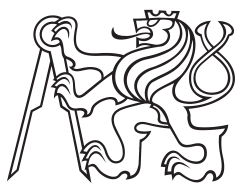


Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Návrh HW pro mikrofonní pole s MEMS mikrofony

Bc. David Vagner

Vedoucí práce: Ing. Petr Honzík, Ph.D.

Studijní program: Elektronika a komunikace

Specializace: Audiovizuální technika a zpracování signálů

Srpen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vagner** Jméno: **David** Osobní číslo: **483885**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh HW pro mikrofonní pole s MEMS mikrofony

Název diplomové práce anglicky:

HW Design of Microphone Array with MEMS Microphones

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s teoretickými základy a principy fungování mikrofonních polí. Navrhněte HW a konstrukci mikrofonního pole sestaveného z MEMS mikrofonů s digitálním výstupem. Zaměřte se na konverzi vícekanálového digitálního signálu pro čtení pomocí Raspberry Pi. Prozkoumejte možnosti rozšíření počtu kanálů pomocí FPGA. Navržený HW realizujte a ověřte jeho funkci. Proveďte akustická měření na realizovaném mikrofonním poli a vyhodnoťte celkovou funkčnost systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Škvor, Z.: Elektroakustika a akustika, ČVUT, Praha, 2012
- [2] Bradstein, M., Ward, D.: Microphone Arrays, Signal Processing Techniques and Applications, Springer, 2001
- [3] Plessas, P.: Rigid Sphere Microphone Arrays for Spatial Recording and Holography, Graz University of Technology, 2009

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Honzík, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **16.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

Ing. Petr Honzík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji Ing. Petru Honzíkovi, Ph.D. za cenné rady ohledně vývoje dokumentovaného zařízení a pravidelné konzultace v Otevřené audio laboratoři č. 545 na Katedře radioelektroniky.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS23/185/OHK3/3T/13.

Prohlášení

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

V Praze, 15. srpna 2023

Abstrakt

Práce plynule navazuje na předchozí autorovu práci - viz přílohu B, která přešla od vývoje sférického mikrofonního pole pro univerzální použití k vývoji modulárního systému pro rychlou výrobu mikrofonních polí pomocí 3D tisku. Vyvinutá platforma umožňuje rychlý návrh a výrobu různých typů mikrofonních polí a jejich rychlé zprovoznění pomocí magnetických modulárních kapslí s MEMS mikrofony spojenými pomocí I2S sběrnice s FPGA (vyvinuté ve spolupráci s Bc. Janem Šedivým), které data přeposílá do počítače přes USB rozhraní. Koncept byl vyzkoušen na vytvořeném prototypu cirkulárního pole, u kterého bylo ověřeno, že protilehlé mikrofony mohou sloužit jako diferenciální mikrofonní pole 1. řádu.

Klíčová slova: Mikrofonní pole, MEMS mikrofon, 3D tisk, FPGA

Vedoucí práce: Ing. Petr Honzík, Ph.D.
K13137 katedra radioelektroniky,
Technická 2, Praha 6

Abstract

This thesis freely follows the previous work of the same author - see appendix B, who stopped developing the spherical microphone array for universal application and started the development of a modular system for quick manufacturing of microphone arrays using the 3D print technology. The developed system allows a quick design and manufacture of various types and shapes of microphone arrays together with putting them into operation easily thanks to developed magnetic modular microphone capsules equipped with MEMS microphones connected by I2S bus with FPGA (developed in coordination with Bc. Jan Šedivý), which sends the data to a computer by USB interface. The platform was tested by making a prototype of a circular microphone array, on which a theory was tested, that two opposing microphones can be used as a differential microphone array of first order.

Keywords: Microphone array, MEMS microphone, 3D print, FPGA

Title translation: HW Design of
Microphone Array with MEMS
Microphones

Obsah

Úvod	1	6.2 Navržená mikrofonní pole	29
Část I		6.2.1 Lineární pole	29
Teoretická část		6.2.2 Cirkulární pole	29
1 Úvod do mikrofonních polí	5	7 Zprovoznění elektronické části a	33
1.1 Vymezení pojmů	5	funkční akustické testy	33
1.2 Sumační mikrofonní pole	6	7.1 Zprovoznění elektroniky	33
1.3 Diferenciální mikrofonní pole	7	7.2 Akustické testy	33
1.3.1 Lineární pole	7	7.2.1 Test v audiovizuálním studiu	34
1.3.2 Cirkulární pole	11	7.2.2 Test v bezodrazové komoře . .	35
1.3.3 Sférické pole	11	7.2.3 Zpracování naměřených dat .	35
2 MEMS mikrofony a digitální	13	7.3 Výsledky testů	36
přenos signálu	13	7.3.1 Data z audiovizuálního studia	36
3 Zásady návrhu 3D modelování	15	7.3.2 Data z bezodrazové komory .	37
3.1 Parametrický návrh 3D modelů .	15	Závěr	41
3.1.1 Modelování v programu		Literatura	43
Autodesk Fusion 360	15	Přílohy	
3.1.2 Modelování v programu		A Seznam zkratk	47
OpenSCAD	16	B Autorovy publikace související s	49
Část II		prací	
Praktická část		C Seznam datových příloh	51
4 Shrnutí předchozí práce	21		
4.1 Bakalářská práce	21		
4.1.1 Konstrukce	21		
4.1.2 Elektronika	21		
4.1.3 Závady původního zařízení . .	22		
4.2 Druhá verze sférického			
mikrofonního pole	23		
5 Návrh elektronické části	25		
6 Návrh fyzické konstrukce pro 3D	27		
tisk	27		
6.1 Modulární prvky	27		
6.1.1 Magnetické mikrofonní moduly	27		
6.1.2 Negativ slotu pro usazení			
magnetického modulu	29		

Obrázky

1.1 Směrové charakteristiky aditivních polí	6	7.4 Směrové charakteristiky z dat ze studia	37
1.2 Nákres lineárního mikrofonního pole se 7 měničů [1]	8	7.5 Korelační funkce dat z komory	38
1.3 Diagram diferenciálního pole	9	7.6 Směrové charakteristiky z dat z komory	38
1.4 Kardiovídní směrová charakteristika	9	7.7 Naměřené směrovosti na frekvenci 6 kHz	39
1.5 Přenosové funkce diferenciálního pole	10		
1.6 Směrová charakteristika diferenciálního pole, 12 kHz	10		
1.7 Schéma cirkulárního mikrofonního pole	11		
2.1 Vnitřní struktura MEMS elektrostatického měniče	13		
2.2 Princip fungování sběrnice I2S	14		
2.3 Diagram zapojení sběrnice TDM	14		
3.1 Okno programu OpenSCAD	16		
4.1 Mikrofonní pole z [1]	22		
4.2 Druhá verze mikrofonního pole	23		
4.3 Převodník I2S na TDM	24		
4.4 Test zpoždění převodníku I2S na TDM	24		
5.1 Schéma plošného spoje pro mikrofón	26		
5.2 Plošný spoj s MEMS mikrofónem	26		
5.3 Plošný spoj v mikrofonním poli	26		
6.1 Přenosová funkce cirkulárního pole	30		
6.2 Hotový prototyp cirkulárního pole	31		
7.1 Přehledová fotografie z bezdozvukové komory	35		
7.2 Fotografie sestavy pole během měření	36		
7.3 Korelační funkce dat ze studia	37		



Úvod

Mikrofonní pole jsou zařízení pro záznam a zpracování zvuku s možností pokročilého post-processingu. Takové zařízení může být vhodné pro celou řadu aplikací, od nahrávání zvuku pro Virtuální realita (VR) aplikace, přes zařízení pro oddělení jednotlivých mluvčích v jedné místnosti na telekonferencích, po různá experimentální nahrávání v audiolaboratořích.

Autorova předchozí práce [1] se zaměřovala na vývoj sférického mikrofonního pole, což může být jedna z možných verzí finálního zařízení. Vývoj dále pokračoval dalšími publikacemi, kde autor postupně zdokonaloval původní prototyp sférického pole - viz příloha B. Pro jiné aplikace mohou být však vhodnější jiné typy mikrofonních polí, např. cirkulární, lineární nebo plošná. Protože je však časově i finančně náročné vyrábět každé pole zvlášť i s potřebnou elektronikou, je vhodné vyvinout modulární systém, který umožní rychlou výrobu nových prototypů pomocí 3D tisku a snadné přesunutí elektroniky (tj. zejména mikrofonů) na nově vyrobený prototyp.

Tato práce si klade za cíl takový systém vyvinout a ve spolupráci s Bc. Janem Šedivým (který vyvíjí řešení čtení dat z mikrofonů pomocí FPGA) otestovat jeho funkčnost.



Část I

Teoretická část

Kapitola 1

Úvod do mikrofonních polí

1.1 Vymezení pojmů

Jako mikrofonní pole lze definovat jakoukoli soustavu mikrofonů, dostatečně organizovanou tak, aby byly signály z nich zpracovatelné dohromady. [2] V této práci se budeme dále zabývat mikrofonními poli, která jsou fázově sladěná - tj. signály z jednotlivých mikrofonů přicházejí do čtecího zařízení tak, že buďto přijdou stejně časově zpožděné, nebo s definovanými časovými rozdíly, které lze následně kompenzovat. Pokud je v mikrofonním poli na úrovni jednotlivých mikrofonů navíc použito vzorkování, je nutné zajistit, aby mikrofony vzorky odebíraly ve stejných časových okamžicích (nebo bylo časové zpoždění mezi vzorky z jednotlivých mikrofonů v násobcích vzorkovací periody, pokud takové zpoždění umíme kompenzovat při zpracování signálů - v takovém případě musí být neměnné nebo přenášené ve formě dat). Tato práce směřuje do oblasti snadno sestavitelných malých mikrofonních polí, kde bude zajištěna synchronizace takovým způsobem, že budou data z mikrofonů čtena ve stejných časových okamžicích.

Časová synchronizace jednotlivých mikrofonů nám umožňuje využít možností fázového zpracování signálů, což mimo jiné umožní použití pole jako směrového mikrofonu (i s měnitelnou směrovou charakteristikou) [2]. Za předpokladu, že jsou všechny použité mikrofony sensorickým analogonem akustického monopólu (tj. jsou všesměrové - jejich směrová charakteristika má tvar kružnice), můžeme dále rozvíjet teorii mikrofonních polí podle dostupné literatury.

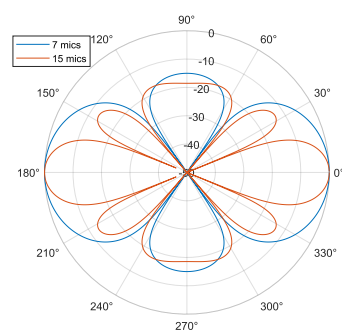
Z hlediska způsobu zpracování signálů můžeme mikrofonní pole rozdělit na sumační, u kterých se signály z mikrofonů sčítají, a diferenciální [3], u kterých se při tvorbě výsledného signálu používá zpožďovacích linek a rozdílových operací, jak je vidět na obr. 1.3.

1.2 Sumační mikrofonní pole

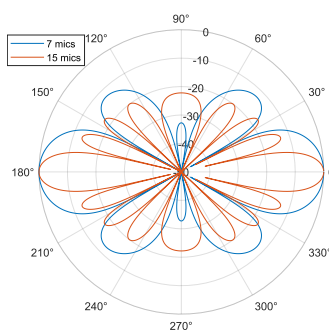
V tomto typu mikrofonního pole se výstupní signál tvoří součtem signálů z jednotlivých mikrofonů [4], [1]. Způsobu zpracování signálu se většinou přizpůsobuje i samotná konstrukce, která je v tomto případě z funkčních důvodů typicky rozměrově větší, než u diferenciálních mikrofonních polí. Funkci sumačního pole si můžeme představit na jednoduchém příkladu lineárního sumačního mikrofonního pole, jehož uspořádání odpovídá obr. 1.2. Sečtením signálů dojde ke tvorbě výstupního signálu s definovanou směrovostí, která závisí na množství mikrofonů v poli n , vlnovém čísle dopadající rovinné zvukové vlny k , vzdáleností sousedních mikrofonů d a úhlu dopadu vlny θ dle obr. 1.2. Odvozená směrová funkce má potom průběh dle rovnice 1.1 [4], [1].

$$h(\theta) = \frac{\sin(nkd \sin \theta)}{n \sin(kd \sin \theta)} \quad (1.1)$$

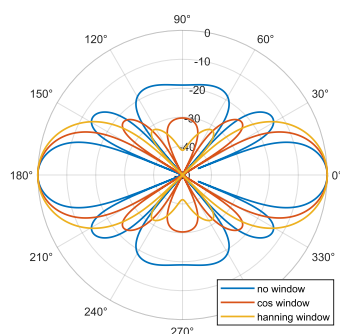
Směrové charakteristiky pak můžeme vizualizovat v polárním diagramu 1.1.



