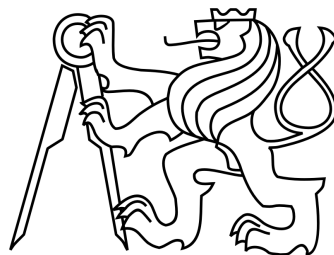


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA RADIOELEKTRONIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Simulace zvukového pole pomocí bodových zdrojů

Autor: Tomáš Halíř

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

Praha, 2013

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Dr. Ing. Liboru Husníkovi za odborné vedení a neocenitelné připomínky a rady, které mi velmi pomohly při přípravě a psaní této práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a všem, kteří mě podporovali během dosavadního studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 26. prosince 2013

Tomáš Halíř

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá simulací zvukového pole pomocí bodových zdrojů, které by v definovaném poslechovém místě vyvolaly stejný akustický tlak jako referenční zdroj. Pro výpočet celkového akustického tlaku navíc uvažujeme ohyb zvukové vlny kolem hlavy. Pro tuto simulaci byly v rámci této práce vytvořeny dva programy v prostředí Matlab. Jeden počítá celkový akustický tlak na prostoru 4x6 metrů a druhý na základě několika těchto polí počítá parametry zdrojů tak, aby se co nejvíce přiblížil hodnotám akustického tlaku referenčního zdroje ve zvolené poslechové oblasti.

Abstract

This bachelor thesis is focused on simulation of an acoustic field created by a spherical wave sources, which would evoke exactly the same sound pressure as reference source in pre-defined listening spot. Total acoustic pressure is calculated as sum of the incident and scattered acoustic pressure by head. There were developed two programs in Matlab environment for this simulation. First one calculates the total acoustic pressure in space of 4x6 metres. Second program, based on precalculated acoustic fields, calculates source parameters to get the same acoustic pressure in selected listening area which would evoke the reference field.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Tomáš Haliř**

Studijní program:
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Simulace zvukového pole pomocí bodových zdrojů**

Pokyny pro vypracování:

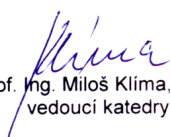
Navrhněte rozmístění bodových zdrojů zvuku v poslechovém prostoru, kterými by bylo možno simulovat účinky směrového pole v definovaném poslechovém místě. Zahrňte vliv ohybu zvukové vlny kolem hlavy.

Seznam odborné literatury:

- [1] Škvor, Z.: Elektroakustika a akustika, ČVUT Praha, 2012
- [2] Olšák, P.: Lineární algebra, skriptum ČVUT, 2007

Vedoucí: Dr.Ing. Libor Husník

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2013/2014


Prof. Ing. Miloš Klíma, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 4. 2. 2013

OBSAH

1	Úvod	1
2	Základy Akustiky	2
2.1	Vznik zvukových vln v plynném prostředí	2
2.2	Matematický popis zvukových vln	2
2.2.1	Vlnová rovnice v kartézské souřadnicové soustavě	2
2.2.2	Vlnová rovnice ve sférické souřadnicové soustavě	3
3	Akustické zdroje	4
3.1	Akustický zdroj nultého řádu	4
3.2	Akustický zdroj prvního řádu	4
3.3	Pístově kmitající kruhová plocha	4
3.4	Soustavy bodových zdrojů	5
4	Ozvučovací systémy	7
4.1	Ozvučovací systémy	7
4.1.1	Stereo	7
4.1.2	Kvadrofonie	8
4.1.3	Dolby Surround sound systems	9
4.1.4	Ambisonie	11
4.1.5	Ambisonie vyššího řádu	12
4.1.6	Systémy s odděleným horizontálním a vertikálním kódováním	13
4.1.7	Rozšíření systému Ambisonie	13
4.1.8	Syntéza zvukového pole	13
5	Rekonstrukce zvukového pole	15
5.1	Rozptýlené zvukové pole v okolí hlavy	15
5.2	Rekonstrukce zvukového pole	17
6	Grafické rozhraní	18
6.1	Program pro výpočet celkového akustického tlaku	18
6.2	Program pro simulaci referenčního pole	20
7	Výsledky simulací	22
8	Závěr	32

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam použitých zkratk a symbolů v kapitole 2

symbol	význam
A, B	komplexní amplitudy vlny šířící se v kladném a záporném směru osy x
c_0	rychlost šíření zvuku ve vzduchu
j	imaginární jednotka
k	vlnové číslo
p	akustický tlak
r	vzdálenost bodu a počátku sférické souřadnicové soustavy
t	čas
T	teplota prostředí ve stupních celsia
x	souřadnice ve směru osy x
ρ_0	hustota prostředí
Φ	rychlostní potenciál
ω	kruhový kmitočet

Seznam použitých zkratk a symbolů v kapitole 3

symbol	význam
d_1	vzdálenost sousedních zářičů
J_1	Besselova funkce prvního druhu
l_0	vzdálenost bodu od středu zářiče
R	poloměr kruhového zářiče
ϑ	úhel odpovídající obrázku v literatuře [1] na straně 125
v	akustická rychlost
φ	úhel odpovídající obrázku v literatuře [1] na straně 125

Seznam použitých symbolů a zkratk v kapitole 4

symbol	význam
a, b	prvky kódovací/dekódovací matice
B	sloupcový vektor přenosových kanálů
C	kódovací matice
f_{alias}	frekvence, od které se začne projevovat prostorový aliasing
HOA	Higher Order Ambisonics
L	počet použitých reproduktorů
L_t, R_t	přenosové kanály
L_f, R_f, L_R, R_R	levý přední, pravý přední, levý zadní a pravý zadní kanál
N	počet transportních kanálů
N_H, N_V	počet transportních kanálů v horizontálním a vertikálním směru
M_H, M_V	řády sférických harmonických funkcí v horizontálním a vertikálním směru
p	sloupcový vektor signálů budící reproduktory
q	pokles o 3 dB
s_i	zvukové signály
WFS	Wave field synthesis
Δx	vzdálenost sousedních reproduktorů
W, X, Y, Z	kanály pro všesměrovou informaci a informaci ve směru osy x, y a z
ϕ	azimut
Θ	úhel elevace
Θ^{sec}, Θ^v	úhly odpovídající obrázku v literatuře [7] na straně 65

Seznam použitých zkratk a symbolů v kapitole 5

symbol	význam
a	poloměr hlavy
G_∞	Greenova funkce pro volné prostředí
H	matice celkových akustických tlaků od jednotlivých zdrojů
h_l	Hankelova funkce prvního druhu
j_l	sférická Besselova funkce
P	sloupcový vektor referenčních bodů
p_l^m	normalizovaný Legendrův polynom
p_{inc}	přímý (incident) akustický tlak
$p_{scattered}$	rozptýlený (scattered) akustický tlak
p_{total}	celkový (total) akustický tlak
q	amplituda zdroje
Z_0	charakteristická impedance vzduchu

ÚVOD

Tato práce si klade za cíl rekonstruovat zvukové pole zdroje v malé oblasti kolem hlavy hledáním řešení soustavy rovnic. Pro počítání zvukového pole v blízkosti hlavy je nutné počítat s rozptylem vlny na překážce. Pro tyto účely byly vytvořeny dva programy v prostředí Matlab. Teoretická část práce se zabývá stávajícími ozvučovacími systémy.

Ve světě zvukové techniky se velmi často můžeme setkat s požadavky na reprodukci prostorového zvuku. K tomuto problému můžeme přistupovat dvěma způsoby. První z nich je rekonstruovat celé původní zvukové pole pomocí fyzikálních principů. Jedná se vlastně o rekonstrukci čela vlnoplochy, které by vytvořil původní zdroj signálu. Druhý způsob je postaven na základech psychoakustiky a snaží se tak simulovat akustické pole pouze v malé oblasti v okolí uší.

V první části je stručně popsána teorie zvukových vln, konkrétně pak popis vlnové rovnice ve dvou souřadnicových systémech. Zápis ve sférické souřadnicové soustavě později využijeme pro popis vlny v navrhovaném programu.

Další kapitola je zaměřena na akustické zdroje. Uvedené jsou pouze základní typy zdrojů. Akustické zdroje vyšších řádů se zpravidla skládají z kombinace zdrojů nižších řádů. Zdroj nultého řádu vytváří symetrickou kulovou vlnu a proto je výhodné popisovat většinu zdrojů ve sférických souřadnicích.

Další část práce se věnuje ozvučovacím systémům. Jsou v ní zahrnuty jak ozvučovací systémy v konfiguracích stereo, kvadrofonie nebo Dolby Surround, tak i složitější metody vytváření prostorového zvuku. Ambisonie prvního řádu, vyšších řádů i systémy s kombinovaným počtem řádů využívá sférických harmonických funkcí ke kódování směrové informace a následné rekonstrukci lokálních vlnoploch. Syntéza zvukového pole je pak založena na Huygensově principu, kdy se jednotlivé body vlnoplochy nahrazují individuálně řízenými zdroji, které vytváří sekundární vlnoplochy.

Následující kapitola se věnuje matematickému popisu rozptýleného akustického pole v okolí hlavy pomocí Besselových funkcí a Legendrových polynomů v závislosti na azimutu a vzdálenosti zdroje. Dále je v ní popsán princip, na kterém pracuje program navržený pro rekonstrukci akustického pole.

Další kapitola obsahuje stručný popis grafického rozhraní dvou programů, které pracují s rozptýleným akustickým polem okolo hlavy. První program je navržen tak, že na ploše 4x6 metrů počítá celkový akustický tlak pro jakýkoli zdroj definovaný pozicí, fází a amplitudou. Druhý program pak z takto uložených zvukových polí dokáže simulovat stejné zvukové pole, které by vytvořil simulovaný zdroj v okolí uší.

V poslední kapitole je pak okomentováno několik výsledků pro různé konfigurace a frekvence.

