

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. Martin Martin



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

HARDWARE PRO AURALIZACI IMPULSOVÝCH ODEZEV PROSTORU

HARDWARE FOR AURISATION OF ROOM IMPULSE RESPONSES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Martin

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2019



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Martin Martin

ID: 165029

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Hardware pro auralizaci impulsových odezev prostoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte algoritmus pro simulaci poslechového prostoru pomocí změřené impulsové odezvy v reálném čase s kompenzací lineárního zkreslení reprodukčního řetězce. Navrhněte a realizujte hardware, na kterém tento algoritmus implementujte a otestujte. Navrhněte a implementujte také metodu měření impulsové charakteristiky reprodukčního řetězce pro kompenzaci jeho lineárního zkreslení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SMÉKAL, Z., SYSEL, P. Signálové procesory. Sdělovací technika, Praha, 2006. ISBN: 80-86645-08-8

[2] MITRA, S.K., KAISER, J.F.: Handbook for Digital Signal Processing. John Wiley & Sons, New York 1993. ISBN 0-471-61995

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá akustikou místností pro zvukové post-produkční činnosti a jejich simulací, za účelem redukce potřeby akustických úprav místností a specializovaného poslechového zařízení na hardwarovou jednotku a sluchátka - konkrétně vytvořením hardwarového produktu pro auralizaci impulsních odezev místností.

KLÍČOVÁ SLOVA

auralizace, hardware, impulsová odezva, režijní místnost

ABSTRACT

This work deals with acoustics of rooms for sound post-production activities and their simulations, in order to reduce the need for acoustic room treatment and specialized monitoring equipment to a hardware unit and headphones - specifically by creating hardware product for auralization of rooms impulse responses.

KEYWORDS

auralization, hardware, impulse response, control room

MARTIN, Martin. *Hardware pro auralizaci impulsových odezev prostoru*. Brno, Rok, 84 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Hardware pro auralizaci impulsových odezev prostoru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D., za odborné vedení, konzultace a trpělivost. Také bych mu rád poděkoval za jeho výtečnou a obětavou práci pro obor Audio inženýrství.

Největší díky pak patří mé manželce Martě, bez které bych studovat nemohl a nic z mé práce by nemělo smysl.

Brno

.....

podpis autora



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



Obsah

Úvod	12
1 Teoretická část	15
1.1 Akustika uzavřených prostorů	15
1.1.1 Veličiny akustického pole	16
1.1.2 Zvukové pole	19
1.1.3 Metody teoretické akustiky	25
1.1.4 Objektivní akustické parametry	34
1.2 Auralizace	39
1.2.1 Princip zvukové lokalizace	40
1.2.2 Princip binaurálního poslechu	45
1.2.3 Kompenzace lineárního zkreslení	49
2 Návrh algoritmu	51
2.1 Programové řešení	51
2.1.1 Vývojový přípravek TMDSDSK6416	51
2.1.2 Test algoritmu na vývojovém kitu	52
2.1.3 Výsledky testu	53
2.2 Vlastní řešení	54
2.3 Měření impulsové charakteristiky	55
3 Realizace hardware	56
3.1 Návrh desky plošných spojů	56
3.1.1 Datová rozhraní	56
3.1.2 Procesory	57
3.1.3 Napájení	58
3.2 Výroba	58
3.3 Programování	59
4 Závěr	60
Literatura	61
Seznam symbolů, veličin a zkratk	68
Seznam příloh	71
A Přílohy k teoretické části	72
A.1 Tabulky veličin	72

B Přílohy k praktické části	75
B.1 GPIO pinout	75
B.2 Schéma zapojení	76
B.3 Rozvržení desky	80
C Fotodokumentace	82
D Obsah přiloženého CD	84

Seznam obrázků

1.1	Šíření zvuku kulovým vlněním v plynném prostředí.	17
1.2	Difrakce zvukového vlnění při šíření prostorem s překážkou.	20
1.3	Střet zvukové vlny s překážkou.	21
1.4	Závislost součinitelů zvukové pohltivosti na frekvenci pro vybrané materiály	22
1.5	Hladina akustického tlaku v závislosti na druhu zvukového pole a vzdálenosti od zdroje zvuku.	25
1.6	Vlastní módy řešené místnosti.	29
1.7	Hustota vlastních kmitů místnosti v třetinooktákových pásmech. . . .	30
1.8	Doporučené poměry rozměrů místností.	32
1.9	Frekvenční oblasti z hlediska hustoty vlastních kmitů místnosti. . . .	33
1.10	Rozložení akustického tlaku v horizontální rovině.	34
1.11	Vypočítaná doba dozvuku, v závislosti na frekvenci.	36
1.12	Vypočítaná doba dozvuku, v závislosti na frekvenci.	38
1.13	Rozdíl vzdálenosti uší od zdroje zvuku.	41
1.14	Jednoduché blokové schéma elektroakustického řetězce.	46
1.15	HRTF pro zdroj s azimutem -45° a elevací 0°	48
1.16	Znázornění virtuálních zdrojů za pomoci BRIR.	48
1.17	Modulová kmitočtová charakteristika Beyerdynamic DT 880pro. . . .	50
2.1	Modulová kmitočtová charakteristika kompenzované HRTF.	53
B.1	Schéma zapojení DAC.	76
B.2	Schéma zapojení DSP.	77
B.3	Schéma zapojení zdrojové části.	78
B.4	Schéma zapojení vstupu S/PDIF.	78
B.5	Schéma zapojení vstupu GPIO.	79
B.6	Schéma zapojení vstupu pro programovací zařízení.	79
B.7	Schéma rozvržení plošného spoje.	80
B.8	Vrchní strana tištěného spoje.	80
B.9	Spodní strana tištěného spoje.	81
C.1	Zařízení HATS.	82
C.2	Osvitové zařízení.	82
C.3	Vyleptaný plošný spoj.	83

Seznam tabulek

A.1	Vlnové délky slyšitelných frekvencí v závislosti na teplotě okolí	72
A.2	Hladiny akustických tlaků různých zdrojů zvuku	72
A.3	Součinitelé zvukové pohltivosti pro vybrané materiály	73
A.4	Závislost vzdálenosti blízkého pole od zdroje na kmitočtu	73
A.5	Rozměry hlavy a torza HATS	74
B.1	Pinout rozhraní GPIO	75

Seznam výpisů

Úvod

Je prokázáno, že akustické vlastnosti místnosti tvoří podstatnou část elektroakustického řetězce. Fyzický prostor, kterým reprodukováná zvuková informace prochází, může i zcela zásadním způsobem měnit její obsah. To vytváří řadu problémů při produkci, záznamu, postprodukcii i reprodukcii hudby.

Samotná produkce etablovaných hudebních forem od artificiální, či lidové hudby, přes populární okruhy až po ty experimentální, je s prostory v kterých je provozována pevně spjata (ať už vědomě, či ne). A to natolik, že lze směle tvrdit, že vývoj architektury jde ruku v ruce s vývojem hudebních forem [7].

Až do minulého století nebývalý rozmach finančně dostupných technologií určených k produkci, zpracování a reprodukcii zvuku přispívá k šíření hudební tvorby ke stále většímu množství posluchačů, také ale neustále posouvá normy hudební estetiky. Je známo, že sami skladatelé vždy rádi komponovali v prostorech, ve kterých se měla jejich hudba následně produkovat. To ostatně bývalo i nezbytné – doma si na kostelní varhany zahrát nelze. Nároky na nástroje, hráče a tím pádem i na prostory k produkci určené, tak představovali relativně pevně daná akustická východiska vzniku hudebního díla. Akustika *Festivalového divadla* v Bayreuthu je součástí Wagnerova *Der Ring des Nibelungen* z roku 1881 – hudebního dramatu pro rozsáhlý orchestr, stejně tak, jako je akustika obývacího pokoje součástí Zoe Dewittové *The Secret Eye of L.A.Y.L.A.H.* z roku 1984 – rituálního ambientu hraného na nástroje vyrobené z lidských ostatků.

Tyto dva příklady představují dva extrémy akustiky poslechového prostoru. Na jedné straně je hlediště díky speciální konstrukci orchestřiště vzdáleno od posluchače. Zvuk orchestru k němu přichází smíchaný a nelze rozpoznat pozice jednotlivých nástrojů, či nástrojových sekcí. Na straně druhé je tu dílo, kde jsou nástroje nahrávány kontaktně, tedy s mikrofonom v bezprostřední blízkosti. Umělý dozvuk je aplikován velmi volně, je součástí kompozice, dojem nějaké konkrétní pozice hráče vůči posluchači vytvářet ani nemá a s prováděním díla se ani nepočítá (kvůli problémům s přepravou nástrojů jsou provedení improvizovaná, počítá se s jinými nástroji a hudebními hosty).

Obvykle však vztahy mezi pozicemi posluchače, zvukového zdroje (zdrojů) a okraji místnosti vytváří vjemové podněty, které zprostředkovávají dojem určitého prostoru. Protože naprostou většinu aspektů hudby posuzuje člověk subjektivně jako „dobrou“ pouze na základě předešlých zkušeností – tedy ze zvyku[49], existuje snaha zaznamenat hudební produkci „věrně“ – tedy včetně vlivu akustiky prostoru pro konkrétní hudební okruh typickou.

Taková je alespoň hojně proklamovaná idea; zprvu nebyl takovýto dokonalý záznam možný kvůli nedokonalostem záznamového zařízení, a nyní už dokonce není v mnoha případech ani žádaný(!). I v případě umělé hudby s více, než stoletou tradicí se zvukový záznam, pořizovaný v pozici dirigenta, prakticky vždy doplňuje záznamy jednotlivých sekcí orchestru a zaznamenaný charakter sálu se někdy dokonce nahrazuje ozvěnou umělou [30]. Preferuje se záznam jednotlivých zdrojů zvuku, bez vlivu akustiky prostoru a pokud možno bez tzv. přeslechů, tedy bez zvuku sousedících nástrojů.

Navzdory populárnímu tvrzení tak záznam a postprodukce zvukového díla takřka vždy představuje kreativní proces, a to konkrétně syntézu (což bylo uznáno i soudně, na základě čehož vznikla Ochranná asociace zvukařů z pověření Ministerstva kultury ČR). Situace je dokonce taková, že většina zvukových techniků věnujících se převážně jazzovému okruhu preferuje umělý dozvuk a akustiku prostoru pouze simulují za pomoci digitálních zařízení. To, spolu se zažitou praxí častého střihu záznamu a dohrávek může přispívat k neautentičnosti hudebního projevu. Po poslechu takto vytvořených nahrávek se nutně mění i hudební preference posluchače/technika, což bylo prokázáno poslechovými testy [31].

Některé oblasti populární hudby, jako např. hudba metalového okruhu, už dokonce nevyžadují ani umělou náhradu akustiky místnosti. Povaha zvukového signálu v typické metalové nahrávce totiž projev akustiky reálné místnosti, ať už z důvodů technických, či estetických, často ani neumožňuje. Techniky kompozice hojně využívající relativně složitých rytmů a extrémně vysokých temp spolu s technikou hry a barvou nástrojů založenou na značném zkreslení signálu za pomoci elektronických prvků elektroakustického řetězce zcela „vypĺňují“ časovou i frekvenční rovinu zvukového signálu [40]. To spolu se snahou o co největší hlasitost a z toho plynoucím skoro nejmenším možným dynamickým rozsahem nahrávek (pohybujícím se běžně v jednotkách decibel) typicky zapřičiňuje buď absenci informace o prostoru, nebo vznik prostoru nereálného. Ten je potom, protože jsme neměli možnost nikde ho slyšet, vnímán spíše jako zvukový efekt – mluvíme pak o zvuku nahrávky tzv. „In Your Face“. Tento způsob hudební (post)produkce je však součástí estetiky toho kterého žánru a je obecně vnímán jako pozitivní.

Problémy spjaté s prostorovou akustikou se však neomezují jen na samotný záznam hudebního projevu. Jak již bylo řečeno, post-produkční činnost nabývá čím dál většího významu a z hlediska estetiky výsledné nahrávky často hraje hlavní roli. Protože však není ušetřena vlivu fyzikálních zákonů, je tento tvůrčí proces zatížen vlivem akustiky prostoru, v kterém se provádí. Jinými slovy: místnost, ve které zvuk mícháme, může mít pro dílo i srovnatelný význam jako má místnost, kde zvuk nahráváme.

Vliv takovéto *režijní místnosti* je v praxi malých, či takzvaně rozpočtových, nebo také *projektových studií* často zanedbáván, což v některých případech záměrně, často však nezáměrně ovlivňuje estetiku nahrávky. Neznalost objektivních vlastností akustiky místnosti je potom suplována vírou v řadu „magických příčin“, která sice může mít pozitivní vliv na samotný kreativní proces, je však často zneužívána v marketingových strategiích obchodníků se zvukovou technikou (ukázkový příklad zde: [40]). Takováto fetišizace výrobních prostředků vede k normalizaci kreativních postupů, což může být v rozporu se záměrem umělce.

Dle mého osobního názoru zde lze pozorovat paralelu s častokrát zmiňovanou *ztrátou aury uměleckého díla* (viz doc. Horáková [25]). Neznalost problematiky fyzikálních aspektů spolu s absencí objektivních kritérií, kvůli kterým by šla umělecká tvorba kvantifikovat, vytváří prostor pro polemiku, v které často vítězí ten participant, který je prostě aktivnější, či sám oplývá jakousi aurou – typicky aurou autority. Samotné dílo je transformováno do virtuálního prostředí jedniček a nul a jeho faktický obsah je doslova závislý na každé jeho jedné konkrétní interpretaci, ať už z filozofického, či fyzikálního pohledu.

Jako relativně známý případ tohoto jevu může posloužit fenomén gramofonových desek. Poslechové testy zcela jasně vypovídají o tom, že posluchač především chce, aby byla konkrétnímu artefaktu (v tomto případě gramofonové desce) přisuzována kvalita. Samotnému zvuku hudby však svědčí především takové médium, které oplývá lepšími objektivními parametry a tak dokáže záměr umělce, či umělkyně lépe zprostředkovat [58].

Tato práce se zabývá akustikou místností pro zvukové post-produkční činnosti a jejich simulací, za účelem redukce potřeby akustických úprav místností a specializovaného poslechového zařízení na hardwarovou jednotku a sluchátka - konkrétně vytvořením hardwarového produktu pro auralizaci impulsních odezev místností.

Tato práce vychází z mé bakalářské práce *Akustika malých prostor* [36], kde jsou některé zde užívané odborné výrazy definovány, práci však využívá jen z malé části a doplňuje množstvím dalších poznatků. Důvodem většího rozsahu této práce (neboli většího, než stanoveného počtu stran) je potřeba dát do souvislosti rozhodnutí, která vedla ke konkrétnímu řešení hardwarového přípravku.

Ve své umělecké i technické praxi se již řadu let zabývám nekomerční a experimentální hudební produkcí, která je z principu řešena především způsobem *Do it yourself – udělej si sám* (DIY). Považuji za nutné pojmout tuto práci (a řešení přípravku) také tímto způsobem, aby mohla mohla mít faktický přínos pro hudební komunitu.

1 Teoretická část

1.1 Akustika uzavřených prostorů

Uzavřený prostor je definován jako prostor obklopený hraničními plochami vykazujícími akustické vlastnosti, přičemž akustickými vlastnostmi hraničních ploch se rozumí jejich schopnost zvuk odrážet, pohlcovat, koncentrovat a rozptylovat.

Akustikou uzavřeného prostoru se pak rozumí soubor akustických vlastností prostoru vyjádřených hodnotami veličin prostorové akustiky určujících kvalitu poslechu hudby nebo řeči v daném uzavřeném prostoru [11]. Norma [12] uvádí řadu technických požadavků, které je nutno dodržet, aby reprodukováný záznam zvuku byl akustickými vlastnostmi prostoru ovlivněn co nejméně, a my jsme tak byli vůbec schopni pořizovaný záznam objektivně posuzovat a případně dojít k rozhodnutí jakým způsobem ho vhodně upravit. Od těchto požadavků jsou odvozeny potřebné akustické vlastnosti uvedených prostorů z hlediska zvukové izolace i z hlediska šíření zvukových vln v místnosti.

Vzhledem k tomu, že prostory režijních místností a také místností občanské výstavby běžně k dispozici jsou definovány jako „malé“ (tím se rozumí místnosti s objemem menším, než 200 m^3), vztahuje se na ně řada jevů, díky kterým je zajištění těchto požadavků jen velmi obtížné. Příliš malý objem místnosti znemožňuje dodržení optimální doby dozvuku místnosti i požadavky na rozložení zvukové energie.

Dlouhodobým výzkumem vztahů mezi hudbou, prostorem a sluchovým vjemem posluchače vznikla celá řada subjektivních a posléze i objektivních kritérií akustiky prostorů. Obecně sice nelze tvrdit, že objektivní kvalita akustického prostoru je dominantním parametrem pro subjektivní (a člověk je schopen pouze subjektivních) hodnocení uměleckého díla, lze však vysledovat její vliv na různé poslechové vjemy [61], které tvorbu v té které místnosti ovlivňují.

Akustické parametry místnosti jsou popisem odezvy místnosti na buzení veličinami akustického pole. Stejně jako u ostatních článků elektroakustického řetězce se jedná o systém, který budíme hudebním signálem, který je pak tímto systémem filtrován. V závislosti na nastavení tohoto systému a osobních preferencích pak může být takový signál informačně obohacen, či ochuzen. U režijní místnosti („control room“) z podstaty usilujeme o odezvu lineární, tedy takovou, která signál buď neovlivní vůbec, nebo takovým způsobem, který nám představu o zpracovávaném signálu nezkrasí. Lze říci, že režijní místnost má mít takové vlastnosti, aby umožňovala tvorbu pro konkrétní cílový poslechový řetězec (nahrávka může mít různé verze mixu pro rádio, domácí poslech, sluchátka atd.).

Pro účely názorného zobrazení této problematiky budu v této části mé práce

uvádět parametry reálné místnosti, která slouží jako má osobní pracovna, a které budou porovnávány v parametry definovanými v normách užívaných pro návrh a realizaci režijních místností. Půjde tak získat představu jak o reálných možnostech, tak požadavcích na vlastnosti místnosti.

Zmíněná místnost má následující parametry:

- rozměry (od největšího): délka 5 m, šířka 4,15 m, světlá výška 2,6 m
- objem: 54 m^3 , celkový povrch: 89 m^2 , délka všech hran místnosti: 47 m
- předpokládaná teplota v místnosti je $22 \text{ }^\circ\text{C}$ a nachází se v ní jeden sedící člověk na polstrované židli
- podlahová krytina je tvořena dřevěnými parketami na asfaltovém loži, podhled je tvořen sádkokartonovými deskami na roštu se vzduchovou mezerou od původní povrchové úpravy 60 mm a povrchová úprava stěn je realizována vápenocementovou omítkou se štukovou úpravou a běžným interiérovým nátěrem
- tyto údaje jsou základem pro výběr odpovídajících akustických parametrů a pro výpočty

1.1.1 Veličiny akustického pole

Říká se, že zvuk existuje, když rozruch šířený skrze pružné prostředí způsobuje změnu v tlaku, nebo vychýlení částic materiálu, které může být zaznamenáno osobou, či přístrojem [4]. Zvuk je tedy přenos energie pomocí kmitajících částic, který jsme schopni slyšet.

Rychlost zvuku

Rychlost šíření tohoto rozruchu, neboli *rychlost šíření zvuku* c_0 je závislá na teplotě [37]:

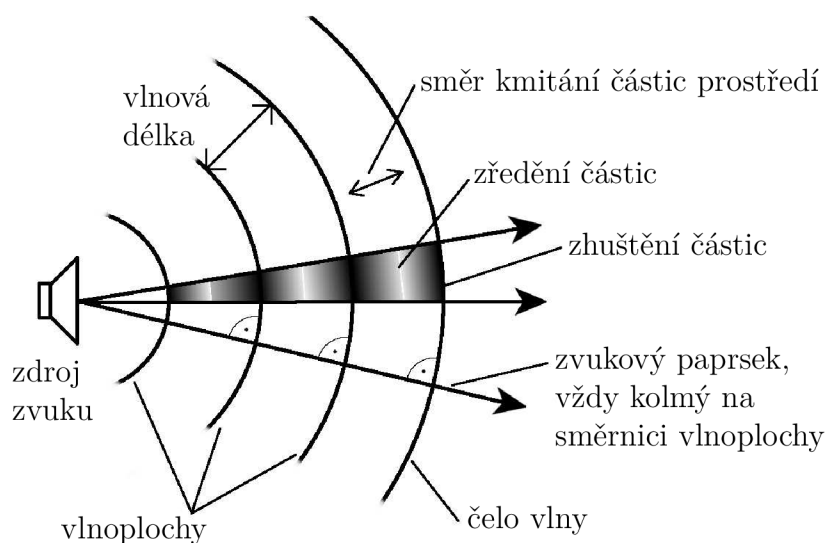
$$c_0 = \sqrt{\left(\frac{\chi p_{00}}{\rho_0}\right) (1 + \gamma C)} \approx 331,4 + 0,607C \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}], \quad (1.1)$$

kde χ je Poissonova konstanta (poměr měrné kapacity plynu při stálém tlaku a objemu; cca 1,4 pro suchý vzduch), p_{00} je atmosférický (barometrický) tlak při teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (101325 Pa), ρ_0 je hustota vzduchu při teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1,29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), γ je součinitel objemové roztažnosti plynů ($\gamma = 1/273,15 \text{ [K}^{-1}]$) a C je teplota okolí [$^\circ\text{C}$].

Běžně uváděná hodnota rychlosti zvuku pro teplotu vzduchu $22 \text{ }^\circ\text{C}$ je $344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při teplotách $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ se rovná $325 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $355 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

V důsledku pružnosti prostředí se při kmitání částic prostředí vytvářejí místa s relativním zhuštěním, či zředěním těchto částic. Takové místo se nazývá *zvuková vlna*. Geometrické místo bodů, do kterých dospělo vlnění ze zdroje za stejnou dobu

se pak nazývá *vlnoplocha* a všechny částice zde kmitají se stejnou fází, což znázorňuje obrázek 1.1. Pokud není výslovně uvedeno jinak, jsou ilustrace v této práci vytvořeny za pomoci softwaru Inkscape.



Obr. 1.1: Šíření zvuku kulovým vlněním v plynném prostředí.

Vzdálenost jednotlivých vlnoploch se nazývá *vlnová délka* [50]:

$$\lambda = c_0 T = \frac{c_0}{f} = 2\pi \frac{c_0}{\omega}, \quad (1.2)$$

kde c_0 je rychlost zvuku ve vzduchu [$m \cdot s^{-1}$], T je perioda zvukového vlnění, f je frekvence [Hz] vlnění, přičemž $f = 1/T$ a ω je úhlová rychlost [$rad \cdot s^{-1}$].

Pro výpočty při řešení rovnic šíření zvuku v různých aplikacích se také používá tzv. vlnové číslo [m^{-1}] [50]:

$$k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (1.3)$$

Kolikrát za sekundu posíláme do systému signál, tedy jak rychle se hýbe například struna, či membrána reproduktoru je vyjádřeno kmitočtem (frekvencí) vlnění (jednomu kmitu za sekundu odpovídá jeden Hertz [Hz]). Rychlost zvuku vyjadřuje, jak rychle se k nám tento signál dostane.

Rozsah kmitočtů, které je člověk schopen vnímat, je přibližně 20 Hz až 20 kHz a těmito frekvencím odpovídají vlnové délky přibližně od 17 m do 17 mm, viz tabulka A.1. Tento rozsah je různý a mění se s věkem a zdravotním stavem jedince.

Akustický tlak

Akustickým tlakem rozumíme rozdíl mezi okamžitou velikostí celkového tlaku v daném bodě zvukového pole za přítomnosti zvuku a statickou hodnotou atmosférického tlaku p_{00} . Je to superponovaná střídavá složka tlaku a za přítomnosti zvuku se tedy v každém bodě zvukového pole hodnota celkového tlaku bude měnit v čase [50]:

$$p(t) = \frac{F(t)}{S} \quad (1.4)$$

Je to skalární veličina, definovaná jako síla působící na jednotku plochy a v přírodě běžně nepřesahující hodnotu amplitudy 100 Pa. Pro srovnání například práh slyšení pro okolní kmitočtu 1 kHz je 0,00002 Pa. Hodnotě přibližně 200 Pa pak odpovídá tryskový motor z 10 m, přičemž dochází k okamžitému a nevratnému poškození sluchu.

Hladina akustického tlaku

Zjednodušeně lze říci, že lidské ucho vnímá řadou aritmetickou akustické veličiny, které se mění řadou geometrickou. To znamená, že násobky akustických veličin jsou vnímány jako přírůstky. Pro vyjádření akustických veličin proto používáme jejich logaritmické hladiny.

Obecným vztahem pro hladinu energetické veličiny je vztah [50]:

$$L = 10 \log \frac{x}{x_0} \quad [\text{dB}] , \quad (1.5)$$

kde x_0 je vztažná hodnota veličiny x . Velikost dané veličiny z její známé hladiny v dB lze získat takto [50]:

$$x = x_0 10^{\frac{L}{10}} . \quad (1.6)$$

Hladina akustického tlaku L (Sound Preassure Level, SPL) se odvozuje z efektivní hodnoty (Root Mean Square) akustického tlaku p_{RMS} , kterou získáme z jeho časového průběhu pomocí vztahu [50]:

$$p_{\text{RMS}} = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \quad [\text{Pa}] . \quad (1.7)$$

V této práci je hodnotou akustického tlaku vždy myšlena jeho efektivní hodnota.