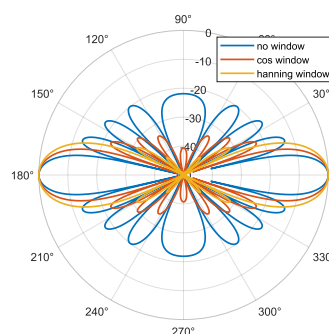
(a) : 3 cm, 2 kHz



(b) : 5 cm, 2 kHz



(c) : 3 cm, 2 kHz, okno



(d) : 5 cm, 2 kHz, okno

Obrázek 1.1: Směrové charakteristiky pro různé konfigurace aditivních mikrofonních polí v dB

Z grafů 1.1a a 1.1b je jasně vidět, že zvětšením vzdálenosti mezi mikrofony docílíme komplikovanější směrové charakteristiky (z důvodu většího počtu nul vznikajících při kratším rozměru vlny vůči vzdálenosti mikrofonů). Stejný efekt by měla změna frekvence dopadající vlny, jelikož směrová charakteristika vzniká v důsledku poměru mezi vlnovou délkou a vzdáleností mikrofonů. Zvýšením počtu mikrofonů taktéž přidáme množství nul do směrové charakteristiky, která má následně větší počet laloků, které jsou užší. Při již zkonstruovaném mikrofonním poli a dané frekvenci je ještě možné měnit směrovou charakteristiku způsobem zpracování signálu. Na obr. 1.1c a 1.1d jsou prezentovány změny směrové charakteristiky při váhování signálů z mikrofonů cosinovým nebo hanningovým oknem. Směrovost se tímto více omezuje na hlavní laloky, které se ale mírně rozšiřují.

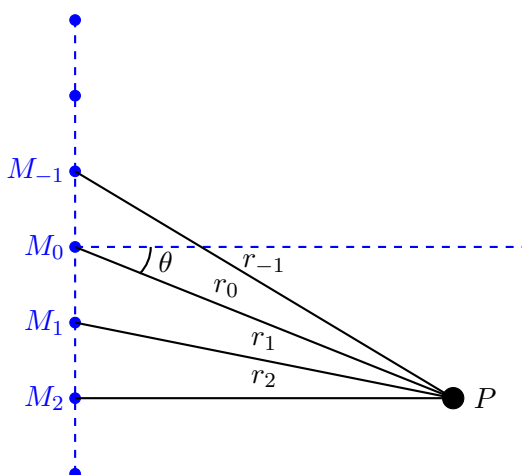
1.3 Diferenciální mikrofonní pole

V textu budeme dále rozvíjet zejména vlastnosti polí diferenciálních, jelikož mají značně lepší vlastnosti, pokud jde o beamforming (což je jeden z hlavních způsobů použití mikrofonních polí) [5]. Zjednodušeně řečeno jsou diferenciální pole všechna mikrofonní pole, kde dochází ke zpracování signálu odečítáním průběhů mezi jednotlivými mikrofony, popř. odečítáním takto vzniklých signálů mezi sebou, viz obr. 1.3. Z konstrukčního hlediska se diferenciální pole snaží přistupovat ke zpracování signálu aproximací derivace diferencí mezi mikrofony. [5] Aby toto bylo zajištěno, musí být pole zkonstruováno tak, aby vlnová délka snímaného zvuku byla srovnatelná se vzdáleností mezi jednotlivými mikrofony. Jak je ale ukázáno v kapitole 1.3.1, takové řešení bohužel také vede k problémům se snímáním zvuků na určitých frekvencích.

1.3.1 Lineární pole

Lineární pole je nejjednodušším druhem mikrofonního pole, kde jsou mikrofony jednoduše uspořádány na přímce, obvykle ve stejných rozestupech. Graficky je znázorněno na obr. 1.2.

Pole je tvořeno sestavou elektroakustických měničů (mikrofonů), přičemž dále se budeme zabývat pouze poli tvořenými všesměrovými mikrofony. Důležitou vlastností mikrofonního pole je jeho směrovost, což je závislost jeho citlivosti na úhlu dopadající plošné akustické vlny. Směrovost závisí na konstrukci mikrofonního pole a způsobu tvorby výstupního signálu a v případě výstupu dat z jednotlivých mikrofonů do adaptivního výpočetního zařízení může být dynamicky měněna [6]. Taková operace se nazývá beamforming a je klíčová zejména u diferenciálních mikrofonních polí vyšších řádů (polí s větším počtem mikrofonů). Způsob tvorby výsledného signálu u diferenciálního mikrofonního pole je na obr. 1.3. Řád diferenciálního mikrofonního pole odpovídá počtu stupňů v diagramu zpracování signálu.



Obrázek 1.2: Nákres lineárního mikrofonního pole z práce [1], se 7 měničů, kde M_x představují pozice mikrofonů, P je pozice zvukového zdroje a r_x vzdálenosti mikrofonů od zdroje

Za speciální případ lineárního diferenciálního pole lze považovat 2 mikrofony v dané konstantní vzdálenosti od sebe. Takové pole se nazývá lineární diferenciální pole 1. řádu a signál je u něho zpracován podle horní části diagramu 1.3 - výstup nese označení „First-order output“. Signál z prvního mikrofonu je zpožděn o časový rozdíl, odpovídající době šíření zvukové vlny po dráze δ . Zpožděný signál je odečten od signálu z druhého mikrofonu a tím vytváří výstupní signál s definovanou směrovostí. Směrovou charakteristiku tohoto diferenciálního pole lze odvodit při podmínce, že je dopadající zvuková vlna rovinná (platí, že $l \gg \delta$, kde l je vzdálenost zdroje zvuku a δ je vzdálenost mikrofonů). Jako d označíme šikmou vzdálenost, kterou zvuková vlna musí urazit při šíření mezi mikrofony. Pro její velikost platí [3]:

$$d = \frac{\delta}{\cos \varphi}, \quad (1.2)$$

kde φ je úhel dopadající vlny vůči spojnici δ . První mikrophon zaznamená zvukovou vlnu s průběhem:

$$p_A = p_1 e^{j\omega t}, \quad (1.3)$$

kde p_1 je amplituda akustického tlaku, ω úhlová rychlost vlny a t čas. Analogicky, druhý mikrophon zaznamená zvukovou vlnu s průběhem:

$$p_B = p_1 e^{-jk\delta} e^{j\omega t} = p_1 e^{-jkd \cos \varphi} e^{j\omega t}, \quad (1.4)$$

kde k je odpovídající vlnčet akustické vlny. Po zpoždění zpoždovací linkou bude mít signál mikrofonu průběh:

$$p_{Bz} = p_1 e^{-jkd \cos \varphi} e^{j\omega(t-\tau)}, \quad (1.5)$$

kde τ je časové zpoždění zpoždovací linky. Po odečtení signálů vznikne výsledný signál:

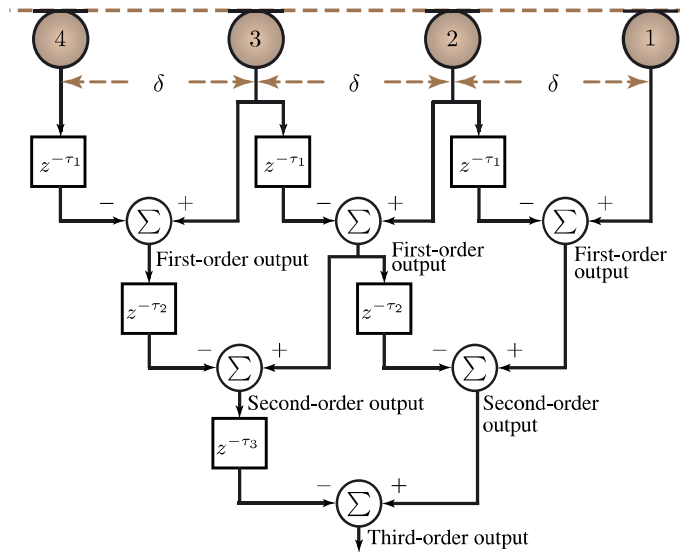
$$U(\varphi, \omega) = p_1 e^{j\omega t} [1 - e^{-j\omega(\frac{d}{c_0} \cos \varphi + \tau)}], \quad (1.6)$$

kde c_0 je rychlost šíření zvuku v daném prostředí. Z výstupního signálu pak lze odvodit směrovost mikrofonního pole:

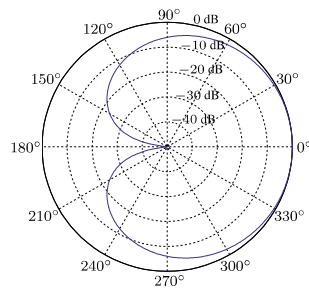
$$D(\varphi, \omega) = \frac{U(\varphi)}{U(0)} = \frac{1 - e^{-j\omega(\frac{d}{c_0} \cos \varphi + \tau)}}{1 - e^{-j\omega(\frac{d}{c_0} + \tau)}}, \quad (1.7)$$

která na frekvencích $f = \frac{\omega}{2\pi} \ll \frac{c_0}{\delta}$ odpovídá kardioidě, viz obr. 1.4 a na vyšších frekvencích má komplikovanější průběh, viz obr. 1.6. Přenosová funkce mikrofonního pole odpovídá vzorci 1.8.

$$TF(\varphi, \omega) = \frac{U(\varphi, \omega)}{p_1 e^{j\omega t}} = 1 - e^{-j\omega(\frac{d}{c_0} \cos \varphi + \tau)}, \quad (1.8)$$



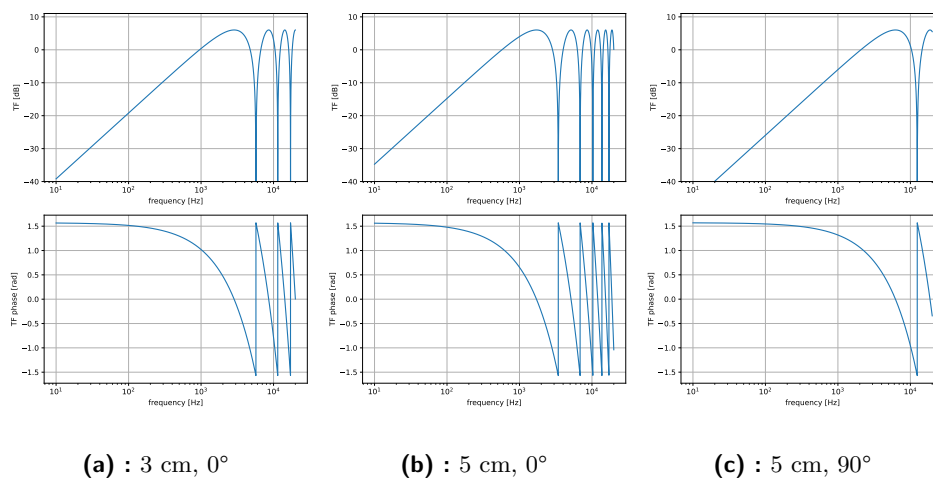
Obrázek 1.3: Přehledové schéma tvorby výsledného signálu v diferenciálním mikrofonním poli 3. řádu [3]



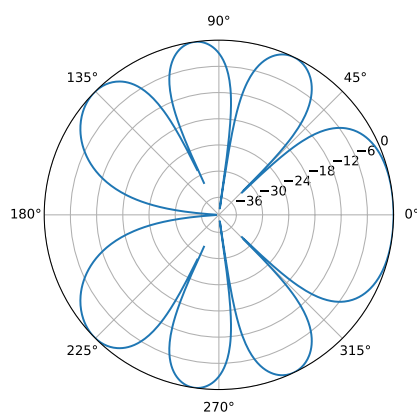
Obrázek 1.4: Kardioidní směrová charakteristika diferenciálního mikrofonního pole 1. řádu [3]

Na ukázkách přenosové funkce 1.5a a 1.5b je vidět, jak se mění v závislosti na změně vzdálenosti mikrofonů. Nuly v přenosové charakteristice vznikají, pokud se vzdálenost mezi mikrofony rovná celočíselným násobkům poloviny vlnové

délky (při úhlu dopadu vlny 0°). Při zvyšování vzdálenosti se nuly přenosové funkce posouvají do nižších hodnot, protože už při nižší frekvenci se splní zmíněná podmínka pro vytvoření nuly. V oblasti pod první nulou převodní charakteristiky je směrovost pole zhruba kardioidní. Výstupní signál zde má malou úroveň, což lze kompenzovat integrátorem, ale za cenu zesílení šumového pozadí. Při jiném úhlu dopadu vlny se nuly posouvají do oblasti vyšších frekvencí. Na obr. 1.6 je možné vidět, jak se změní směrová charakteristika, přejdeme-li do oblasti vyšších frekvencí. Při změně úhlu dopadu vlny totiž častěji vznikají situace, kdy se signály z mikrofonů plně odečtou a vznikne nulová odezva.