ZÁKLADY AKUSTIKY

2.1 Vznik zvukových vln v plynném prostředí

Jakýkoli harmonický vzruch, který v čase a prostoru vyvolá změnu tlaku, hustoty nebo kmitání prostředí v určitém kmitočtovém pásmu, můžeme považovat za zdroj zvukových vln. Ty se pak šíří prostředím jako podélná vlna, kterou si můžeme představit jako zhušťování a zředování prostředí ve směru šíření vlny. Rychlost zvuku závisí na teplotě, barometrickém tlaku a hustotě prostředí. Většinou se ovšem setkáme se vztahem zahrnující pouze teplotu prostředí

$$c_0 = 331,82 + 0,82T, \quad (2.1)$$

kde T je teplota prostředí ve stupních celsia. Frekvenční pásmo mezi 20 Hz a 20 kHz vnímáme jako slyšitelný zvuk. Jak spodní, tak horní hranice tohoto pásma jsou silně individuální a s postupem věku se slyšitelné pásmo zužuje. Zvuky pod slyšitelnou hranicí označujeme jako infrazvuky a můžeme je vnímat pomocí hmatu. Nad slyšitelnou hranicí přibližně do 50 kHz definujeme tzv. ultrazvuk.

2.2 Matematický popis zvukových vln

Pro následující matematické rovnice, popisující zvukové vlny v plynném prostředí, uvažujeme prostředí stlačitelné, spojité, homogenní, izotropní, neviskózní a v klidu. Akustické pole se předpokládá za nevírové. Všechny uvedené vztahy a teorie v této kapitole jsou k nalezení v literatuře [1].

2.2.1 Vlnová rovnice v kartézské souřadnicové soustavě

Jestliže budeme uvažovat rovinnou postupnou vlnu šířící se ve směru osy x a vyjdeme-li z pohybové rovnice, rovnice kontinuity a Poissonovy rovnice, můžeme psát vlnovou rovnici pro rychlostní potenciál jako

$$\Delta\Phi = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}. \quad (2.2)$$

Za předpokladu, že vlna bude harmonická s úhlovou frekvencí ω , dostaneme řešení

$$\Phi = Ae^{jk(c_0t-x)} + Be^{jk(c_0t+x)}, \quad (2.3)$$

kde A a B jsou komplexní amplitudy vlny šířící se v kladném a záporném směru osy x . V praxi většinou uvažujeme pouze vlnu šířící se v kladném směru osy x .

Dosazením za $k = \frac{\omega}{c_0}$ a zanedbáním záporného směru osy x , se řešení vlnové rovnice zjednoduší na

$$\Phi = Ae^{-jkx}. \quad (2.4)$$

Akustický tlak se z rychlostního potenciálu vypočítá jako

$$p = -j\omega\rho_0\Phi, \quad (2.5)$$

kde ρ_0 je hustota prostředí.

2.2.2 Vlnová rovnice ve sférické souřadnicové soustavě

Sférické souřadnicové soustavy lze s výhodou využít při počítání zvukové vlny vytvořené bodovým zdrojem 3.1. Pro kulovou vlnu vytvořenou zdrojem v počátku souřadnicového systému dostaneme řešení vlnové rovnice

$$\Phi = A \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.6)$$

a pro akustický tlak z této rovnice dostaneme výraz

$$p = -j\omega\rho_0\Phi. \quad (2.7)$$

Což je tzv. Greenova funkce pro volné prostředí.

AKUSTICKÉ ZDROJE

Zvukové vlny jsou vytvářeny akustickými zdroji, které ve svém okolí vyvolají změny tlaku, hustoty a kmitání prostředí. V praxi jsou to většinou kmitající tělesa, membrány, struny apod. Jejich popis je v kompletním znění uveden v literatuře [1]. Zde uvádím pouze výtah z jednotlivých kapitol.

3.1 Akustický zdroj nultého řádu

Základním typem akustického zdroje je bodový zdroj. Jedná se o radiálně pulzující kouli, která svým kmitáním vytváří kulově symetrické vlny. Pokud tento zdroj umístíme do počátku sférických souřadnic a bude splněna okrajová podmínka, pak pro rychlostní potenciál platí

$$\Phi = -v_s \frac{R^2}{1 + jkR} \frac{e^{-jk(r-R)}}{r}, \quad (3.1)$$

kde v_s je akustická rychlost, r je vzdálenost od počátku souřadnic a R je klidový poloměr koule. Na obrázku 3.1 vlevo nahoře je zobrazen horizontální řez prostorem, ve kterém je v počátku souřadnicového systému umístěn zdroj nultého řádu. Jak je z rozložení akustického tlaku vidět, můžeme tento zdroj považovat za všesměrový.

3.2 Akustický zdroj prvního řádu

Budeme-li uvažovat dva zdroje nultého řádu se stejnou amplitudou a opačnou fází umístěné od sebe ve vzdálenosti daleko menší než je vlnová délka, dostaneme akustický zdroj prvního řádu, který v bodě A vytvoří rychlostní potenciál daný rozdílem rychlostních potenciálů jednotlivých zdrojů

$$\Phi_{12} = A \left(\frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right). \quad (3.2)$$

Tento zdroj osmičkového charakteru znázorňuje obrázek 3.1 vpravo nahoře. V mikrofonní technice se mikrofonům s takovou směrovou charakteristikou také někdy říká rychlostní mikrofony.

3.3 Pístově kmitající kruhová plocha

Pro modelování běžných akustických polí vytvořených kruhovým reproduktorem, se používá aproximace v podobě pístově kmitající kruhové desky o poloměru R umístěné v nekonečně rozlehlé rovinné stěně. Matematické vyjádření pro rychlostní potenciál vypadá po zjednodušení následovně

$$\Phi \approx -\frac{v_n}{2\pi} \frac{e^{-jkl_0}}{l_0} \int_0^R \left(\int_{-\pi}^{\pi} e^{-jkr \sin \vartheta \sin \varphi} d\varphi \right) r dr. \quad (3.3)$$

Využijeme-li dále Besselovy funkce prvního druhu J_1 , dostaneme rychlostní potenciál ve vzdáleném poli zdroje v závislosti na úhlu ϑ

$$\Phi = -\frac{v_n}{2\pi} \frac{e^{-jkl_0}}{l_0} \pi R^2 \frac{2J_1(kR \sin \vartheta)}{kR \sin \vartheta}. \quad (3.4)$$

3.4 Soustavy bodových zdrojů

Umístěním několika akustických zdrojů nultého řádu do volného prostoru bude rychlostní potenciál, v libovolném bodě A, dán součtem rychlostních potenciálů vyvolaných jednotlivými zdroji v tomto bodě

$$\Phi_A = \sum_{i=1}^n \Phi_i, \quad (3.5)$$

kde n je počet bodových zdrojů. Jestliže umístíme n shodných bodových zdrojů v ekvidistantních vzdálenostech na osu z a mají-li jednotkové amplitudy, pak pro rychlostní potenciál ve vzdáleném poli můžeme po zjednodušení psát

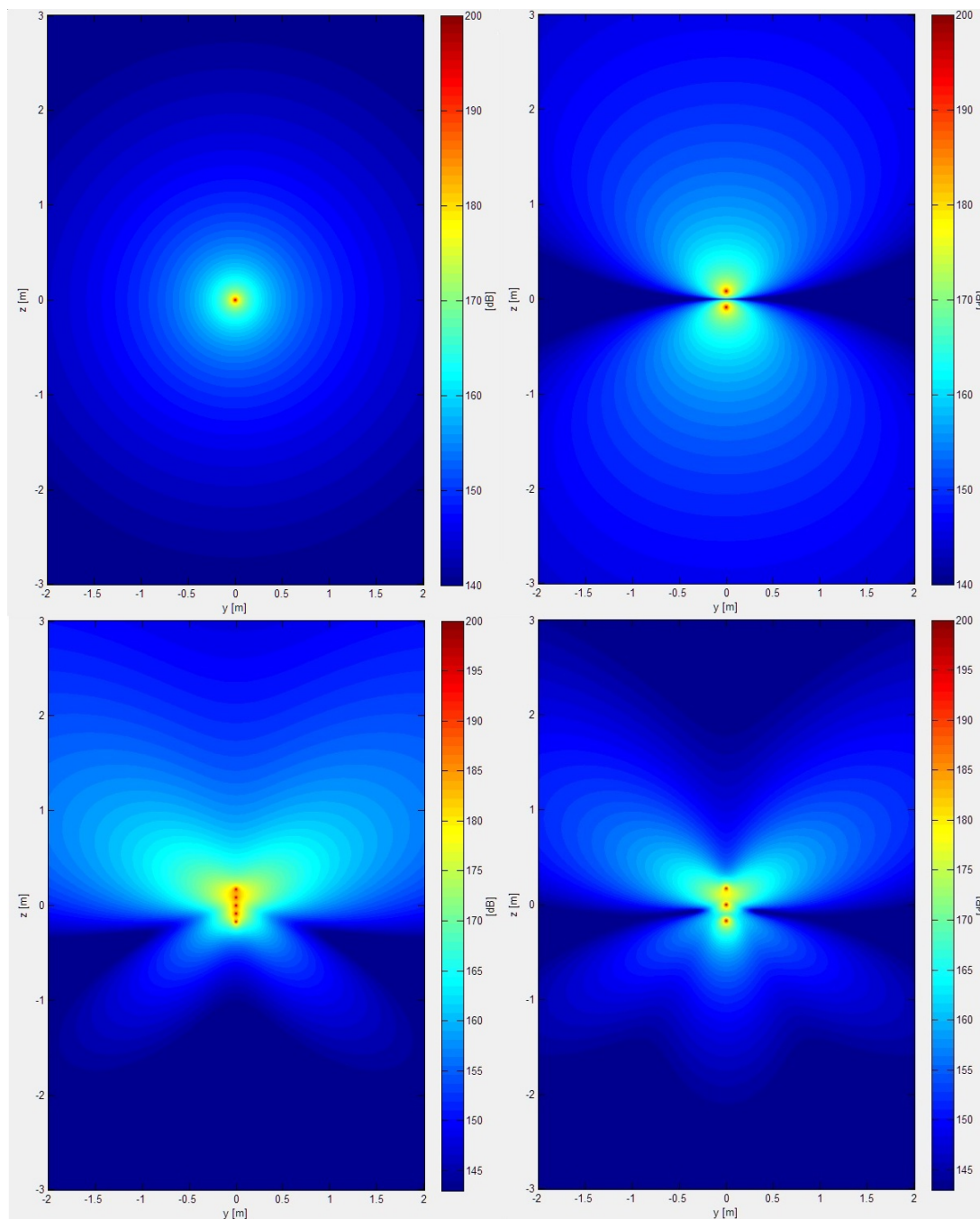
$$\Phi_A \approx \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \sum_{m=1}^n e^{-j(m-1)\delta}, \quad (3.6)$$