Po dosazení efektivních hodnot a ekvivalentních úpravách rovnice dostaneme vztah [50]:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}] , \quad (1.8)$$

kde p_0 je vztažná hodnota pro 0 dB L_p ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa), která odpovídá, jak již bylo jednou uvedeno, prahu slyšení v okolí jednoho kmitočtu. Jednotka hladiny akustického tlaku se často zapisuje ve tvarech jako dB(SPL), dB_(SPL), či dB_{SPL}, pro lepší orientaci v textu, avšak takové značení neodpovídá mezinárodnímu systému jednotek SI. Akustickému tlaku 1 Pa odpovídá hladina 94 dB_{SPL}.

Subjektivní vjem hlasitosti je závislý nejen na frekvenci zvuku, ale také na hladině akustického tlaku, při které je zvuk produkován. To znamená, že dva zvuky o rozdílném kmitočtu můžeme subjektivně vnímat jako stejně hlasité při vysoké hladině akustického tlaku, a jako rozdílně hlasité, při nízké hladině a to přesto, že byly do prostoru vyzářeny se stejnou energií (tedy o stejném výkonu).

Lze říci, že hlasitější projev je vnímán jako bohatší, což je často důvodem preference hlasitější reprodukce (oproti tišší) při krátkodobém poslechu. Při dlouhodobém vystavení vysokým hladinám však dochází k únavě sluchového orgánu, která znemožňuje objektivní hodnocení a od určitých hladin dochází i trvalému poškození fyziologického ústrojí. Pro srovnání je k dispozici tabulka A.2.

1.1.2 Zvukové pole

Prostor, kterým se šíří zvuk, se nazývá zvukovým polem. V plynném prostředí nejsou smyková napětí a částice tedy kmitají kolem své rovnovážné polohy pouze ve směru šíření zvuku. Ve většině případů ho můžeme považovat za *homogenní* a *isotropní*, což znamená, že v každém bodě prostoru bude mít stejnou hustotu a rozruch se v něm bude šířit všemi směry stejnou rychlostí.

To ovšem platí jen za určitých podmínek, které v uzavřený prostor nespĺňuje.

Šíření zvuku

Druhy vlnění rozlišujeme podle změny obsahu povrchu vlnoploch vůči vzdálenosti od zdroje zvuku na kulové a rovinné (případně se ještě používají válcové, například pro posuzování hluku provozu na dálnicích apod.), a to dle $r \gg \lambda$. Kulová zvuková vlna s velkým poloměrem se chová stejně jako rovinná zvuková vlna, kde se intenzita zvuku se vzdáleností od zdroje již prakticky nemění. v malém uzavřeném prostoru se setkáme prakticky pouze s vlněním kulovým.

Amplituda akustického tlaku je pro kulové vlnění nepřímo úměrná vzdálenosti. Partikulární řešení vlnové rovnice pro postupující vlnu směrem od zdroje zvuku pro akustický tlak ve vzdálenosti r [50]:

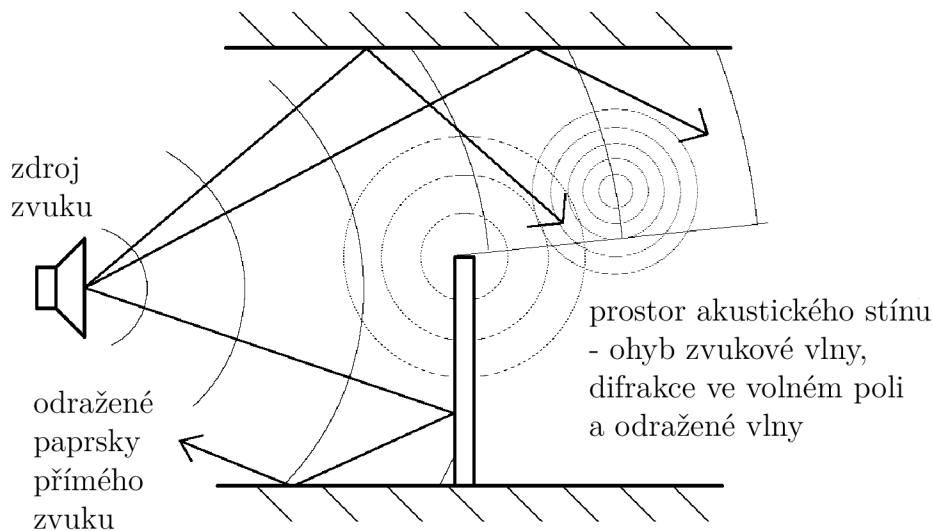
$$p = \frac{p_1}{r} e^{j\omega\left(t - \frac{r}{c_0}\right)}, \quad (1.9)$$

jedná se o skalární veličinu, kde p_1 je amplituda efektivní hodnoty akustického tlaku v jednotkové vzdálenosti $r = 1$ m, ω je úhlový kmitočet harmonického vlnění, p je rychlost zvuku a t je vektor času. Při každém zdvojnásobení vzdálenosti se tak její úroveň zmenšuje o přibližně 6 dB, neboli intenzita zvuku u kulové vlny klesá se čtvercem vzdálenosti. Z uvedeného vztahu také vyplývá, že hodnota tlaku se v průběhu času mění v závislosti na kmitočtu.

Toto ovšem platí, pouze když uvažujeme jen jeden, všesměrový zdroj zvuku ve *volném poli* (viz dále). V praxi je samozřejmě šíření zvuku různými způsoby omezeno, což ilustruje obrázek 1.2.

Prozatím jsme uvažovali o šíření zvuku ve volném poli, tedy bez odrazu vlnění od překážky. Každá plocha však tvoří překážku, a ty se kterými se můžeme setkat v uzavřených prostorech, budou odpovídat rozměrům místnosti, případně také například lidské postavě, mixážnímu pultu, či monitoru.

Vlnění o vlnové délce větší, nežli jsou rozměry překážky, se kolem takovéto překážky ohne – „obteče ji“. Uplatní se zde *Huygensovův princip*, kdy se jednak každý bod vlnoplochy záření opět stává všesměrovým zdrojem, a v případě překážky se stává novým všesměrovým zdrojem i její hrana. Tento fenomén je totožný pro všechny druhy vlnění a je způsoben fázovou interferencí [19]. *Difrakce* zvuku je také frekvenčně závislá.



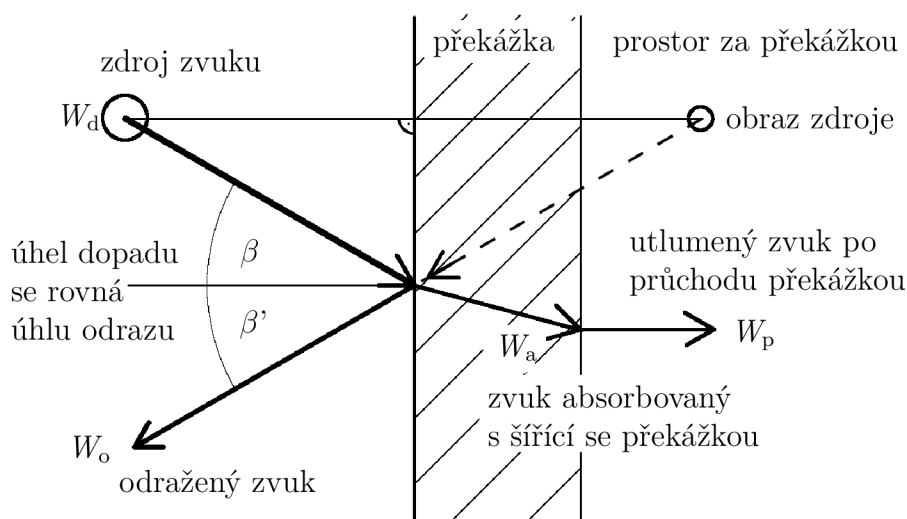
Obr. 1.2: Difrakce zvukového vlnění při šíření prostorem s překážkou.

Překážka v cestě zvukové vlny bude odrážet pouze vlnění o menších vlnových délkách, než jsou její rozměry, a vznikne za ní tzv. *akustický stín*, v jehož rozmezí bude zvuk v závislosti na frekvenci utlumen.

Tento princip se, spolu s odrazy od ramen a torza lidské postavy, uplatňuje také při lokalizaci zvukového zdroje v prostoru člověkem. Schopnost lokalizace je odpovídajícím způsobem frekvenčně závislá a nejpřesnější je pro frekvence, jejichž vlnová délka se blíží rozměrům hlavy (2–3 kHz).

Absorpce a difuze zvuku

Žádný povrch není absolutně odrazivý a při střetu zvukové vlny s překážkou vždy dojde k pohlcení části její energie, což znázorňuje obrázek 1.3. V relativně malé vzdálenosti od zdroje zvuku (v malých prostorech) sice bude vlnění kulové, nicméně pro účely simulací o něm v metodách *geometrické akustiky* uvažujeme jako o množství diskrétních paprsků.



Obr. 1.3: Střet zvukové vlny s překážkou.

Část energie (W_o) se tedy od překážky odrazí a část se pohltí (W_a) (přičemž na rozhraní materiálů dojde k *refrakci*). Pohlcená energie se dále z části přemění v překážce na energii tepelnou a z části může i překážkou prostoupit (W_p), jak je znázorněno na obrázku 1.3. Vlastnost materiálů pohlcovat zvukovou energii je frekvenčně závislá a popisuje se pomocí *součinitele zvukové pohltivosti* α , jehož hodnoty se běžně uvádí v třetino-oktávo-ových pásmech a je definován jako poměr absorbované energie k energii dopadající v rámci určité plochy povrchu daného materiálu [19]:

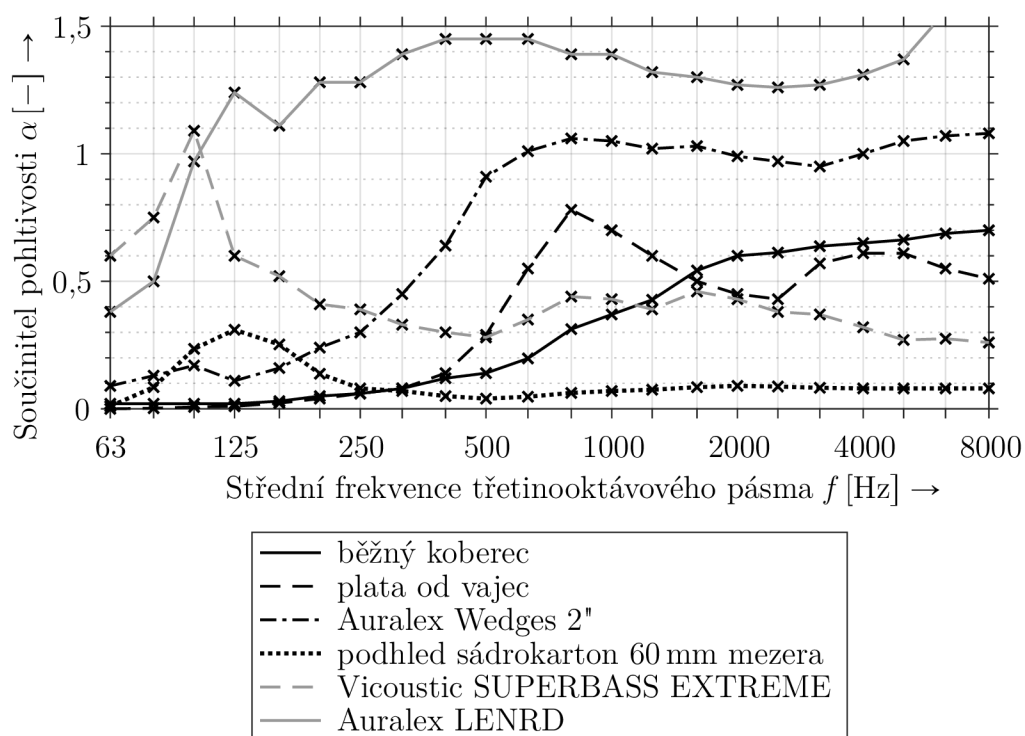
$$\alpha = \frac{W_a}{W_d}, \quad (1.10)$$

Měkčí materiály, jako jsou například pokojové závěsy, obecně vykazují pohltivost na vyšších frekvencích a tvrdší materiály s hladkým povrchem lépe absorbují na nižších

kmitočtech. Příklad takovéto závislosti je zanesen v grafu 1.4.

Z grafu na obrázku 1.4 lze vysledovat několik zajímavých faktů:

- laiky hojně používaná plata od vajec vykazují absorpční vlastnosti srovnatelné s tzv. „akustickou pěnou“ (ovšem za té podmínky, že budou aplikována na cca 3-krát větší plochu a navíc jejich závislost absorpce na frekvenci není konstantní)
- žádný z laiky využívaných materiálů (včetně akustické pěny) nevykazuje pohltivost na nízkých kmitočtech
- basové pasti, ať už jsou konstruovány na principu rezonátoru, či tvořeny akustickou pěnou, vykazují nezanedbatelnou pohltivost i na vysokých kmitočtech
- hodnoty zobrazené v grafu jsou získány z oficiálních materiálů výrobců a odborné literatury kromě *plat od vajec*, které jsem měl možnost změřit v dozvukové komoře společnosti SONING Praha s.r.o. (které bych rád tímto za tuto možnost poděkoval); jedná se o produkt „Eur+ tray“ od společnosti Huhtamaki Česká republika, a.s.; protokoly z měření jsou součástí přílohy



Obr. 1.4: Závislost součinitelů zvukové pohltivosti na frekvenci pro vybrané materiály

Je nutno poznamenat, že hodnoty uvedené v grafu jsou platné pouze v rozmezí

kmitočtů 100 až 5000 Hz. Pro hodnoty mimo tento rozsah není měření platné, z důvodu nezanedbatelného vlivu rozměrů zkušební místnosti (viz dále) a výrobci akustických prvků jsou uváděny pouze „pro zajímavost“. Graf byl zpracován za použití softwaru Libre Office.

Součinitele pohltivosti se určují měřením v takzvaných dozvukových komorách, porovnáváním doby dozvuku prázdné místnosti s dobou dozvuku místnosti s měřeným vzorkem. Součinitele běžných stavebních materiálů i akustických prvků jsou uvedeny v řadě publikací (např.: [26]) a některé z nich jsou uvedeny v příložené tabulce A.3. Pro materiály se kromě součinitelů závislých na frekvenci uvádí i *střední součinitel zvukové pohltivosti*, který vyjadřuje průměrnou pohltivost a bývá doplněn příznakem, specifikujícím, jaké frekvenční oblasti se týká. Lze ho využít pro výpočty určitých parametrů, nicméně často s ním nelze docílit tak přesných výsledků, jako při zohlednění frekvenční závislosti.

Difuze zvuku je také frekvenčně závislá a ovlivňuje úhel odrazu, znázorněný na obrázku 1.3. V některých případech usilujeme o to, aby se zvuk, který nebyl překážkou pohlcen, odrazil do co nejvíce směrů – tedy aby se jeho energie v prostoru rozprostřela a příliš tak neovlivňovala zvuk, který se od zdroje šíří přímo.

Fenomén difrakce zvuku o hrany beden reproduktorů je dobře známý. Postavíme-li reproduktor ke stěně a namíříme ho do prostoru, bude se vyzářená zvuková vlna rozražená o hranu reproduktoru, odrazet i od této stěny. V místě posluchače pak dochází k interferenci přímého a odraženého zvuku a vzniku tzv. *hřebenového filtru*, přičemž dle experimentu ([19]) může být frekvenční odezva takového systému změněna na vícero kmitočtech až o ± 5 dB (!). Z tohoto důvodu je dobré umísťovat reproduktory dál od stěny, nebo je do ní rovnou zabudovat. Ze stejného důvodu mají mikrofony měřících zařízení malé rozměry a bývají vzdáleny od rozměrnější přístrojové krabice.

Mimochodem podobně se pak například stěna zkušebny, pokrytá platy od vajec, na kterých jsou jehly s délkou hrany cca 5 cm, jeví pro zvukové vlny o frekvencích menších než cca 6900 Hz – samotné jehly pod tuto frekvenci k difuzi nepřispívají.

Druhy zvukových polí

Když se zvuková vlna šíří prostorem nerušeně, tj. bez odrazů, nazýváme takové zvukové pole volným a takováto „neovlivněná“ vlna se označuje jako *primární*. V uzavřeném prostoru bude takováto vlna představovat tzv. *přímý zvuk*. Při existenci překážky v cestě zvukové vlny však může v různé míře dojít k odrazům, pohlcení či ohybu vlny. Takovéto *prvotní odrazy*, či *sekundární* vlny mohou s primárními interferovat.

Dalším postupem vlny v uzavřeném prostoru pak po mnohočetných odrazech vzniká *pole difúzní*. Směr šíření zvukové energie je náhodný a stále se mění a nejsme tak schopni určit směr, odkud zvuk přichází. Nelze definovat žádnou vlnoplochu. Pokud pole není dostatečně difúzní, tedy pokud v prostoru není energie rozložena náhodně, můžou na vysokých frekvencích vzniknout slyšitelné zvukové efekty zvané *zvonivá ozvěna (flutter echo)*; zde se plata od vajec uplatní. Za hranici mezi volným a difúzním polem v uzavřeném prostoru označujeme vzdálenost, ve které se hustota akustické energie primárních vln rovná hustotě akustické energie vln sekundárních, a nazýváme ji *dozvuková vzdálenost* [19]. Běžně se pro tuto vzdálenost uvádí vztah 1.11

$$r_d = 0,14\sqrt{A} , \quad (1.11)$$

kde A je *celková pohltivost prostoru*. Celková pohltivost místnosti je daná součinem celkové plochy místnosti s průměrným součinitelem zvukové pohltivosti místnosti.

S touto vzdáleností souvisí i hodnota parametru *doba směšování*, který uvádí, za jak velkou dobu dojde k přechodu mezi prvotními a mnohonásobnými odrazy.

Novější výzkumy [34] však prokázaly, že subjektivní vjem tohoto parametru lépe vyjadřuje vztah publikovaný v [46]

$$r_d = 4\frac{V}{S} , \quad (1.12)$$

kde V je objem řešené místnosti a S je celková plocha všech vnitřních povrchů místnosti, vzdálenost je uvedena v jednotkách metrů.

Z tohoto vztahu pak lze odvodit vztah pro přibližnou dobu směšování (tamtéž)

$$t_{\text{mix}} \approx 4 \cdot r_d \cdot \frac{10^3}{c_0} , \quad (1.13)$$

který udává hodnotu v milisekundách.

V blízkosti rozměrnějších zdrojů zvuku (například reproduktorů) vzniká v důsledku interference nehomogenní, tzv. *blízké pole* (jinak také zvané *Fresnelův prostor*), které je definováno jako [50]:

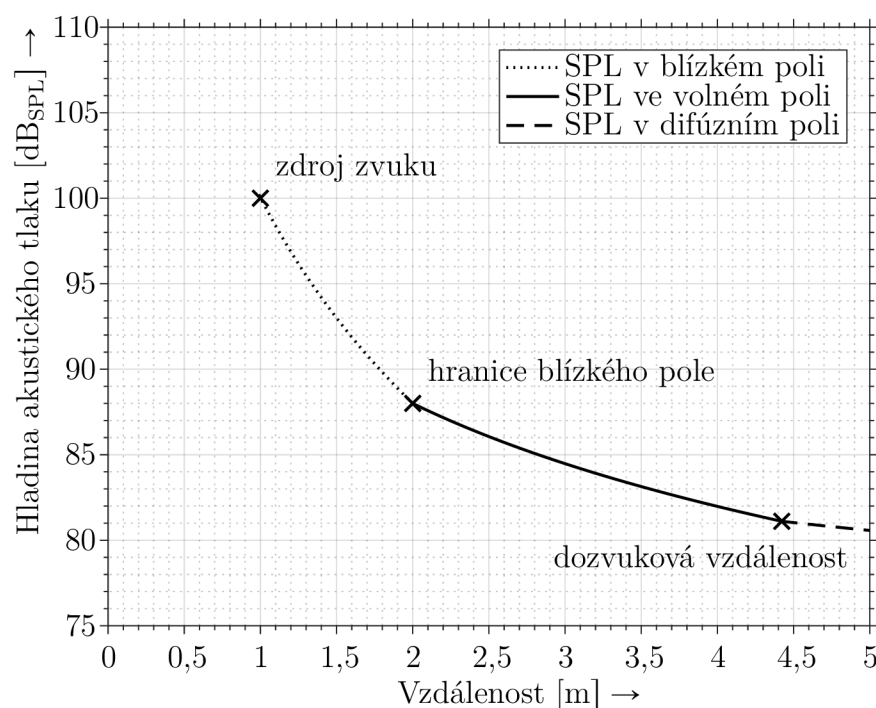
$$kr \ll 1 , \quad (1.14)$$

tedy, do takové vzdálenosti od zdroje zvuku, která je mnohem menší, než $1/k$. Při hodnotách kr větších než 1 mluvíme o poli *vzdáleném*. V blízkém a difúzním poli neplatí rovnice, díky kterým je jinak možné, při určitém stavu, charakterizovat plynné prostředí například pomocí změny jeho hustoty ρ . V blízkém poli klesá hladina akustického tlaku se strmostí 12 dB na oktávu [19]. V difúzním poli je přímý zvuk

maskován zvukem odraženým.

To, co slyšíme je tak značně závislé na vzdálenosti od zdroje zvuku. Z rovnice 1.14 je vidět, že hraniční vzdálenost tohoto pole budeme určovat podle nejnižší frekvenční složky signálu. Z tabulky A.4 je zase vidět, že v praxi by měla postačit vzdálenost cca 27 cm. Jako hranice blízkého pole je ovšem v literatuře a normách často zmiňovaná [44] vzdálenost 1 m, a tato hodnota bude považována za hranici blízkého pole i v této práci.

Graf 1.5 ilustruje rozmístění zvukových polí v popisované místnosti s jedním zdrojem zvuku, umístěným jeden metr od stěny, paralelně s osou místnosti, u kterého byla ve vzdálenosti jeden metr naměřena hladina akustického tlaku 88 dB. Pokud není vysloveně uvedeno jinak, jsou všechny grafy v této práci vytvořeny za pomoci softwaru MATLAB.



Obr. 1.5: Hladina akustického tlaku v závislosti na druhu zvukového pole a vzdálenosti od zdroje zvuku.

1.1.3 Metody teoretické akustiky

Akustiku uzavřeného prostoru, lze analyzovat více postupy. Každý z nich má určité využití a určitou obtížnost při výpočtu. Základními metodami analýzy jsou vlnová akustika, statistická akustika a geometrická akustika.

Akustika malého prostoru je charakteristická značným vlivem *vlastních kmitů prostoru*, které jsou dominantní na mnohem vyšších frekvencích než u velkých místností. V této frekvenční oblasti nelze použít odhadů statistické akustiky. Nelze zanedbat jevy jako ohyb zvukových vln (difrakce) a tak nelze použít ani metod geometrické akustiky. Navíc se brzké odrazy dostanou k přijímači v mnohem menším časovém odstupu od přímé vlny a celý systém odrazů je tak oproti větším místnostem časově komprimovaný.

Na velmi nízkých frekvencích se *doba dozvuku* značně liší v různých místech měřeného prostoru, a jeho jednotlivá měření znázorňují spíše jen některé dominantní módy, než průměr jejich většího počtu. Zdá se však, že ať už doba dozvuku reprezentuje přesný statistický průměr difúzního pole, či hrubější průměr lokálních dob dozvuku jde stále o platné měření, které úzce souvisí s různými poslechovými vjemy v místnosti [61] – jinými slovy: i vliv „špatné“ akustiky místnosti na poslech lze objektivně podchytit.

Geometrická akustika

Pomocí geometrické akustiky zkoumáme základní fyzikální vlastnosti prostorů. Používá se spíše při stavebním návrhu místnosti, avšak je velice výpočetně náročná – složitost výpočtů roste exponenciálně se složitostí prostoru. Geometrické modely zanedbávají jevy jako interference a ohyb vln a jen nesnadno se používají pro prostory složitějších tvarů.

Statistická akustika

Statistická akustika k charakterizaci zvukového pole používá veličiny energetického rázu jako hustota zvukové energie a intenzita zvuku. Nalézá jejich průměrné hodnoty a s jejich pomocí umožňuje poskytovat kvalitativní obraz o základních vlastnostech uzavřených prostorů. Pro statistické modely je zavedeno několik předpokladů:

- Úhly, pod kterými dopadá zvuková energie do uvažovaného bodu, jsou zastoupeny se stejnou pravděpodobností.
- Velikost zvukové energie v libovolném bodě v uzavřeném prostoru je dána součtem středních hodnot energie, která do uvažovaného bodu dospěla vlivem odrazů od stěn.
- Hustota zvukové energie je ve všech bodech prostoru stejně veliká.