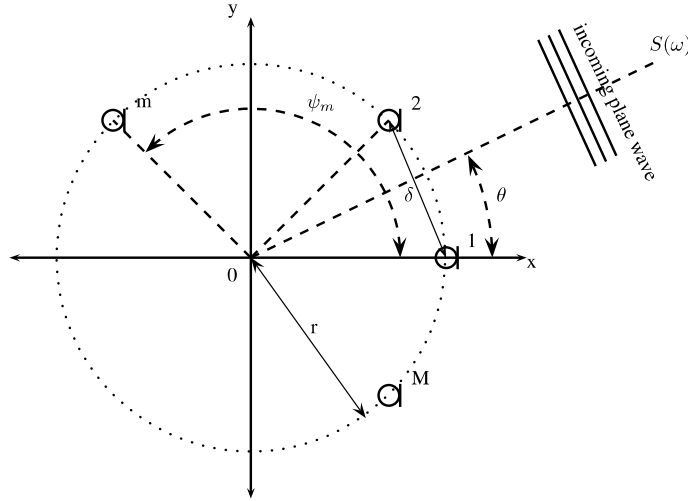
Obrázek 1.5: Přenosové funkce diferenciálního pole 1. řádu při různých parametrech vzdálenosti mikrofonů a úhlu dopadající rovinné vlny



Obrázek 1.6: Směrová charakteristika diferenciálního mikrofonního pole 1. řádu se vzdáleností měničů 5 cm, při frekvenci dopadající zvukové vlny $f = 12$ kHz

1.3.2 Cirkulární pole

Pokud umístíte mikrofony na kružnici, vytvoříme tím pole cirkulární, které je znázorněno na obr. 1.7.



Obrázek 1.7: Přehledové schéma cirkulárního mikrofonního pole s uniformním rozdělením mikrofonů [6]

Jak uvádí [6], cirkulární mikrofonní pole jsou schopna změnou parametrů zpracování signálu svou směrovou charakteristiku i natáčet, což u lineárních mikrofonních polí nelze realizovat. Celkem je možné směrovou charakteristiku natáčet do M různých směrů, kde M je počet mikrofonů. Stejně tak lze měnit tvar směrové charakteristiky, kdy počet možných tvarů odpovídá řádu mikrofonního pole.

1.3.3 Sférické pole

Sférické mikrofonní pole je dalším typem mikrofonního pole, kdy jsou mikrofony uspořádány na povrchu sféry [7], [1]. Takové pole lze zkonstruovat jako otevřené, kde jsou mikrofony umístěny volně v prostoru, nebo pevné, kde jsou mikrofony umístěny na povrchu pevné sférické plochy. Pevná varianta je výhodnější pro použití se všesměrovými mikrofony, jak rozebírá [7].

Pevné sférické mikrofonní pole pracuje na principu snímání hodnot akustického tlaku na různých místech sféry poté, co dojde k rozptylu příchozí zvukové vlny na povrchu sféry, který se řídí tzv. sférickými harmonickými funkcemi [9]. Jejich reálná část se dá vyjádřit jako:

$$Y_l^m(\varphi, \theta) = N_l^{|m|} \cdot P_l^{|m|}[\sin \theta] \cdot \begin{cases} \sin(|m|\varphi), & \text{pro } m < 0, \\ \cos(|m|\varphi), & \text{pro } m \geq 0, \end{cases} \quad (1.9)$$

kde φ je azimut, θ elevační úhel, l značí řád sférické harmonické funkce a m její stupeň. $N_l^{|m|}$ je normalizační koeficient a $P_l^{|m|}[\sin \theta]$ přidružená Legendrova funkce řádu l a stupně $|m|$. Sférické harmonické funkce vycházejí z řešení

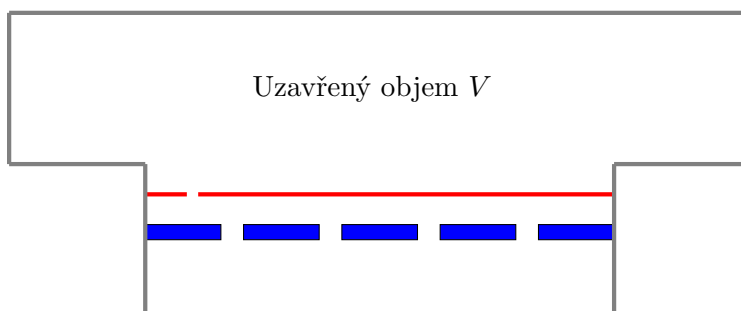
vlnové rovnice ve sférických souřadnicích po vypuštění parametru poloměru, jelikož ten je fixován na hodnotu poloměru pevné sféry.

Pomocí sférického mikrofonního pole je možné nahrávat zvuk do ambisonických formátů [1], což jsou formáty záznamu prostorového zvuku. Zvuk je možné nahrát do vícero možných ambisonických formátů, podle stupně sférických harmonických funkcí. Vyšší řád ambisonického formátu lépe (podrobněji) mapuje směrové parametry příchozího zvuku. Pro vyšší řád ambisonické nahrávky je nutné použít mikrofonní pole s větším počtem mikrofonů [7].

Kapitola 2

MEMS mikrofony a digitální přenos signálu

Pro konstrukci mikrofonních polí je vhodné použít mikrofony s co nejmenšími rozměry, se kterými je možné stavět i pole malých rozměrů. Ze současné nabídky takovou roli nejlépe plní Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) mikrofony, což jsou elektrostatische mikrofony vyrobené pomocí polovodičových technologií, díky čemuž projevují jen malé odchylky mezi vyrobenými kusy [1]. Vnitřní strukturu, kterou je možné vidět na obr. 2.1 tvoří pevná elektroda s otvorem pro vyrovnání atmosferického tlaku a pohyblivá membrána [8].

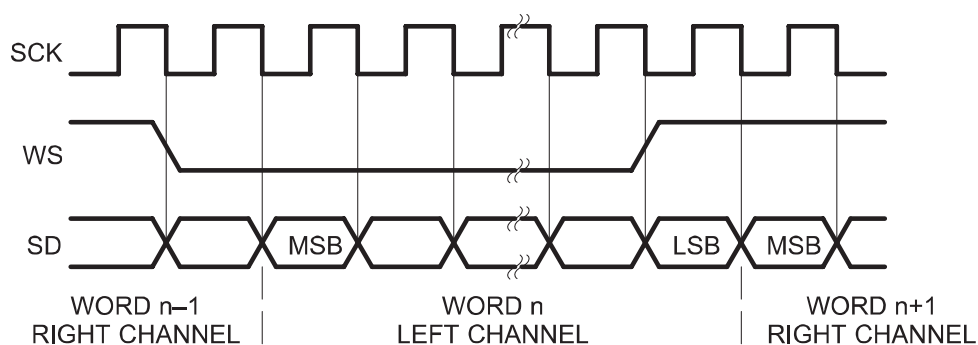


Obrázek 2.1: Vnitřní struktura MEMS elektrostatische měniče. [1] Modře je vykreslena pevná elektroda s perforací, červeně membrána s otvorem pro vyrovnání statického tlaku, šedě okolní konstrukce

V dnešní době jsou MEMS mikrofony často vyráběny s digitálním výstupním rozhraním Inter-IC Sound (I2S), které umožňuje přenášet data ze 2 mikrofonů po jedné datové lince. Rozhraní, již dříve popsáno v autorově práci [1], je tvořené vodiči Serial Data Clock (SCK), Serial Data (SD) a Left-Right Clock (LRCLK). Diagram fungování je na obr. 2.2. Zařízení připojené na sběrnici jako master volí, budí taktovací signál SCK a signál výběru kanálu LRCLK, podle jehož aktuální úrovně je vybráno slave zařízení (mikrofon), který po dobu jedné periody LRCLK vysílá jeden vzorek svých dat [10] ve formátu dvojkového doplňku v pořadí MSB-first (nejdříve se vysílá bit s největší vahou). Frekvenci signálu SCK, f_{sck} odpovídá:

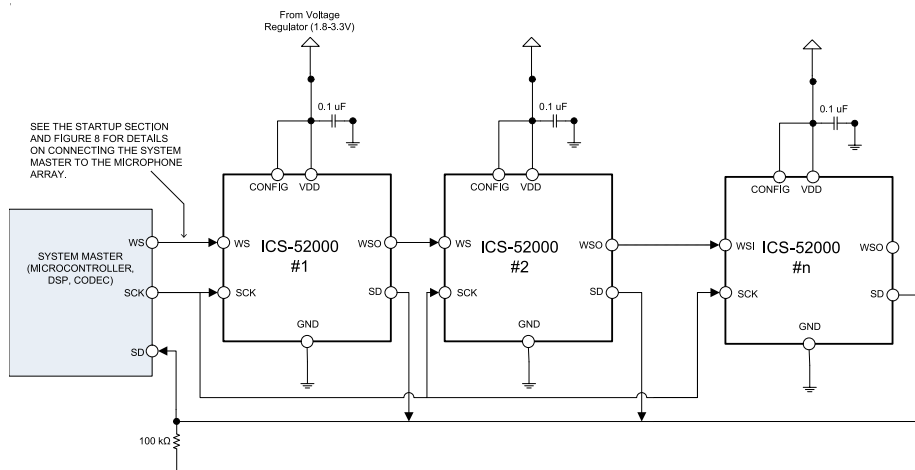
$$f_{sck} = f_{vz} \cdot b, \quad (2.1)$$

kde f_{vz} je vzorkovací frekvence a b je počet bitů na jeden vzorek.



Obrázek 2.2: Časový diagram fungování sběrnice I2S [10]

Modifikací sběrnice I2S zřetěžením slave zařízení (a možným zvýšením jejich počtu) dojdeme ke sběrnici TDM [1]. Ta používá shodnou formu dat i taktovacího signálu, jen je signál LRCLK nahrazen signálem WS, který je vedený zřetěženě, viz obr. 2.3, a každé zařízení na sběrnici tímto signálem vyzývá následující zařízení k zahájení přenosu dat. Sběrnice TDM může mít různá omezení maximálního počtu slave zařízení, právě podle typu připojených zařízení. Např. mikrofon TDK ICS-52000 umožňuje fungovat na této sběrnici v počtu max. 16 kusů [11].



Obrázek 2.3: [11] Diagram zapojení zařízení na sběrnici TDM

Kapitola 3

Zásady návrhu 3D modelování

3D tisk je technologie aditivní výroby, při které je výsledný prototyp vyráběn postupným nanášením vrstev materiálu a jejich spojováním. Autorova předchozí práce [1] shnuje základy vlastností 3D tisku. Následující text rozšiřuje tuto práci o dodatečné informace. Práce [12] rozebírá možnosti a omezení Fused Deposition Modeling (FDM) 3D tisku, což je levná a rozšířená technologie 3D tisku, umožňující tisk jednoduchých i složitějších objektů, avšak s velkými omezeními, ke kterým patří:

- Přílnavost objektu k podložce - je vhodné zvětšit spodní podstavu
- Tisk výčnělků - problematický, jelikož je nutné pod nimi tisknout podpěry
- Objem objektů - z důvodu tepelné roztažnosti se mohou objemnější objekty deformovat
- Malé prvky - Tisk je rozměrově omezen, detaily se nevytisknou z důvodu průměru trysky
- Tolerance - Každý materiál obvykle vykazuje jiné tolerance děr nebo vnějších obrysů

3.1 Parametrický návrh 3D modelů

Na rozdíl od pevného 3D modelování, ve kterém veškeré úpravy probíhají přímou interakcí s modelem přináší parametrické modelování možnosti rychlé změny objektů. Pro parametrický návrh je podstatné, že je v jeho rámci možné definovat parametry, což jsou proměnné, jejichž hodnoty jsou vázány na rozměry nebo jiné vlastnosti modelu [13].