což je součet geometrické řady s kvocientem $q = e^{-j\delta}$, kde $\delta = kd_1 l \cos \vartheta$. Kdybychom chtěli realizovat různé typy směrových charakteristik, umístili bychom několik bodových zdrojů na přímkou a jejich fázi i amplitudu bychom řídili individuálně. Příklady takto řízených soustav jsou na obrázku 3.1 dole a jejich přesné konfigurace v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Parametry zdrojů

konfigurace	zdroj	Y [m]	Z [m]	Amplituda [-]	fáze [rad]
A	A1	0	0	1	0
B	B1	0	0.085	1	0
	B2	0	-0.085	1	1
C	C1	0	-0.17	1	1
	C2	0	-0.085	1	0.75
	C3	0	0	1	0.5
	C4	0	0.085	1	0.25
	C5	0	0.17	1	0
D	D1	0	0	1	0.25
	D2	0	-0.17	1	1
	D3	0	0.17	1	0

Obrázek 3.1: Akustické zdroje



poznámka k obrázku 3.1: Vlevo nahoře je akustický zdroj nultého řádu (konfigurace A), vpravo nahoře je akustický zdroj prvního řádu (konfigurace B), dole jsou příklady soustav akustických zdrojů nultého řádu (konfigurace C vlevo a D vpravo). Vše je počítáno na frekvenci 1000 Hz.

OZVUČOVACÍ SYSTÉMY

Velmi často se v praxi setkáme s požadavky na reprodukci prostorového zvuku. Jestliže se povede na nahrávce zachytit a následně reprodukovat zvuk tak, že posluchač jen stěží rozpozná od originálu, můžeme pak mluvit o akustické virtuální realitě. Tato kapitola se věnuje ozvučovacími systémům a technikám, pomocí kterých můžeme akustickou virtuální realitu simulovat.

Požadavek na reprodukování pole je tedy takový, aby bylo stejné jako pole originální, tj. zachovat všechny jeho atributy. Vyjdeme-li ovšem z psychoakustiky, můžeme tyto atributy původního pole značně omezit. Některé požadavky můžeme splnit použitím zdrojů s dostatečným frekvenčním a dynamickým rozsahem, díky kterým nebude při reprodukci docházet ke zkreslení. Dále musíme splnit správnou lokalizaci zdroje, prostorový vjem a charakteristiky prostředí. To vše v co největším poslechovém prostoru. Vše začíná už při nahrávání zvuku. Podle toho jak k nahrávání přistupujeme, můžeme mikrofonní techniky rozdělit do dvou skupin. První se snaží zachytit a reprodukovat co nejpřirozenější zvukový signál. V základu používá pouze dva mikrofony ve vzdáleném poli zdroje, umístěné místo uší posluchače. Druhá skupina používá více mikrofonů umístěných v blízkém poli zdrojů tak, aby se minimalizoval vliv odražených vln. Signály z jednotlivých mikrofonů se pak mixují do dvou kanálů a uměle se tak dotváří vliv místnosti. Stejně tak jako můžeme k nahrávání přistupovat dvěma způsoby, můžeme také rozlišit dvě metody reprodukce zvukového pole. Některé metody se snaží rekonstruovat celé pole na základě fyzikálních principů, jiné se zase spokojí s vytvořením stejného zvukového pole v určité poslechové oblasti.

4.1 Ozvučovací systémy

4.1.1 Stereo

O systému stereo, kvadrofonie i dolby surround sound se můžeme více dočíst v literatuře [5], zde uvádím pouze základy. Stereo používá dva akustické zdroje, což je minimální konfigurace pro reprodukci prostorového zvuku. Pro reprodukci se používají dva stejné reproduktory umístěné před posluchačem, který s nimi tvoří rovnoramenný trojúhelník. Přesná konfigurace je vidět na obrázku 4.1, kdy jsou zdroje umístěné ve vzdálenosti 1,5 metru a jejich spojnice s posluchačem svírá s kladnou osou z úhel 30° . Místnost by měla být dostatečně velká. Zároveň by měla tlumit odrazy od stěn a mít krátkou dobu dozvuku v porovnání s prostorem, kde byla nahrávka pořízena. Typická vzdálenost reproduktorů od posluchače se pohybuje mezi 3 a 4 metry. Pro reprodukci prostorového zvuku se pak využívá buď rozdílné intenzity nebo časového zpoždění signálu.

Intenzitní stereo je založeno na tom, že intenzita zvuku přicházející od zdroje umístěného mimo osu z, je v oblasti uší rozdílná. To je způsobeno akustickým stínem hlavy a rozdílem drah mezi zdrojem a ušima. Výsledkem je, že posluchač relativně přesně lokalizuje simulovaný zdroj blíže reproduktoru s větší intenzitou. Oba kanály se liší pouze v amplitudě, nikoli ve fázi. Proto je tato technika kompatibilní

s mono reprodukcí.

Stereo založené na časovém zpoždění využívá toho, že zvukové vlny od simulovaného zdroje, který neleží na ose z , dorazí do jednoho ucha dříve než do druhého. Posluchač pak určí zdroj blíže ke zdroji, od kterého signál dorazil dříve. Výsledky lokalizace simulovaného zdroje jsou v obou případech závislé na posluchači, pohybech hlavy a reprodukováném signálu.

4.1.2 Kvadrofonie

Jak je vidět z rozmístění zdrojů u stereo techniky, simulované zdroje mohou ležet pouze mezi použitými reproduktory a pokrývají tedy velmi malou množinu simulovatelných zdrojů. Jestliže bychom se omezili na horizontální rovinu a chtěli simulovat zdroje ze stran a za posluchačem, musíme přidat alespoň další dva reproduktory umístěné podle obrázku 4.1. Z něj je vidět, že se jedná o symetrické rozmístění reproduktorů kolem posluchače, a že leží ve vrcholech čtverce ve vzdálenosti 1,5 metru od počátku souřadnicové soustavy. Toto řešení umožňuje zachovat kompatibilitu se stereofonií. Řízení jednotlivých kanálů se pak provádí pomocí matic.

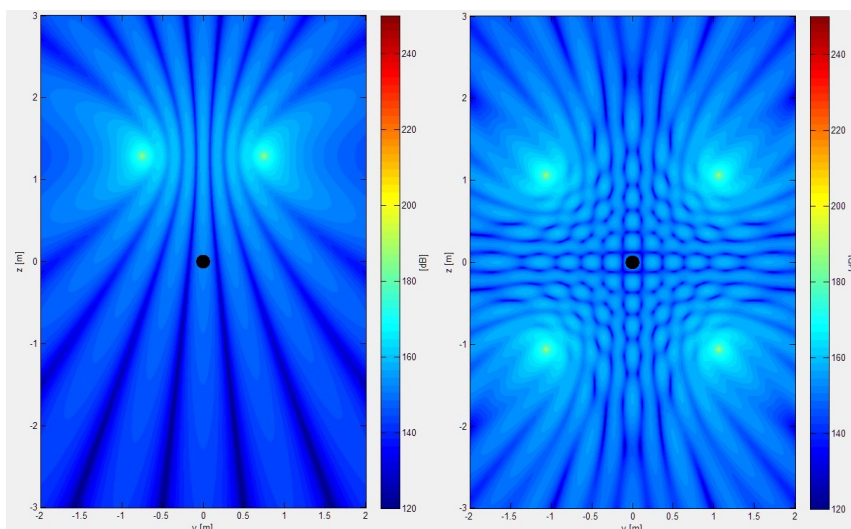
Většina kvadrofonických systémů používá schéma 4-2-4. V praxi to znamená, že se použijí čtyři kanály pro nahrávání, dva kanály pro přenos a opět čtyři kanály pro reprodukci. Právě 2 přenosové kanály nám zaručí zpětnou kompatibilitu se stereofonií, která je dále nedekóduje. Z toho vyplývá, že pro kvadrofonii je zapotřebí kódovací matice o rozměrech 2×4 a dekodovací matice 4×2 . Kódovací matici můžeme vyjádřit jako

$$\begin{bmatrix} L_t \\ R_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_F \\ R_F \\ L_R \\ R_R \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

kde L_F , R_F , L_R a R_R označují levý přední, pravý přední, levý zadní a pravý zadní kanál použitý při nahrávání, a jsou prvky kódovací matice a L_t a R_t jsou přenosové kanály. Kanály pro reprodukci se z přenosových kanálů dekodují maticí 4×2

$$\begin{bmatrix} L'_F \\ R'_F \\ L'_F \\ R'_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_t \\ R_t \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Obrázek 4.1: Stereo a kvadrofonie



poznámka k obrázku 4.1: Vlevo je rozložení přímého akustického tlaku pro konfiguraci stereo, vpravo je rozložení přímého akustického tlaku pro konfiguraci kvadrofonie. Obě konfigurace počítány na frekvenci 1000 Hz. Černý kruh v počátku souřadnic znázorňuje hlavu posluchače.