Základním předpokladem pro splnění těchto podmínek je dostatečná hustota vlastních kmitů při buzení prostoru stacionárním signálem. S rostoucím kmitočtem se průměrná vzdálenost na kmitočtové ose mezi jednotlivými vlastními kmity zkracuje natolik, že se jednotlivé rezonanční křivky začnou soustavně překrývat a nelze

je už rozlišit. Rozložení vlastních kmitů na kmitočtové ose nabývá náhodného charakteru, a tím má reálná a imaginární část okamžitých hodnot akustického tlaku v dostatečné vzdálenosti od zdroje zvuku Gaussovo (normální) rozložení. Toto však platí pouze pro kmitočty vyšší, než je *Schröderův (kritický) kmitočet* (viz dále), který se u malých místností může pohybovat okolo hodnoty až 350 Hz. *Módy prostoru* tedy existují i na vysokých kmitočtech, jen jich je tolik a jsou tak blízko u sebe, že nepůsobí rušivě.

Vlnová akustika

Vlnová teorie akustického pole uzavřených prostorů vychází ze základních zákonů mechaniky prostředí, v němž se šíří zvuk (pohybové rovnice, stavové rovnice a rovnice kontinuity), a formuluje vlnovou rovnici a příslušné hraniční a okrajové podmínky. Analytické řešení je ale možné jen pro geometricky jednoduché tvary prostorů [50]. To je také důvodem pro oblíbenost prostor tvaru kvádra - relativně snadno se navrhují. Dvě třetiny nejlépe hodnocených hudebních sálů na světě je tvaru kvádra (tzv. *shoe box*) [6].

Řešením vlnové rovnice pro rychlostní potenciál, zobecněný na tvar udávající šíření rovinné postupné vlny v obecném směru vůči kartézským osám, můžeme po dosazení okrajových podmínek obdržet frekvence vlastních kmitů prostoru a jejich počet.

Vlnové číslo pro pravoúhlý netlumený prostor (dutý kvádr) [52]:

$$k = \sqrt{\left(\frac{n_x \pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{l_z}\right)^2} \quad (1.15)$$

kde n_x , n_y a n_z jsou nezáporná celá čísla a l_x , l_y a l_z jsou délky hran uvažovaného prostoru v metrech.

Řešením rovnice 1.15 jsou *vlastní kmity* prostoru nebo tzv. *módy prostoru* (v anglické literatuře se užívá výrazů „normal modes, room resonance frequencies, či eigenfrequencies“). Řešení vlnových dějů s obecnými vlnoplochami je početně obtížné. Pro stanovení intensity je vyžadována nejen znalost akustického tlaku, ale i fázový posun mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí při určité frekvenci, což je obzvláště v difúzním poli obtížné určit.

Vlastní kmity uzavřeného prostoru

Vlastní kmity, nebo módy prostoru jsou výsledkem zvukových vln pohybujících se v opačném směru na uzavřené trajektorii. Čím tužší jsou povrchy a menší zvuková absorpce, tím více bude daný prostor rezonovat a tím výraznější budou jeho vlastní

kmitů a jeho prostorová charakteristika. Pro rezonanční systémy obecně je charakteristická frekvenčně závislá odezva systému na vybudění na rezonančních kmitočtech systému a dlouhé časy náběhu a dozvuku.

Akustické vlastnosti uzavřeného prostoru z hlediska přenosu zvuku ze zdroje k posluchači jsou tedy značně závislé nejen na kmitočtu, ale i na pozici zdroje a přijímače.

Při dopadu zvukového vlnění na stěnu dojde k jejímu odrazu. V místnosti se vlny postupující opačnými směry v místě styku sečtou a dojde tak k *interferenci*. Fázový rozdíl těchto vln bude záviset na vlnové délce a rozměrech místnosti ve směru, kterým se vlna šíří. Dle principu superpozice, při ideálně odrazivých stěnách, může v závislosti na tomto fázovém rozdílu v určitých místech energie součtu přímé a odražené vlny nabývat nulové až dvojnásobné hodnoty podle toho, zda se vlny v daném místě potkají ve fázi nebo v protifázi.

Jestliže mají dva nebo více módů vlastních kmitů (pro dvě nebo více kombinací hodnot indexů n_x , n_y , n_z) totožnou vlastní frekvenci, nazývají se *degenerovanými módy*. Výsledkem degenerovaných módů je koncentrace a zesilování akustické energie na těchto frekvencích. Modulová kmitočtová charakteristika místnosti je v okolí těchto frekvencí silně zdůrazněná. Největší počet těchto vícenásobných módů je v místnostech s velkou geometrickou symetrií. Například v místnostech tvaru krychle nebo kvádrů s poměry hran rovnými celistvým sudým číslům. Každý harmonický signál reprodukováný v takovéto místnosti vybudí v prostoru celou řadu módů, které budou mít kmitočet blízký kmitočtu budicího signálu.

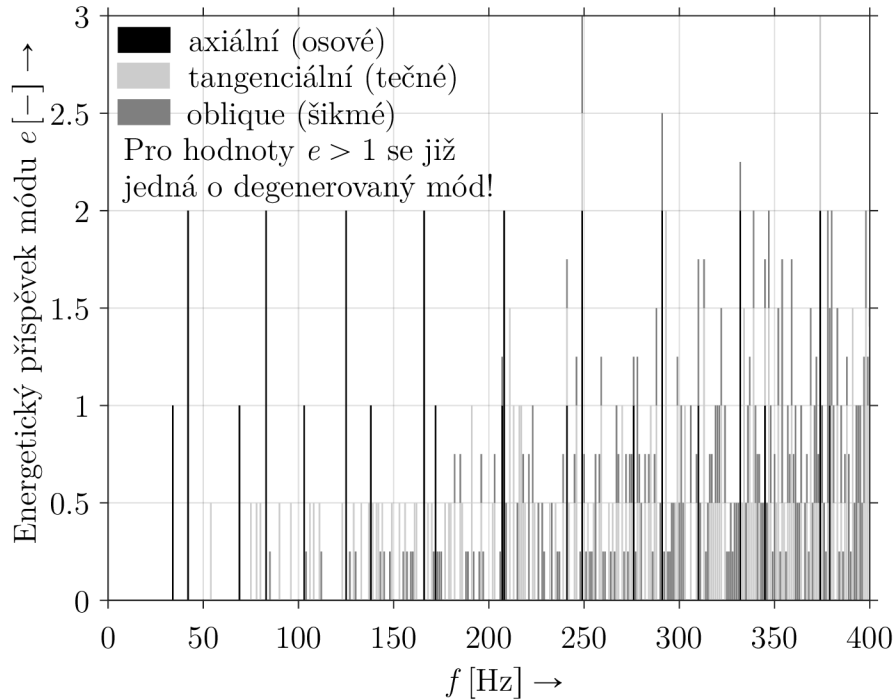
Vlastní kmitů mají význam i pro přechodné jevy, které se vyskytují hlavně na začátku působení zvukového zdroje, jako například nasazení smyčce, drknutí do struny, či úder do bicího nástroje apod.

Po úpravě lze z vlnového čísla stanovit frekvenci módu f_N pro danou kombinaci hodnot indexů n_x , n_y a n_z [52]:

$$f_N = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (1.16)$$

Z této rovnice vyplývá, že spektrum módů pravoúhlého prostoru není spojitě, ale diskrétní. V případě, že jedno z čísel n_x , n_y , n_z je rovno nule, dostaneme frekvenci *axiálního (osového) modu*, pokud jsou nulová dvě, tak frekvenci *tangenciálního (tečného) modu*, a pokud jsou všechna čísla různá od nuly, tak dostaneme kmitočet *oblique (šikmého) modu*. Frekvenci f_N lze formálně považovat za vektor \mathbf{f}_N a čísla n_x , n_y , n_z za jednotkové vektory \mathbf{n}_x , \mathbf{n}_y , \mathbf{n}_z ve směru jednotlivých kartézských os.

Graf 1.6 vytvořený za pomoci softwaru MATLAB a znázorňuje frekvence módů zkoumané místnosti:



Obr. 1.6: Vlastní módy řešené místnosti.

Počet vlastních kmitů prostoru N ležících v kmitočtovém intervalu od 0 Hz do kmitočtu f je [55]:

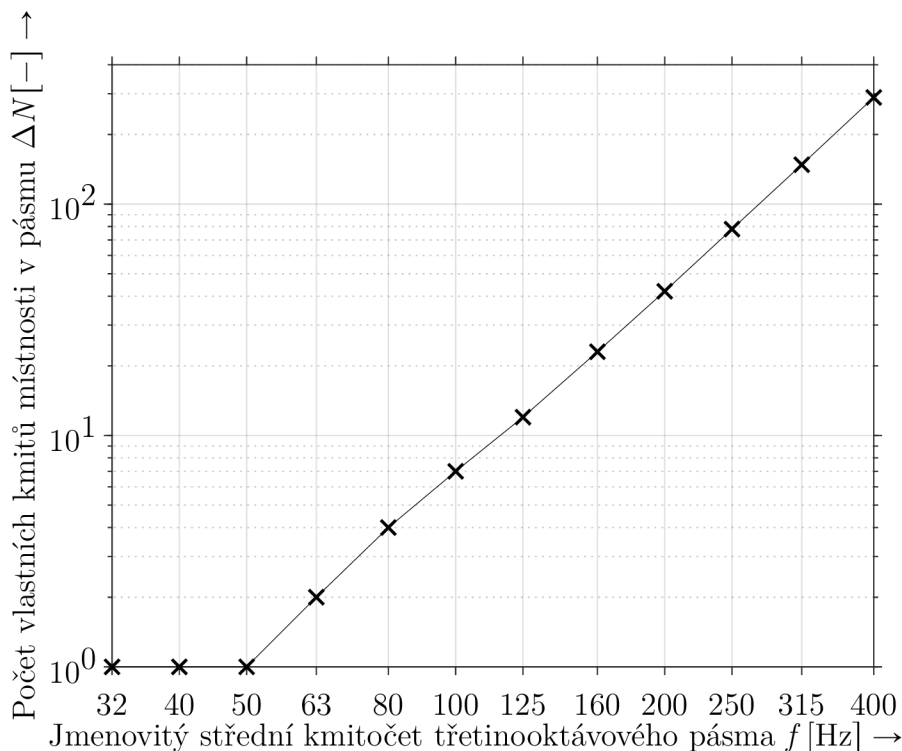
$$N(f_N) = \frac{4\pi V}{3c_0^3} f_N^3 + \frac{\pi S}{4c_0^2} f_N^2 + \frac{L}{8c_0} f_N \quad (1.17)$$

kde V je objem místnosti, S je plocha stěn místnosti a L je celková délka všech hran místnosti. Derivací rovnice 1.17 podle f_N získáme hustotu spektra kmitů. První člen značí celkový počet šikmých módů, druhý člen celkový počet tečných módů a třetí člen celkový počet osových módů v uvažovaném kmitočtovém intervalu.

Nemá-li být přenos zvuku příliš ovlivněn prostorem, je důležité, aby v poslecho-
vém kmitočtovém pásmu byl co největší počet vlastních kmitů. Z toho také vyplývá,
že nejnižší vlastní kmitočet by měl být hluboko pod uvažovaným kmitočtovým pás-
mem. Tato podmínka je splněna právě jen pro místnosti větší než 200 m^3 . Hustota
kmitů v mé pracovně (tedy pokoji $4 \times 5 \text{ m}$) je zobrazena na grafu 1.7.

Hustota modů slouží k posuzování *Bonnelova kritéria* [10], které dle jejich počtu
posuzuje optimální poměr rozměrů místnosti a uvádí že:

- Křivka hustoty má stoupat monotónně – tedy každé další pásmo má obsahovat více modů, než to předchozí.
- V pásmu se nesmí nacházet degenerovaný mód, pokud hustota v tomto pásmu není rovna, nebo větší, než 5.



Obr. 1.7: Hustota vlastních kmitů místnosti v třetinooktávových pásmech.

Což dle předchozích dvou obrázků zkoumaná místnost nesplňuje, a to především na nízkých kmitočtech. Toto kritérium má však využití pouze pro návrh místností nových, protože pracuje s rozměry místnosti, které ještě lze ovlivnit. Výzkum také naznačuje [62], že kritérium má význam pouze pro situaci, kdy je pozice zdroje v rohu místnosti, což také není častý případ. Pozice v rohu je dokonce nejhorší možný případ umístění, jak ukazuje výzkum [18].

Celkem dle očekávání, druhý zmíněný výzkum také uvádí, že subjektivně je hodnoceno jako nejlepší, pokud je vliv modů odstraněn, respektive pokud je vzdálenost modů tak malá, že již nejsou vnímány jako samostatné oblasti (což platí na vysokých kmitočtech). Bohužel také uvádí, že prakticky jediná akustická úprava, která je tomuto požadavku sto dostát využívá aktivních prvků – konkrétně je potřeba několika, elektronicky řízených subwooferů a zpoždovacího systému, což je velmi finančně náročné. Uvádí ovšem také, že hodnocení tohoto subjektivního vjemu je silně závislé na charakteru signálu, který je posuzován. Při vzorku, který obsahoval rychlou hru na basovou kytaru (funk) nebylo možno kvalitu konkrétní akustické úpravy vůbec posoudit. Takováto „dobrá akustika“ tedy bude mít pravděpodobně zanedbatelný význam pro hudební žánry, které hojně užívají rychlé změny v časové rovině signálu a vznikly v prostorech, které požadavky normy nesplňovali.

Celkový počet vlastních kmitů se s tvarem prostoru v podstatě nemění, dochází pouze ke vzájemným posunům v jejich spektru. U pravoúhlých prostorů tvoří určité

vlastní kmitů harmonické řady, u nepravoúhlých již nejsou tyto kmitů celistvými násobky základních kmitů, a proto je možnost vzniku ozvěn v tomto případě podstatně menší. Počet vlastních kmitů v konstantním kmitočtovém intervalu roste kvadraticky s kmitočtem a je úměrný objemu místnosti.

Doporučené poměry místností

Akustické vlastnosti prostoru se odvíjejí především od jeho rozměrů – především na nízkých kmitočtech totiž ovlivňují rozprostření energie v prostoru. S ohledem na tento fakt existuje snaha snaha vyhledat takové optimální poměry, aby zaručili ideální rozprostření vyzářené energie [47]. Existují metody, které kvantifikují celkové kolísání hladiny akustického tlaku v místnosti a zobrazují nerovnost ve frekvenčních odezvách mezi rozličnými poslechovými pozicemi [48].

S ohledem na toto kritérium byla definována tzv. *Boltova oblast* [8], která doporučuje poměry vyznačuje. V současnosti platná norma od European Broadcast Union tuto oblast ještě rozšiřuje [17]. Uvádí však, že smyslem jejich doporučení je spíše vyhnout se těm nejhorším poměrům, než definovat ty optimální a je definováno následovně :

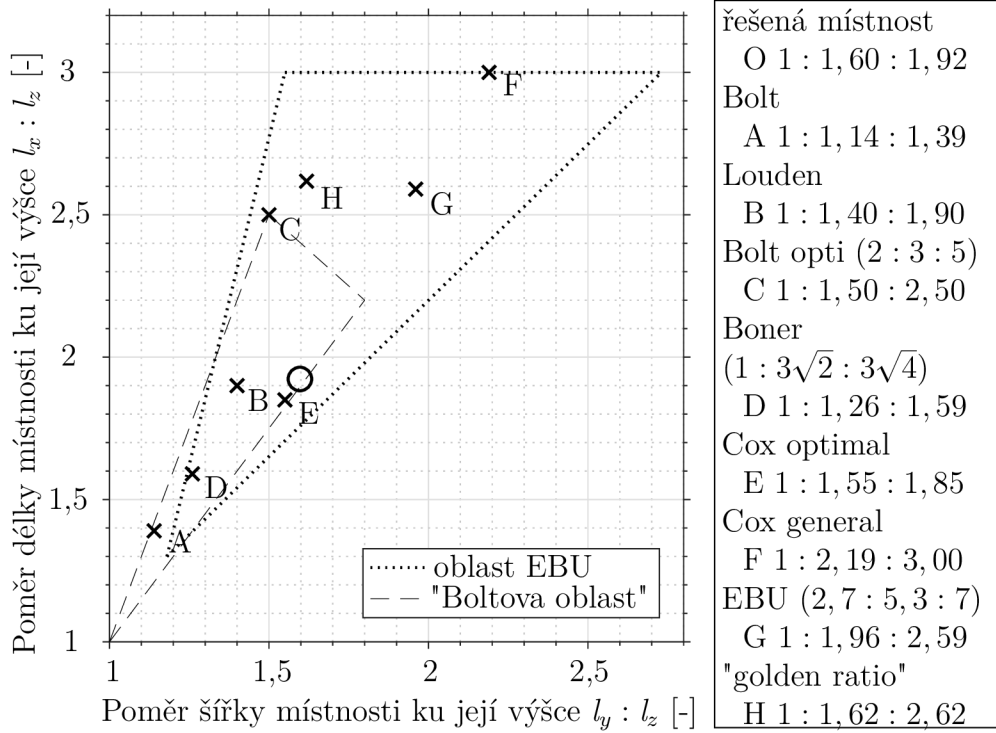
$$1, 1 \frac{l_y}{l_z} \leq \frac{l_x}{l_z} \leq 4, 5 \frac{l_y}{l_z} - 4 \quad (1.18)$$

Graf 1.8 vytvořený za pomoci softwaru MATLAB tyto oblasti zobrazuje a vyznačuje v odborné literatuře uváděné optimální poměry, spolu s poměrem řešené místnosti. Je dobré podotknout, že při posuzování jsou poměry normalizovány tak, že výška místnosti se vždy rovná jedné. Jako nejlepší jsou hodnoceny poměry „Cox general“ a „EBU“ [48]. Jak je z grafu vidět, jsou to ty s největšími rozměry, a představují tedy i největší místnost.

Schröderův (kritický) kmitočet

Pro posuzování vlastností akustického prostoru z hlediska přenosu signálu je důležité znát počet vlastních kmitů N pod určitým kmitočtem f_k (Schröderův), tento počet je nezávislý na tvaru prostoru, pouze na velikosti jeho objemu a tlumení jeho povrchu [33].

Je hranicí mezi oblastmi, kdy je nezbytné k popisu vlastností akustického pole uzavřeného prostoru použít metody vlnové akustiky (pro oblast pod kritickým kmitočtem) a kdy můžeme použít metod geometrické či statistické akustiky (pro oblast nad kritickým kmitočtem).



Obr. 1.8: Doporučené poměry rozměrů místností.

Pro tento kmitočet platí [55]:

$$f_k = \frac{5000}{\sqrt{V\delta}} \quad (1.19)$$

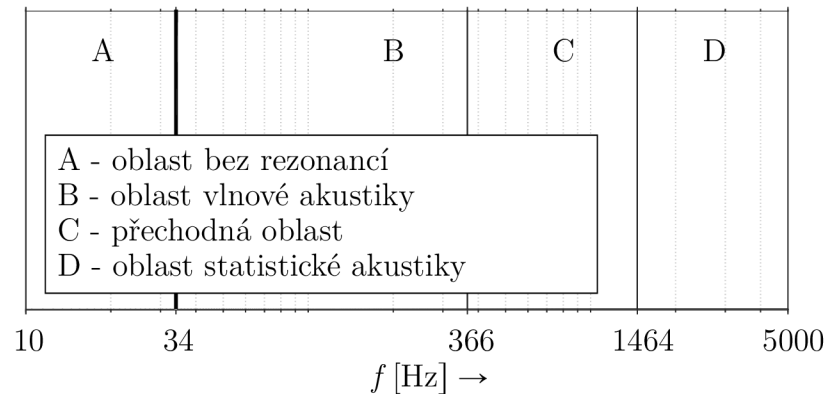
kde V je objem místnosti a $\delta = \sqrt{3}\Delta f_N$ je konstanta tlumení (Δf_N je šířka pásma daného módu). Od kmitočtu f_k lze konstanty tlumení módů s blízkým kmitočtem vyjádřit jejich průměrnou velikostí, přičemž lze také použít vzorec [32]:

$$f_k = 2000\sqrt{\frac{T_d}{V}} \quad (1.20)$$

kde $T_d = 6,91\delta$ je *doba dozvuku* v dané místnosti (viz dále) a V vnitřní objem prostoru.

Rozhraní zmíněných oblastí však u malých prostor není dáno naprosto jednoznačně jedinou frekvencí. Odborná literatura uvádí čtyřnásobek kritického kmitočtu jako horní hranici přechodné oblasti, kde energie není rozprostřena zcela rovnoměrně a kde ještě dominuje vliv difrakce a difuze [19]. Hranice takto definovaných frekvenčních oblastí pro řešenou místnost bez akustických úprav znázorňuje graf 1.9. Horní hranicí první oblasti je první mód místnosti, který je na frekvenci, jejíž vlnové délce

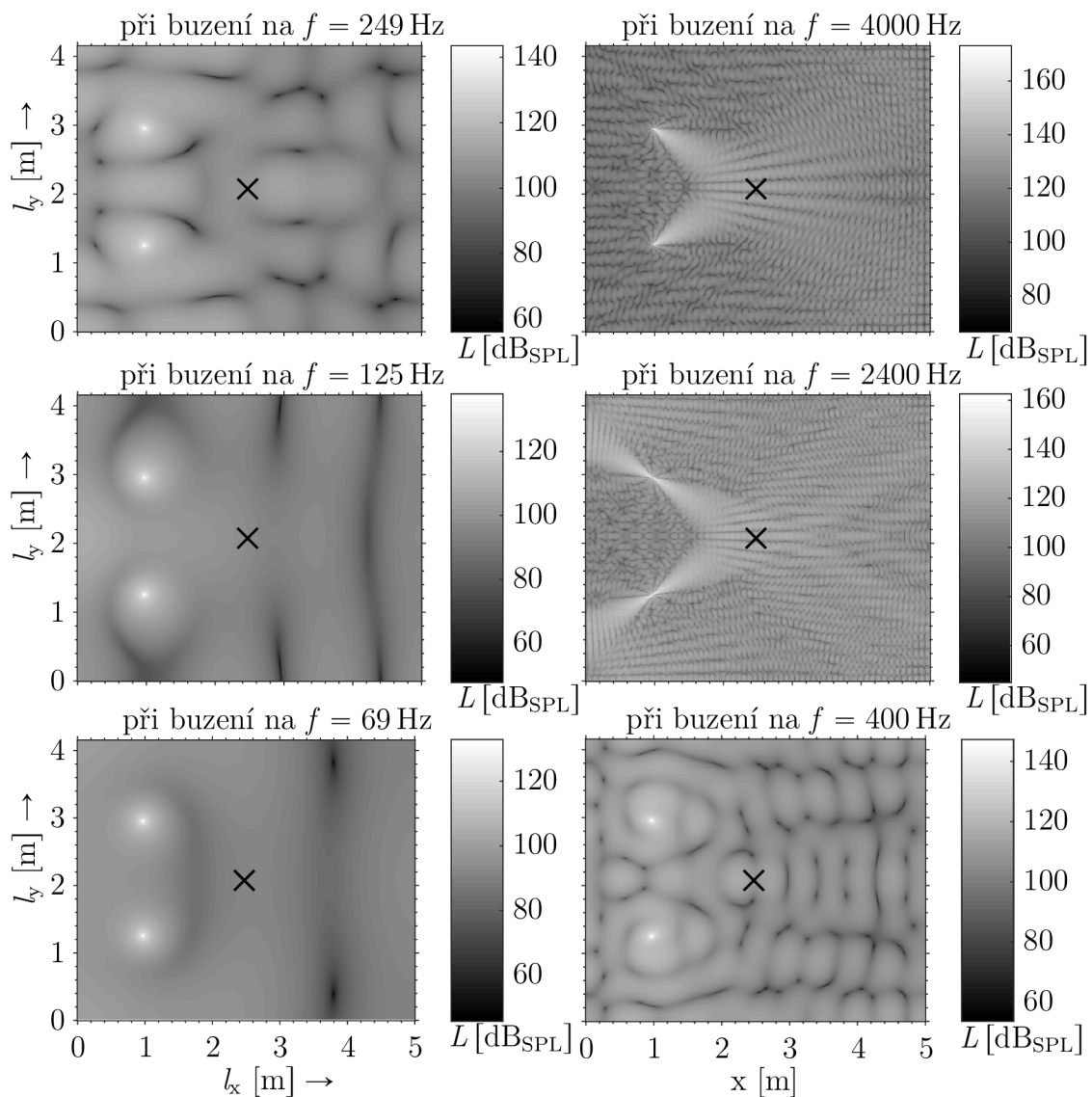
odpovídá nejdelší rozměr místnosti. U jedné z variant řešení akustiky místnosti za pomoci běžně dostupných prostředků uvedených na obrázku 1.4 se podařilo snížit kritický kmitočet na 187 Hz, což ovšem zdaleka nestačí na splnění požadavků pro frekvenční odezvu místnosti na nízkých kmitočtech.



Obr. 1.9: Frekvenční oblasti z hlediska hustoty vlastních kmitů místnosti.