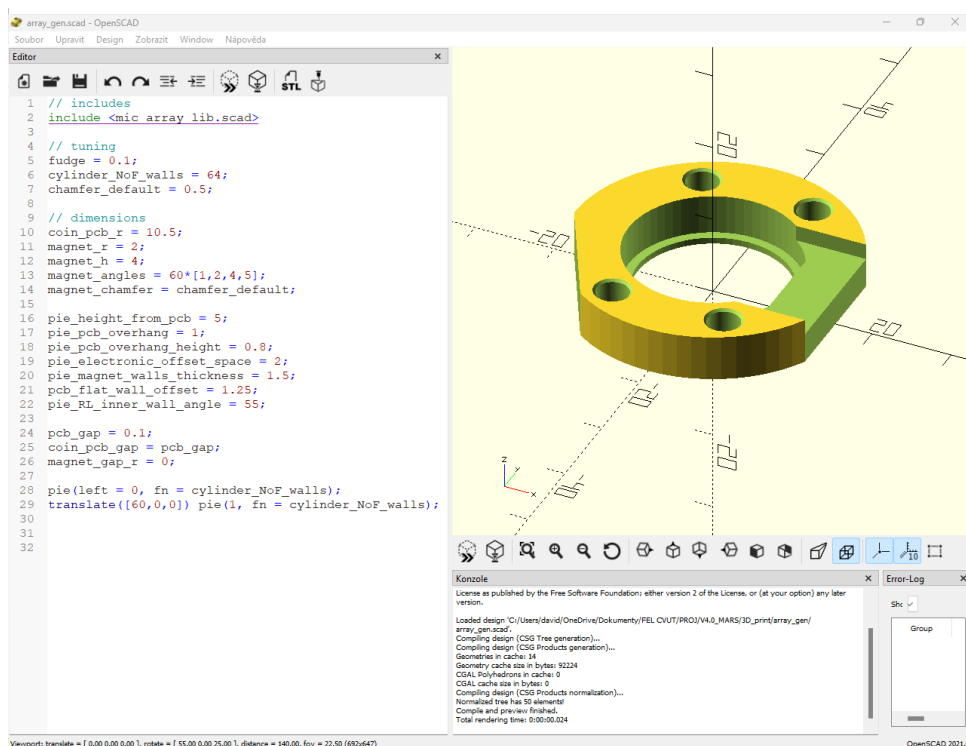
3.1.1 Modelování v programu Autodesk Fusion 360

Tento komerční nástroj je v současné době hojně používán pro svojí jednoduchost. Byly v něm provedeny předchozí autorovy návrhy, viz přílohu

B. Nástroj umožňuje rychlé základní i pokročilejší modelování s uchováním postupu tvorby, čímž je kdykoli možné upravit předchozí krok (např. délku úsečky nebo výšku vytažení objektu). Parametrizace je možná jen na základní úrovni - tj. uživatel má možnost měnit rozměry, úhly a podobné hodnoty, ale není mu umožněno např. parametrické větvení návrhu na základě daných podmínek.

3.1.2 Modelování v programu OpenSCAD

Nástroj OpenSCAD je program pro parametrické modelování objektů na bázi textového vstupu [13]. Uživatel vkládá instrukce pro tvorbu objektů, které se vykreslují v náhledovém okně. Protože jsou veškeré instrukce vkládány textově, není problém návrh větvit podmínkami nebo používat složité parametrické struktury. Při dostatečném ošetření realizačních podmínek tak nástroj OpenSCAD klade uživateli jen minimální omezení. Na obr. 3.1 je uživatelské rozhraní programu, s textovým vstupním rozhraním v levé části, náhledovým oknem v pravé horní části a konzolí příkazů v pravé dolní části.



Obrázek 3.1: Okno s uživatelským rozhraním programu OpenSCAD

OpenSCAD umožňuje tvorbu objektů pouze s konečným počtem nezakřivených stěn (neumožňuje tedy např. modelování ideálního válce). Toto omezení je nutné si uvědomit na počátku návrhu nového modelu a přizpůsobit mu postup prací. Každé zvýšení počtu stěn (tedy např. aproximování válce čtyřicetistěnou místo desetistěnou) přináší velké zvýšení nároků na výpočetní schopnosti počítače a prodlužuje výsledné renderování výstupního souboru.

■ Příkazy programu OpenSCAD

Pro základní modelování v programu OpenSCAD jsou používány hlavní 3 druhy příkazů - tvorba primitivních objektů, příkazy pro jejich kombinování a příkazy pro jejich transformace.

Tvorba objektů začíná volbou primitivních tvarů, ze kterých se objekt bude skládat. Uživatel má na výběr z tvarů „cube“, „cylinder“, „sphere“ a „polyhedron“. Každý z těchto objektů má své vlastní parametry, jako jsou délky stran nebo jemnost vykreslování. Objekty je možné transformovat příkazy „scale“, „resize“, „rotate“, „translate“ nebo „mirror“ a následně na jejich kombinacích provádět logické operace, jako je „union“, „difference“ nebo „intersection“. Během modelování je však třeba věnovat pozornost koplanárním rovinám, tedy rovinám ležícím alespoň z části na stejných souřadnicích. Pokud se totiž uživatel rozhodne od jednoho objektu odečíst jiný s koplanární plochou, výsledek v některých případech vede na chybu ve výpočtu geometrie a výsledný model není platný „manifold“, nemá tedy uzavřený objem. Tento problém se většinou řeší přidáním malé hodnoty „fudge“ k rozměrům odčítaného objektu, aby se odstranila koplanarita rovin.



Část II

Praktická část

Kapitola 4

Shrnutí předchozí práce

Výčet autorovy předchozí práce, která souvisí s touto prací je v příloze B.

4.1 Bakalářská práce

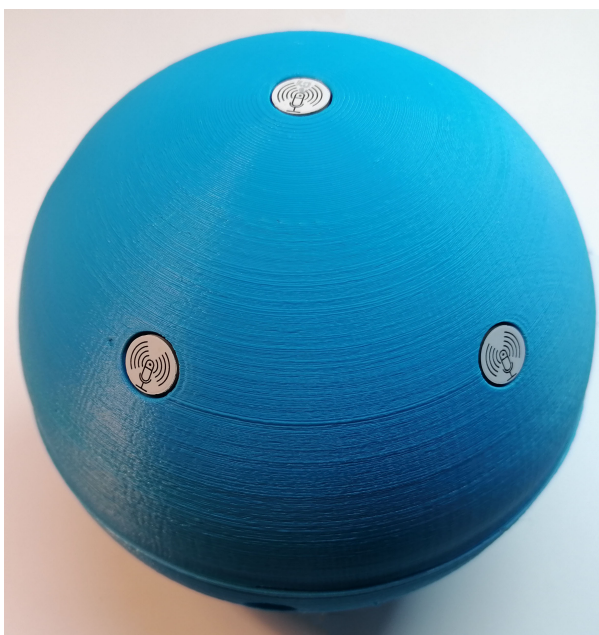
Bakalářská práce [1] položila základy projektu sférického mikrofonního pole pro univerzální použití. Jako měniče byly zvoleny MEMS mikrofony díky svým malým rozměrům, malým rozdílům mezi jednotlivými vyrobenými kusy (což je důležitá vlastnost pro konstrukci mikrofonních polí) a v neposlední řadě i často integrovanou digitální elektronikou schopnou průběhy akustického tlaku zachycené mikrofonem posílat ve formě dat po digitální sběrnici (např. PDM, I2S nebo TDM).

4.1.1 Konstrukce

Mikrofony MEMS jsou převážně vyráběny jako všesměrové, proto bylo vzhledem k informacím z [7] mikrofonní pole vyvinuto jako sférické s pevnou sférickou konstrukcí, sloužící pro rozptyl zvukového vlnění. Jelikož šlo o první vývojový prototyp, bylo zařízení zkonstruováno spíše s ohledem na jednoduchost ladění a zprovoznění, než na praktičnost použití. Konstrukce byla vy-modelována v programu Fusion 360 s možností mírné parametrizace (zejména rozmístění mikrofonů na sféře) a vyrobena pomocí Fused Deposition Modeling (FDM) 3D tisku. Větší rozměry sféry umožnily snadné sestavení a měli by zajistit dobré směrové vlastnosti při nahrávání prostorového zvuku i na nižších vzorkovacích frekvencích. Hotová konstrukce je vyobrazena na obr. 4.1.

4.1.2 Elektronika

Pro snímání zvuku byly vybrány MEMS mikrofony ICS-52000 od TDK InvenSense [11], jelikož byly jediné na trhu disponující sběrnici TDM, která umožňuje propojit dostatečný počet mikrofonů. V případě zvolených mikrofonů je limitem 16 slave zařízení, což bylo nakonec i použito, protože tento



Obrázek 4.1: První verze mikrofonního pole z práce [1]

počet odpovídá počtu mikrofonů nutných pro zkonstruování ambisonického mikrofonu 3. řádu (požadavek zadání práce). Data z mikrofonů jsou čtena mikropočítačem řady Raspberry Pi v kombinaci s navrženým adaptérem konvertujícím rozhraní I2S na rozhraní TDM (více informací v samotné práci).

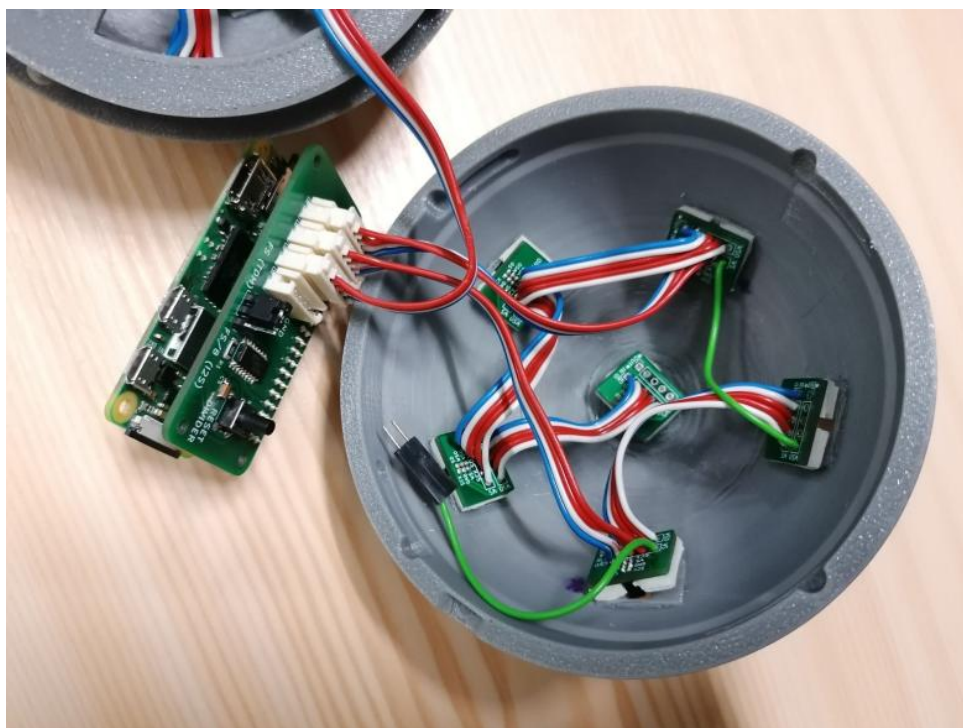
■ 4.1.3 Závady původního zařízení

Bohužel, původní zařízení vykazovalo velké množství problémů, které bylo potřeba vyřešit. Jednalo se zejména o:

- Adaptér pro konverzi I2S rozhraní na TDM rozhraní byl problematický z důvodu příliš pomalého čítače, sloužícího jako dělič frekvence. Docházelo ke tvorbě časového zpoždění taktovacího signálu.
- Přeslechy mezi signály - časté přeslechy z taktovacího signálu do datového signálu způsobovaly v některých případech poškození dat