4.1.3 Dolby Surround sound systems

Do této skupiny ozvučovacích systémů můžeme počítat systémy v konfiguracích 4.1, 5.1 nebo 7.1, kde první číslo značí počet použitých zdrojů a druhé číslo počet subwooferů. Někdy se též setkáme s konfiguracemi se dvěma nebo i více subwoofery. Pro přenos signálů se stále zachovávají 2 přenosové kanály, proto například pro kódování systému 5.1 můžeme psát maticovou rovnici

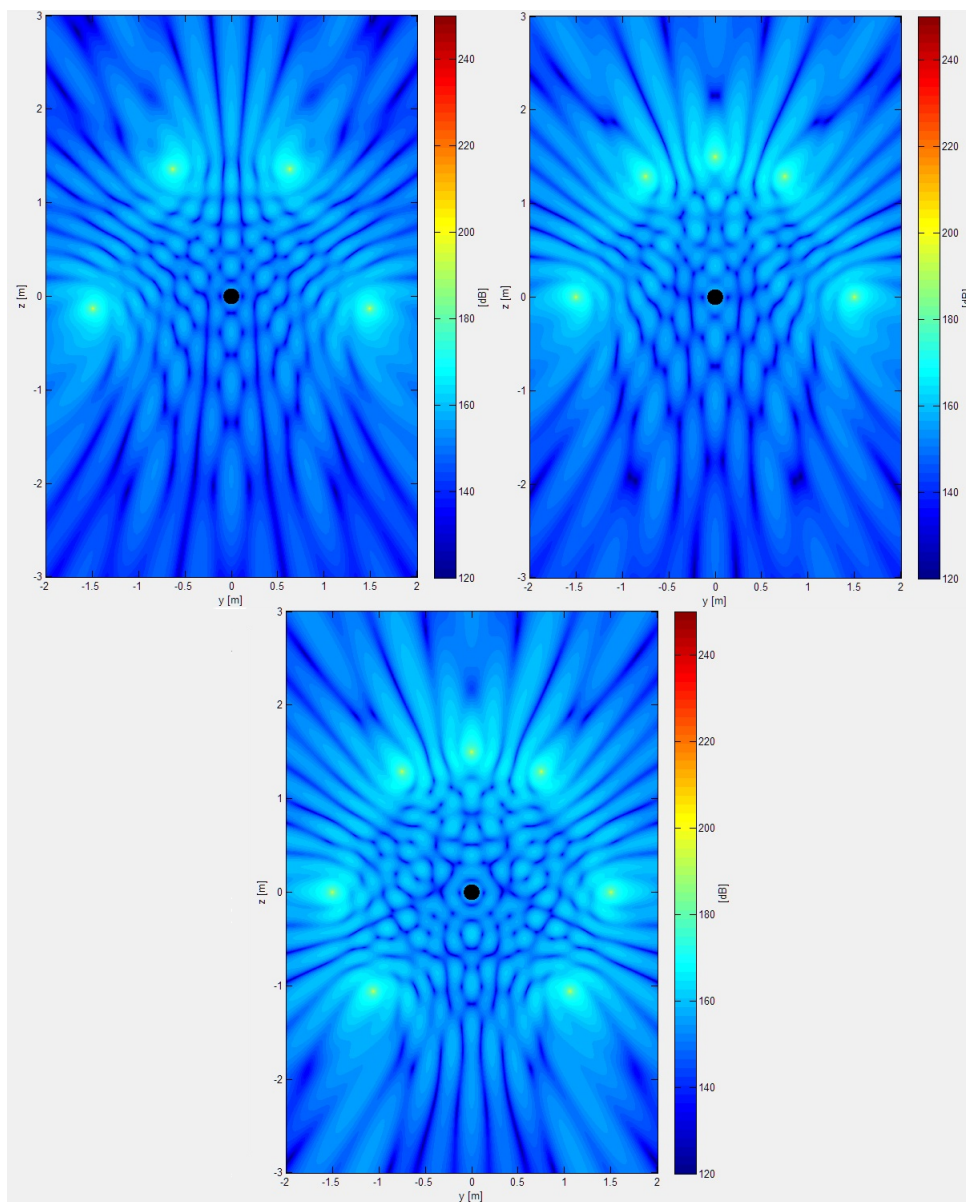
$$\begin{bmatrix} L_t \\ R_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & q & 0 & -jq \\ 0 & q & 1 & jq \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ C \\ R \\ S \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Reproduktorové signály jsou pak dány kombinací nahrávacích kanálů

$$\begin{bmatrix} L' \\ C' \\ R' \\ S' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & q & 0 & -jq \\ q & 1 & q & 0 \\ 0 & q & 1 & jq \\ jq & 0 & -jq & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ C \\ R \\ S \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

kde $q = \frac{1}{2}\sqrt{2}$, což se rovná poklesu o 3 dB, a j znamená posun fáze o 90° . L , C , R a S pak značí kanály při nahrávání na pozicích Left (levý), Center (středový), Right (pravý) a Side (boční). Signály S jsou pásmově omezené od 100 Hz do 7 kHz a fázově posunuty maximálně o $\pm 90^\circ$. Rozmístění jednotlivých zdrojů pro všechny systémy je vidět na obrázku 4.2. V systému 4.1/4.2 svírají spojnice předních reproduktorů s počátkem a kladnou osou z úhel 25° , boční reproduktory pak 95° . V systému 5.1/5.2 je středový reproduktor umístěn na kladné části osy z , přední reproduktory odpovídají umístění zdrojů u stera na obrázku 4.1 a spojnice bočních reproduktorů s počátkem souřadnicového systému svírají s kladnou osou z pravý úhel. Systém 7.1/7.2 je stejný jako 5.1/5.2 jen je doplněn o dva zadní reproduktory, které jsou symetricky umístěné za posluchačem.

Obrázek 4.2: Dolby surround sound



poznámka k obrázku 4.2: Rozložení přímého akustického tlaku pro systém 4.1/4.2 je vlevo nahoře, 5.1/5.2 je vpravo nahoře a 7.1/7.2 je dole. Všechny konfigurace jsou počítány na frekvenci 1000 Hz. Černý kruh v počátku souřadnic znázorňuje hlavu posluchače.

4.1.4 Ambisonie

Jak se můžeme dočíst v publikaci [3], princip systému Ambisonie (anglicky Ambisonics) prvního řádu, nazývaný také B-format, je založen na rekonstrukci lokálních vlnoploch a na kódování směrové informace trojrozměrného zvukového pole do čtyř kanálů.

Všesměrová informace

$$W = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \quad (4.5)$$

Informace ve směru osy x

$$X = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i (\cos \phi_i \cos \theta_i) \quad (4.6)$$

Informace ve směru osy y

$$Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\sin \phi_i \cos \theta_i] \quad (4.7)$$

Informace ve směru osy z

$$Z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i (\sin \theta_i) \quad (4.8)$$

Kde s_i označují zvukové signály, které chceme zakódovat v závislosti na horizontální poloze, která je dána úhlem ϕ , a vertikální poloze dané úhlem θ . Z těchto rovnic je patrné, že zvukové pole může být syntetizováno prostým vynásobením jakéhokoli zdrojového signálu akustického pole s hodnotou třírozměrné funkce (sférické harmonické funkce) závislé na jejich směru. Nahrávání by pak probíhalo jedním všesměrovým mikrofonom a třemi mikrofony s osmičkovou směrovou charakteristikou umístěnými ve směrech příslušných os. Nejlépe kdyby všechny tyto mikrofony byly umístěné v jediném bodě v počátku souřadnicového systému.

Je důležité si uvědomit, že signály W, X, Y a Z jsou pouze transportní kanály a nebudí žádný reproduktor. To znamená, že jsou nezávislé na počtu nebo uspořádání reproduktorů, kterými chceme zvukové pole rekonstruovat. Jediné omezení je, že nemůžeme použít menší počet reproduktorů, než je přenosových kanálů. V našem případě by tedy stačily reproduktory čtyři. Při omezení na horizontální rovinu by pak stačily pouze tři. V zásadě platí, že čím víc reproduktorů umístíme symetricky do prostoru kolem posluchače, tím lepší výsledky lokalizace dostaneme. Výsledné rekonstruované pole je ovšem omezeno na malou poslechovou oblast. Ta je navíc proměnlivá v závislosti na vlnové délce.

Dekódování přenosových signálů můžeme provést dvěma způsoby. První způsob je ten, že každý reproduktor je buzen váhovaným součtem všech přenosových kanálů. Váha jednotlivých kanálů je dána hodnotou příslušné sférické harmonické funkce pro danou pozici reproduktoru. Pro j-tý reproduktor to je:

$$p_j = \frac{1}{L} \left[W \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) + X (\cos \phi_j \cos \theta_j) + Y (\sin \phi_j \cos \theta_j) + Z (\sin \theta_j) \right], \quad (4.9)$$

kde L je počet použitých reproduktorů. Tento způsob, nazývaný dekodování pomocí projekce (decoding through projection), ovšem podporuje pouze pravidelné rozmístění zdrojů.

Druhý způsob je pomocí pseudoinverze (decoding through pseudoinverse), kdy se využívá maticového zápisu přenosové rovnice. Označíme-li sloupcový vektor přenosových kanálů jako B , p jako sloupcový vektor signálů budící reproduktory a C jako kódovací matici, můžeme pro dekódovací funkci psát

$$B = C \cdot p \quad (4.10)$$

neboli

$$p = C^{-1} \cdot B, \quad (4.11)$$

kde C^{-1} značí dekódovací matici, čili inverzní k C . Jestliže chceme invertovat matici C , musíme splnit podmínku, že matice je čtvercová a není singulární. Čtvercová je pouze tehdy, když je počet použitých reproduktorů stejný jako počet přenosových kanálů. Většinou máme reproduktorů k dispozici více. Pak se provádí tzv. pseudoinverze, kterou vyjadřuje následující rovnice:

$$pinv(C) = C^T \cdot (C \cdot C^T)^{-1}, \quad (4.12)$$

čili pro p

$$p = pinv(C) \cdot B = C^T \cdot (C \cdot C^T)^{-1} \cdot B. \quad (4.13)$$

Pro hodně pravidelné konfigurace reproduktorů dává pseudoinverze stejné výsledky jako metoda projekce.