Pro názorné zobrazení situace v řešené místnosti jsem v softwaru MATLAB vytvořil simulaci rozložení akustického tlaku v prostoru za pomoci metody zrcadlových zdrojů. Grafy v obrázku 1.10 znázorňuje vliv místnosti pro dva zdroje, tvořené pístově kmitající kruhovou membránou o průměru 8" (203 mm), nasměrované na pozici značenou písmenem X. Tyto tři body tvoří rovnoramenný trojúhelník, jehož strany mají délku 1,7 m, přičemž zdroje jsou odsazeny 1 m od stěny. Tyto parametry jsou aplikovány dle doporučení normy [27], která definuje podmínky prostředí vhodné pro subjektivní posuzování zvuku. Aplikovaná metoda využívá odrazy druhého řádu, tedy simuluje vlnu, které se od stěn odrazí dvakrát, přičemž při každém odrazu se energie vlny zmenšuje za pomoci pro danou frekvenci příslušného součinitele pohltivosti z odpovídajícího třetino-oktávového pásma. Pro kmitočty, jejichž vlnová délka dělená dvěma je stejná nebo menší, než rozměr reproduktoru (250 mm), zdroj vyzařuje pouze směrem do místnosti.

Z obrázku lze usuzovat, že cílem tohoto doporučení je vyloučit vliv modů prostoru na frekvenční odezvu místnosti. Je také zajímavé sledovat, že rozmístění modů se mění s pozicí zdrojů zvuku a neplatí tedy rozšířená představa, která vychází z populárních vizualizací, které jsou platné pro zdroj umístěný v rohu místnosti. Jako hraniční vzdálenost mezi zdroji zvuku a posluchačem uvádí norma hodnotu 2 až 3 m a z obrázku 1.5 víme, že to představuje pozici posluchače ve volném poli. Lze tedy uvažovat, že při dodržení tohoto doporučení odpadá nutnost toto lineární zkreslení zahrnout do simulace poslechového prostoru při poslechu na sluchátka a dále se tedy zaměřím na dosažení požadované *doby dozvuku* a simulaci *binaurálního* poslechu.



Obr. 1.10: Rozložení akustického tlaku v horizontální rovině.

1.1.4 Objektivní akustické parametry

Za pomocí objektivních akustických parametrů se snažíme dát do souvislosti vliv fyzikálních vlastností poslechového řetězce na subjektivní poslechové vjemy.

Doba dozvuku T_d (*Reverbatation time*)

Zvuk, který se díky odrazům od stěn a konečné rychlosti zvuku šíří prostorem po vypnutí zdroje zvuku, nazýváme *dozvuk* (laicky ozvěna).

Základní charakteristikou, popisující vlastnosti uzavřených prostorů z hlediska prostorové akustiky, je *doba dozvuku*. Ta je ve statistické teorii definována jako doba,

za kterou klesne hustota zvukové energie nebo intenzita po vypnutí zdroje zvuku na 10^{-6} (tj. o 60 dB) oproti původní velikosti. K tomu dochází vlivem útlumu zvuku při šíření prostředím, zejména díky útlumu překážek. Protože je však činitel zvukové pohltivosti materiálů kmitočtově závislý a protože na nízkých kmitočtech dochází k ohybu zvukového vlnění kolem menších překážek, je i doba dozvuku frekvenčně závislá. Tento fakt je zohledněn v nejspíše nejpoužívanějším, Eyringově vzorci pro její výpočet [37]:

$$T_d = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_{\text{str}}) + 4mV}, \quad (1.21)$$

kde T_d je doba dozvuku, V je objem místnosti, S je plocha místnosti, α_{str} je střední hodnota činitele zvukové pohltivosti stěn a konstanta m je *činitel útlumu zvuku ve vzduchu* (m) závislý na relativní vlhkosti a teplotě vzduchu a na kmitočtu zvuku. Jeho hodnota se při teplotě 20 °C, atmosférickém tlaku 101,325 kPa a relativní vlhkosti vzduchu 10 % pohybuje od $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ na nízkých kmitočtech do $30 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ na vyšších kmitočtech a s rostoucí vlhkostí rychle klesá [13]. Postup pro stanovení hodnoty konstanty m grafickou cestou podle Beranka je uveden například v [37].

Ukazuje se však [5], že zvláště pro velmi malé (malé oproti například operním sálům) místnosti nejsou běžně užívané standardní hodnoty koeficientů vhodné a například *činitel zvukové pohltivosti* (α) může v takovýchto případech nabývat hodnot i vyšších než 1.

Pro standardní dobu dozvuku, kde se jedná o pokles o 60 dB se používá značení RT_{60} . Pro měření takového poklesu by bylo třeba, aby hladina akustického tlaku před vypnutím zdroje byla o více než 60 dB vyšší než hladina hluku pozadí, což nelze vždy splnit. Proto norma předpokládá, že se vyhodnocuje doba poklesu hladiny akustického tlaku o 30 dB (označovaná RT_{30}) a poté se vypočítá její dvojnásobek.

Doba dozvuku RT_{30} se používá nejčastěji, dalšími užívanými jsou doby dozvuku RT_{20} a RT_{10} (RT_{20} vyhodnocena z poklesu o 20 dB, RT_{10} vyhodnocena z poklesu o 10 dB).

Optimální doba dozvuku T_o

Doba dozvuku je považována za nejvýznačnější akustickou vlastnost hned po hlasitosti hluku pozadí a existuje řada doporučení pro doby dozvuku místností rozličných rozměrů a účelů [13].

Pro režijní místnosti se v České normě uvádění hodnota 0,3 sekundy. Není v ní však výslovně uvedeno „Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T_d / T_o obsazeného prostoru určeného k přednesu hudby i řeči v závislosti na středním kmitočtu

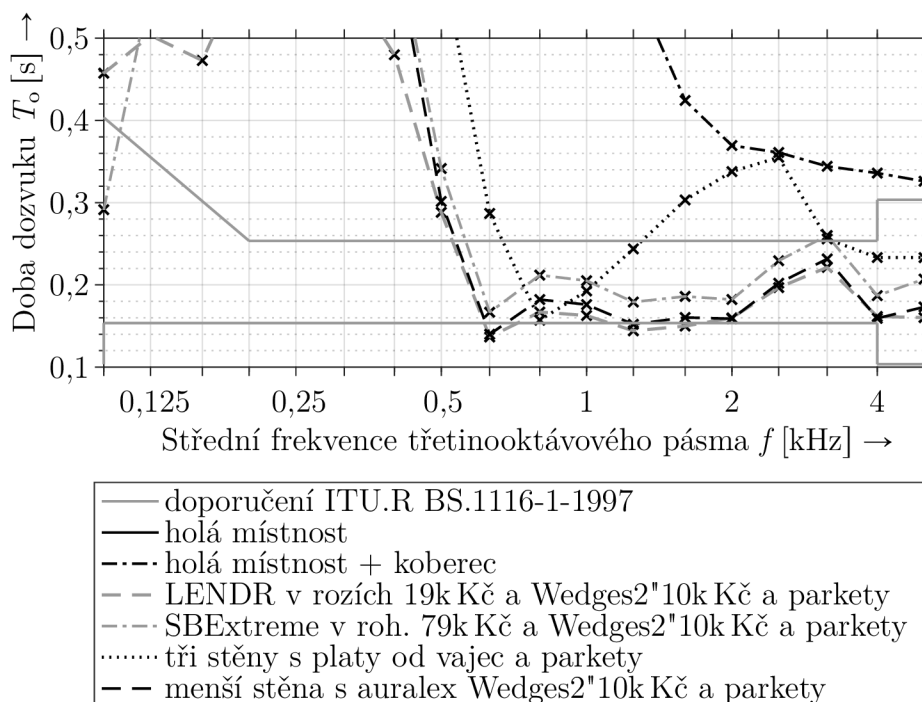
oktávového pásma“, kde T_d je vypočítaná doba dozvuku a T_o je *optimální doba dozvuku* (T_o).

Pro posouzení doby dozvuku řešené místnosti jsem tedy použil doporučení z normy [27]. Ta definuje optimální dobu přísněji dle vzorce 1.22

$$T_o = 0,25 \left(\frac{V}{V_{\text{ref}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.22)$$

kde V_{ref} je referenční objem o velikosti 100 m^3 a která pro řešenou místnost vychází přibližně $0,2 \text{ s}$.

Graf 1.11 zobrazuje doby dozvuku pro několik variant akustických řešení zkoumané místnosti, vypočtených dle 1.21 v programu MATLAB. Jak je vidět, ani použití drahých specializovaných produktů nezaručuje řešení problémů na nízkých kmitočtech. Nabízí se vlastnoruční výroba velkoformátových širokopásmových rezonátorů, o rozměrech minimálně jedné stěny. To je v DIY podmínkách ještě realizovatelné, nicméně tato práce se tím nezaobírá. Je ovšem užitečné sledovat situaci v této místnosti pro porovnání akustických úprav, u kterých je při realizaci finanční rozdíl až $100000 \text{ Kč}(!)$.



Obr. 1.11: Vypočítaná doba dozvuku, v závislosti na frekvenci.

Z praktických důvodů nebylo možno na obrázku dodržet některé zásady pro správné zobrazování grafů, a to z toho důvodu, že při zobrazení všech vypočtených závislostí již nebylo možno graficky posuzovat dodržení rozsahu daného normou.

Zdá se, že v řešené místnosti je možné splnit požadavek na délku dozvuku 0,2 s, avšak pouze pro frekvence do cca 500 Hz. Lze očekávat, že podobná situace bude panovat ve všech místnostech podobných rozměrů, které neoplývají aktivním akustickým opatřením, což budou prakticky všechny, mimo specializovaná komerční pracoviště. Nabízí se zde možnost volby, a to zda simulovat takovýto poslechový prostor dozvukem splňujícím normu, a nebo dozvukem typickým pro takovéto místnosti, což by teoreticky mohlo lépe odpovídat kreativnímu procesu, který tomu či onomu hudebnímu žánru odpovídá. Domnívám se, že je lepší mít možnost volby, což v podmínkách DIY vede na použití virtuálního dozvuku (ať už modelovaného, nebo získaného měřením ve skutečné místnosti) a poslechu na sluchátka. V současné době je k dispozici řada softwarových i hardwarových řešení pro umělý dozvuk, a to i nekomerčních, například v podobě VST pluginů, které vzhledem k výpočetnímu výkonu běžně dostupných domácích počítačů představují řešení finančně mnohem výhodnější, než dedikované hardwarové zařízení.

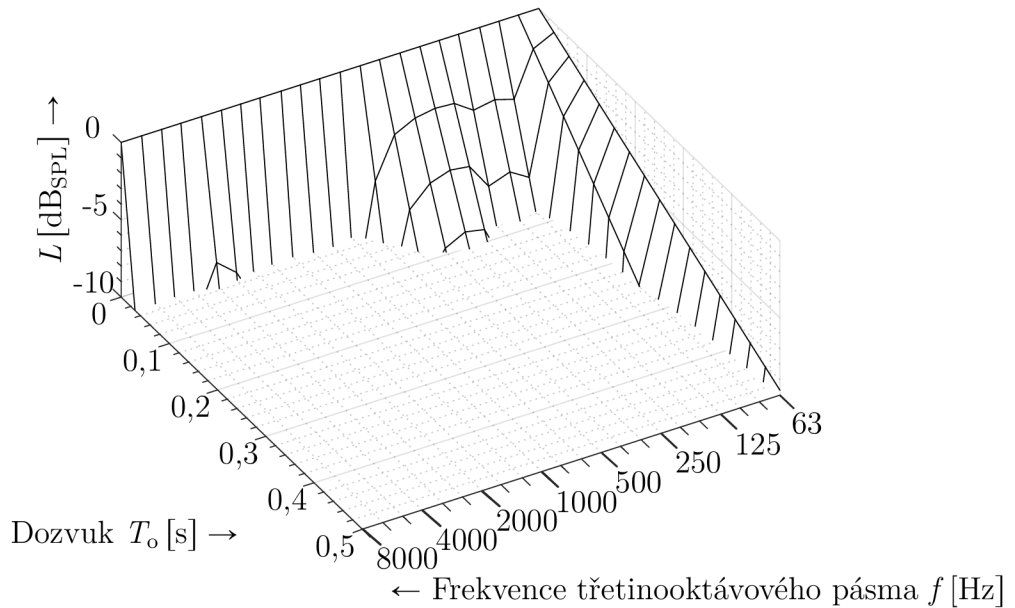
Vzhledem k výše uvedenému nepokládám za přínosné zařadit funkci simulace dozvuku do navrhovaného zařízení z důvodu zbytečně zvýšených finančních nároků na výrobu. Případné užití autentického dozvuku lze řešit prostřednictvím *impulsové odezvy* reálné místnosti importované do některého z *konvolučních reverbů*. Pro další popis poslechového řetězce bude doba dozvuku uvažována v délce 0 s v celém kmitočtovém pásmu.

Stávající praxe je taková, že naprostá většina posluchačů využívá pro poslech sluchátek. Zbývá tak vliv *auralizace* a lineárního zkreslení poslechového řetězce.

Počáteční doba dozvuku EDT (*Early Decay Time*)

Pomocí hodnot *EDT* lze velmi dobře hodnotit subjektivní vjem doby dozvuku prostoru, který je pro subjektivní hodnocení kvality hudebního signálu zásadní [16]. Jednočíselně se vyjadřuje nejčastěji jako EDT_{mid} , což je průměr hodnot *EDT* v oktávových pásmech 500 Hz a 1 kHz a získává se stejným způsobem jako RT_{60} , ovšem z pouze z počátečních 10-ti dB.

Často se užívá vyobrazení ve formátu tzv. *Early Decay Relief*, který pro hodnoty neupravené místnosti uvádím v grafu 1.12, který jsem také vytvořil v programu MATLAB. Tyto hodnoty byly získány při uvažované hodnotě $SPL\ 0\ dB_{SPL}$ v čase 0 s a hodnoty $-60\ dB_{SPL}$ v čase vypočítaném dle vzorce 1.21. Z těchto známých bodů byla vypočtena směrnice přímky, která vyjadřuje závislost hodnoty hladiny akustického tlaku na čase a tyto závislosti byly pro každé třetinooktávové pásmo zaneseny do grafu.



Obr. 1.12: Vypočítaná doba dozvuku, v závislosti na frekvenci.

Činitel interaurální vzájemné korelace (InterAural cross Correlation Coefficient)

Proces slyšení je binaurální (tedy uši používáme dvě). Tato charakteristika vypovídá o tom, do jaké míry se navzájem liší akustické signály přicházející k jednotlivým uším posluchače a je ji nutné měřit pomocí buď umělé, nebo skutečné hlavy. Dle [14] je možné použít skutečnou hlavu, pokud s její pomocí změřené hodnoty IACC korelují s hodnotami IACC umělé hlavy s hodnotou koeficientu $r = 0,85$, nebo lépe. Činitel IACC je kmitočtově závislý, uvádí se v oktávových pásmech a pro jeho výpočet se používá integračních hodnot od 0, 80 a 1000 ms. Dobře koreluje se subjektivním vjemem *prostorovosti zvuku* – čím menší je jeho hodnota, tím větší je vnímaná prostorovost [60]:

Normalizovaná funkce interaurální vzájemné korelace ($IACF_{t_1,t_2}(\tau)$) je definována vzorcem [60]:

$$IACF_{t_1,t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}}, \quad (1.23)$$

kde p_l je impulsová odezva na vstupu do levého ušního kanálu a p_r je impulsová odezva na vstupu do pravého ušního kanálu.

Činitel interaurální vzájemné korelace ($IACC_{t_1,t_2}$) je pak dán rovnicí [60]:

$$IACC_{t_1,t_2} = \max|IACF_{t_1,t_2}(\tau)| \quad (1.24)$$

kde $-1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms}$. Hodnota 1 získaná z $1 - IACC_{t_1,t_2}$ pro $t_1 = 0 \text{ ms}$ a $t_2 = 80 \text{ ms}$ odpovídá maximálně difuznímu zvukovému poli.

Další parametry poslechové místnosti

Existuje celá řada dalších objektivních parametrů akustiky místností, které však pro účel simulace režijní místnosti nemají takový význam [29]. Návrh režijních místností prošel, v důsledku vývoje technologií a nových poznatků, řadou proměn, avšak vždy za stejným účelem. Jde o dosažení takového prostoru, v kterém je možné kriticky posuzovat hudební signál, přičemž je žádoucí mít možnost napodobit podmínky poslechového prostředí posluchače ve smyslu ekvivalentního elektroakustického řeťežce. To konkrétně znamená jak akustiku prostoru, tak elektromechanické vlastnosti zdrojů zvuku [59].

1.2 Auralizace

Auralizace je proces „zvukového vykreslení“ (acoustical rendering) zvukového pole daného zdroje v prostoru tak, aby, za pomoci fyzikálního, či matematického modelování, simuloval *binaurální* poslechovou zkušenost v daném místě modelovaného prostoru [19].

Oproti zraku dokáže zvuk zprostředkovat plně *ponořující* (*immersive*) prožitek, protože ho lze vnímat ze všech směrů zároveň. Dozvuk, který zprostředkovává dojem prostoru spolu s relativní pozicí zvukového zdroje, představuje určité prostředí které je možné pomocí technologie zachytit, či i synteticky vytvořit. Při reprodukci tohoto akustického prostředí za pomoci reproduktorů, či sluchátek pak mluvíme o *virtuálním poslechovém prostředí*, jehož smyslem je nahradit, či rozšířit prostředí přirozené. V takovémto virtuálním prostředí spoléháme na naše analytické i psychoakustické schopnosti, pomocí kterých zvukové vjemy rozeznáváme a přiřkládáme jim význam [44]. Sluchové vjemy jsou komplexním fenoménem, určeným fyziologií sluchového ústrojí a postiženém *poznávacími* (*cognitive*) *procesy* – to znamená, že zvuk posuzujeme nejen dle objektivních kritérií, odvoditelných z fyzikálních zákonů, ale také podle našich zkušeností.

Binaurální techniky zvukové reprodukce využívají přirozených lidských *prostorových sluchových podnětů* (*spatial auditory cues*) k vytvoření takového virtuálního

prostředí, které při poslechu přes reproduktory, či sluchátka vytváří dojem vjemu z „první osoby“. Jsou řešením pro zajištění takové prostorovosti zvuku, která je nejbližší reálnému poslechu [45].

V této práci se zabývám reprodukcí přes sluchátka, což je řešení finančně mnohem dostupnější, než akustické úpravy poslechové místnosti, které – jak bylo ukázáno – v reálných prostorech někdy ani nelze provést s uspokojujícím výsledkem. V roce 2013 dosáhly celosvětové prodeje sluchátek 8,2 miliard dolarů [41].

Sluchátka jsou také ideálním prostředkem, jak individuálně řídit akustický tlak budící jednotlivé ušní bubínky, v co možná nejkratší vzdálenosti od nich. Tím odpadá nutnost reprodukovat signál z přesně té pozice, kde byl zaznamenan – je ovšem nutné tuto neshodu pozice kompenzovat. Protože však reálné vysílače nejsou akusticky transparentní, je třeba také kompenzovat frekvenční odezvu sluchátek a akustickou impedanci ušního kanálu, která je nošením sluchátek ovlivněna [38].

Poslech hudby na sluchátka, jejichž frekvenční odezva je kompenzována, při aplikaci impulsní odezvy upravené poslechové místnosti, využívající přesných monitorovacích reproduktorů se ukazuje jako nejpreferovanější při srovnání s nekompenzovanými sluchátky [41].

1.2.1 Princip zvukové lokalizace

Sluchové prostorové vnímání (lokalizace zdroje zvuku) představuje schopnost lokalizovat individuální zvukové zdroje v trojrozměrném prostoru i za současné přítomnosti více zdrojů. Prostorová informace není reprezentována přímo smyslovým receptorem sluchového ústrojí, nýbrž integrací *nervových binaurálních vlastností* (*neural binaural properties*) a kmitočtově závislou filtrací ušním boltcem [63]. Zvuk ze všech směrů působí na bubínek společně, a tak lokalizace sluchem probíhá nepřímým způsobem. Samotná schopnost lokalizace se vyvíjí během života jednice a je závislá také na zkušenostech a na spojování sluchových vjemů se zrakovými.

Lokalizace v horizontální rovině

Pozice zdroje zvuku je nejčastěji vyjadřována za pomoci azimutu, elevace a vzdálenosti, prostřednictvím souřadnicového systému, kde poloha posluchače v poloze čelem přímo vpřed je definována úhlem azimutu 0° a úhlem elevace 0° . Azimut je definován úhlem θ , který svírá pozice zdroje se střední (mediální) rovinou při pohledu na horizontální rovinu. Vzhledem k tomu, že pro blízký poslech je doporučováno umísťovat reproduktory ve stejné horizontální rovině s ústím ušních kanálů (což vyplývá i z konstrukce reproduktorů), budu předpokládat, že je žádoucí být vždy v ideální poslechové pozici a není nutné se elevací zabývat. Azimuty napravo

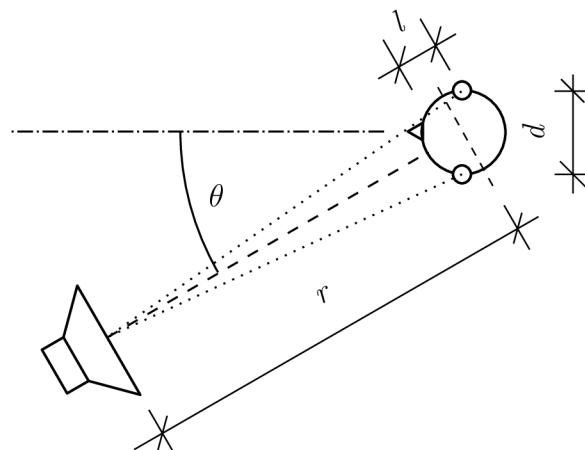
od posluchače jsou kladné, vlevo záporné a přesně vzadu je azimut definován jako 180° . Vzdálenost je definována jako poloměr r , promítnutý podél vektoru, který tvoří azimut a elevace zdroje.

Dalším důležitým terminologickým rozlišením relevantním pro „meziušní“ (*interaural*) vjemy jsou pojmy *ipsilaterální* a *kontralaterální* ucho. Ucho ipsilaterální je nejbližší zdroji zvuku a ucho kontralaterální nejdále od něj.

Na obrázku 1.13 je také zobrazena vzdálenost uší (d), pro kterou se při výpočtech často používá hodnota 15 cm. Norma [28], která slouží jako doporučení pro rozměry umělé hlavy určené pro telefonometrii, uvádí přípustné rozmezí hodnot 147 až 154 mm. V příloze uvádím tabulku (A.5) s doporučenými rozměry umělého torza HATS (Head and Torso Simulator), rozšířenou o sloupek s rozměry „no-name“ umělé (ženské) hlavy určené pro vystavování klobouků, kterou lze sehnat za cca 150 Kč na tržnici.

Rozdílnou vzdálenost uší od zdroje zvuku při pozici s nenulovým azimutem znázorňuje *binaurální rozdíl vzdáleností* l . Tento rozdíl vzdáleností způsobuje, že signál zdroje se dostane k jednotlivým ušním bubínkům s rozdílnou úrovní a v rozdílném čase, což popisují *lokalizační podněty*.

Všechny lokalizační podněty jsou kmitočtově závislé. Pro matematický popis přenosové funkce, pomocí které lze zdroj v prostoru vůči pozici posluchače popsat, je vhodné buzení impulsem. Při subjektivním vyhodnocování pozice zdroje člověkem je situace jiná a ukazuje se, že nejpřesnějších odhadů se dosahuje při testování za pomoci bílého šumu, kde se energie projevuje na všech slyšitelných kmitočtech [57]. Ukazuje se také, že k přesné lokalizaci je zapotřebí všech lokalizačních podnětů.



Obr. 1.13: Rozdíl vzdálenosti uší od zdroje zvuku.

Interaural Time Difference (ITD)

Podnět interaurálního časového rozdílu vyplývá z kratší dráhy, kterou musí zvuková vlna zdroje urazit do ipsilaterálního ucha a vztahuje se ke schopnosti zvukového ústrojí rozpoznat interaurální fázové rozdíly (IPD) přibližně do kmitočtu 1000 Hz. Pro harmonické signály se ITD vztahuje k IPD jen za pomoci činitele kmitočtu. Posune-li se vzájemně fáze zvuku dopadajících na obě uši, je zvuk vnímán na straně toho ucha, v němž fáze zvuku předbíhá a posune-li se fáze více než o polovinu trvání periody, pak zvuk přeskočí do druhého ucha. Při rychlosti zvuku ve vzduchu $344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ to při průměrné velikosti hlavy odpovídá přibližně maximálnímu rozdílu $650 \mu\text{s}$, po jehož překročení je již signál vnímán jako dva rozdílné zvuky, každý v jiném uchu [50] [44].

Výzkum prokázal, že lidé jsou schopni užít podnětu ITD pro kmitočty až do 1400 Hz, přičemž při lokalizaci širokopásmového signálu je situace ještě složitější a vliv mají kmitočty až do 4000 Hz. Obecně je ITD dominantním podnětem při laterální lokalizaci signálu obsahujícím frekvenční složky pod cca 1500 Hz, nicméně signál filtrovaný dolní propustí o mezním kmitočtu 500 Hz je lokalizovatelný už jen těžko (úspěšnost 67 %). Dále se ukazuje, že schopnost lokalizace zdroje o vysokých kmitočtech se zhoršuje, pokud je zároveň přítomen zdroj rušení, který rychle pulsuje na nízkých kmitočtech (například hudební nástroj v jiné pozici v prostoru), což ovšem neplatí recipročně [57] [44].