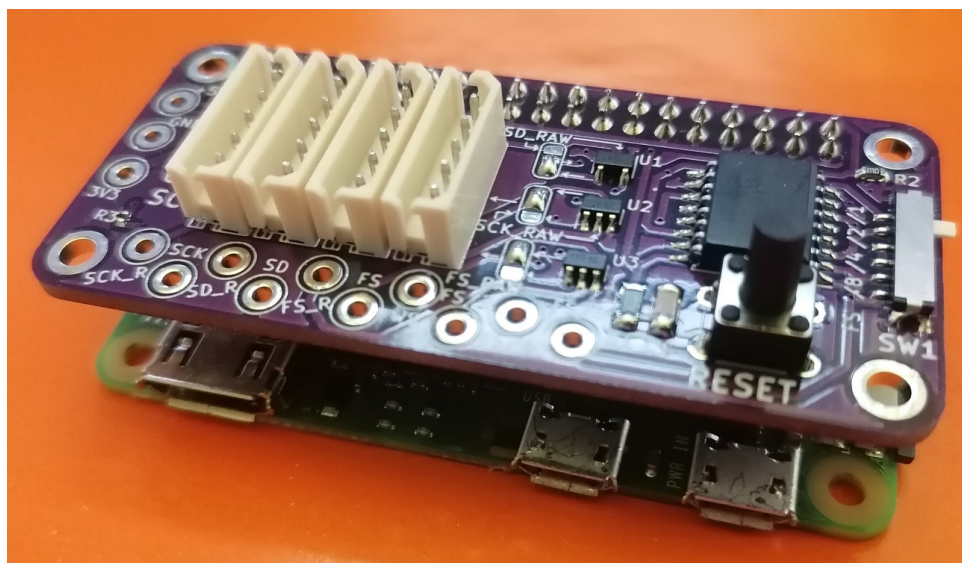
4.2 Druhá verze sférického mikrofonního pole

Pokračováním původního projektu vznikla druhá verze, s menšími rozměry a zabudovatelnou elektronikou. Konstrukce je rozměrově menší a přináší mimo jiné změny v uchycení mikrofonních modulů, jejich připojení nebo snadné rozebírání. Pro zpracování dat je použit mikropočítač Raspberry Pi Zero 2W, který je dostatečně malý, aby se vešel do vnitřní části zařízení. Modul pro konverzi I2S na TDM rozhraní je zde také zmenšený. Fotografie tohoto pole, v otevřeném stavu je na obr. 4.2.

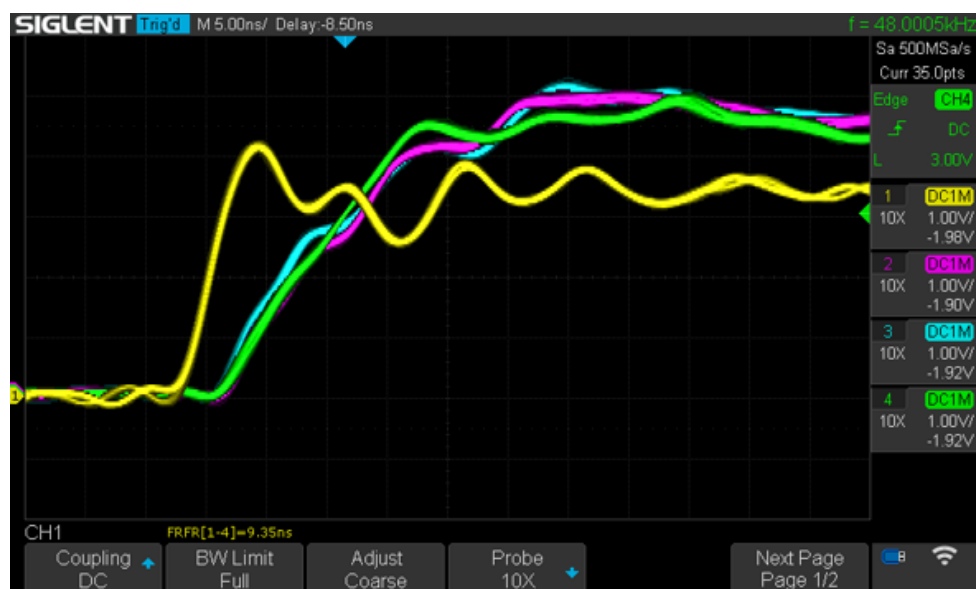


Obrázek 4.2: Druhá verze mikrofonního pole

Po testech funkčnosti se projevily stejné závady, jako u původního mikrofonního pole. Proto vývoj směřoval ještě k jedné verzi adaptéru pro převod I2S na TDM. U toho byl původní čítač vyměněn za rychlejší typ - CY74FCT191ATSOC, pro který byly v datovém listu uvedené značně menší hodnoty zpoždění vstup-výstup. Hotová a osazená deska (na obr.4.3 byla otestována generátorem signálu a osciloskopem na hodnotu zpoždění vstup-výstup. Výsledky byly publikovány v dřívější autorově práci (viz přílohu B) a jsou vyobrazeny na obr. 4.4. Průměrné zpoždění čítače činí asi 9,5 ns, což je mnohem méně, než polovina minimální používané periody taktovacího signálu - 40,7 ns.



Obrázek 4.3: Poslední verze převodníku pro konverzi rozhraní I2S na TDM



Obrázek 4.4: Test zpoždění vstup-výstup poslední verze převodníku pro konverzi rozhraní I2S na TDM

Kapitola 5

Návrh elektronické části

Součástí práce bylo vyvinout plošné spoje pro jednotlivé mikrofony a jejich protikusy, zajišťující přenos signálu do vodičů vedoucích do zařízení, které signály bude schopno přijmout. Jak je popsáno v části 6.1.1, navržené zařízení počítá s použitím výměnných mikrofonních modulů kruhového tvaru, které jsou k jednotlivým mikrofonním polím připevněny magneticky. Navržený plošný spoj s mikrofonem proto používá pro přenos signálů a napájení pružinový pinový konektor, který se spojí s pozlacenými vodivými ploškami na jiném plošném spoji, který je umístěn v mikrofonním poli. Z toho jsou následně vyvedené lankové vodiče, pokračující do zařízení pro zpracování signálu. Konektor JST SH osazený na plošných spojích s mikrofony pak slouží jako záložní varianta přímého vedení signálu k dalšímu zpracování.

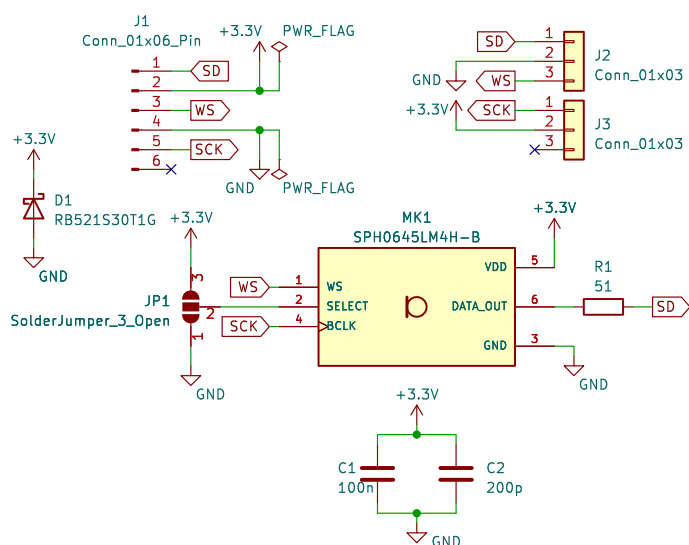
Pro návrh všech plošných spojů byl zvolen nástroj KiCad verze 7.0.

■ Plošné spoje pro mikrofonní moduly

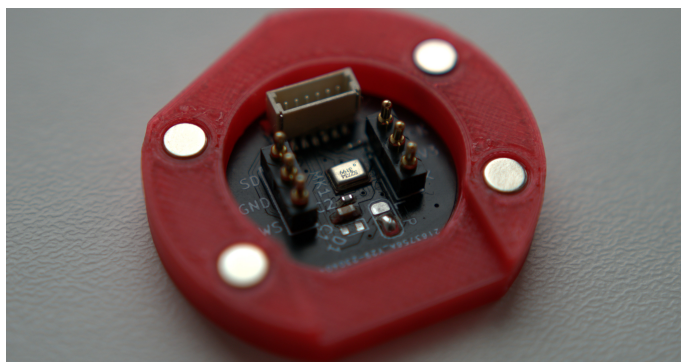
Pro realizaci byly zvoleny Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) mikrofony Knowles SPH0645LM4H-B, které disponují digitálním rozhraním I2S. Volba na tento typ rozhraní byla učiněna z důvodu vícero alternativních nabídek na trhu, kdy je možné v budoucnu používat jiné typy mikrofonů při zachování stejného typu výstupního rozhraní. Jelikož použitý mikrofon odesílá výstupní data už v digitálním formátu, stačilo plošný spoj doplnit jen minimálním množstvím dodatečných komponent, jak je vidět na schématu 5.1. Hotový osazený plošný spoj je na obr. 5.2.

■ Plošné spoje pro zabudování do konstrukce pole

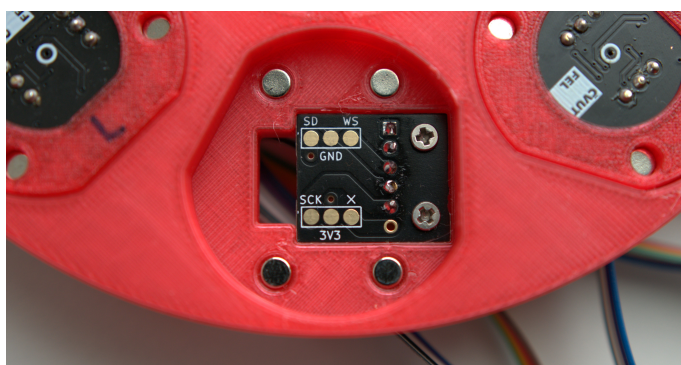
Jako protikus k plošným spojům s mikrofony jsou do mikrofonního pole zabudovány (příšroubovány) plošné spoje s pozlacenými ploškami. Z nich je signál vyveden připájenými vodiči k dalšímu zpracování. Instalovaný plošný spoj v cirkulárním mikrofonním poli je na obr. 5.3.



Obrázek 5.1: Schéma plošného spoje pro MEMS mikrofon



Obrázek 5.2: Hotový plošný spoj s MEMS mikrofonem umístěný ve vytisknuté modulární konstrukci



Obrázek 5.3: Hotový plošný spoj pro vyvedení signálů z mikrofonního modulu k dalšímu zpracování, instalovaný do cirkulárního mikrofonního pole

Kapitola 6

Návrh fyzické konstrukce pro 3D tisk

Nejzásadnější částí celého návrhu bylo vytvořit 3D model celého zařízení v souladu s požadavky vyplývajícími z možností a omezení FDM 3D tisku. Protože bylo cílem práce vyvinout mikrofonní pole bez bližšího určení, bylo rozumné model vytvořit jako parametrický nebo alespoň modulární, aby bylo možné kdykoli snadno vytvořit modifikovaný nebo úplně nový (avšak s elektronikou kompatibilní) model. Většina navržených modelů pro 3D tisk byla vytvořena v programu Autodesk Fusion 360.

6.1 Modulární prvky

Navržený systém byl měl umožňovat jednoduchý návrh libovolných dalších tvarů a typů mikrofonních polí s co možná nejmenším omezením možností návrhu. Takovou podmínku lze dobře splnit vytvořením sady modulárních nástrojů zabezpečujících integrování pouze nutných prvků (zejména samotných mikrofónů) a zbytek návrhu ponechávají na tvůrci.

Zkušenosti nasbírané během tvorby práce [1] určily ideu vývoje - tj. vytvoření vyjmutelných mikrofonních "kapslí" s vyvedením signálu do protilehlého plošného spoje zabudovaného do těla mikrofonního pole, ze kterého je snadné signály vyvést k dalšímu zpracování po lankových vodičích.