4.1.5 Ambisonie vyššího řádu

S cílem rozšířit poslechovou oblast a zlepšit schopnost posluchače lokalizovat zdroj zvuku byl vyvinut systém Ambisonie vyššího řádu (Higher Order Ambisonics). S lepšími vlastnostmi přišla i negativní stránka systému, a to sice zvětšení počtu kanálů (pro druhý řád 5 kanálů, pro třetí řád dokonce 7 kanálů) a s tím spojený i minimální počet reproduktorů, který nesmí být menší než počet kanálů. Jak vyplívá z názvu, tento systém používá vyšší řády sférických harmonických funkcí. Například pro druhý řád jsou jednotlivé kanály kódovány takto:

$$R = s \left[\frac{1}{2} (3 \sin^2 \theta - 1) \right] \quad (4.14)$$

$$S = s [\cos \phi \sin 2\theta] \quad (4.15)$$

$$T = s [\sin \phi \sin 2\theta] \quad (4.16)$$

$$U = s [\cos 2\phi \cos^2 \theta] \quad (4.17)$$

$$V = s [\sin 2\phi \cos^2 \theta] \quad (4.18)$$

S vyšším řádem sférických harmonických funkcí roste i přesnost směrové informace a tím i možnost lokalizace původního zdroje zvuku. Technika nahrávání se samozřejmě stává těžší, a proto není možné použít standardní mikrofony. Místo nich se používají mikrofonní pole, pomocí kterých se tvaruje příslušná směrová funkce. Technika reprodukce zůstává stejně náročná ve všech řádech.

4.1.6 Systémy s odděleným horizontálním a vertikálním kódováním

Vezmeme-li v úvahu nedokonalosti lidského slyšení a přizpůsobíme tomu ozvučovací systém, můžeme mluvit o Mixed-Order System, kde je horizontální a vertikální informace zvukového pole kódována odděleně. Lidské ucho je více citlivé na změny polohy zdroje v horizontálním směru než ve vertikálním. A proto vertikální směr můžeme kódovat nižším řádem sférických harmonických funkcí. Počet transportních kanálů je pak dán

$$N = N_H + N_V = [2M_H + 1] + [(M_V + 1)^2 - (2M_V + 1)], \quad (4.19)$$

kde N_H a N_V jsou počty kanálů pro kódování informace v horizontálním a vertikálním směru. M_H a M_V jsou řády sférických harmonických funkcí pro horizontální a vertikální rovinu.

4.1.7 Rozšíření systému Ambisonie

Kódování vzdálenosti

Zatím jsme původní akustické pole kódovali pouze pomocí harmonických sférických funkcí, které jsou závislé pouze na azimutu a elevaci. K rekonstrukci přirozeně znějícího akustického pole je nutné vzít v potaz i vzdálenost původních zdrojů. Pro vzdálené zdroje se používá umělý dozvuk. Jiná situace nastane, jestliže chceme rekonstruovat zdroje blíže než jsou reproduktory, kterými je rekonstruueme. V takovém případě existují dvě řešení.

První způsob jak kódovat informaci o vzdálenosti zdroje je tzv. Near Field Compensation, která funguje na principu proximity efektu. Ten si můžeme zjednodušeně představit tak, že čím blíže jsme zdroji, tím více vnímáme nízké kmitočty. Když tedy budeme chtít simulovat zdroje ve větší vzdálenosti než máme umístěné reproduktory, uберeme na basových frekvencích. Jestliže budeme chtít simulovat zdroj blíže než jsou reproduktory, tak přidáme na nízkých kmitočtech.

Druhý způsob využívá křivosti kulových vlnoploch v závislosti na vzdálenosti od zdroje. Čím dále je čelo vlny od zdroje, tím menší má křivost. V první fázi je kódována křivost vlnoplochy, a tedy i vzdálenosti zdroje pomocí syntézy zvukového pole 4.1.8 do virtuálního reproduktorového pole. V druhé fázi jsou signály jednotlivých virtuálních zdrojů kódovány pomocí Ambisonie vyššího řádu.

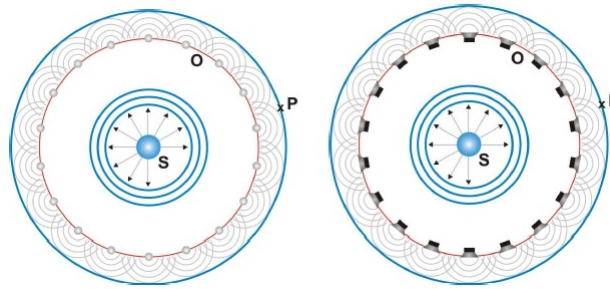
Vliv místnosti

Jedním z předpokladů systému Ambisonie bylo umístění soustavy reproduktorů do volného prostoru. V praxi toho ovšem nelze docílit, a proto musíme počítat s odrazy v místnosti. Jeden ze způsobů, jak s nimi počítat, je změřit směrovou impulsní odezvu místnosti v bodě poslechu. Odrazy pak můžeme interpretovat jako další virtuální zdroje, které můžeme vynulovat jinými zdroji s opačnou fází.

4.1.8 Syntéza zvukového pole

Syntéza zvukového pole (anglicky Wave Field Synthesis-WFS) je podle [5], [6] nebo [7] metoda vytváření prostorového zvuku na základě Huygensova principu. Ten říká, že každý bod vlnoplochy, do kterého dospělo vlnění v určitém časovém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch ve směru, ve kterém se původní vlna šířila. Nahradíme-li tyto jednotlivé body vlnoplochy individuálně řízenými reproduktory (obrázek 4.3 převzat z [7]), které budou simulovat sekundární vlny, výsledná obalová plocha sekundárních vln pak vyvolá stejné akustické pole jako původní zdroj. Nevyužívá tedy principů psychoakustiky, ale fyzicky rekonstruuje původní pole.

Obrázek 4.3: Princip Wave field synthesis



poznámka k obrázku 4.3: Vlevo Huygensův princip, vpravo princip WFS

Wave field synthesis můžeme realizovat dvěma způsoby. První způsob, vycházející z modelu místnosti, je založený na zrcadlení zdrojů, ze kterého se spočítají počáteční body odrazů v nahrávací místnosti. Ty se pak společně s odrazivostí stěn a směrovostí zdroje promítnou do výpočtu řídicích parametrů jednotlivých zdrojů. Vzhledem k velkému množství odrazů a dozvuku je přesná rekonstrukce zvukového pole nemožná. V současné době jsme schopni rekonstruovat přímou vlnu a několik prvních odrazů.

Druhý způsob vychází z naměřených dat, konkrétně z impulsní odezvy nahrávací místnosti. K nahrání je zapotřebí rozmístění mikrofonního pole v nahrávací místnosti ve stejné konfiguraci jako rozmístění reproduktorů v poslechové místnosti. Následnou konvolucí signálu a impulsní odezvy jsme schopni realizovat přímou vlnu, všechny odrazy i dozvuk místnosti. Nejsme ovšem schopni zaznamenat impulsní odezvy pro všechny konfigurace a musí se tedy pro ostatní případy dopočítávat. Vzhledem k množství těchto výpočtů je tento způsob téměř neproveditelný v reálném čase, zejména pro pohybující se zdroj signálu.

Největší výhodou systému WFS je fakt, že posluchač není vázán na jedno poslechové místo, protože syntetizuje celé zvukové pole. Jestliže se posluchač v poslechové místnosti pohne, změní se jeho vnímání prostorového zvuku stejným způsobem, jako by se pohyboval ve zvukovém poli původního zdroje. Nesmí se ovšem přiblížit příliš blízko jednotlivým reproduktorům, protože poté by začal vnímat jednotlivé reproduktory a nevnímal by syntetizované pole. Jako další výhodu můžeme uvést možnost řídit přímou vlnu, odrazy i ozvěnu zvlášť, narozdíl od klasických ozvučovacích systémů, kde jsou tyto signály již smíchány do jednoho.

Z principu takto syntetizovaného zvukového pole vyplývá i jeho největší nevýhoda. Pro věrnou simulaci prostorového zvuku je zapotřebí velké množství individuálně řízených akustických zdrojů umístěných blízko u sebe. Při použití omezeného počtu reproduktorů nastane problém s prostorovým aliasingem. Ten se začíná projevovat, když je rozteč mezi jednotlivými reproduktory větší než polovina vlnové délky $d > \frac{\lambda}{2}$. Důsledkem toho se ve vyzařovací charakteristice objeví postranní laloky, které nemíří žádaným směrem. Tyto nechtěné vlny pak interferují s ostatními a v poslechovém prostoru se tak vytváří místa, kde se tyto vlny vyruší nebo naopak sečtou a vzniknou tak oblasti s rozdílnou hladinou akustického tlaku. Frekvence, od které se začne projevovat prostorový aliasing, je závislá na geometrii umístění akustických zdrojů.

$$f_{alias} = \frac{c}{\Delta x |\sin \Theta^{sec} - \sin \Theta^v|}, \quad (4.20)$$

kde Δx je rozteč mezi reproduktory, a Θ^{sec} a Θ^v jsou maximální úhly mezi spojnicí zdroje s posluchačem a spojnicí zdroje s krajním reproduktorem a spojnicí posluchače s krajním reproduktorem. Pro správnou rekonstrukci akustických vlastností nahrávací místnosti je nutné, aby poslechová místnost byla dostatečně ztlumena a nepřidávala tak do syntetizovaného pole vlastní odrazy a ozvěnu.