Interaural Intensity Difference (IID)

Často uváděný také v jednotkách dB jako *Interaural Level Difference (ILD)*, vzniká především útlumem zvukové vlny v důsledku akustického stínu hlavy, při odchýlení zdroje od mediální roviny. Útlum vznikající při šíření zvukové vlny prostředím je ve větší vzdálenosti od zdroje zanedbatelný.

Akustický stín vzniká jen pro kmitočty, jejichž vlnová délka je menší, než průměr hlavy, což bude platit pro kmitočty vyšší než přibližně 2000 Hz. Útlum akustickým stínem roste spolu s kmitočtem; při pozici zdroje s azimutem 90° vyzařujícím harmonický signál o kmitočtu 3000 Hz činí útlum cca 10 dB, pro kmitočtet 10000 Hz útlum činí již zhruba 35 dB – tato závislost může být značně odlišná pro různé azimuty a kmitočty [57].

Nezávisle na frekvenčním obsahu signálu, se změny v celkových rozdílech mezi hladinou intenzity u jednotlivých ušních bubínků interpretují jako změny pozice zdroje zvuku z perspektivy posluchače. IID slouží jako lokalizační podnět i pro nižší kmitočty a může zprostředkovat celkově lepší lokalizaci, avšak je získáván především z vysokých spektrálních složek. Lokalizace zdroje obsahující pouze vysoké kmitočty

je obtížná podobně jako jako je tomu v případě zdroje o nízkých kmitočtech u podnětu ITD. Pro lokalizaci v horizontální rovině je nezbytné, aby signál obsahoval frekvenční složky o kmitočtech 2000 až 12000 Hz. Díky značnému vlivu akustického stínu je možná lokalizace širokopásmového zvuku i monaurálně (jedním uchem), a to především díky předchozím zkušenostem [57]. Minimální poslechový úhel (diskriminační práh) je malý (kolem 1°) pro nízké a vysoké kmitočty a velký (10° i více) pro kmitočty mezi 1500 a 2000 Hz [55].

Přestože existují silné důkazy o vlivu vizuální informace na sluchové vjemy, prostorové lokalizace jsou schopni i lidé, kteří vizuálního vjemu schopni nejsou. Vizuální vjem je však při odhadu vzdálenosti dominantní. Přesnost odhadu vzdálenosti za pomoci jen sluchových podnětů souhlasí s fyzickou pozicí zdroje jen do vzdálenosti přibližně jednoho metru a se zvyšující se vzdáleností je odhad podceňován. Tento odhad lze zpřesnit při pohybu posluchače v prostoru, kde se zdroj nachází, či podvědomých pohybech hlavy, při kterých se uplatňují podněty ITD a ILD – to ovšem při poslechu hudby nenastává, protože zvuková scéna je typicky stacionární a není doplněna virtuálním vizuálním prostředím [29].

Tento fenomén je nejspíše příčinou extrémů při produkci populární hudby, kdy je preferována buď relativně velká doba dozvuku, která představuje pozici posluchače v difúzním poli, kde se neurčitost vzdálenosti zdroje nejeví jako rušivá, či naopak internalizace zvukové scény „dovnitř hlavy“, která se o realistické ztvárnění akustiky prostoru ani nesnaží a spoléhá na návyk posluchače na estetiku konkrétního hudebního žánru.

Spektrální podněty

Každá jedna konkrétní hodnota podnětů ITD a IID neodpovídá jednomu unikátnímu směru lokalizovaného zdroje, ale množině směrů, obkružujících interaurální osu ve zhruba laterální vzdálenosti od mediální roviny a tvoří takzvaný *kužel zmatení* (*cone of confusion*). Pro zdroje, které mají identické, či skoro identické hodnoty ITD nebo IID může dojít k záměně vnímané polohy v rámci koronální (oba ušní kanály protínající) a mediální roviny. K určení polohy zdroje zvuku vpředu/vzadu a v mediální rovině (nahore/dole) nepostačují při statickém stavu hlavy (tedy když se nepohybuje) jen již uvedené podněty a pro *externalizaci* zvukového vjemu jsou nutné další mechanismy analýzy. Těmi jsou spektrální podněty tvořené směrově závislou kmitočtovou filtrací, která nastává při odrazu dopadajícího zvuku od vnějšího ucha, hlavy a ramen [57].

Tyto spektrální podněty se projevují pouze když zvuk zdroje obsahuje kmitočty vyšší, než zhruba 4000 Hz. Kužel nejistoty se rozšiřuje, když posluchač nemůže hýbat hlavou a ve zvuku nejsou přítomny spektrální složky vyšší, než 7000 Hz, kde vlnové

délky zhruba odpovídají antropometrickým rozměrům částí vnějšího ucha, u kterých dochází k destruktivním interferencím, které filtraci způsobují [9]. Pohyb hlavy lze ve virtuálních prostředích simulovat za pomoci *sledovače pohybu hlavy (head-tracker)*, což je v tuto chvíli záležitostí spíše videoher a představuje nezanedbatelné finanční nároky na vybavení a technické znalosti jak interpreta, tak posluchače (alespoň prozatím). Pohyby hlavy jsou dokonce natolik důležité, že pro stacionární zdroj lze spektrální podněty obou uší navzájem prohodit se stejným výsledkem [57]. Je tedy možné využít stejnou impulsní odezvu pro obě uši.

Další podněty

Prostorové podněty mohou být zkreslené dozvukem, na druhé straně může poměr přímé a odražené energie poskytovat další prostorový podnět, někdy označovaný jako *dozvukový podnět*.

Podle toho, v jakém druhu pole se posluchač nachází, může dojít ke změně vjemu vzdálenosti zdroje. V difúzním poli dochází ke zvětšení *zdánlivé šířky zdroje*.

Posluchač musí předem znát spektrum daného zdroje, aby byl schopný rozpoznat změnu jeho polohy, díky frekvenční charakteristice filtrované jeho, či její strukturou vnějšího ucha. Pokud dojde k selhání externalizace a zdroj je vnímám „uvnitř hlavy“, mluvíme o *Inside-the-head locatedness (IHL)*. Ukázalo se, že zásadní roli pro odstranění tohoto problému hraje použití přesné repliky hlavy a vnějšího ucha při měření, ale také ekvalizace sluchátek pro volné pole, namísto difúzního [44].

Na základě velikosti poslechového prostoru rozlišujeme *podněty týkající se prostředí (Environmental Context Cues)*. Tyto souvisí s distribucí raných odrazů v časové rovině a dobou dozvuku. Různé časově/prostorové vzory, především ve vnitřních prostorech, mohou ovlivnit vjem vzdálenosti a šířku zdroje. Pro popis se často používá parametr $IACC_{t_1, t_2}$ a pro akustiku hudebních hal existuje poměrně rozsáhlý výzkum [6] věnující se této problematice.

Informace poskytnuté *pozdním dozvukem* dotvářejí vjem velikosti prostoru. Patrné jsou především při vypnutí zdroje, kdy lze slyšet pokles dozvuku až nízké hodnoty akustického tlaku, přičemž při hudebním signálu populární hudby lze čekat pokles kolem pouhých 10 dB.

Z toho vyplývá důležitost zkušenosti pro subjektivní hodnocení kvality zvuku. Výzkum také dokládá, že vjem elevace a relativní vzdálenosti, které silně závisí na spektrálních podnětech jsou nejlépe odhadovány pro zdroje se známým obsahem jako je například mluvené slovo [44].

V tuto chvíli se sice zdá, že problematika IHL nelze bez zařízení sledující pohyb hlavy (Head-Tracker) řešit, zároveň už ale existuje návyk posluchačů a IHL je mnohdy brán jako součást žánru [40].

Mnou navrhovaný přípravek by tak stále měl být schopný posloužit buď jako náhrada poslechové místnosti, nebo případně jako zvukový efekt při produkci určené přímo na poslech na sluchátka.

1.2.2 Princip binaurálního poslechu

Binaurální technologie napodobuje lokalizaci zvuků člověkem. *Binaurální kódování zvukové scény* spočívá buď v pořízení nahrávky, či simulaci akustického tlaku u vstupu do ušního kanálu posluchače [38]. Těmito způsoby získané signály obsahují veškeré informace, které sluchové ústrojí potřebuje k identifikaci zvukového zdroje. Binaurální kódování je založeno na syntéze lokalizačních podnětů, které byly uvedeny.

Protože bude auralizace realizována číslicovým systémem, považuji za vhodné nejprve uvést definici *impulsní odezvy*.

Impulsní odezva

Uzavřený prostor, ve kterém se šíří zvuková vlna a dochází k jejím odrazům a ohybu, lze z hlediska zpracování signálu považovat za systém s několika vstupy a výstupy. Vstupy tohoto systému jsou zdroje zvukového signálu a výstupy jsou přijímače zvukového signálu, tj. mikrofony nebo uši posluchače.

Změny tlaku vzduchu na slyšitelných kmitočtech jsou děje *adiabatické* a lze u nich uplatnit *princip superpozice*. Z toho důvodu lze pro analýzu akustického prostoru využít metod analýzy lineárních časově invariantních systémů (LTI), jako je kmitočtová nebo přechodová charakteristika, přenosová funkce, atd.

Nejčastěji se používá *impulsová charakteristika*, ta popisuje systém, který simuluje šíření zvukových vln v akustickém prostoru s daným počtem vstupů a výstupů. V případě binaurálního poslechu se jedná o systém se dvěma vstupy a dvěma výstupy. Tvar impulsové charakteristiky akustického prostoru popisuje *logaritmická obálka impulsní odezvy* E [dB]. U LTI systémů nám impulsní odezva dá, pokud nedošlo k nelineárnímu zkreslení, vždy všechny informace o odezvě na jakýkoli vstupní signál.

Doba dozvuku souvisí s odrazy v uzavřeném prostoru, a proto lze předpokládat, že bude souviset i s odezvou na *Diracův impuls*. Tuto myšlenku rozvinul Schröder v šedesátých letech minulého století a zavedl definici doby dozvuku vypočtené na základě impulsové odezvy. Je-li uzavřený prostor vybuzen akustickým Diracovým

impulsem, potom z časového průběhu akustického tlaku p (impulsové odezvy) v daném bodě určíme pokles energie dozvuku E_t podle vztahu [15]:

$$E = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau . \quad (1.25)$$

Zavedeme-li označení

$$E_t = \int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau , \quad (1.26)$$

můžeme pro pokles hladiny akustického tlaku odpovídající poklesu energie dozvuku odvodit vztah 1.28, přičemž předpokládáme, že vybuzenému stavu odpovídá hladina 0 dB.

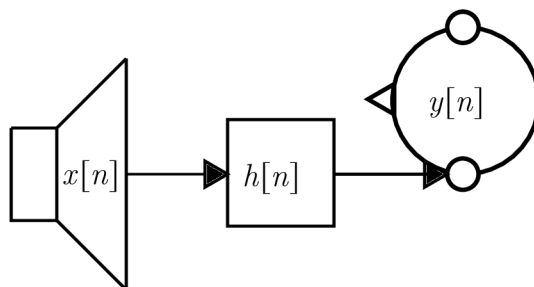
Doba dozvuku je potom určena přímkou se směrnici b , proloženou *dozvukovým poklesem* $D(t)$ (známým také jako „Schröderův integrál“) v úseku mezi hladinami $D = -5$ dB až $D = -65$ dB s tou podmínkou, že dolní hladina musí být minimálně 10 dB nad úrovní hladiny hluku pozadí [50]:

$$RT_{60} = \frac{-60}{b} \quad (1.27)$$

Dozvukový pokles $D(t)$ je definován takto [50]:

$$D(t) = 10 \log \left(1 - \frac{E_t}{E_{\infty}} \right) \quad (1.28)$$

Zjednodušený model pro jeden zdroj a jedno ucho je znázorněn na obrázku 1.14.



Obr. 1.14: Jednoduché blokové schéma elektroakustického řetězce.

Platí pro něj vztah [54]:

$$y[n] = x[n] * h[n], \quad (1.29)$$

kde $x[n]$ je vstupní signál, $h[n]$ je impulsová odezva a $y[n]$ je výstupní signál.

Konvoluci impulsních odezev odpovídá po *transformaci do spektrální oblasti* prosté násobení. Platí-li $h[n] \Leftrightarrow H[k]$, potom frekvenční charakteristiku výsledného signálu získáme, po použití jednostranné transformace \mathcal{Z} , pomocí vztahu [54]:

$$Y[k] = X[k] \cdot H[k] \quad (1.30)$$

Head-Related transfer Function (HRTF)

Kombinace ITD, IID a charakteristik spektrálního zabarvení jsou zachyceny v *přenosové funkci vztahované k hlavě* (HRTF). Přesná povaha tohoto filtru může být změřena jednoduchým experimentem, v kterém je reproduktorem, umístěným v určité pozici vyslán impuls. Změny v tomto signálu jsou měřeny pomocí záznamu malými mikrofony v pozicích ústí ušního kanálu jednotlivých uší. Pokud je měření provedeno v obou uších naráz, takto získané odezvy představují filtry, které obsahují interaurální rozdíly. Tato technika umožňuje změření relevantních prostorových podnětů pro danou pozici zdroje a posluchače v daném prostoru.

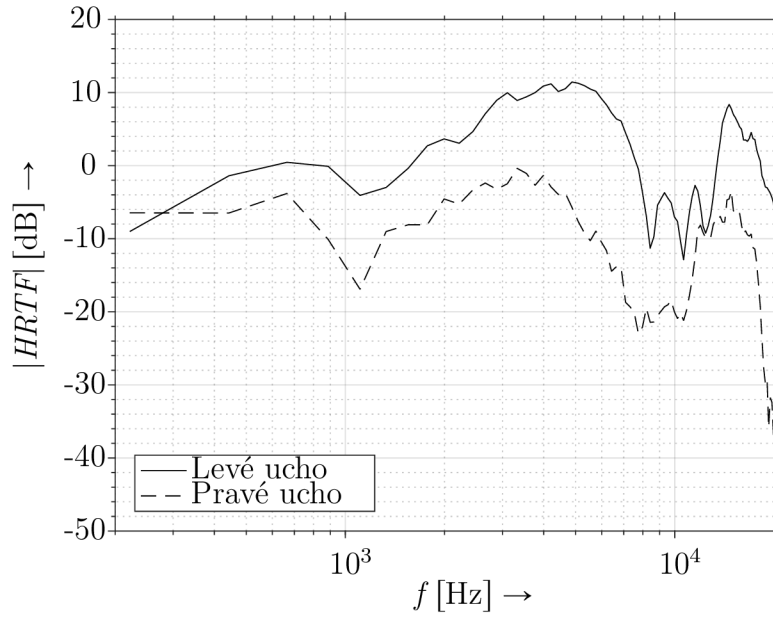
Takto získané filtry představují *filtry konečné délky* (FIR), a často jsou označovány jako *Head-related impulse responses* (HRIR) v časové rovině a jako HRTF v rovině kmitočtové. Filtrace ve frekvenční rovině probíhá pomocí *Hadamardova součinu*, který představuje násobení dvou matic (nebo v našem případě vektorů) o stejném rozměru po složkách a filtrace v rovině časové se provádí pomocí konvoluce dvou posloupností představujících filtrovaný signál a HRIR.

Graf 1.15 znázorňuje přenosovou funkci dvou uší pro jednoho konkrétního jedince získanou z databáze *The CIPIC HRTF Database – a public-domain database of high-spatial-resolution HRTF measurements*. <https://www.ece.ucdavis.edu/cipic/spatial-sound/hrtf-data/> (CIPIC). Lze na něm rozpoznat vliv ILD, především na kmitočtech cca 2 až 8 kHz a vliv SC na kmitočtech od cca 8 kHz výše.

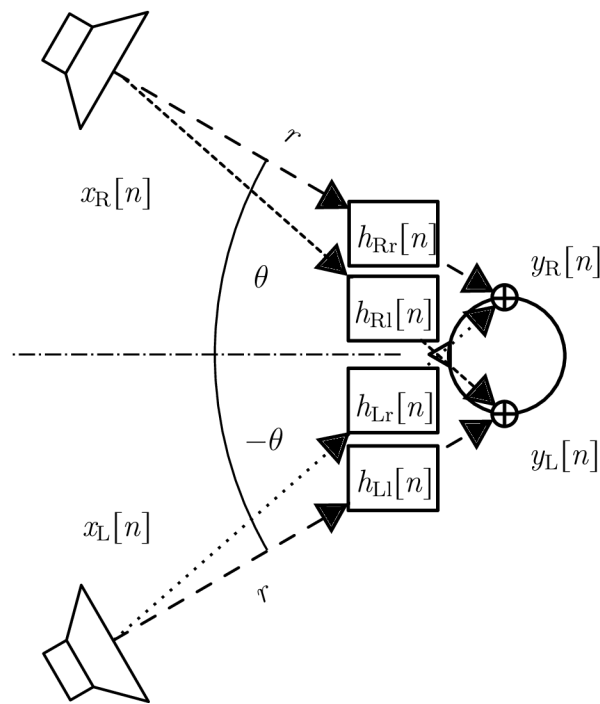
Binaural Room Impulse Response (BRIR)

Zachycená kombinace charakteristik reproduktorů, akustiky místnosti a posluchačovy HRTF tvoří *binaurální impulsovou odezvu místnosti* a tvoří systém s mnoha vstupy a výstupy (MIMO). Reprodukce více, jak jednoho virtuálního zdroje při poslechu na sluchátka vytvoří virtuální *phantom image*, odpovídající obrazu, který by byl vnímán ze skutečných reproduktorů v místnosti.

Při implementaci je potřeba zpracovat signály jednotlivých zdrojů zvlášť, přičemž každý zdroj je třeba filtrovat odpovídající impulsovou odezvou náležející tomuto uchu. Náš případ znázorňuje obrázek 1.16.



Obr. 1.15: HRTF pro zdroj s azimutem -45° a elevací 0° .



Obr. 1.16: Znázornění virtuálních zdrojů za pomoci BRIR.

Výsledný signál je tedy součtem konvoluce levého zdroje s odpovídající impulsní odezvou a pravého zdroje s odpovídající impulsní odezvou pro každé ucho zvlášť, což podstatně zvyšuje výpočetní nároky na přípravku. Pro signál v levém uchu uvádím rovnici 1.31:

$$y_L[n] = x_L[n] * h_{L1}[n] + x_R[n] * h_{R1}[n], \quad (1.31)$$

1.2.3 Kompenzace lineárního zkreslení

Všechna zařízení elektroakustického řetězce mají svou vlastní kmitočtovou charakteristiku, která může signál ovlivnit. Použité mikrofony, reproduktory, před-zesilovače, analogově–digitální a digitálně–analogové převodníky a jakékoli další použitá zařízení tak musí být pečlivě zkalibrována. Je žádoucí, aby tyto články řetězce měli lineární přenosovou charakteristiku a jejich vliv v řetězci tak mohl být zanedbán spolu s vlivem režijní místnosti. Jinými slovy – každá reálná sluchátka filtrují reprodukováný signál a různým způsobem ovlivňují signál v různých částech frekvenčního spektra.

Pokud toto zjednoduší platí, lze zaznamenaný (či slyšený) signál reprezentovat tímto vztahem 1.32:

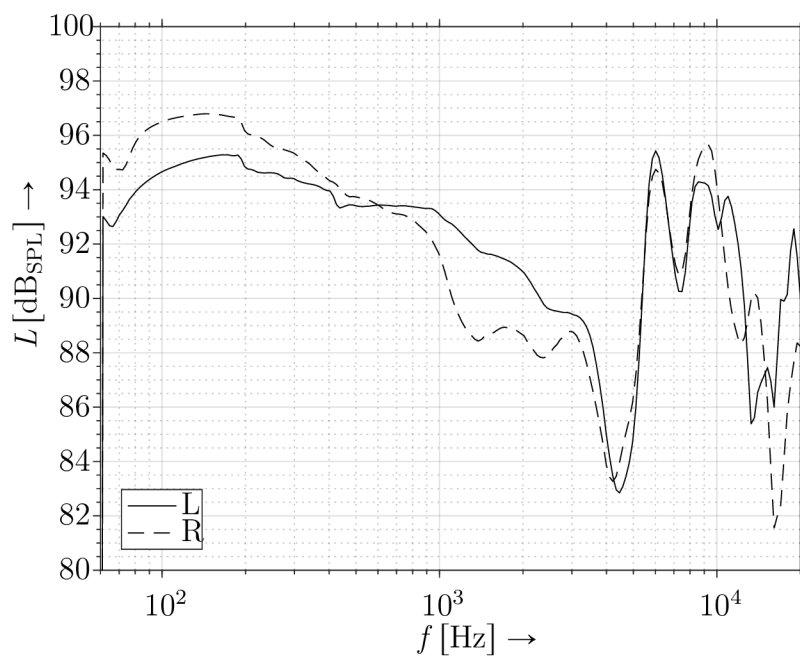
$$Y(\omega) = X(\omega) \cdot S(\omega) \cdot H(\omega), \quad (1.32)$$

kde $Y(\omega)$ je zaznamenaný signál, $X(\omega)$ je signál zdroje, $S(\omega)$ je přenosová funkce sluchátek a $H(\omega)$ je HRTF.

Na přenosovou funkci může mít vliv například i *směrová charakteristika* reproduktoru – úroveň hladiny akustického tlaku je závislá na frekvenci a azimutu od *akustické osy* reproduktoru. Charakteristika je typicky směrovější s rostoucí frekvencí a tak při pozici posluchače mimo *sweet-spot* (což je ideální pozice poznačená na obrázku 1.10). Mimo tuto ideální pozici se tak lze dostat velmi snadno, například při pouhém nahnutí se nad mixážní pult, či obsluze jiného zařízení. Tento problém však při použití sluchátek neexistuje, což je jedna z výhod jejich použití.

Tyto parametry byly při získávání HRTF do databáze CIPIC kompenzovány [3] a tak je použitá HRTF těchto vlivů zbavena. Stejný problém ovšem představuje poslech na sluchátka při použití přípravku. Proto získanou přenosovou funkci sluchátek zohledňuji jejím násobením v kmitočtové rovině s HRTF. Přenosovou funkci sluchátek jsem získal měřením v Laboratoři Elektroakustiky dle doporučení IEC 60268-7:2010(E), za použití binaurálního simulátoru hlavy a torza Brüel & Kjær 4100 a měřícího zařízení Audio Precision APx525 v bez–odrazové komoře laboratoře.

Frekvenční modulová charakteristika měřených sluchátek, která používám je uvedena v grafu 1.17:



Obr. 1.17: Modulová kmitočtová charakteristika Beyerdynamic DT 880pro.

2 Návrh algoritmu

2.1 Programové řešení

K řešení zadání jsem přistoupil tak, že pro účel nahrazení reálné místnosti je nejprve definovat, jak v čem akustika takové místnosti spočívá.

Za využití odborné literatury jsem reálnou místnost popsal a vytvořil několik skriptů v prostředí MATLAB, které tuto místnost analyzují. Po provedení simulací jsem také ukázal, že pro malé, běžně dostupné místnosti mohou být běžné akustické úpravy často nedostačující a někdy ani požadované akustické vlastnosti v místnosti realizovat nelze. Díky simulacím vyšlo také najevo, jaký důvod mají doporučení týkající se poslechového prostoru a jeho uspořádání.

Z této části vyplynula požadovaná doba dozvuku, která pro uvedenou místnost činí 0,2s a je konstantní v celém kmitočtovém pásmu, což je především na nízkých kmitočtech prakticky nerealizovatelné a navíc to může být pro produkci některých hudebních žánrů i nežádoucí.

Další částí bylo nastudování problematiky auralizace, ze které vyplynuli procesy, který by měl přípravek provádět. Protože nebylo možné sehnat přípravek, který by byl pro implementaci přímo určený, a to ani přes komunikaci s řadou společností, zabývajících se výrobou *Digital Signal Processor* (DSP), zvolil jsem pro ověření návrhu vývojový kit.

2.1.1 Vývojový přípravek TMDSDSK6416

Pro test implementace algoritmu jsem z ryze praktických důvodů (byl k zápůjčení od fakulty) zvolil vývojový kit od společnosti Texas Instrument, a to konkrétně TMS320C6416 DSP Starter Kit (DSK) (TMDSDSK6416). Jedná se o již poměrně drahé zařízení v hodnotě cca 12000 Kč. To je sice nevhodné z hlediska dostupnosti, nicméně zaručuje funkcionalitu a výkon.

Vývojový přípravek TMDSDSK6416 užívá digitální signálový procesor Texas Instruments TMS320C6416T. Ten pracuje s pevnou desetinnou čárkou, avšak pro profesionální zvuková zařízení je se zpravidla používají datové typy s plovoucí desetinnou čárkou (typicky 32bit float), které poskytují větší dynamický rozsah a také menší zaokrouhlovací chyby. Procesor je taktovaný na frekvenci 1GHz.

DSP jsou navrženy pro rychlé a efektivní zpracování číslicových signálů v reálném čase.

Pro vytvoření kódu algoritmu, který přípravek prováděl jsem využil integrované vývojové prostřední Code Composer Studio (CCS), které program kompilovalo z

programovacího jazyka C do assembleru. Kvůli výkonu je však třeba algoritmy často přímo v assembleru ručně optimalizovat.