6.1.1 Magnetické mikrofonní moduly

Mikrofonní pole vytvořená v rámci [1] a navazujících publikací trpěla v největší míře na zdlouhavou výměnu elektroniky (v případě mikrofónů napevno připájených k řídicí elektronice) nebo na špatné elektrické kontakty (v případě použití modulárního konektorového systému - v té době pomocí pinových konektorů s roztečí 1,27 mm). Bylo proto záhodno vymyslet nový systém se spolehlivým elektrickým propojením, jakož i jednoduchou výměnou mikrofónů mezi různými typy mikrofonních polí.

Nyní blíže rozvedu řešení z hlediska konstrukce a 3D tisku. Celý modul má tvar sousého meziválcí. Tento tvar je zvolen, jelikož se jedná o dobrý

kompromis pro jeho umístování jak do lineárních, tak i kruhových nebo sférických mikrofonních polí. Jeho vnitřek slouží pro umístění plošného spoje s MEMS mikrofonem, jehož návrh je blíže popsán v kapitole 5. Plošný spoj nesoucí mikrofon má taktéž kruhový tvar a do navrženého modulu je vložen ze strany, která směřuje směrem do konstrukce celého zařízení. Je zapřený o kruhový převis, který je dostatečně silný, aby kompenzoval sílu vytvořenou pružinami elektrického propojení a pro případ vyndání modulu z konstrukce mikrofonního pole je plošný spoj k převisu přilepený univerzálním kyanoakrylátovým lepidlem. Prostor pro umístění plošného spoje je z jedné strany zkosen tak, aby bylo možné plošný spoj umístit jen správně natočený, a tím zajistit, že elektrická propojení budou vždy stejně orientována.

Použitá I2S sběrnice je charakteristická zapojením vždy 2 mikrofonů na jednu sběrnici. To skýtá 2 možné problémy:

- Možné prohození pořadí dvou kanálů při opakovaném sestavení jednoho typu pole
- Možné zapojení dvou mikrofonů se stejným definovaným kanálem na jednu sběrnici, a tím vytvořením situace se dvěma kolidujícími zdroji signálu

Každý modul proto disponuje dvěma zkosenými ploškami z vnějších stran, které korespondují se zkosenými ploškami na daném typu mikrofonního pole, a tím fyzicky znemožňují, aby nastala kterákoli z obou jmenovaných situací. Výsledkem jsou 2 typy modulů - pro levý a pro pravý kanál I2S.

Použitý pružinový pinový konektor vyžaduje, aby plošný spoj (s modulem) na místě držela jiná aparatura (v zařízení zkonstruovaném pro bakalářskou práci [1] plošné spoje držely přímo použité konektory). Navržené řešení proto používá magnety jako hlavní přídržnou sílu a vnější obvodové stěny modulu pro směrové vedení.

■ Alternativní model vytvořený v programu OpenSCAD

Jako zárodek možného budoucího návrhu s ještě lepší parametrizací byl vytvořen identický model mikrofonního modulu v programu OpenSCAD, a to formou parametrického modulu, který stačí volat z libovolného kódu uživatele. Náhled do programu OpenSCAD s vytvořeným modulem je na obr. 3.1.

■ 6.1.2 Negativ slotu pro usazení magnetického modulu

Navržený systém zjednodušuje návrh výsledných typů mikrofonních polí zejména díky negativu slotu (otvoru, jamky), do které jsou usazovány připravené mikrofonní moduly. Negativ samozřejmě obstará všechny důležité funkční prvky na mikrofonním poli pro kompatibilitu s mikrofonními moduly:

- Otvory pro neodymové magnety
- Plocha pro umístění plošného spoje pro elektrické propojení s mikrofonním modulem
- Otvory pro šroubové připevnutí plošného spoje
- Otvory pro protažení vodičů sběrnice I2S

V poslední verzi disponuje negativ dostatečně širokým otvorem pro sběrnici I2S, který umožní protažení celého plošného spoje, a tím není nutné plošný spoj vždy znovu zapájet do nového mikrofonního pole (u staré verze bylo nutné přiložit plošný spoj z jedné strany, a ze druhé k němu připájet dané vodiče).

■ 6.2 Navržená mikrofonní pole

Pro demonstrační účely této práce byly navrženy 2 typy mikrofonních polí - lineární a cirkulární, které bylo i vyrobeno a otestováno. Uvedené popisy mohou sloužit jako inspirace pro budoucí tvorbu dalších typů mikrofonních polí na vyvinuté platformě.

■ 6.2.1 Lineární pole

Nejjednodušší navrženou verzí vhodnou pro návrh je lineární mikrofonní pole, které je na představené platformě nejjednodušším typem z hlediska realizovatelnosti. Teorie fungování je popsána v části 1.3.1. Pro návrh stačí vygenerovat obdélníkový prvek, do kterého se následně vytvoří otvory pro mikrofonní kapsle pomocí poskytnutého negativu. Návrh pak lze jako prototyp ihned vytisknout a po osazení vnitřními plošnými spoji používat.

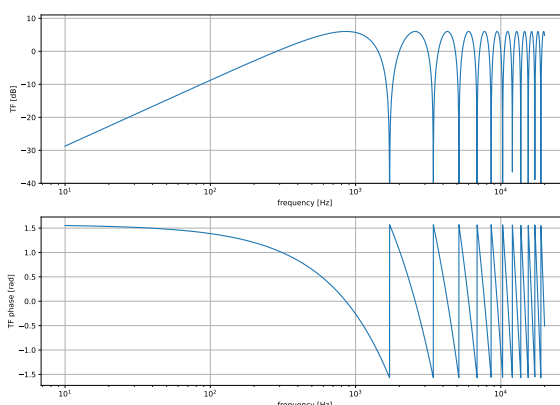
■ 6.2.2 Cirkulární pole

Základní parametry návrhu se řídí teorií, popsané v části 1.3.2 se promítají do návrhu hlavně po stránce umístění a vzdáleností jednotlivých mikrofonů. Z praktických důvodů bylo vytvořeno cirkulární pole, jehož mikrofony leží na kružnici o průměru 10 cm. Pro otestování funkčnosti a akustických vlastností byl zvolen způsob vyhodnocení kardioid tvořených vždy dvěma protilehlými

mikrofony. Při zpracování dat z mikrofonních párů je nutné vždy signál jednoho z nich zpozdít o čas, který odpovídá době šíření zvukového signálu ve volném poli při dané akustické rychlosti na vzdálenosti protilehlých mikrofonů. Toto lze při zpracování signálů provést v časové i frekvenční oblasti. Ve frekvenční oblasti je možné takto signál zpracovat o čas, který nemusí odpovídat celočíselnému násobku vzorkovací periody. Zato v časové oblasti (bez použití interpolace signálu) není možné signál o neceločíselný násobek vzorkovací periody zpozdít. Pokud budeme počítat s běžně uváděnou rychlostí zvuku $c = 343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, je vzdálenost, kterou zvuk urazí za jednu vzorkovací periodu při vzorkovací frekvenci $f_{vz} = 48 \text{ kHz}$:

$$s_1 = \frac{c}{f_{vz}} = \frac{343}{48000} \doteq 7,15 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Z praktického hlediska (jednoduchost použití, tisku, snadná přenositelnost) byla zvolena vzdálenost protilehlých mikrofonů 100 mm, což je velmi blízko čtrnáctinásobku vzdálenosti $s_1 \cdot 14 \doteq 100,042 \text{ mm}$ (relativní chyba činí 0,04 %). Teoretická přenosová funkce dvou protilehlých mikrofonů, tvořících diferenciální mikrofonní pole 1. řádu, pro úhel dopadu zvukové vlny 0° , dle vzorce 1.8, je na obr.6.1. Je vidět, že oblast, kdy je směrová charakteristika blízka kardioidě končí už u frekvencí kolem 1 kHz.



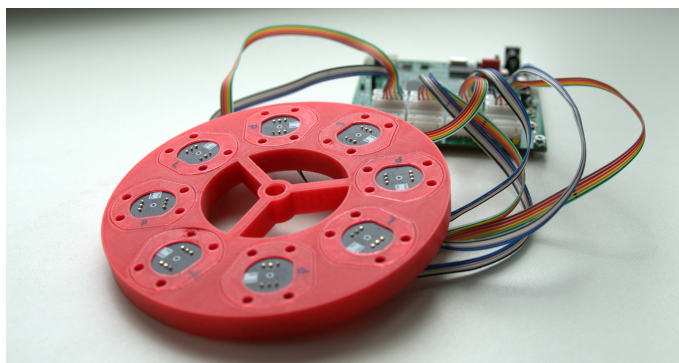
Obrázek 6.1: Přenosová funkce dvou protilehlých mikrofonů, tvořících diferenciální mikrofonní pole, na navrženém cirkulárním poli

Modelování

Samotný proces 3D modelování je zde velmi jednoduchý a obdobný, jako u lineárního pole. Z extrudovaného disku jsou odečteny negativy pro tvorbu otvorů na mikrofonní kapsle. Na závěr je přidán středový závit dle normy ANSI Unified Screw Threads 3/8-16 UNC, který vyhovuje připevnění do standardních mikrofonních stojanů.

■ Ladění rozměrů

Prototyp byl po modelování vytisknut z materiálu PETG na 3D tiskárně Prusa i3 MK3S a otestován, zda-li rozměry odpovídají použitým mikrofonním kapslím. Protože nesouhlasilo hned několik rozměrů (průměr otvorů pro kapsle byl příliš malý, otvory na magnety taktéž, plocha pro umístění plošného spoje byla příliš velká), byly výtiskem několika testovacích modelů (zahrnujících pouze prostor pro 1 mikrofonní kapsli) rozměry doladěny v průběhu 5 iterací. U výsledného cirkulárního pole byly ještě doladěny tolerance vytisknutého závitu tak, aby šel závit našroubovat na kovový protikus. Vyrobený a osazený prototyp je na obr. 6.2. Ladění rozměrů je třeba opakovat pro různé druhy materiálů a 3D tiskáren, jelikož každá kombinace může projevovat různě velká zkreslení tisknutých prvků. Obzvláště tisknutý závit byl vytištěn s výrazně odlišnými rozměry v případě použití různých druhů materiálů - PLA, PETG.



Obrázek 6.2: Hotový a osazený prototyp cirkulárního mikrofonního pole, připojený k desce s FPGA

■ Adaptér pro testovací konfiguraci

Protože bylo zamýšleno cirkulární pole otestovat pomocí přípravku vyvinutého v práci [14], byl pro testovací účely vyvinut jednoduchý adaptér, který se z jedné strany nasadí na hřídel krokového motoru otočného přípravku a z druhé strany je na něj možné našroubovat testované mikrofonní pole pomocí závitu 3/8-16 UNC. Adaptér je navíc vybavený ramenem, na které se dá připevnit veškerá elektronika potřebná k testování, která se točí dohromady s testovaným mikrofonním polem. V našem případě byla použita pro desku čtení I2S signálu s FPGA. Celá sestava je k vidění na obr. 7.2.

Kapitola 7

Zprovoznění elektronické části a funkční akustické testy

Pro demonstrační účely bylo vyrobené cirkulární mikrofonní pole osazeno navrženou elektronikou a akusticky otestováno. Zejména část 7.1 je vhodná jako návod pro budoucí osazování nově vytvořených mikrofonních polí.

7.1 Zprovoznění elektroniky

Protože vyrobené mikrofonní pole nebylo vytisknuto dle poslední verze návrhu, nešlo k instalovaným plošným spojům předem přiletovat signálové vodiče a sestavu do pole vložit a přišroubovat. Postup tak proběhl opačně a u dalších mikrofonních polí bude nutné vodiče letovat znovu.

Bohužel, u použitých vodičů (ze strany připojení k desce s FPGA) došlo ke špatnému provedení krimpování koncovek konektoru JST XH a během prvotních testů se tak projeví chyby příjmu signálu od některých mikrofonů. Problém byl vyřešen manuální opravou. K jiným problémům s elektronikou nedošlo.

7.2 Akustické testy

Cílem měření bylo ověřit, že se směrové charakteristiky diferenčních mikrofonních polí tvořených vždy dvěma protilehlými mikrofony budou blížit ideální kardioidní směrové charakteristice. K tomu bylo nutné budít zvukový signál ve slyšitelném pásmu kmitočtů a přitom nahrávat výstupní signál jednotlivých mikrofonů pro různé úhly natočení mikrofonního pole vůči budícímu reproduktoru.