REKONSTRUKCE ZVUKOVÉHO POLE

Jistě by bylo zajímavé pokusit se rekonstruovat zvukové pole v malé oblasti kolem uší pomocí menšího počtu zdrojů, než využívá Wave Field Synthesis a zároveň také univerzálnějším způsobem než je Higher Order Ambisonics. Libovolně umístěné zdroje v prostoru by byly váhovány tak, aby v několika vybraných bodech v blízkosti uší vytvářely stejný akustický tlak jako rekonstruovaný zdroj. Abychom přesně určili akustický tlak v blízkosti hlavy, je nutné počítat s rozptylem kolem ní. Jistou aproximací je podle [8] rozptyl vlny na tuhé kouli, ke které potřebujeme matematický aparát, který je popsán v příloze Besselovy funkce a Legendrovy polynomy. Je nutné dát pozor na značení jednotlivých veličin. Můžeme se totiž setkat například s opačným značením deklinace a azimutu nebo s pozměněnou podobou Greenovy funkce.

5.1 Rozptýlené zvukové pole v okolí hlavy

Pro jednoduchost aproximujeme hlavu koulí o poloměru $a = 0.08m$ a umístíme ji do počátku sférického souřadnicového systému. Akustický tlak přímého pole je dán Greenovou funkcí 2.7. Pro řešení rozptýleného pole musíme tuto funkci rozšířit do sférických harmonických funkcí

$$G_{\infty} = \frac{ik}{2\pi} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{+l} \varepsilon_m \cos m(\theta - \theta_m) p_l^m(\cos \phi_s) p_l^m(\cos \phi) j_l(kr_{<}) h_l(kr_{>}), \quad (5.1)$$

kde ϕ , ϕ_s značí deklinaci počítaného bodu v prostoru a deklinaci zdroje. θ a θ_s značí azimut bodu a azimut zdroje měřený od kladného směru osy z . Dále platí, že

$$r_{<} = \min(r, r_s)$$

$$r_{>} = \max(r, r_s)$$

$$\varepsilon_m = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 2, & m \neq 0 \end{cases}.$$

Jestliže splníme podmínky, uvedené v textu [8], můžeme po několika matematických úpravách pro rozptýlený akustický tlak v libovolném bodě prostoru psát:

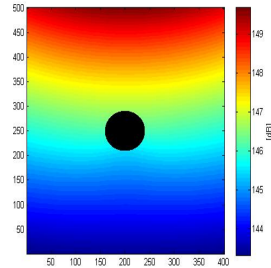
$$p_{scattered} = ikZ_0q \frac{ik}{2\pi} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{+l} \varepsilon_m \left[\frac{l j_{l-1}(ka) - (l+1) j_{l+1}(ka)}{l h_{l-1}(ka) - (l+1) h_{l+1}(ka)} \right] \cos m(\theta - \theta_s) p_l^m(\cos \phi_s) p_l^m(\cos \phi) h_l(kr_s) h_l(kr). \quad (5.2)$$

Celkový akustický tlak v kterémkoli bodě je pak dán součtem přímého akustického tlaku p_{inc} a rozptýleného akustického tlaku $p_{scattered}$

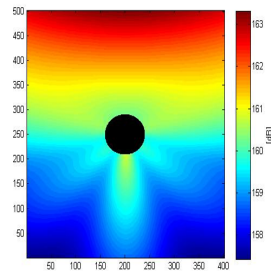
$$p_{total} = p_{inc} + p_{scattered} \quad (5.3)$$

Na obrázcích 5.1, 5.2, a 5.3 můžeme vidět rozložení celkového akustického tlaku na několika frekvencích.

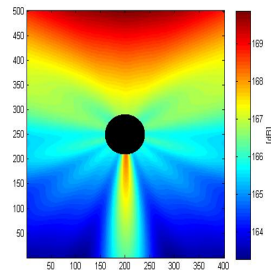
Obrázek 5.1: Rozložení akustického tlaku na frekvenci 1 kHz



Obrázek 5.2: Rozložení akustického tlaku na frekvenci 5 kHz



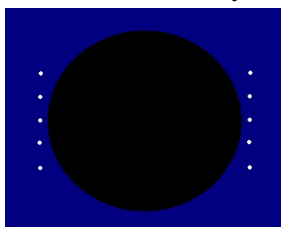
Obrázek 5.3: Rozložení akustického tlaku na frekvenci 10 kHz



5.2 Rekonstrukce zvukového pole

Jelikož nechceme rekonstruovat akustické pole v celém prostoru, můžeme se omezit jen na nejbližší oblast v okolí hlavy, a to především po stranách v oblasti kolem uší. Celkové akustické pole máme tedy spočítané ze vzorce 5.2 pro každý bod prostoru. Nyní můžeme vybrat několik referenčních bodů, které budou charakterizovat akustické pole, které chceme simulovat. Referenční body můžeme vybrat například podle obrázku 5.4, ale můžeme vybrat i jinou konfiguraci, která by například kopírovala tvar hlavy.

Obrázek 5.4: Referenční body kolem hlavy



Bílé body označíme P_1 až P_{10} a sestavíme z nich sloupcový vektor P . Dále umístíme libovolný počet reproduktorů do prostoru kolem posluchače a vypočteme celkový akustický tlak ve stejných bodech jako v předchozím případě pro každý zdroj zvlášť. Tato metoda vede na řešení maticové rovnice

$$P = H \cdot q, \quad (5.4)$$

kde H je matice, ve které jsou v řádcích celkové akustické tlaky od jednotlivých reproduktorů v bodech P_1 až P_{10} a q je sloupcový vektor obsahující parametry pro řízení každého reproduktoru v prostoru. Inverzí matice H dostaneme z rovnice požadované parametry q

$$q = H^{-1} \cdot P. \quad (5.5)$$

Inverze matice H ovšem není tak úplně jednoduchá, jelikož se jedná o téměř singulární matici. Jak se můžeme dočíst v [2], tak inverzi matice můžeme provést pouze v případě, že matice není singulární, tedy její determinant je různý od nuly ($\det H \neq 0$), a je čtvercová. Matice H ovšem čtvercová není, protože z obrázku 5.4 je vidět, že řídicích bodů je deset a my počítáme s maximálně sedmi reproduktory. V nejlepším případě má tedy matice H rozměry 7×10 . V Matlabu můžeme použít speciální operátor backslash „\“, který řeší obecnou rovnici $A \cdot x = B$ jako $x = A \setminus B$.

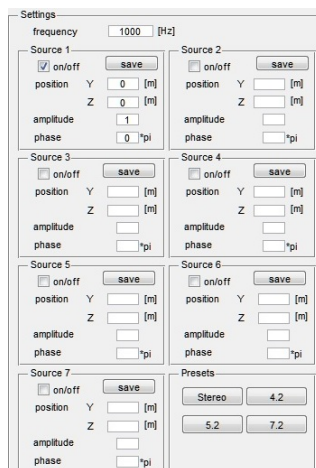
GRAFICKÉ ROZHRAŇÍ

Program pro výpočet celkového akustického tlaku je založen na rovnicích 2.7 pro přímý akustický tlak a rovnici 5.2 pro rozptýlený akustický tlak. Tento program byl použit pro veškeré výpočty akustických polí a jeho výsledky můžeme vidět například na obrázcích 5.1 a 5.2. Program pro simulaci referenčního zdroje je pak založen na rovnici 5.4 a hledá tedy řešení soustavy rovnic. Pro snazší ovládání obou programů jsou připravena dvě grafická rozhraní, která intuitivně navádějí ke správnému používání programů. Níže uvádím stručný popis grafických oken jednotlivých programů pro lepší orientaci.

6.1 Program pro výpočet celkového akustického tlaku

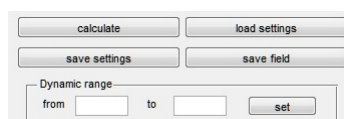
První program, který počítá celkové akustické pole v prostoru 4x6 metrů, nabízí zobrazení až sedmi bodových zdrojů najednou. V levé polovině okna je umístěno nastavení všech zdrojů. Pro každý zdroj je možné nastavit všechny důležité parametry. Konkrétně pozici v kartézských souřadnicích, amplitudu a fázi. Volba on/off pak zahrnuje, nebo odebírá zdroj z výpočtu. Tlačítko save uloží rozložení akustického pole konkrétního zdroje do samostatného souboru ve struktuře *.mat. Toto tlačítko je také nutné použít pro ukládání referenčních zdrojů.

Obrázek 6.1: Nastavení zdrojů



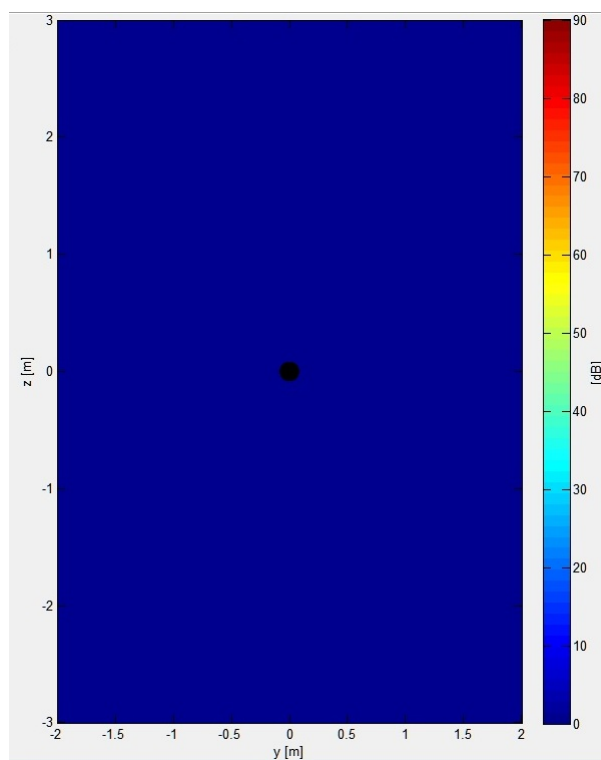
Samotný výpočet celkového akustického tlaku se spouští tlačítkem calculate. Do výpočtu jsou zahrnuty pouze zdroje, u kterých je zaškrtnuta položka on/off. Spolu s ním jsou zde tlačítka pro uložení a nahrání nastavení zdrojů do nebo z textového souboru. Poslední tlačítko této sekce ukládá všechna pole jednotlivých zdrojů do struktury *.mat společně s jejich nastavením. Vzhledem k velkým rozdílům maximálních a minimálních hodnot akustického pole a omezenou barevnou škálou, bylo nutné implementovat nastavení dynamického rozsahu zobrazení.