2.1.2 Test algoritmu na vývojovém kitu

Princip binaurálního poslechu byl popsán výše. Zatímco teoreticky není sestavení požadovaného algoritmu až tak složité, problémy se objevili při samotném testování ve vývojovém kitu. Pro číslicové zpracování akustického signálu v reálném čase jsem zvolil postup s využitím vstupního bufferu. Po jeho naplnění se zpracovává celý blok signálu najednou.

Tento způsob blokového zpracování je však nezbytný při použití algoritmů využívajících výpočtu FFT a s jeho pomocí lze také využít pokročilé techniky paralelního zpracování dat (čímž se tato práce nezabývá).

Kvůli vysokým výpočetním nárokům jsem byl nucen provést několik úkonů, které upravili HRIR získanou z databáze CIPIC. Tak aby byl splněn *Nyquistův teorém*, a zároveň signál obsahoval všechny slyšitelné spektrální složky je třeba použít vzorkovací kmitočet alespoň 44,1 kHz, což výpočetní nároky zvyšuje.

- HRIR měla délku 200 vzorků (což odpovídalo délce 4,5 s), tato délka byla snížena na 64 vzorků. V důsledku toho upravená odezva přišla o informace na kmitočtech 200 až 700 Hz. Vzhledem k tomu, že se předpokládá poslech v přímém poli ve vzdálenosti 1,7 m, pokládal jsem úbytek energie na nízkých kmitočtech – v řádu jednotek decibel – vlivem podnětu ILD za zanedbatelný.
- Zkrácením odezvy zároveň došlo k vyhlazení spektra, a to především na vysokých kmitočtech. Dle dostupného výzkumu [45] je však takovéto vyhlazení zanedbatelné, protože lidský sluchový systém vyhlazování provádí sám o sobě.
- Hodnoty impulsní odezvy bylo nutné normalizovat tak, aby byly v rozsahu -1 až 1. Pro hodnoty rovné 1 poté byla odečtena 1 aby nedocházelo k přetečení při zpracování testovacím kitem. Tím sice klesla úroveň signálu, ale konstantně a tak byly zachovány kmitočtové vlastnosti [53].
- Vzdálenost od zdroje (1,7 m) je do odezvy implementována pomocí vsazených vzorků s hodnotou 0. Při rychlosti $344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ to bude představovat zpoždění 0,005 s. Toto zpoždění je jen stěží postřehnutelné a tak ho zanedbávám.

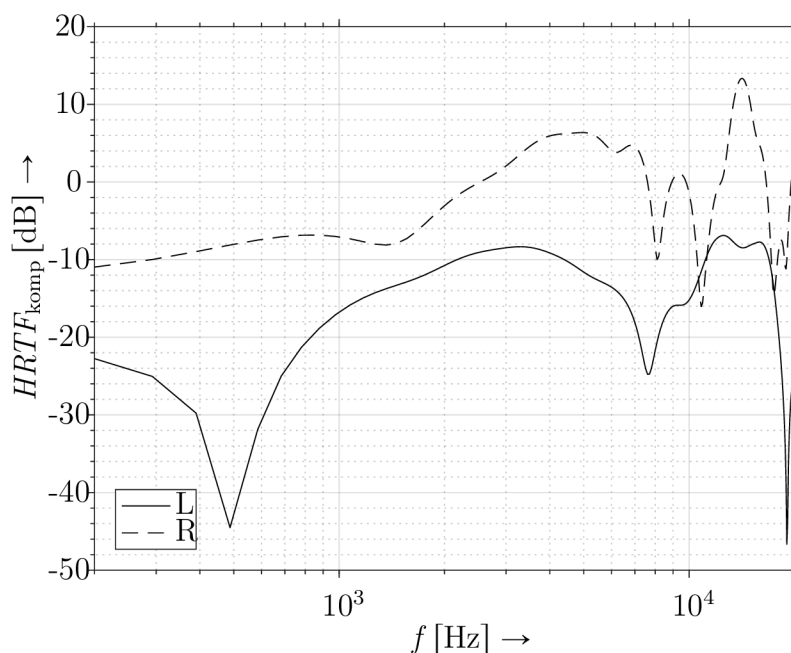
Při testování se ukázal značný vliv individuálních HRTF z databáze CIPIC na schopnost lokalizace zdroje. Pro dosažení alespoň přibližného vjemu lokalizace proto bylo nutné použít do obou uší stejnou (symetricky) odezvu. Pokud tedy posluchač nemá možnost pořídit si svou vlastní HRTF, je mnohem lepší použít odezvu umělé hlavy. Toto řešení vykazuje mnohem lepší výsledky než HRTF jiného jedince.

Abych co nejvíce vyhověl zadání, rozhodl jsem se řešit kompenzaci alespoň staticky, a to předzpracováním kompenzované odezvy v prostředí MATLAB.

Použil jsem dříve naměřenou frekvenční charakteristiku sluchátek a tuto charakteristiku jsem transformoval do časové oblasti. Pro užití koeficientů ve smyslu FIR filtru bylo ovšem nutné odezvy upravit. Vzhledem k tomu, že do jednoho ucha by měla být aplikovaná vlastně dvakrát tak jsem hodnoty posloupnosti nejdříve vydělil dvěma.

Takto získané odezvy byly nejdříve normalizovány a potom byla provedena jejich konvoluce. Výslednou kompenzovanou odezvu jsem ještě upravil tak, aby se vešla do formátu Int16, tedy od hodnot rovným jedné jsem jedničku odečetl. Takto získané koeficienty již byly použitelné pro implementaci.

Jedna takto upravená odezva je zobrazena v grafu 2.1:



Obr. 2.1: Modulová kmitočtová charakteristika kompenzované HRTF.

Již při letném pohledu je však vidět problémy spočívající ve značném poklesu na nízkých kmitočtech, které vznikly nejspíše díky způsobu provedení měření sluchátek, které bylo prováděno pouze pro informativní účely a naměřená charakteristika obsahovali i velmi nízké kmitočty, které již nedávali smysl, měli velmi nízkou hodnotu a ovlivnili tak nepříznivě výslednou podobu odezvy po konvoluci.

V příloze jsou použité skripty MATLABu a projekt ve vývojovém prostředí Code Composer Studio, kde lze algoritmus nahrát do přípravku.

2.1.3 Výsledky testu

Poznatky z testu jsou takové, že pro výpočty za pomoci konvoluce je zapotřebí značný výpočetní výkon, s čímž značně stoupá cena zařízení a je tedy zapotřebí

využít výpočtů za pomoci FFT. Při výpočtu využívající FFT je možno navržený algoritmus na tomto přípravku realizovat.

Provádění čtyř konvolucí v reálném čase bylo takto možné, bez značného zkreslení signálu, jen pro délku impulsní odezvy 64 vzorků (i přes relativně velký výpočetní výkon přípravku). Toto se mi povedlo implementovat, ale výkon už naneštěstí při takto malé délce odezvy nepostačoval pro věrnou auralizaci.

Dále se ukázalo, že využití individualizovaných HRTF z volně přístupných databází je možné pouze za předpokladu zdoluhavých pokusů (kdy je třeba každou jednu osobně vyzkoušet) a to s ne zcela ideálním výsledkem a nabízí se tak téma na další práci, která by se zabývala získáváním HRTF. Jistého úspěchu lze dosáhnout s „defaultní“ odezvou umělé hlavy.

Kompletní kompenzace lineárního zkreslení sluchátek je možná pouze s odezvou získanou přímo za tímto účelem (tedy s respektem k vlastnostem použité HRTF, jako jsou frekvenční rozsah apodobně). Nabízí se možnost redukce lineárního zkreslení za pomoci FIR menšího řádu, který by toto řešil sice jen částečně, ale mohl by být použit pro více druhů sluchátek.

2.2 Vlastní řešení

Testovací fáze na vývojovém kitu v neposlední řadě poukázala na značnou finanční náročnost takového zařízení. Tato skutečnost spolu s existencí komerčně dostupných VST pluginů, které jsou dnes již schopné provádět auralizaci v reálném čase při práci v běžných DAW může odrazovat od pořízení hardwarového zařízení s DSP.

Na druhou stranu dnes také roste výpočetní výkon procesorů typu ARM, které jsou hojně využívány ve spojení s operačními systémy s otevřenou licencí jako je například projekt Raspberry Pi. Tyto jednočipové mini počítače zatím nejsou sami o sobě přímo určeny pro zpracování zvukových signálů v reálném čase, ale lze je použít k ovládání různých periferních nízkourovňových zařízení (*shield*, HAT), kterým může být například přídatná deska s DSP procesorem (či procesory), jejichž výkon se také neustále zvyšuje a to i levnějších segmentech trhu.

Z těchto důvodů jsem se rozhodl realizovat hardwarový přípravek jako rozšiřující desku pro *Raspberry Pi 3 Model B*, která by ovšem byla schopná fungovat i samostatně.

Typická sestava zařízení v domácím studiu se často omezuje na jednu externí zvukovou kartu, která obsahuje vstupní i výstupní převodníky a komunikuje se stolním počítačem, ve kterém probíhá mix i úprava digitalizovaného zvukového signálu. Zvuková karta komunikuje s počítačem nejčastěji pomocí sběrnice USB, či Thunderbolt (dříve také často FireWire), velmi často však zůstávají nevyužité vstupy a výstupy

standardu S/PDIF (který často využívá nesymetrického vedení koaxiálním kabelem, ovšem u některých karet také vedení optické).

Protože S/PDIF přenáší digitální signál, odpadá v připojeném zařízení nutnost vstupních převodníků, což zlevňuje a zjednodušuje hardwarové řešení. Navrhované zařízení tedy koncipováno s digitálním vstupem a balancovaným stereo výstupem, který bude skýtat možnost připojení do zařízení se symetrickým i nesymetrickým analogovým vstupem (což lze zařídit vhodným kabelem), přičemž se očekává, že toto zařízení bude sluchátkový zesilovač, distributor, či jiné aktivní zařízení se sluchátkovým výstupem. Docílí se tak značné úspory ve vybavení studia.

2.3 Měření impulsové charakteristiky

K měření impulsových charakteristik se běžně používá metoda integrované impulsové odezvy s logaritmicky přeladovaným sinusovým signálem dle normy [15]. V teoretické části bylo popsáno lineární zkreslení a princip jeho kompenzace. Zatímco v teorii se řešení tohoto může zdát triviální, v praxi se naráží na řadu překážek. Dnes už není tak těžké pořídit všesměrové mikrofony s relativně rovnou frekvenční modulovou charakteristikou i v nižší cenové kategorii, stejně jako dostatečně kvalitní zvukové karty a software. Mnohem větší problém ovšem představuje umístění mikrofonů. Aby měření lineárního zkreslení poslechového řetězce (tedy charakteristiky sluchátek) mělo smysl, je třeba signál zaznamenávat při nasazených sluchátkách a to kvůli vlivu akustické impedance kavity vnějšího ucha ve spojení s kavitou samotných sluchátek a také nutností mít sluchátka přitisknutá jako při běžném poslechu.

K tomuto slouží specializované zařízení HATS, neboli umělá hlava s torzem. Podařilo se vytvořit takovéto zařízení a to relativně levně. Jako problém se však ukázali ušní boltece, které jsem byl schopen sehnat pouze s tvarovaným lalůčkem, díky kterému je potom naměřená odezva zkreslena, nelze však již určit nakolik. Vytvořit umělý boltec, který by splňoval požadavky normy [28] se mi v domácích podmínkách zatím nepodařilo. Zhotovené zařízení lze používat pro binaurální nahrávky, avšak již nikoli pro platná měření.

V zařízení využívám mikrofony SC4061-BM3 od společnosti DPA. Mikrofonní zesilovače jsou napájeny samostatným zařízením, které poskytuje fantomové napájení a pracuje na 9-ti voltové baterie. Signál lze pak zaznamenávat dalším externím záznamovým zařízením. Fotodokumentace tohoto zařízení je příloze C.1.

V praxi bude mnohem praktičtější využít přenosovou charakteristiku udávanou výrobcem sluchátek a kompenzovat ji ručně za pomoci DSP.

3 Realizace hardware

3.1 Návrh desky plošných spojů

Vlastní hardware jsem se snažil navrhnout tak, aby splňoval specifikace takzvaného *HATu* (Hardware On Top) [23] a zároveň šel vyrobit metodou DIY. Tyto dva požadavky se však navzájem z praktických důvodů vylučují.

Zatímco použitý DSP procesor a *Digital-to-analog converter* (DAC) převodník jsou v balení velikostí *Leadframe Chip Scale Package* (LFCSP) a *Quad flat no-leads package* (QFN) [35], které se ještě daří v domácích podmínkách osazovat na tištěný spoj, tak nejmenší velikost pouzdra pasivních *Surface-mount device* (SMD) součástek, kterou jsem ještě schopen ručně osazovat je 0805 [56]. Jejich velikost spolu s velikostí potřebných konektorů a možností si doma vyrobit desku s nanejvýše dvěma vrstvami měděné vrstvy vyloučili splnění požadavků na rozměry.

Pro možnost lepšího řešení do budoucna jsem ovšem zachoval pozice otvorů pro uchycení desky a pozici alespoň dolních 20 pinů hardwarového rozhraní *General-purpose input/output* (GPIO). Desku tak v tuto chvíli nelze připojit přímo k Raspberry Pi 3B (RPi) tak, aby byl vytvořen kompaktní celek, který by mohl být spolu v jedné krabici, lze ji však připojit alespoň kabelem.

Všechny soubory týkající se návrhu jsou součástí digitální přílohy práce. Příloha obsahuje pdf soubory se schémata zapojení, ale také samotný projekt návrhového softwaru a to včetně exportované knihovny použitých součástek a soupis součástek (BOM). Přiloženy jsou také dva soubory pdf na kterých ve čtyřech kopiích rozložení desky plošného spoje v měřítku (je nutný tisk bez okrajů) pro tisk masky k leptání. Samozřejmě jsou také připojeny gerber soubory pro případnou výrobu desky profesionální společností. Rozvržení desky je součástí sekce Přílohy k praktické části B.7, B.8 a B.9.

Návrh jsem prováděl v softwaru Autodesk EAGLE.

3.1.1 Datová rozhraní

GPIO

Toto rozhraní má 40 pinů, přičemž jejich počet lze rozšiřovat. Obsahuje rozhraní UART, sběrnici I²C, *Serial Peripheral Interface* (SPI), I²S audio, 3V3, 5V a zem. Zapojení k přípravku je popsáno v tabulce B.1. Piny GPIO jsou universální a jejich použití lze nastavit v RPi [22].

Rozvržení zapojení tohoto rozhraní je v příloze B.1.

S/PDIF

Přípravek je určený především k příjmu digitálního stereo signálu standardu *Sony/Philips Digital Interface* (S/PDIF) a to přes konektor RCA (CINCH) či přes optický konektor FCR6842031R (TOSLINK). U konektorů se nachází přepínač pro volbu vstupu.

Schémata zapojení jsou v přílohách zde B.4, B.5, B.6.

3.1.2 Procesory

Oba užití procesory mohou komunikovat po sběrnících SPI a I²C a jsou napájeny zdrojem 3,3 V. Zem je, dle doporučení výrobce, společná pro digitální i analogovou část. Zvuková data ve formátu *Pulse-code Modulation* (PCM) si mezi sebou předávají po sběrnici I²S.

DSP

Při výběru vhodného DSP mě zaujal všestranný ADAU1462 od Analog Devices [1].

Má celou řadu využití od automobilového průmyslu až po kytarové efekty a dle činnosti jeho výrobce v minulých letech snad bude skýtat možnost upgradu v budoucnosti, čímž mám na mysli možnost vyměnit tento procesor v přípravku za výkonnější ve stejném balení.

Jedná o 32bitový DSP s taktovací frekvencí 300 MHz, 80 kWords RAM, 6144 SIMD instrukcí za vzorek a 1600 ms digitálního zpoždění to vše při vzorkovací frekvenci 48 kHz.

Oplývá stereo S/PDIF vstupem/výstupem a dalšími čtyřmi sériovými vstupy/-výstupy. Navíc je přímo určen pro aplikace algoritmů prostorového ozvučení.

Mezi jeho nejzajímavější vlastnosti patří možnost programovat ho přes grafické vývojové rozhraní SigmaStudio, které může velmi usnadnit práci méně zkušeným uživatelům [51].

Schéma zapojení je v příloze B.2.

DAC

K převodu digitálního signálu na analogový slouží převodník PCM5242 od Texas Instruments [42].

Mezi jeho vynikající vlastnosti patří bitová hloubka až 32 bitů, dynamický rozsah 114 dB a celkové harmonické zkreslení se šumem THD+N -94 dB při -1 dBFS. Podporuje vzorkovací frekvenci až 384 Hz a má balancovaný výstup o úrovni $4,2 V_{\text{RMS}}$.

Integrovaný systém PLL odstraňuje potřebu systémového hodinového signálu, čímž se snižuje rušení.

Velmi zajímavou vlastnost skýtá integrovaný systém miniDSP (HybridFlow). Ten umožňuje například úpravu modulové kmitočtové charakteristiky za pomoci až 10-ti nezávislých digitálních filtrů druhého řádu, které lze programovat z grafického prostředí, které obsahuje pomůcku pro import frekvenční odezvy, dle které lze pak filtry nastavit [24].

Schéma zapojení je v příloze B.1.

3.1.3 Napájení

Přípravek lze napájet třemi způsoby: z RPi přes rozhraní GPIO, z programovacího rozhraní a nebo externím zdrojem s konektorem miniUSB při napětí 5 V. V každém případě se předpokládá existence DC/DC měniče mimo vlastní přípravek.

Všechny použité integrované obvody pracují při napětí 3,3 V.

Tuto napěťovou úroveň poskytuje LDO (Low dropout) napěťový regulátor ZLDO1117, který je schopen poskytovat až 1 A výstupního proudu.

Schéma zapojení je v příloze B.3.

3.2 Výroba

Přípravek jsem se rozhodl vyrobit v domácích podmínkách. To představovalo relativně velké počáteční náklady, protože jsem neměl řadu potřebných pomůcek. Na internetu se však nachází řada návodů, který výběr vhodného nářadí zjednodušili [20].

Postup byl následující:

- Vytvoření návrhu v EAGLU. Program ve volné verzi umožňuje vytvořit desku pouze o dvou vrstvách a maximálních rozměrech
- Tisk předlohy na průhlednou fólii, kde se ukázalo, že běžná domácí tiskárna tiskne s nepřesností v řádu desetin milimetrů, proto je dát pozor při vrstvení předloh na sebe. Tiskárna měla problém s tiskem tenkých cest, proto bylo třeba předlohu zkontrolovat a doplnit chybějící barvu tenkým lihovým fixem.
- Použil jsem jednostranné cuprexitové desky s fotocitlivou vrstvou a tloušťkou měděné vrstvy 35 μm . Ty jsem pak osvítil po domácku vyrobeným zařízením s UV-C zářivkami, které je o několik tisíc korun levnější, než komerčně dostupná zařízení C.2.

- Jako vývojku jsem použil roztok 1,5 % hydroxidu sodného a pro leptání cca 40 % roztok chloridu železitého. Po vyleptání se projeví problémy s kvalitou cest tloušťky 0,3 mm C.3. Některé bylo třeba ručně rozdělít škrábáním a některé doplnit měděnou samolepící páskou o tloušce 35 μm .
- Protože prokovy v deskách lze vytvořit pouze na specializovaném zařízení, bylo nutné po ručním vrtání otvorů desky propojit drátky.
- Poté bylo možné nanést pastovou pájku injekční stříkačkou s malým průměrem jehly. Použil jsem výrobek ALPHA®OM-5100 se složením 62Sn/36Pb/2Ag, která má bod tavení už při 180 °C. Poté bylo možné nanášet součástky a s použitím Flux pasty F-SW26 je připájet horkovzdušnou stanicí.

Tento postup vedl, kvůli nedostatečným mezerám mezi tenkými signálovými cestami, k nefunkčnímu výrobku. Předpokládám však, že s praxí by mi povedlo přípravek zhotovit i tímto způsobem. Při obhajobě diplomové práce bude předveden výrobek, který využívá profesionálně vyrobenou desku s plošnými spoji.

3.3 Programování

V rámci operačního systému Raspbian [43] již existují ovladače *Advanced Linux Sound Architecture* (ALSA) [2], díky kterým je možné komunikovat přímo se zařízením HAT a tak přípravek teoreticky skýtá i možnost mixu externího signálu se signálem z RPi. Tato práce se však komunikací s RPi nezabývá.

USBi

Přípravek lze programovat za pomoci programovacího zařízení, které není součástí návrhu. Výrobce DSP nabízí ke koupit přípravek EVAL-ADUSB2EBZ který lze k přípravku připojit pomocí 10-ti pinového konektoru. Toto rozhraní bývá označováno jako USBi lze pořídit za „pouhých“ 2200 Kč. Naštěstí existuje i alternativa v podobě zařízení freeUSBi [21], které lze koupit buď sestavené, či k sestavení za cca 650 Kč.

Díky přívětivému grafickému rozhraní výrobců použitých procesorů tak může být užívání přípravku celkem přívětivé i pro poučené uživatele, kteří nejsou přímo vývojáři DSP.

4 Závěr

Tato práce je zaměřena na simulaci poslechového prostoru pomocí auralizace impulsové odezvy a implementaci řešení v hardwarovém přípravku. Zvolený postup při řešení se odvíjí od požadavků kladených na režijní místnosti a reálné potřeby a možnosti zvukových techniků pohybujících se v nekomerčních hudebních okruzích. Práci jsem vypracoval takovým způsobem, aby mohla sloužit také jako informační materiál, protože jsem zatím nenarazil na česky psanou publikaci, která by se touto problematikou takovýmto způsobem zabývala, přičemž zájem o prostorový zvuk roste ve všech odvětvích od hudební produkce, přes divadlo až po videohry.

Hlavním problémem se ukázali být značné finanční nároky spojené s výrobou hardwaru. Tyto plynou z maloobchodních cen součástek, absence potřebného vybavení a časové náročnosti úkonů vedoucích k výrobě takového prostředku bez zázemí specializované firmy.

Při vyhotovování práce jsem hojně využil rozsáhlý záběr oboru Audio inženýrství, který spojuje odbornosti technického vývoje a hudební produkce a díky kterému jsem byl schopen řadu řešených problémů formulovat a překonat. Podařilo se vytvořit teoretické zázemí, otestovat ho na vývojovém kitu a vytvořit hardwarový přípravek, který lze dále rozvíjet a vyhovět tak zadání alespoň v omezené míře. Zhotovený hardware je schopen plnit požadovanou funkci alespoň částečně s tím, že může sloužit jako zázemí pro další práci s touto problematikou.

Literatura

- [1] Analog Devices, Inc. *SigmaDSP Digital Audio Processor Data Sheet ADAU1462/ADAU1466*, 2017, Web. Dostupné z URL: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adau1462-1466.pdf>>.
- [2] ALSA project. *ALSA documentation*, 2019, Web. Dostupné z URL: <<https://www.alsa-project.org/wiki/Documentation>>.
- [3] ALGAZI, V. Ralph, DUA, O. Richard, THOMPSON, M. Dennis, AVENDANO, Carlos. *The CIPIC HRTF database*. 2001 IEEE ASSP Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, Oct 2001, Web. Dostupné z URL: <http://www.ece.ucdavis.edu/cipic/files/2015/04/cipic_WASSAP_2001_143.pdf>.
- [4] BERANEK, Leo and MELLOW, Tim (Eds.) *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Academic Press, 2012. ISBN 978-0-12-391421-7.
- [5] BERANEK, Leo. *Concert Hall Acoustics-2008**. Journal of the Audio Engineering Society, 56(7-8), July-August 2008, s. 532-544. Dostupné z URL: <http://www.aes.org/journal/online/JAES_V56/jaes.cfm?file=JAES_V56_7_8/JAES_V56_7_8_PG532hirez.pdf>.
- [6] BERANEK, Leo and MELLOW, Tim (Eds.) *Concert Halls and Opera Houses*. 2nd ed. New York: Springer, 2004. ISBN 978-1-4419-3038-5.
- [7] BYRNE, David. *How Architecture Helped Music Evolve*. TED Talks. TED, Feb. 2010. Web. Dostupné z URL: <https://www.ted.com/talks/david_byrne_how_architecture_helped_music_evolve>.
- [8] BOLT, R. J. *Note on Normal Frequency Statistics in Rectangular Rooms*. The Journal of the Acoustical Society of America, 18(1), Květen 1946, s. 130–133. Web. Dostupné z URL: <<http://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/1.1916349>>.
- [9] BOMHARDT, Ramona and FELS, Janina. *The Influence of Symmetrical Human Ears on the Front-Back Confusion*. Audio Engineering Society Convention 142, May 2017, Web. Dostupné z URL: <<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18590>>.
- [10] BONNELO, Oscar J. *A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes*. Journal of the Audio Engineering Society, 29(9), Zář 1981, s. 597–606.