Pro zjednodušení procesu měření a jeho automatizaci byl s výhodou použit přípravek vyvinutý v rámci bakalářské práce [14]. Přípravek je tvořen krokovým motorem a jednotkou jeho řízení, která komunikuje s PC pomocí sériové linky. Umožňuje připevněné měřené zařízení natáčet v horizontální rovině o

libovolný počet kroků, přičemž použitý krokový motor umožňuje natočení do 200 různých úhlů (rovnoměrně rozdělených) v rámci jedné otáčky. Skript napsaný J. Šedivým v rámci jeho aktuálně tvořené diplomové práce kombinuje řízení tohoto přípravku s řízením budícího reproduktoru a nahráváním signálů přijatých od mikrofonů skrze desku s FPGA. Po spuštění skript pro každý nastavený úhel (nastavený podle možností krokového motoru) nastaví motor do požadované polohy, přehraje sine sweep signál o délce 600 ms a současně nahraje výstupy z mikrofonů.

Kvůli případné pozdější kompenzaci frekvenční charakteristiky reproduktoru byly dohromady s některými testy nahrané i referenční nahrávky logaritmického průběhu sine sweep na elektrostatický měřicí mikrofon.

7.2.1 Test v audiovizuálním studiu

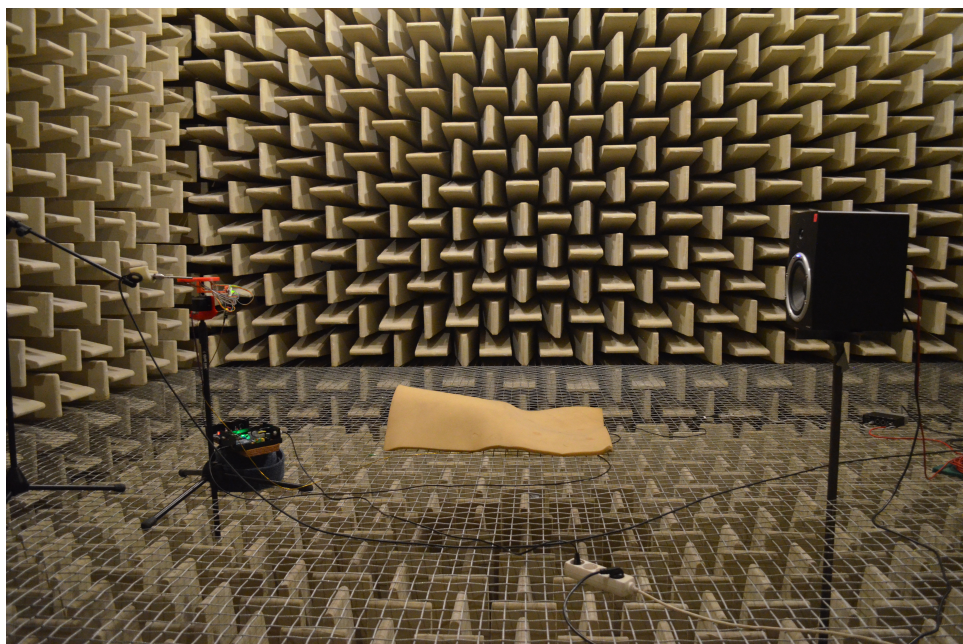
Prvním provedeným testem byl test akustických vlastností provedený v audiovizuálním studiu Katedry radioelektroniky, což je místnost vybavená akustickou úpravou pro studiové účely. Rozmístění přístrojů bylo podobné, jako u následujícího měření v bezodrazové akustické komoře. Lze si ho prohlédnout na obr. 7.1.

Měřicí sestavu tvoří budící reproduktor, sestava s krokovým motorem pro měření směrových charakteristik, testované mikrofonní pole a měřicí elektrostatický mikrofon. Aktivní studiový reproduktor značky M-Audio je připojen ke zvukové kartě Steinberg UR22 MKII, ke které je taktéž připojen měřicí mikrofon stíněným symetrickým kabelem s konektory XLR. Mikrofonní moduly na mikrofonním poli jsou připojeny k desce s FPGA. Všechno příslušenství bylo připojeno k laptopu, sloužícímu jako ovládací zařízení a prostředek k ukládání dat. Přípravek byl umístěn 1,5 m od membrány budícího reproduktoru, vertikálně tak, aby horní strana mikrofonního pole byla zarovnána na polovině výšky reproduktoru. Veškeré ostatní aparáty (notebook, řízení krokového motoru, zvuková karta) byly umístěny mimo tuto rovinu a pokud možno tak, aby co nejméně odrážely zvukový signál z reproduktoru do mikrofonního pole. Bohužel studio nebylo vyklizené a vyskytovaly se v něm i velké ploché předměty, schopné výrazně odrážet zvuk - zejména plochá televize a 2 přenosné stoly.

Hlavní měření proběhlo v celkem 100 krocích (tedy při úhlovém kroku $3,6^\circ$). Pro každý úhel testovací skript vytvořil audiosoubor .wav, který ve svém názvu nese informaci o krokové pozici motoru. Celkem proběhly 3 testy - hrubý zkušební test s malým počtem měřených úhlů, jemný test se 100 kroky a třetí test po úpravě hlasitosti reproduktoru a pořízení referenční nahrávky měřícím mikrofonem.

7.2.2 Test v bezodrazové komoře

Pro ještě lepší posouzení vlastností prototypu byla provedena další měření v bezodrazové zvukové komoře. Měřicí sestava, zachycená na obr. 7.1, byla téměř identická, jen byly všechny odrazivé předměty ještě více vzdáleny od měřicí roviny a notebook (potenciálně největší odrazná plocha) byl zakryt zvukově pohltivým materiálem. Detail měřicí sestavy kolem mikrofonního pole je na obr. 7.2. Další fotografie z měření v bezodrazové komoře si lze prohlédnout v datové příloze C.

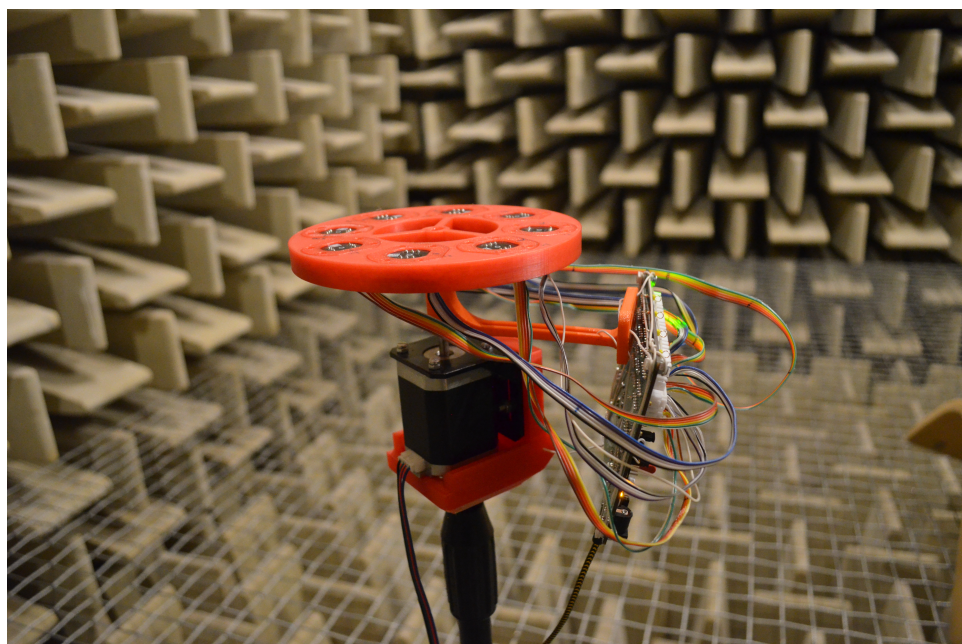


Obrázek 7.1: Přehledová fotografie testu cirkulárního pole v bezodrazové komoře. Zleva: mikrofonní pole a měřicí elektrostatický mikrofón, notebook pokrytý akusticky-pohltivým materiálem, budicí reproduktor

7.2.3 Zpracování naměřených dat

Výstupní data jsou zpracována skripty napsanými v jazyce Python.

- Skript pro měření zpoždění zvukového signálu mezi mikrofony korelační funkcí. Pomocí něho se dá ověřit rychlost zvuku v daném prostředí i to, jestli jsou zvukové stopy správně uspořádány (ve směru hodinových ručiček při pohledu zhora na mikrofonní pole).
- Skript pro zobrazení směrových charakteristik jednotlivých mikrofonních dvojic (protilehlých mikrofónů) na zadaných frekvencích.

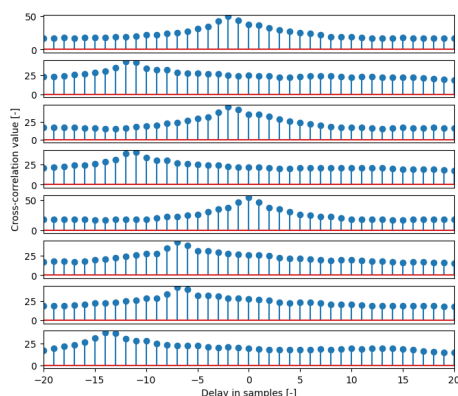


Obrázek 7.2: Fotografie sestavy zařízení kolem cirkulárního mikrofonního pole během měření v bezodrazové komoře

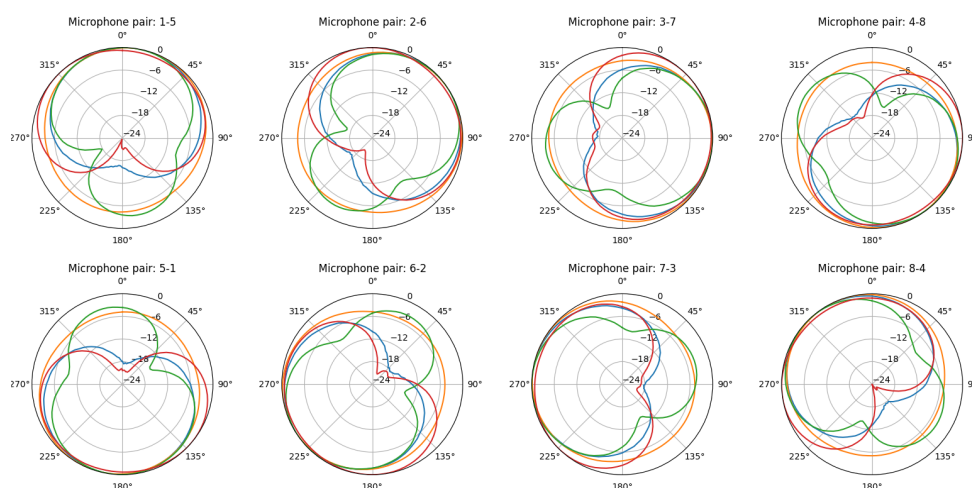
7.3 Výsledky testů

7.3.1 Data z audiovizuálního studia

Pro zpracování dat bylo zvoleno 3. (poslední) měření. Výstup skriptu pro výpočet korelačních funkcí pro 1. zvukový soubor (soubor, kdy 1. mikrofon směřuje k reproduktoru), na obr. 7.3, ukazuje, že pořadí mikrofonů v audiozáznamu je oproti realitě zpřeházené. Jednoduchým vyhodnocením různých korelačních funkcí bylo ale poté odvozeno správné pořadí, které je nyní uvedeno v souboru readme.txt, přiloženém ve složce s naměřenými daty. Výsledné směrové charakteristiky, které je možno vidět na obr. 7.4 na některých frekvencích neodpovídají tvarem kardioidě. Vzhledem k tomu, že měření v bezodrazové komoře (možno vidět na obr. 7.6) podobné výsledky nepřineslo, předpokládám zavinění odrazy od různých předmětů ve studiu a možná také rezonančními módy místnosti.