Obrázek 6.2: Výpočet a zobrazení pole



Celá polovina okna programu je vyčleněna pro zobrazení akustického pole v dB měře.

Obrázek 6.3: Okno pro zobrazení výsledku



6.2 Program pro simulaci referenčního pole

Druhý program simuluje referenční akustické pole pomocí předpočítaných akustických polí jiných zdrojů. Vlevo je sekce pro načtení polí ve formátu *.mat, jejich zobrazení a začlenění nebo vyčlenění z výpočtu tlačítkem on/off. Tlačítko calculate parametres pak podle postupu popsaneho v 5.2 spočítá parametry jednotlivých zdrojů a zobrazí všechny výsledky.

Obrázek 6.4: Načtení zdrojů do programu

Pod touto sekci je možnost napsat a zobrazit vlastní rovnici. Jako proměnné je nutné použít slova field1, field2, ..., field7. Výsledek je možné uložit tlačítkem save result.

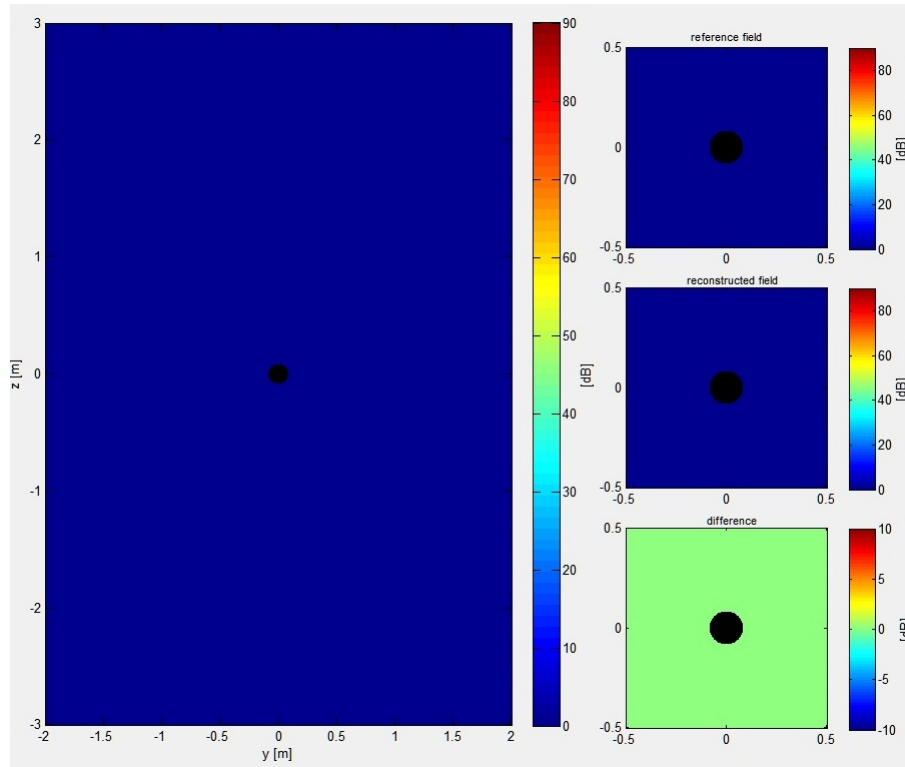
Obrázek 6.5: Vlastní rovnice

Dole je pak sekce pro nastavení dynamických rozsahů jednotlivých zobrazovačů.

Obrázek 6.6: Nastavení dynamického rozsahu

I zde je pro přehlednost nejvíce místa vyčleněno pro zobrazení výsledného pole a detailní výřezy z jednotlivých polí. V největším grafickém okně se zobrazují náhledy jednotlivých polí, nebo celkové rekonstruované akustické pole. V zobrazovačích napravo se pak od shora zobrazují referenční pole, rekonstruované pole a nejnižze jejich rozdíl.

Obrázek 6.7: Okna pro zobrazení výsledků



VÝSLEDKY SIMULACÍ

Abychom mohli porovnávat výsledky různých konfigurací ozvučovacího systému, je nutné ve všech simulacích dodržet stejný kmitočet pro všechny počítané zdroje. V této kapitole prezentuji pouze výsledky pro konfiguraci zdrojů 5.2 a pro zdroje rozmístěné pravidelně do kruhu. Pro obě konfigurace je přesné nastavení uvedeno níže v tabulce 7.1 a 7.2. Pro další práci s vypočteným polem je vhodné, aby všechny zdroje měly stejnou fázi i amplitudu (nejlépe jednotkovou). Referenční zdroje mají parametry popsané v tabulce 7.3. Referenční oblasti pro simulaci pole jsou dvě. Každá z nich má rozměr přibližně 1x4 cm a jsou umístěné symetricky v těsné blízkosti na stranách hlavy.

Tabulka 7.1: Nastavení zdrojů pro konfiguraci 5.2

zdroj	Y [m]	Z [m]	amplituda [-]	fáze [rad]
1	0	1.5	1	0
2	0.75	1.29	1	0
3	-0.75	1.29	1	0
4	1.5	0	1	0
5	-1.5	0	1	0

Tabulka 7.2: Nastavení zdrojů pro pravidelnou kruhovou konfiguraci

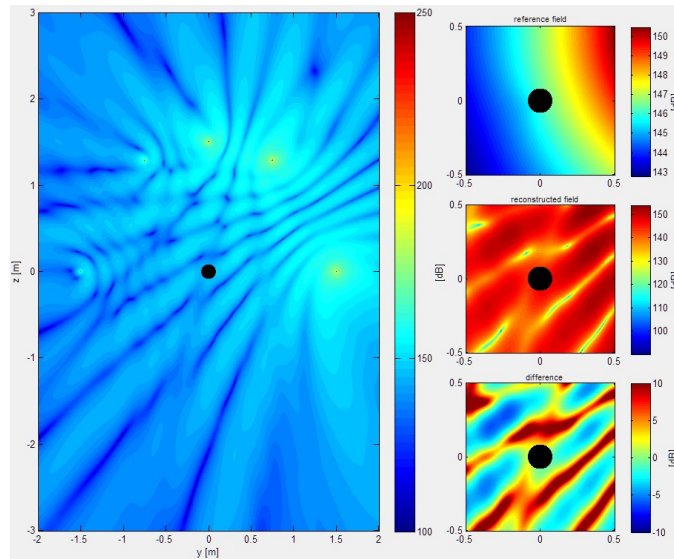
zdroj	Y [m]	Z [m]	amplituda [-]	fáze [rad]
1	0	1.5	1	0
2	1.17	0.93	1	0
3	-1.17	0.93	1	0
4	1.46	-0.33	1	0
5	-1.46	-0.33	1	0
6	0.65	-1.35	1	0
7	-0.65	-1.35	1	0

Tabulka 7.3: Parametry referenčních zdrojů

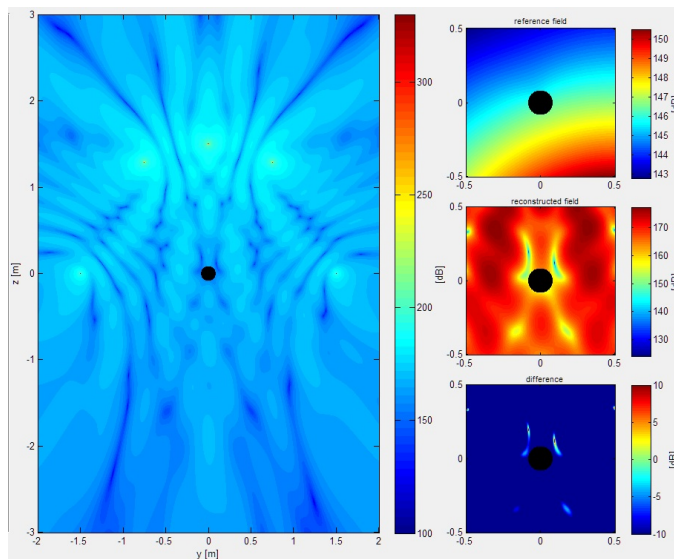
referenční zdroj	Y [m]	Z [m]	amplituda [-]	fáze [rad]
A	1.41	0.5	1	0
B	0.5	-1.41	1	0
C	0.38	1.45	1	0

Výsledky simulací zdrojů systémem 5.2 na frekvenci 1 kHz

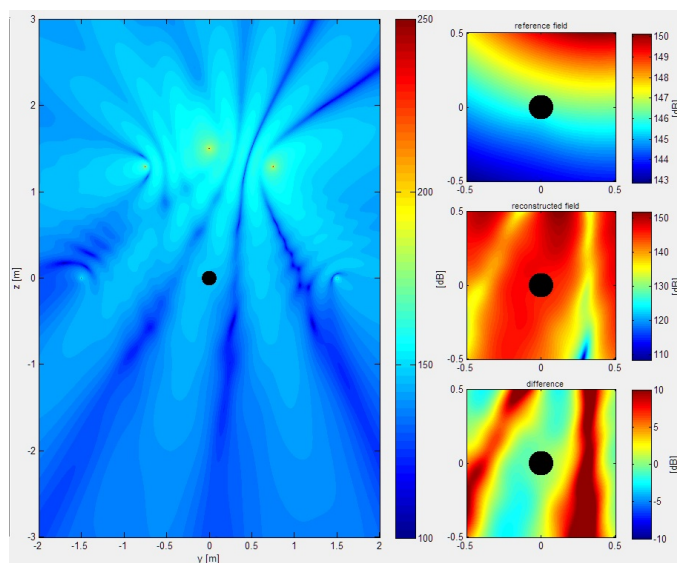
Obrázek 7.1: Simulace referenčního zdroje A systémem 5.2 na frekvenci 1 kHz



