of Auditory Space. I. Normal Hearing Conditions. *Perception*. 1984, **13**(5), 581-600. ISSN 0301-0066. Dostupné z: doi:10.1068/p130581
- [26] OLDFIELD, Simon R a Simon P A PARKER. Acuity of Sound Localisation: A Topography of Auditory Space. II. Pinna Cues Absent. *Perception*. 1984, **13**(5), 601-617. ISSN 0301-0066. Dostupné z: doi:10.1068/p130601

- [27] PLENGE, G. On the differences between localization and lateralization. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1974, **56**(3), 944-951. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1903353
- [28] ROGINSKA, Agnieszka a Paul GELUSO. *Immersive Sound: Binaural Audio Through Headphones*. 1. Oxon: Taylor & Francis, 2018. ISBN 978-1-138-90000-4.
- [29] *Schoeps Mikrofone: OCT-3D* [online]. SCHOEPS, 2023 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://schoeps.de/en/products/surround-3d/oct-3d-set/oct-3d.html>
- [30] SHINN-CUNNINGHAM, Barbara. Learning Reverberation: Considerations for Spatial Auditory Displays. In: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display*. Atlanta, Georgia, USA, 2000, s. 126-134.
- [31] SINCLAIR, Jean-Luc. *Principles of Game Audio and Sound Design: Sound Design and Audio Implementation for Interactive and Immersive Media*. Oxon: Taylor & Francis, 2020. ISBN 978-1-138-73897-3.
- [32] STEVENS, S. S. a Miguelina GUIRAO. Loudness, Reciprocity, and Partition Scales. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1962, **34**(9B), 1466-1471. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1918370
- [33] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3. doplněné vydání. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2013. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [34] TSINGOS, Nicolas, ROGINSKA, Agnieszka a Paul GELUSO, ed. *Immersive Sound: Object-based Audio*. 1. Oxon, UK: Taylor & Francis, 2018. ISBN 978-1-138-90000-4.
- [35] WENZEL, Elizabeth M., Durand R. BEGAULT a Martine GODFROY-COOPER, GELUSO, Paul a Agnieszka ROGINSKA, ed. *Immersive Sound: Perception of Spatial Sound*. Oxon: Taylor & Francis, 2018. ISBN 978-1-138-90000-4.
- [36] WITTEK, Helmut. Stereophonic multichannel recording techniques for 3D-Audio and VR. *Presentation at the 144th AES Convention*. Milan, IT, 2018.
- [37] ZAHORIK, Pavel. Assessing auditory distance perception using virtual acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2002, **111**(4), 1832-1846. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1458027
- [38] ZAHORIK, Pavel, Douglas S BRUNGART a Adelbert W BRONKHORST. Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research. *ACTA Acustica united with Acustica*. 2005, **91**(3), 409-420. ISSN 1861-9959. Dostupné také z: <https://pubs.aip.org/asa/jasa/article/111/4/1819-1831/547182>
- [39] *Uživatelská zkušenost se standalone aplikací Dolby Atmos Renderer*. V5. 2023.
- [40] *5th Immersive Audio Academy*. [osobní účast]. online. 2023