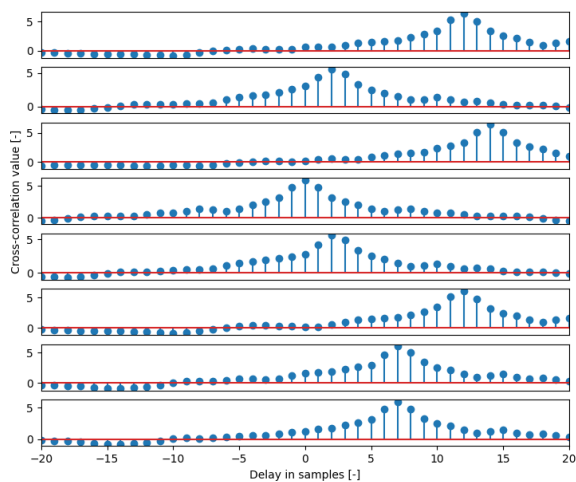
Obrázek 7.3: Spočtené korelační funkce z dat naměřených ve studiu při základní poloze mikrofonního pole (krok = 0) a referenční stopou č. 5



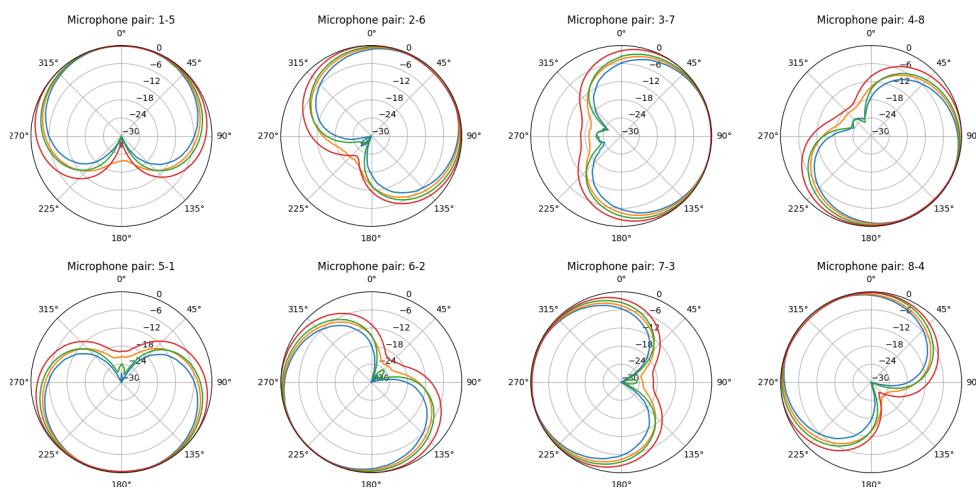
Obrázek 7.4: Spočtené směrové charakteristiky z dat naměřených ve studiu pro frekvence 400 Hz modře, 600 Hz žlutě, 800 Hz zeleně a 1000 Hz červeně

7.3.2 Data z bezdrazové komory

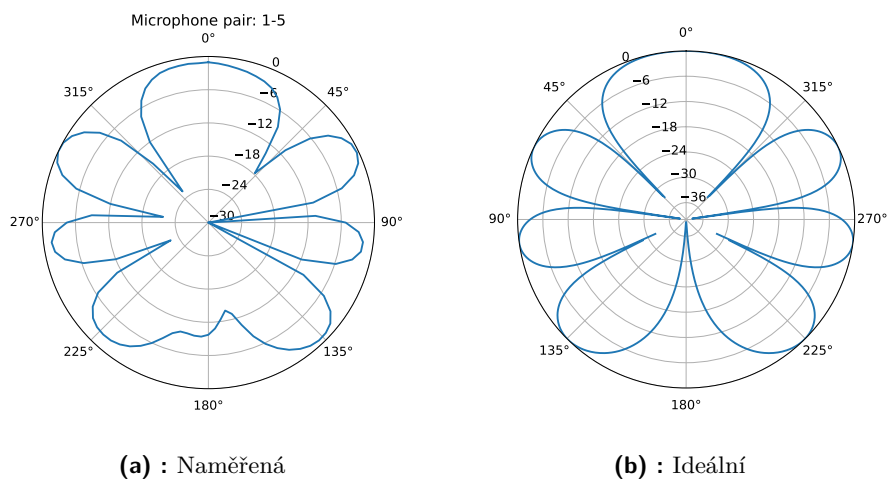
Zde byla opět zpracována data z 3. měření. Spočtené korelační funkce na obr. 7.5 opět ukazují jiné pořadí mikrofónů v nahrávce, což bylo opět zaznamenáno v příslušném souboru readme.txt. Na obr. 7.6 jsou vidět výsledné směrové charakteristiky, které zde vypadají subjektivně lépe. Při frekvenci 400 Hz navíc kardioida protíná bod -6 dB v bodech 90° a -90° vůči její nejvyšší hodnotě, což odpovídá teoreticky ideální kardioidě. Pro zajímavost byla zpracována i směrová charakteristika pole na frekvenci 6 kHz, viz obr. 7.7a a srovnána s ideální směrovou charakteristikou na této frekvenci, spočtenou ze vzorce 1.7, viz obr. 7.7b.



Obrázek 7.5: Spočtené korelační funkce z dat naměřených v bezodrazové komoře při základní poloze mikrofonního pole (krok = 0) a referenční stopou č. 1



Obrázek 7.6: Spočtené směrové charakteristiky z dat naměřených v bezodrazové komoře pro frekvence 400 Hz modře, 600 Hz žlutě, 800 Hz zeleně a 1000 Hz červeně



Obrázek 7.7: Spočtené směrové charakteristiky z dat naměřených v bezdrazové komoře (a) a spočtených ze vzorce 1.7 (b) na frekvenci 6 kHz



Závěr

Práce vyvinula platformu pro rychlý vývoj, výrobu a zprovoznění mikrofonních polí základních tvarů a typů. Všechny nestandardní konstrukční prvky jsou vyvinuty pro 3D tisk, což je činí jednoduše vyrobitelnými a upravitelnými. Modulární systém od sebe oddělil mikrofonní moduly a konstrukci samotného mikrofonního pole, ke kterému se moduly připojují magneticky. To umožňuje rychlou výměnu mikrofonních modulů za jiné, nebo naopak jejich přenesení na jiný typ pole.

Mikrofonní moduly mohou být osazeny různými typy MEMS mikrofonů, avšak pro testování byly použity mikrofony Knowles SPH0645LM4H-B s I2S rozhraním na vyvinutém plošném spoji. Systém pružinových konektorů, kterými se moduly elektricky kontaktují s mikrofonním polem, zajišťuje přímočaré osazování mikrofonními moduly a eliminuje chyby uživatele. Pro testovací účely bylo vyvinuto cirkulární mikrofonní pole, které bylo připojeno k přípravku s FPGA (vyvinutého Bc. Janem Šedivým) pro čtení dat z mikrofonů a jejich odesílání do počítače.

Na cirkulárním poli byla provedena série testů v prostředí audiovizuálního studia a bezodrazové zvukové komory. V obou případech byl přípravek umístěn na hřídel krokového motoru a pro každý nastavený úhel z něho byla nahrána odezva na zvuk buzený z reproduktoru. Nahrávky byly následně zpracovány způsobem, který potvrdil, že ve volném poli (v bezodrazové komoře) mají diferenciální mikrofonní pole 1. řádu, složené ze 2 protilehlých mikrofonů na cirkulárním poli, kardioidní směrovou charakteristiku v oblasti nízkých frekvencí. Výsledky z testu ve studiu byly viditelně zkreslené odrazy od objektů, které se ve studiu nacházely.



Literatura

- [1] VAGNER, David. *Návrh sférického mikrofonního pole*. Praha, 2021. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/94677>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.
- [2] BRANDSTEIN, Michael a Darren WARD. *Microphone arrays: Signal Processing, Techniques and Applications*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001, 398 s. ISBN 978-3-642-07547-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-04619-7
- [3] BENESTY, Jacob, Jingdong CHEN a Israel COHEN. *Design of Circular Differential Microphone Arrays* [online]. Berlin, Germany: Springer, 2015 [cit. 2023-05-21]. 1. ISBN 978-3-319-14842-7. 1866-2617. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-14842-7>
- [4] BENESTY, Jacob a Jingdong CHEN. *Study and Design of Differential Microphone Arrays*. London: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-33752-9. 1866-2609.
- [5] Introduction to Differential Beamforming. THE MATHWORKS, INC. *Documentation - MATLAB & Simulink* [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/introduction-to-differential-beamforming.html>
- [6] PICHLER, Thomas. *Circular Differential Microphone Arrays*. Graz, 2016. Dostupné také z: <https://www.spsc.tugraz.at/student-projects/circular-differential-microphone-arrays.html>. Diplomová práce. Graz University of Technology, Signal Processing and Speech Communications Laboratory. Vedoucí práce Dipl.-Ing. Dr. techn. Martin Hagmüller.

- [7] PLESSAS, Peter. *Rigid Sphere Microphone Arrays for Spatial Recording and Holography*. Graz, Rakousko, 2009, 71 s. Dostupné také z: https://plessas.mur.at/rnd/da/Thesis_Plessas.pdf. Diplomová práce. Graz University of Technology, Austria. Vedoucí práce Franz Zotter. Ve spolupráci s: IEM Institute of Electronic Music and Acoustics; University of Music and Performing Arts Graz, Austria; CNMAT Center for New Music and Audio Technologies, University of California, Berkeley.
- [8] ŠKVOR, Zdeněk. *Elektroakustika a akustika: vysokoškolská učebnice*. Praha: České vysoké učení technické, 2012, 574 s. ISBN 978-80-01-05034-7.
- [9] NOVOTNÝ, Martin. *Zpracování zvuku pro sférická videa - sada výukových úloh*. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. František Rund, Ph.D.
- [10] PHILIPS SEMICONDUCTORS. *I2S bus specification* [online]. 1986 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf>
- [11] INVENSENSE, INC. *ICS-52000: Low-Noise Microphone with TDM Digital Output* [online]. 2017-4-14. 20 s. [cit. 2021-5-9]. DS-000121. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/download-pdf/ics-52000-data-sheet/>. Rev. 1.3.
- [12] SURANGE, Vinod G. a Punit V. GHARAT. 3D Printing Process Using Fused Deposition Modelling (FDM). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* [online]. 2016, **3**(3), 1403 - 1406 [cit. 2021-5-11]. ISSN 2395 - 0056. Dostupné z: <https://www.irjet.net/archives/V3/i3/IRJET-V3I3295.pdf>
- [13] *OpenSCAD - Documentation* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.openscad.org/documentation.html>
- [14] RINGSMUTH, David. *Kondenzátorový mikrofón s dělenou pevnou elektrodou*. Praha, 2023. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.



Přílohy



Příloha A

Seznam zkratk

FDM	Fused Deposition Modeling
FPGA	Field Programmable Gate Array
I2S	Inter-IC Sound
LRCLK	Left-Right Clock
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
PDM	Pulse-Density Modulation
SCK	Serial Data Clock
SD	Serial Data
TDM	Time Domain Multiplexing
USB	Universal Serial Bus
VR	Virtuální realita
WS	Word Select

Příloha B

Autorovy publikace související s prací

- VAGNER, David. *Návrh sférického mikrofonního pole*. Praha, 2021. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/94677>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.
- VAGNER, David. Design and realization of spherical microphone array. In: *POSTER 2022: Proceedings of the International Student Scientific Conference Poster – 26/2022*. Praha: Faculty of Electrical Engineering, Printing Office, CTU in Prague, 2022, s. 87-90. ISBN 978-80-01-06992-9.
- ŠEDIVÝ, Jan a David VAGNER. Spherical MEMS microphone array with FPGA communication unit. In: *POSTER 2023: Proceedings of the International Student Scientific Conference Poster – 27/2023*. Praha: Faculty of Electrical Engineering, Printing Office, CTU in Prague, 2023, s. 57-59. ISBN 978-80-01-07140-3.
- VAGNER, David. HW for microphone array. In: *4. STUDENTSKÝ AKUSTICKÝ SEMINÁŘ*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2023, s. 7-8. ISBN 978-80-01-07156-4.

Příloha C

Seznam datových příloh

Jednotlivé .zip archivy obsahují následující obsah (z důvodu velkého množství souborů uvádím jen přehled):

- Archiv 3D_print.zip
 - Složka array_gen Nástroj pro vytváření magnetických modulů pro mikrofony v programu OpenSCAD
 - Ostatní soubory obsahují 3D návrhy modelů pro tisk
- Archiv foto.zip Obsahuje fotografie testovaného zařízení
- Archiv penizek_mars.zip Obsahuje návrh PCB pro MEMS mikrofon
- Archiv pruziny.zip Obsahuje návrh PCB pro zabudování do mikrofonních polí
- Archiv vysledky_komora.zip Obsahuje naměřená data ze 2. měření v bezdodrazové komoře
- Archiv vysledky_studio.zip Obsahuje naměřená data ze 3. měření v audiovizuálním studiu