- Web. Dostupné z URL: <<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=3889>>.
- [11] ČSN 01 1600 *Akustika – Terminologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [12] ČSN 73 0526 *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Studia a místnosti pro snímání, zpracování a kontrolu zvuku*. Česká technická norma, Český normalizační institut, únor 1998.
- [13] ČSN 73 0527 *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*. Česká technická norma, Český normalizační institut, březen 2005.
- [14] ČSN EN ISO 3382-1 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 20 s.
- [15] ČSN EN ISO 3382-2 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 20 s.
- [16] DE MAN, Brecht and MCNALLY, Kirk and REISS, Joshua D. *Perceptual Evaluation and Analysis of Reverberation in Multitrack Music Production*. Journal of the Audio Engineering Society, 65(1/2), Jan/Feb 2017, s. 108–116. Web. Dostupné z URL: <<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18548>>.
- [17] EBU Tech. 3276 - 2nd edition. *Listening conditions for the assessment of sound programme material: Monophonic and two-channel stereophonic*. European Broadcasting Union, květen 1998. Dostupné z URL: <<https://tech.ebu.ch/files/live/sites/tech/files/shared/tech/tech3276.pdf>>.
- [18] ELMER, Lucy A. and FAZENDA, Bruno and HARGREAVES, Jonathan A. and HIRST, Jonathan M. and WANKLING, Matthew *Subjective Preference of Modal Control Methods in Listening Rooms*. Audio Engineering Society Convention 129, Nov 2010, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15734>>.
- [19] EVEREST, Frederick Alton and POHLMAN, Ken C. *Master handbook of acoustics*. 6th ed. McGraw-Hill Education, 2014. 622 s. ISBN 978-0-07-184104-7.
- [20] Michal Dudka. *Výroba DSP fotocestou*, 2017, Web. Dostupné z URL: <<https://www.tajned.cz/2017/06/vyroba-dps-fotocestou/>>.

- [21] freeDSP. *freeUSBi documentation*, 2019, Web. Dostupné z URL: <<https://github.com/freeDSP/freeUSBi>>.
- [22] Webová stránka *Raspberry Pi Pinout*, 2019, Web. Dostupné z URL: <<https://pinout.xyz/>>.
- [23] Raspberry Pi (Trading) Ltd. *Raspberry Pi HAT specifications*, 2017, Web. Dostupné z URL: <<https://github.com/raspberrypi/hats>>.
- [24] Texas Instruments Incorporated. *Using the TAS5754/6M and PCM5242 HybridFlow Processor*, 2015, Web. Dostupné z URL: <<https://www.ti.com/lit/ug/slau577a/slau577a.pdf>>.
- [25] HORÁKOVÁ, Jana *Umělecké dílo v době své digitální reprodukovatelnosti*. Elportál, Brno: Masarykova univerzita, 2010. ISSN 1802-128X. Web. Dostupné z URL: <<https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/ff/ps10/dilo/web/index.html>>.
- [26] HRÁDEK, Tomáš. a TUČEK, Jan. *Katalog akustických prvků*. 1. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 2011. 147 s. ISBN 978-80-7331-316-6.
- [27] ITU-R BS.1116-1. *Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems..* Geneva (Switzerland):International Telecommunication Union, 1997. Dostupné z URL: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1116-1-199710-I!!PDF-E.pdf>.
- [28] ITU-T P.58. *Head and torso simulator for telephony..* Geneva (Switzerland):International Telecommunication Union, květen 2013. Dostupné z URL: <https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-P.58-201305-I!!PDF-E&type=items>.
- [29] KAPLANIS, Neofytos and BECH, Søren and JENSEN, Søren Holdt and van WATERSCHOOT, Toon. *Perception of Reverberation in Small Rooms: A Literature Study*. Audio Engineering Society Conference: 55th International Conference: Spatial Audio, Aug 2014, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17348>>.
- [30] KING, Richard. *Recording Orchestra and Other Classical Music Ensembles*. 1st ed. New York: Focal Press, 2017. 256 s. ISBN 978-1138854543.
- [31] KING, Richard and LEONARD, Brett and HOWIE, Will and KELLY, Jack. *Real or Illusion? A Comparative Study of Captured Ambiance vs. Artificial*

- Reverberation in Immersive Audio Applications*. Audio Engineering Society Convention 142, May 2017, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18621>>.
- [32] KLEINER, Mendel. and TICHY, Jiri. *Acoustics of Small Rooms*. 1st ed. Florida: CRC Press, 2014. 491 s. ISBN 978-0415779302.
- [33] KOLMER, Felix a KYNCL, Jaroslav. *Prostorová akustika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 242, [1] s.
- [34] LINDAU, Alexander and KOSANKE, Linda and WEINZIERL, Stefan. *Perceptual Evaluation of Physical Predictors of the Mixing Time in Binaural Room Impulse Responses*. Audio Engineering Society Convention 128, May 2010, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15386>>.
- [35] Wikimedia Foundation, Inc. *Surface-mount technology*, 2019, Web. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_integrated_circuit_packaging_types>.
- [36] MARTIN, Martin. *Akustika malých prostorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 69 s. Dostupné z URL: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=93611>.
- [37] MERHAUT, Josef. *Průručka elektroakustiky*. 1. vyd. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2005. 327 s. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU; 5. ISBN 80-7331-043-0.
- [38] MØLLER, Henrik. *Fundamentals of binaural technology*. Applied Acoustics, 36(3), 1992, s. 171–218. Web. Dostupné z URL: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003682X9290046U>>.
- [39] MOON, Han-gil and PARK, Jungmin and SUNG, Koeng-mo and JANG, Dae-young. *The Effects of Early Decay Time on Auditory Depth in the Virtual Audio Environment*. Audio Engineering Society Convention 115, Oct 2003, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12437>>.
- [40] MYNETT, Mark. *Metal Music Manual*. 1st ed. New York: Focal Press, 2017. 382 s. ISBN 978-1138809321.
- [41] OLIVE, Sean and WELTI, Todd and McMULLIN, Elisabeth. *The Influence of Listeners' Experience, Age, and Culture on Headphone Sound Quality Preferences*. Audio Engineering Society Convention 137, Oct 2014, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17500>>.

- [42] Texas Instruments Incorporated. *PCM5242 4.2-V^{RMS} DirectPathTM, 114dB Audio Stereo Differential-Output DAC with 32bit, 384-kHz PCM Interface*, 2014, Web. Dostupné z URL: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcm5242.pdf>>.
- [43] Raspberry Pi Foundation. *Raspbian documentation*, 2019, Web. Dostupné z URL: <<https://www.raspbian.org/RaspbianDocumentation>>.
- [44] ROGINSKA, Agnieszka and GELUSO, Paul. *Immersive Sound*. 1st ed. New York: Focal Press, 2018. 364 s. ISBN 978-1138900004.
- [45] ROZENN, Nicol. *Binaural Technology*. 1st ed. New York: Audio Engineering Society, 2010. 77 s. ISBN 978-0937803721.
- [46] RUBAK, Per and JOHANSEN, Lars G. *Artificial Reverberation Based on a Pseudo-Random Impulse Response II*. Audio Engineering Society Convention 106, May 1999, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=8280>>.
- [47] SARRIS, John. *A Comparative Study of Various "Optimum" Room Dimension Ratios*. Audio Engineering Society Convention 130, May 2011, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15907>>.
- [48] SARRIS, John. *A New Method for the Determination of Acoustically Good Room Dimension Ratios*. Audio Engineering Society Convention 136, Apr 2014, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17194>>.
- [49] SEDLÁK, František a VÁŇOVÁ, Hana. *Hudební psychologie pro učitele*. Vyd. 2., přeprac. a rozš., V nakl. Karolinum 1. Praha: Karolinum, 2013. 406 s. ISBN 978-80-246-2060-2.
- [50] SCHIMMEL, Jiří. *Elektroakustika*. Vysoké učení technické v Brně, 2014. s. 1-167. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [51] Analog Devices, Inc. *Evaluating the ADAU1466 SigmaDSP Audio Processor*, 2017, Web. Dostupné z URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/EVAL-ADAU1466Z_UG-1135.pdf>.
- [52] ŠKVOR, Zdeněk. *Elektroakustika a akustika: vysokoškolská učebnice*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. 574 s. ISBN 978-80-01-05034-7.
- [53] SMĚKAL, Zdeněk a SYSEL, Petr. *Signálové procesory*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 2006. 283 s. ISBN 978-80-86645-08-0.

- [54] SMĚKAL, Zdeněk. *Systémy a signály: 1D a 2D diskrétní a číslicové zpracování*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 2013. 254 s. ISBN 978-80-86645-23-0.
- [55] SMETANA, Ctirad a kol. *Praktická elektroakustika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981. 692, [1] s.
- [56] Wikimedia Foundation, Inc. *Surface-mount technology*, 2019, Web. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Surface-mount_technology>.
- [57] SUZUKI, Yoiti and Brungart, Douglas and KATO, Hiroaki. *Principles and Applications of Spatial Hearing*. 1st ed. World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2011. 520 s. ISBN 978-9814313872.
- [58] UWINS, Michael. *Analogue Hearts, Digital Minds? An Investigation into Perceptions of the Audio Quality of Vinyl*. Audio Engineering Society Convention 138, May 2015, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17620>>.
- [59] VOETMANN, Jan *50 Years of Sound Control Room Design*. Audio Engineering Society Convention 122, May 2007, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14125>>.
- [60] VONDRÁŠEK, M., ANTEK, M. *Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů*. Akustické listy, 11 (3), září 2005, s. 9 – 18. Web. Dostupné z URL: <<https://www.czakustika.cz/listy/casopis/11-3.pdf>>.
- [61] WEISSER, A. and RINDEL, J.H. *Evaluation of sound quality, boominess, and boxiness in small rooms*. Journal of the Audio Engineering Society, 54(6), June 2006, s. 495–511. Web. Dostupné z URL: <https://www.aes.org/journal/online/JAES_V54/jaes.cfm?file=JAES_V54_6/JAES_V54_6_PG495hirez.pdf>.
- [62] WELTI, Todd. *Investigation of Bonello Criteria for Use in Small Room Acoustics*. Audio Engineering Society Convention 127, Oct 2009, Web. Dostupné z URL: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15044>>.
- [63] YOST, William and DYE, Raymond. *Fundamentals of Directional Hearing*. Seminars in Hearing, 18(11), 1997, s. 321–344. Web. Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/profile/Raymond_Dye/publication/247476067_Fundamentals_of_Directional_Hearing/links/00b7d51f0696fdaacc000000/Fundamentals-of-Directional-Hearing.pdf?origin=publication_detail&ev=pub_int_prw_xdl&msrp=7R0e7uy0cHgUP6ryAnpEKEKdwZkIca20Ab6I6TbYgBXYjodsFpxzbGAmEZAHZ9Td1R7rkv-1VptCV>.

mp1VMGM1X-UI.aNZTFAWkBHwa0vzyMTRFJ2YkCIGn3LVNPdbZtSpohhwiPjV2pCKHfx71ohZ7ain5
tp2Rd4NliIX1nZQ.-DQX-RYsosKvjfv2MZ1tH0Wq0wedi9W05WZFAowzrs_
KkXiuSXoITcH-qPHjbW4hRiCzPifq3eKbntEScag_XWDvJvXH5Xr-A5tQ1A.
jliuDlGgJy7mDstd70coC3zXRUtWtfJLUfmaVB9FKUqFqvVkgdRsBgKIoM0pqm_
ZB8rr1zZ_BLU2K90jhhL4RPKQ_kBNyUdBnyQTPg>.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

α	činitel zvukové pohltivosti
α_{str}	střední hodnota činitele zvukové pohltivosti
a	akustické zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
A	celková pohltivost prostoru [sabin]
ALSA	Advanced Linux Sound Architecture
ARM	Advanced RISC Machine – Architektura počítačových procesorů s redukovanou instrukční sadou.
BR	míra hlubokých tónů (<i>Bass Ratio</i>)
c_0	rychlost zvuku ve vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
C	teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$]
C_7	míra přímého zvuku [dB]
CIPIC	The CIPIC HRTF Database – a public-domain database of high-spatial-resolution HRTF measurements. https://www.ece.ucdavis.edu/cipic/spatial-sound/hrtf-data/
δ	konstanta tlumení
DAC	Digital-to-analog converter
DAW	Digital audio workstation – elektronické zařízení, nebo aplikace používaná pro nahrávání, editování a produkci zvukových souborů.
Δf_N	šířka pásma daného módu
DIY	Do it yourself – udělej si sám
D_{50}	Zřetelnost (<i>Objective Clarity</i>)
DSP	Digital Signal Processor
$D(t)$	dozvukový pokles
E	logaritmická obálka poklesu energie
E_t	zvuková energie během doby dozvuku
Autodesk EAGLE	EAGLE – a scriptable electronic design automation (EDA) application. https://www.autodesk.com/products/eagle/overview
E_{∞}	úhrnná energie impulsové odezvy
EDT	počáteční doba dozvuku (<i>Early Decay Time</i>)
EDT_{mid}	průměr hodnot EDT v oktávových pásmech 500 Hz a 1 kHz
EK	Echo Criterion
f	frekvence [Hz]
f_k	Schröderův (kritický) kmitočet
f_N	frekvence módu
\mathbf{f}_N	vektor \mathbf{f}_N
F	síla [N]
FireWire	FireWire (také označované jako i.Link nebo IEEE 1394) je standardní sériová sběrnice pro připojení periférií k počítači.
FFT	Fast Fourier Transform
$\mathcal{F}\{h(t)\}$	Fourierovy transformace impulsní odezvy
G	síla zvuku (<i>Strength of arriving energy</i>)
γ	součinitel objemové roztažnosti plynů ($\gamma = 1/273,15$ [K^{-1}])
GPIO	General-purpose input/output
$h(t)$	impulsová odezva
$h[n]$	impulsová charakteristika diskrétního systému
H	míra dozívání (<i>Reverberance measure</i>)
HAT	Hardware Attached on Top

HATS	Head and torso Simulation
<i>HFR</i>	míra vysokých tónů (<i>High Frequency Ratio</i>)
$H(\omega)$	funkce frekvenční odezvy
$H[k]$	kmitočtová charakteristika LTI diskrétního systému
I	intenzita zvuku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
I_0	vztažná hodnota $10^{-12} \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
I²C	Inter-Integrated Circuit
I²S	Intergrated Interchip Sound
$IACC_{t_1,t_2}$	Činitel interaurální vzájemné korelace
$IACF_{t_1,t_2}(\tau)$	Normalizovaná funkce interaurální vzájemné korelace
Inkscape	Inkscape – a free and open-source vector graphics editor. https://inkscape.org/
k	vlnové číslo [m^{-1}]
λ	vlnová délka [m]
LFCSP	Leadframe Chip Scale Package
l_x	délka ve směru osy x [m]
l_y	délka ve směru osy y [m]
l_z	délka ve směru osy z [m]
L	celková délka všech hran místnosti [m]
L_I	hladina intenzity zvuku [dB]
Libre Office	LibreOffice – a free and open-source office suite. https://www.libreoffice.org/
L_p	hladina akustického tlaku [dB]
L_P	hladina akustického výkonu [dB]
L_V	hladina akustického rychlosti [dB]
LTI	lineární časově invariantní diskrétní systém
m	činitel útlumu zvuku ve vzduchu
MATLAB	MAtrix LABoratory – interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk čtvrté generace. https://www.mathworks.com
n_x	proměnná nabývající hodnot: 0, 1, 2, 3, ...
n_y	proměnná nabývající hodnot: 0, 1, 2, 3, ...
n_z	proměnná nabývající hodnot: 0, 1, 2, 3, ...
\mathbf{n}_x	jednotkový vektor ve směru kartézské osy x
\mathbf{n}_y	jednotkový vektor ve směru kartézské osy y
\mathbf{n}_z	jednotkový vektor ve směru kartézské osy z
N	počet vlastních kmitů prostoru
S/PDIF	Sony/Philips Digital Interface
p	akustický tlak [Pa]
PCM	Pulse-code Modulation
p_{RMS}	efektivní hodnota akustického tlaku [Pa]
p_0	vztažná hodnota pro 0 dB L_p ($2\cdot 10^{-5}$ Pa)
p_{00}	atmosférický (barometrický) tlak při teplotě 0°C (101325 Pa)
P	<i>akustický výkon</i> [W]
P_0	vztažná hodnota 10^{-12} W
QFN	Quad flat no-leads package
ρ_0	hustota vzduchu při teplotě 0°C ($1,29 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
r	souřadnice od počátku sférické souřadné soustavy [m]
r_d	dozvuková vzdálenost [m]
RT_{10}	doba dozvuku určena z poklesu o 10 dB
RT_{20}	doba dozvuku určena z poklesu o 20 dB

RT_{30}	doba dozvuku určena z poklesu o 30 dB
RT_{60}	standardní doba dozvuku (<i>Reverbatation time</i>)
S	plocha [m ²]
SMD	Surface-mount device
SPI	Serial Peripheral Interface
SPL	hladina akustického tlaku (Sound Preassure Level)
t	čas [s]
t_s	čas těžiště impulsové odezvy (<i>Center Time</i>)
t_{mix}	doba směšování (Mixing Time) [s]
T	perioda zvukového vlnění
T_d	doba dozvuku
T_o	optimální doba dozvuku
Thunderbolt	Thunderbolt je rychlé hardwarové rozhraní, které umožňuje připojit k počítači zařízení (periferie) přes rozšiřující sběrnici.
UART	Universal Asynchronous Reception and Transmission
USB	Universal Serial Bus je univerzální sériová sběrnice, moderní způsob připojení periférií k počítači.
v	akustická rychlost [m·s ⁻¹]
v_0	vztažná hodnota 5.10 ⁻⁸ m·s ⁻¹
V	objem [m ³]
VST	Virtual Studio Technology je softwarové rozhraní pro komunikaci mezi hostitelským programem a zásuvnými moduly (pluginy), kde tyto moduly slouží ke generování a úpravě digitálního audio signálu.
χ	Poissonova konstanta (poměr měrné kapacity plynu při stálém tlaku a objemu; cca 1,4 pro suchý vzduch)
$x[n]$	vstupní signál diskrétního systému
$X[k]$	frekvenční charakteristika vstupního signálu
y	akustická výchylka [m]
$y[n]$	výstupní signál diskrétního systému
$Y[k]$	frekvenční charakteristika výstupního signálu
ω	úhlová rychlost [rad·s ⁻¹]

Seznam příloh

A Přílohy k teoretické části	72
A.1 Tabulky veličin	72
B Přílohy k praktické části	75
B.1 GPIO pinout	75
B.2 Schéma zapojení	76
B.3 Rozvržení desky	80
C Fotodokumentace	82
D Obsah přiloženého CD	84

A Přílohy k teoretické části

A.1 Tabulky veličin

C [°C]	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	40
c_0 [m.s ⁻¹]	325,33	328,365	331,4	334,435	337,47	340,505	343,54	346,575	349,61	355,68
f [Hz]	λ [m]									
20	16,267	16,418	16,570	16,722	16,874	17,025	17,177	17,329	17,481	17,784
50	6,895	6,895	6,628	6,689	6,749	6,810	6,871	6,932	6,992	7,114
100	3,448	3,448	3,314	3,344	3,375	3,405	3,435	3,466	3,496	3,557
200	1,724	1,724	1,657	1,672	1,687	1,703	1,718	1,733	1,748	1,778
300	1,149	1,149	1,105	1,115	1,125	1,135	1,145	1,155	1,165	1,186
500	0,690	0,690	0,663	0,669	0,675	0,681	0,687	0,693	0,699	0,711
700	0,493	0,493	0,473	0,478	0,482	0,486	0,491	0,495	0,499	0,508
1000	0,345	0,345	0,331	0,334	0,337	0,341	0,344	0,347	0,350	0,356
2000	0,172	0,172	0,166	0,167	0,169	0,170	0,172	0,173	0,175	0,178
3000	0,115	0,115	0,110	0,111	0,112	0,114	0,115	0,116	0,117	0,119
5000	0,069	0,069	0,066	0,067	0,067	0,068	0,069	0,069	0,070	0,071
7000	0,049	0,049	0,047	0,048	0,048	0,049	0,049	0,050	0,050	0,051
10000	0,034	0,034	0,033	0,033	0,034	0,034	0,034	0,035	0,035	0,036
15000	0,023	0,023	0,022	0,022	0,022	0,023	0,023	0,023	0,023	0,024
20000	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,018

Tab. A.1: Vlnové délky slyšitelných frekvencí v závislosti na teplotě okolí

zdroj	aku. tlak [Pa]	[dB _{SPL}]	poznámka
start raketoplánu	100000	194	modulace atmosférického tlaku
tryskový motor	2000	160	okamžité poškození
vrtulový motor	200	140	práh bolesti
sbíjecí kladivo	20	120	hmatový práh, nepříjemné
koncert populární hudby	6	110	metal
řetězová pila z 1 m	2	100	forte fortissimo
expozice do 8hod denně při:	0,4	85	nevratné zhoršení sluchu
ref. poslechová úroveň	0,3	82	stereo při růžovém šumu a -18dBFS
hustá doprava, orchestr ze 7 m	0,2	80	forte
hluky od:	0,04	65	ovlivnění tělesných systémů
konverzace z 1 m	0,02	60	piano
hluky od:	0,01	50	neblahé na psychiku
knihovna, tichá čtvrť	0,002	40	piano pianissimo
nahrávací studio, šumění listí	0,0002	20	pro studio frekvenčně závislé
práh slyšitelnosti	0,00002	0	neslyšitelné

Tab. A.2: Hladiny akustických tlaků různých zdrojů zvuku

materiál	střední kmitočet okt. pásma						α_{str}
	125	250	500	1000	2000	4000	
cihla	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,05
koberec	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65	0,25
Auralex Wedges 2"	0,11	0,30	0,91	1,05	0,99	1,00	0,65
Pyrotek Sorberfoam 50mm	0,15	0,55	1,19	0,98	0,97	0,93	0,85
OSB	0,02	0,03	0,04	0,11	0,16	0,15	0,10
ISOpiano 100mm	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
vajíčka	0,01	0,06	0,29	0,70	0,45	0,61	0,35
parkety	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,05
podhled sádra 60mm	0,31	0,08	0,04	0,07	0,09	0,08	0,10
natřená omítka	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
keram. Dlažba	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05
Artnovion Eiger	0,96	0,64	0,44	0,40	0,38	0,30	0,40
Artnovion KomodoW	0,98	0,43	0,56	0,40	0,38	0,29	0,40
akusPenaPast	0,70	0,91	0,65	0,70	0,64	0,78	0,70
Vicoustic Superbass90	0,99	1,03	0,86	0,69	0,63	0,72	0,70
Vicoustic SuperbassExtreme	0,60	0,39	0,28	0,43	0,43	0,32	0,40
Pyrotek EchohushBT300	0,58	0,54	0,56	0,49	0,43	0,40	0,50
Auralex Studio6	0,86	0,91	0,82	0,74	0,67	0,62	0,70
Auralex LENRD	1,24	1,28	1,45	1,39	1,27	1,31	0,95
stojící muž	0,05	0,16	0,25	0,58	0,86	1,03	0,35
pohltivost vzduchu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00

Tab. A.3: Součinitelé zvukové pohltivosti pro vybrané materiály

f [Hz]	λ [m]	k [m^{-1}]	$1/k$	$(1/k) / 10$
20	17,20	0,37	2,74	0,2737
30	11,47	0,55	1,82	0,1825
50	6,88	0,91	1,09	0,1095
70	4,91	1,28	0,78	0,0782
100	3,44	1,83	0,55	0,0547
200	1,72	3,65	0,27	0,0274
300	1,15	5,48	0,18	0,0182
500	0,69	9,13	0,11	0,0109
700	0,49	12,79	0,08	0,0078
1000	0,34	18,27	0,05	0,0055
2000	0,17	36,53	0,03	0,0027
3000	0,11	54,80	0,02	0,0018
5000	0,07	91,33	0,01	0,0011
7000	0,05	127,86	0,01	0,0008
10000	0,03	182,65	0,01	0,0005
20000	0,02	365,30	0,00	0,0003

Tab. A.4: Závislost vzdálenosti blízkého pole od zdroje na kmitočtu

rozměr	nominal	min	max	noname
šířka (mezi spánky)	152	147	154	150
délka (čelo až týl)	191	190	205	178
Ústí Ušního Kanálu až temeno	130	128	136	136
vzdálenost ušních kanálů	132	130	133	132
ÚUK až týl	94	92	100	95
ÚUK až rameno	170	167	181	x
ÚUK až rty	130	128	131	135
brada až temeno	224	216	225	214
úhel rovin uší / rty	24°	21,5°	25,5°	23°
šířka ramen	420	400	455	x
hloubka hrudníku	235	178	272	x
hloubka ramen	110	108	161	x
osa uší / osa ramen	10	-4	46	x
výška bysty HATS		600		

Tab. A.5: Rozměry hlavy a torza HATS

B Přílohy k praktické části

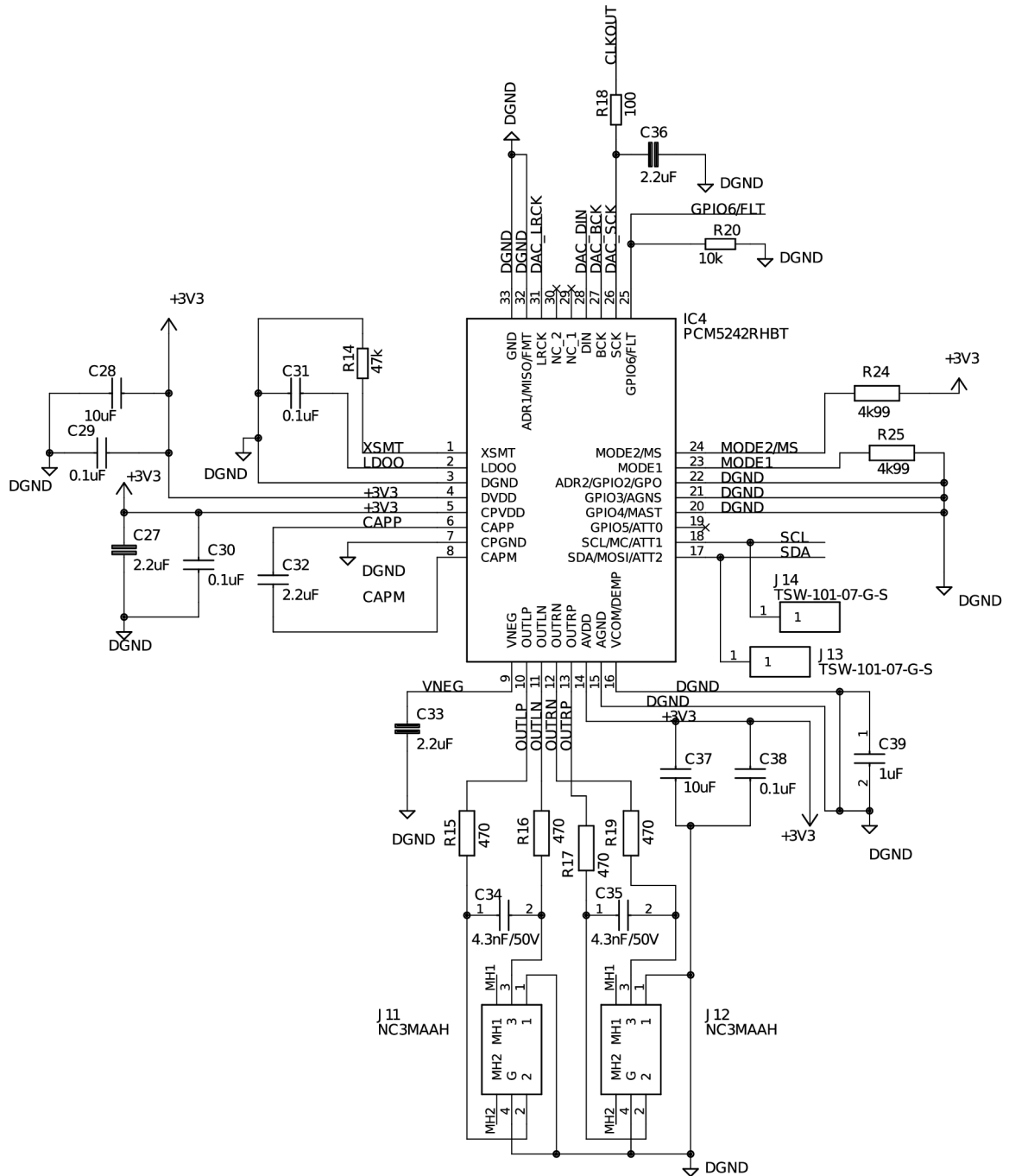
B.1 GPIO pinout

Pin	Název	Účel	Užití	Pin	Název	Účel	Užití
1	3,3V	DC PWR	x	2	5V	DC PWR	5V
3	GPIO02	(SDA1 I2C)	SDA	4	5V	DC PWR	5V
5	GPIO03	(SCL1 I2C)	SCL	6	GND	-	GND
7	GPIO04	(GPIO GCLK)	x	8	GPIO14	(TXDO)	x
9	GND	-	GND	10	GPIO15	(RXDO)	x
11	GPIO17	(GPIO_GEN0)	DSP RESET	12	GPIO18	(GPIO_GEN1)	DSP BCLK_IN0
13	GPIO27	(GPIO_GEN2)	x	14	GND	-	GND
15	GPIO22	(GPIO_GEN3)	x	16	GPIO23	(GPIO_GEN4)	x
17	3,3V	DC Power	x	18	GPIO24	(GPIO_GEN5)	x
19	GPIO10	(SPI MOSI)	DSP MOSI/ADDR0	20	GND	-	GND
21	GPIO09	(SPI_MISO)	DSP MISO/SDA	22	GPIO25	(GPIO_GEN6)	x
23	GPIO11	(SPI_CLK)	DSP SCLK/SCL	24	GPIO08	(SPI_CE0_N)	x
25	GND	-	GND	26	GPIO07	(SPI_CE1_N)	x
27	ID_SD	(I2C ID EEPROM)	x	28	ID_SC	(I2C ID EEPROM)	x
29	GPIO05	N/A	x	30	GND	-	GND
31	GPIO06	N/A	x	32	GPIO12	N/A	x
33	GPIO13	N/A	x	34	GND	-	GND
35	GPIO19	N/A	DSP LRCLK_OUT3/_MP9	36	GPIO16	N/A	x
37	GPIO26	N/A	x	38	GPIO20	N/A	DSP SDATA_OUT3
39	GND	-	GND	40	GPIO21	N/A	DSP SDATA_IN0

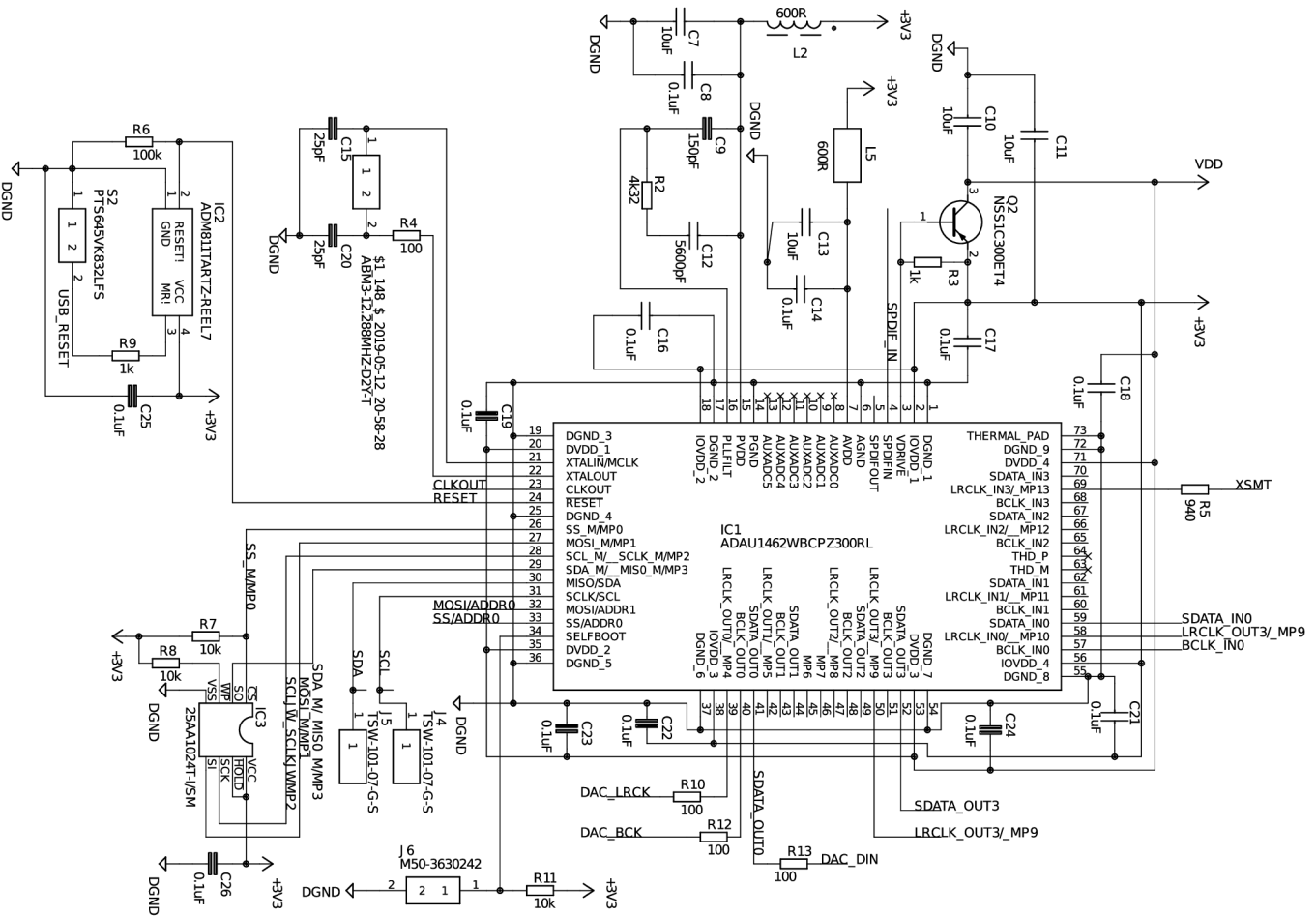
Tab. B.1: Pinout rozhraní GPIO

B.2 Schéma zapojení

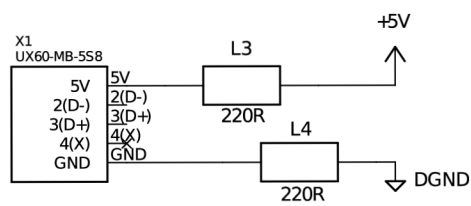
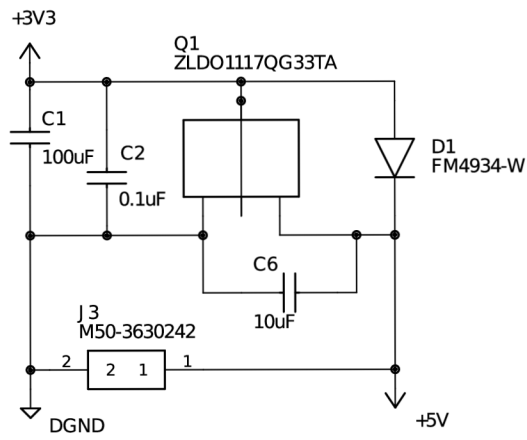
Výkresy jsou v elektronické podobě přiloženy na CD ve formátu pdf. Na CD je také uložen projekt vytvořený v softwaru EAGLE včetně knihoven.



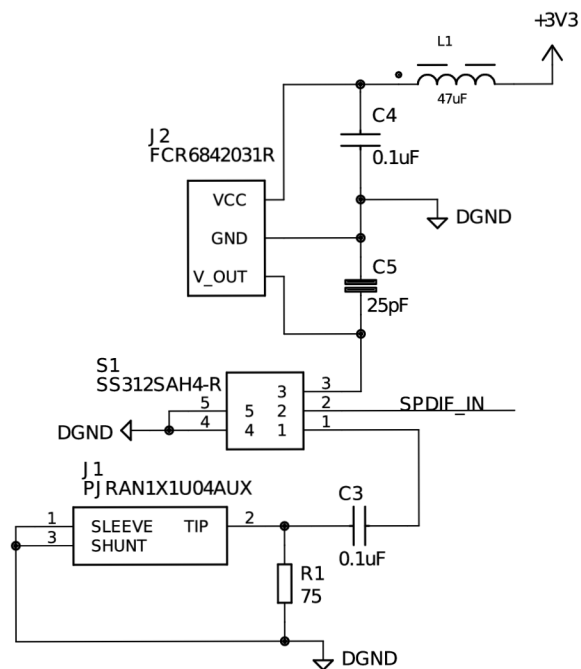
Obr. B.1: Schéma zapojení DAC.



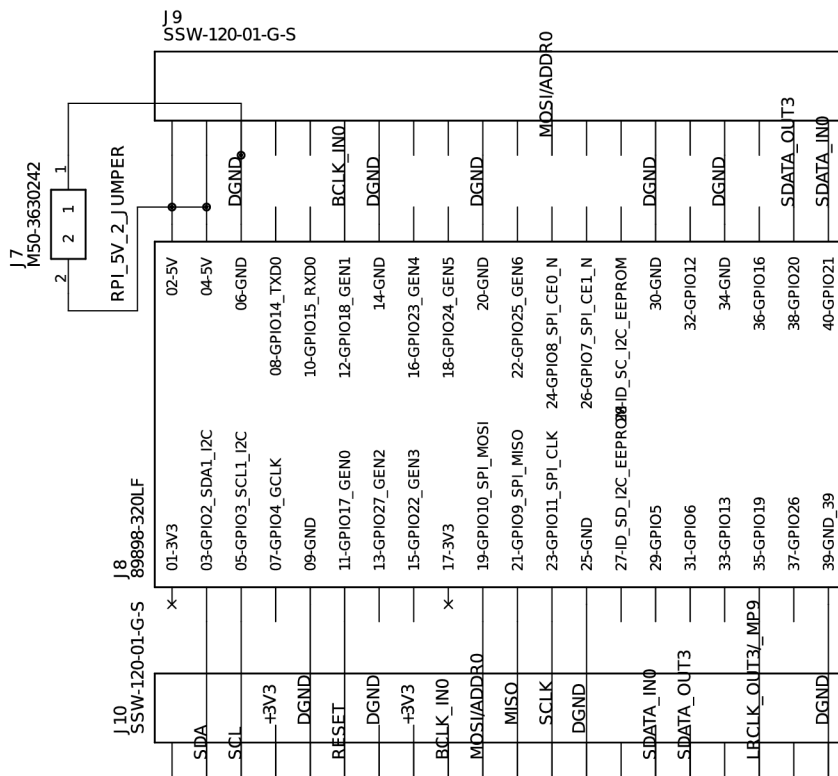
Obr. B.2: Schéma zapojení DSP.



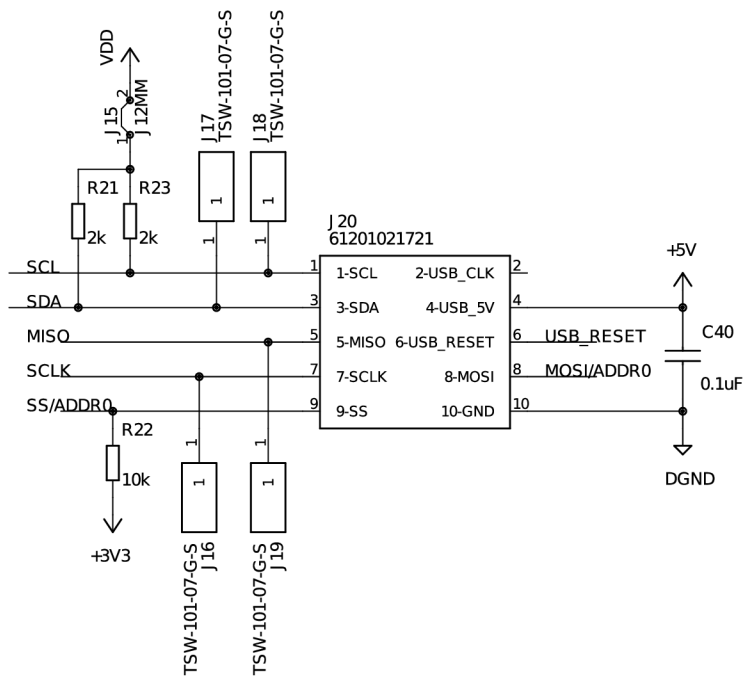
Obr. B.3: Schéma zapojení zdrojové části.



Obr. B.4: Schéma zapojení vstupu S/PDIF.

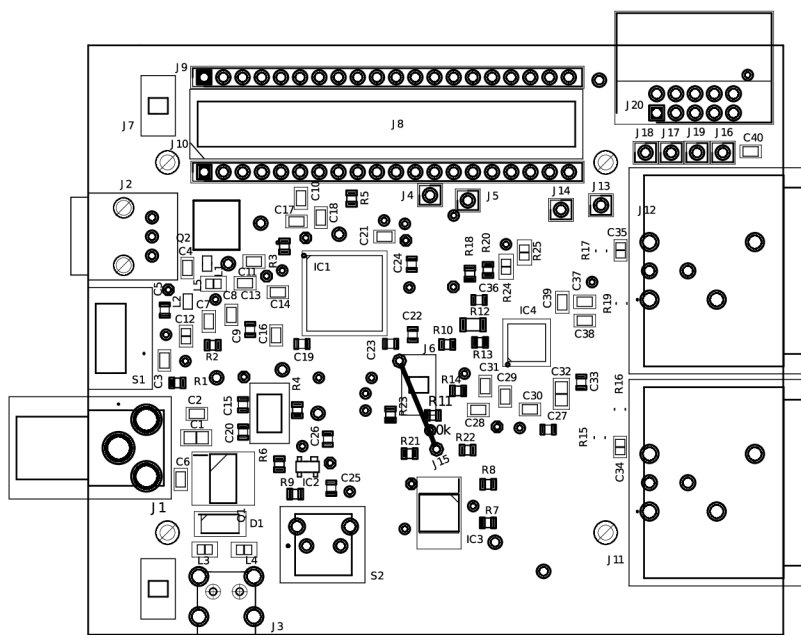


Obr. B.5: Schéma zapojení vstupu GPIO.

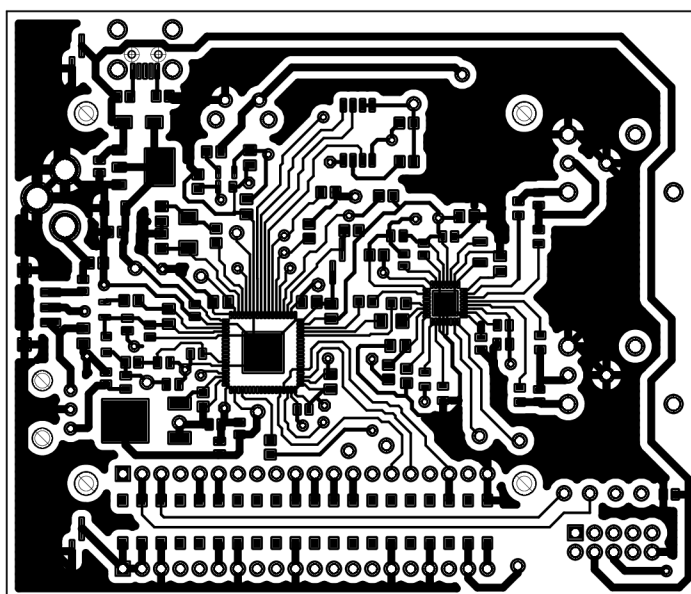


Obr. B.6: Schéma zapojení vstupu pro programovací zařízení.

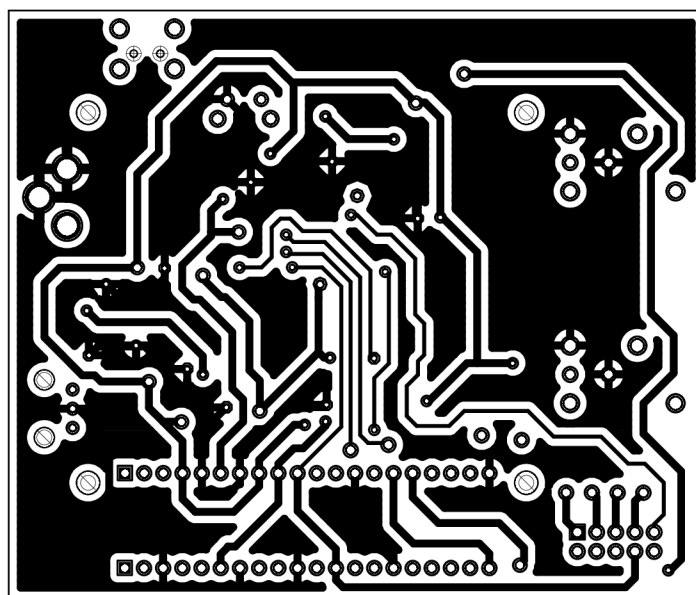
B.3 Rozvržení desky



Obr. B.7: Schéma rozvržení plošného spoje.

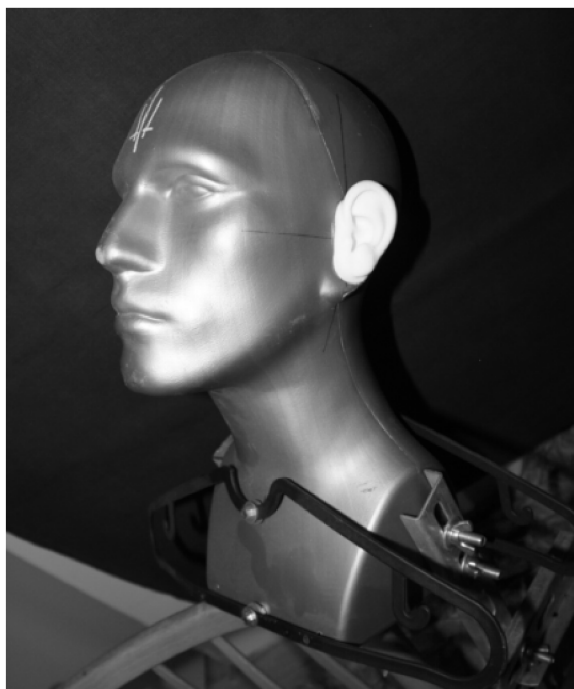


Obr. B.8: Vrchní strana tištěného spoje.



Obr. B.9: Spodní strana tištěného spoje.

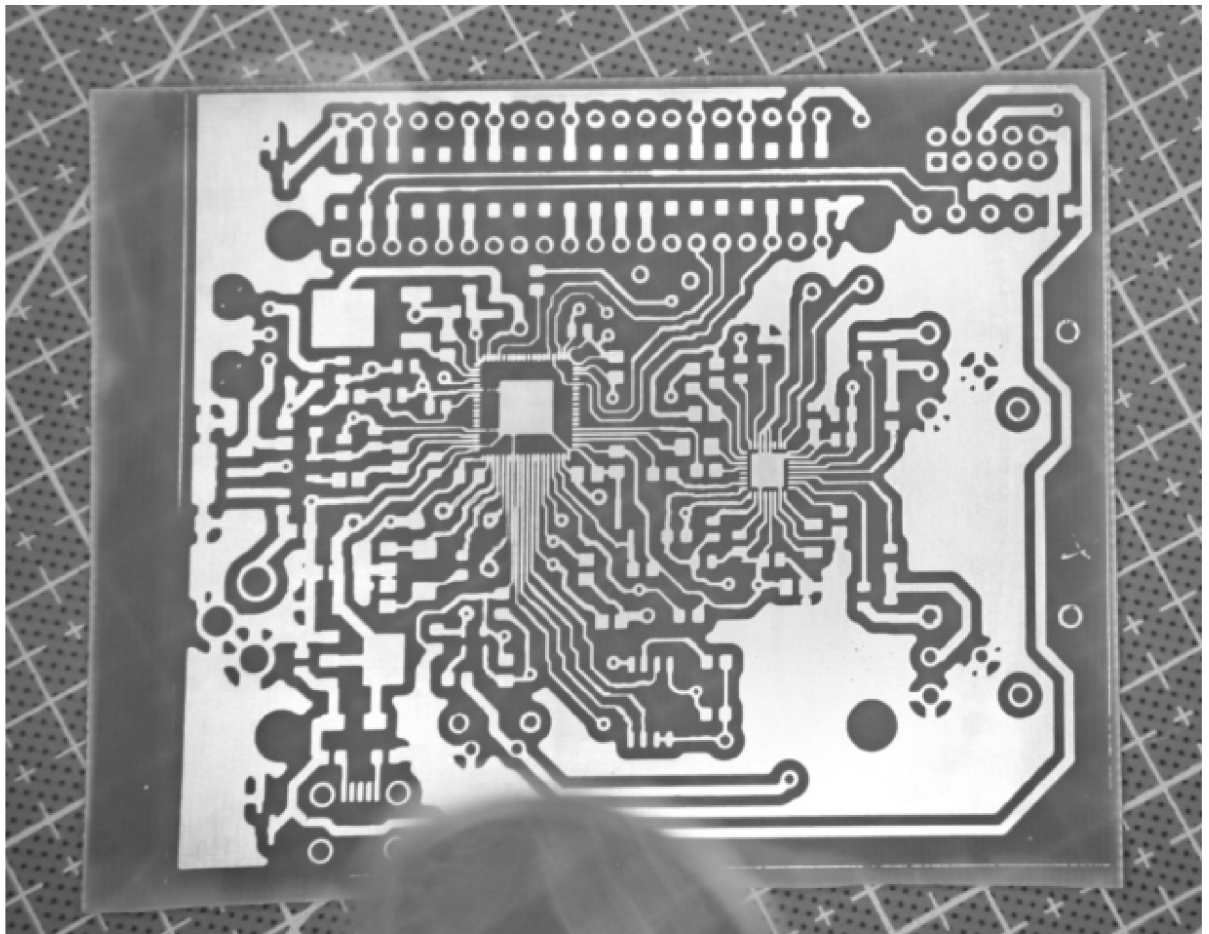
C Fotodokumentace



Obr. C.1: Zařízení HATS.



Obr. C.2: Osvitové zařízení.



Obr. C.3: Vyleptaný plošný spoj.

D Obsah příloženého CD

Obsah CD diplomové práce

- Soubory projektu EAGLE
- Fotodokumentace
- Soubory teoretické části pro program MATLAB
- Projekt do vývojového kitu z prostředí CSS
- Protokoly měření
- Schémata zapojení
- Soubory pro výrobu PCB