Obrázek 7.2: Simulace referenčního zdroje B systémem 5.2 na frekvenci 1 kHz



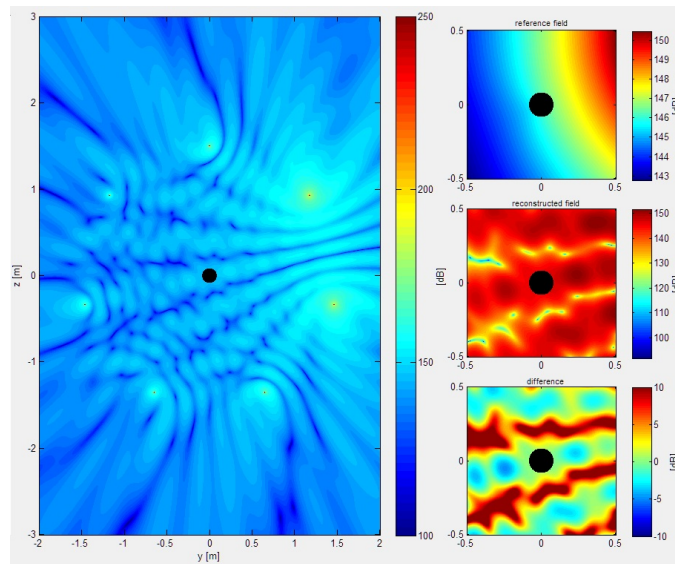
Obrázek 7.3: Simulace referenčního zdroje C systémem 5.2 na frekvenci 1 kHz



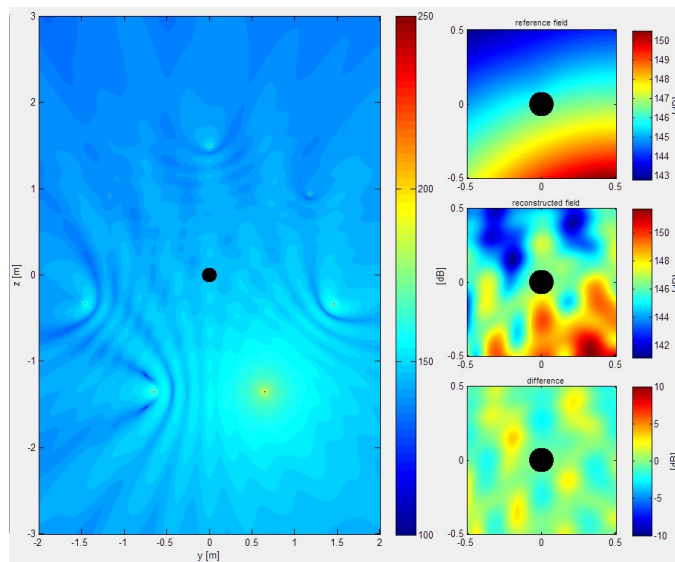
Jestliže se podíváme blíže na výsledky simulací zdrojů A a C, můžeme konstatovat, že jsou výsledky velice přijatelné. Maximální rozdíl referenčního a námi vytvořeného pole je 1.419 dB při simulaci zdroje A. Naopak simulace zdroje B je zcela nevyhovující a rozdíly polí jsou obrovské. To je dáno umístěním referenčního zdroje vůči ostatním zdrojům.

Výsledky simulací zdrojů systémem s pravidlenou kruhovou konfigurací na frekvenci 1 kHz

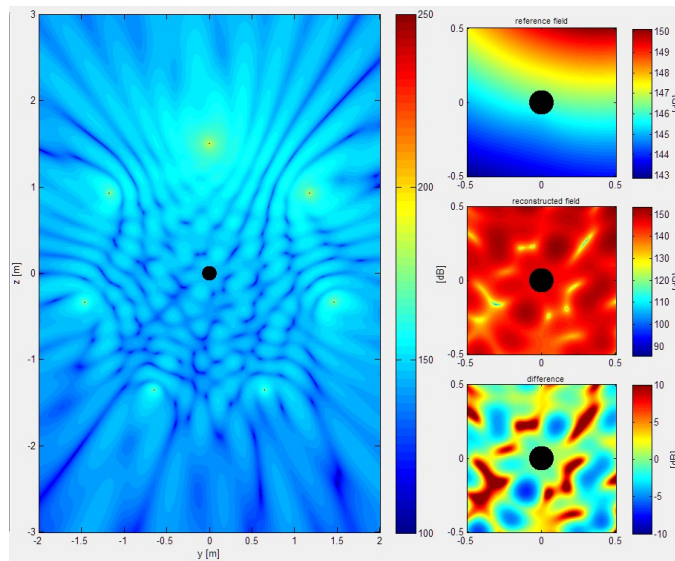
Obrázek 7.4: Simulace referenčního zdroje A systémem s pravidlenou kruhovou konfigurací na frekvenci 1 kHz



Obrázek 7.5: Simulace referenčního zdroje B systémem s pravidlenou kruhovou konfigurací na frekvenci 1 kHz



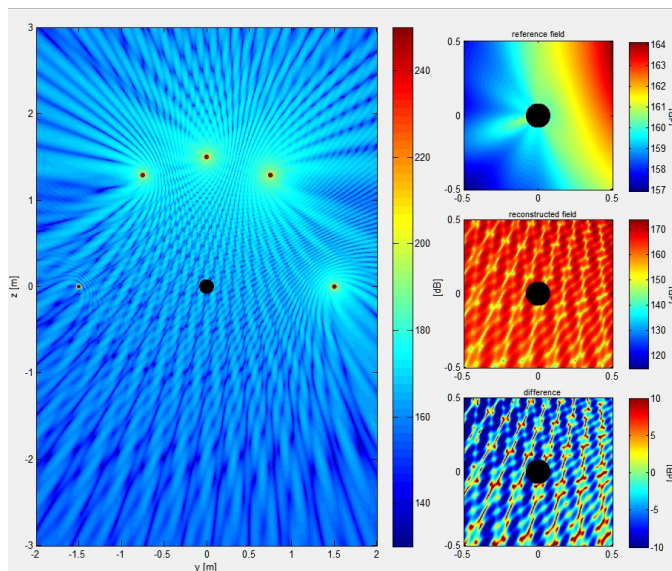
Obrázek 7.6: Simulace referenčního zdroje C systémem s pravidlenou kruhovou konfigurací na frekvenci 1 kHz



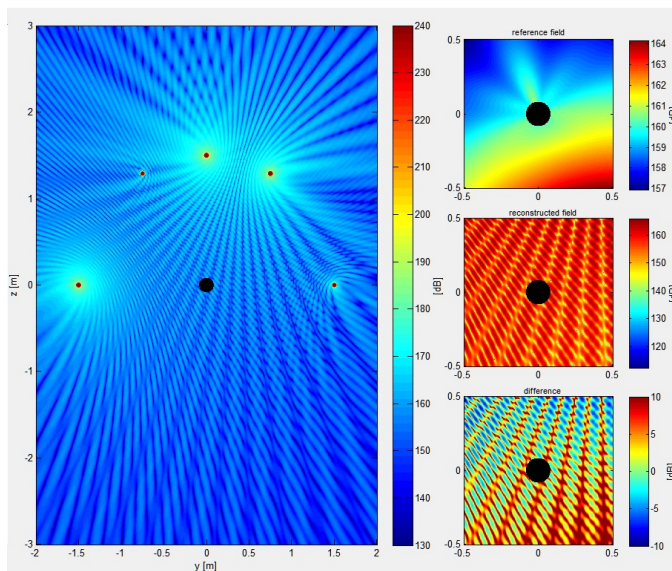
U výsledků simulací zdrojů A a C dostáváme velice podobné výsledky jako v předchozí konfiguraci. Rozdíly polí jsou minimální. Konkrétně maximální hodnota je 0.66 dB při simulaci zdroje C. V této konfiguraci můžeme vidět velkou výhodu pravidelného rozmístění zdrojů kolem posluchače, proto i simulace zdroje B má velice dobré výsledky.

Výsledky simulací zdrojů systémem 5.2 na frekvenci 5 kHz

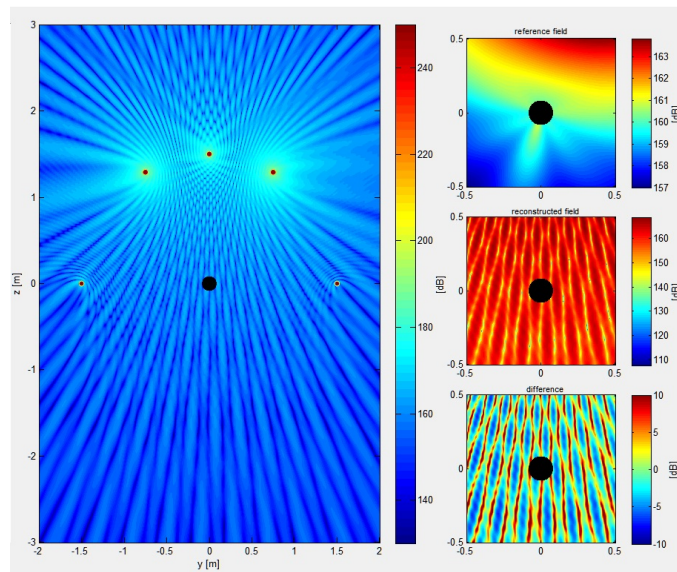
Obrázek 7.7: Simulace referenčního zdroje A systémem 5.2 na frekvenci 5 kHz



Obrázek 7.8: Simulace referenčního zdroje B systémem 5.2 na frekvenci 5 kHz



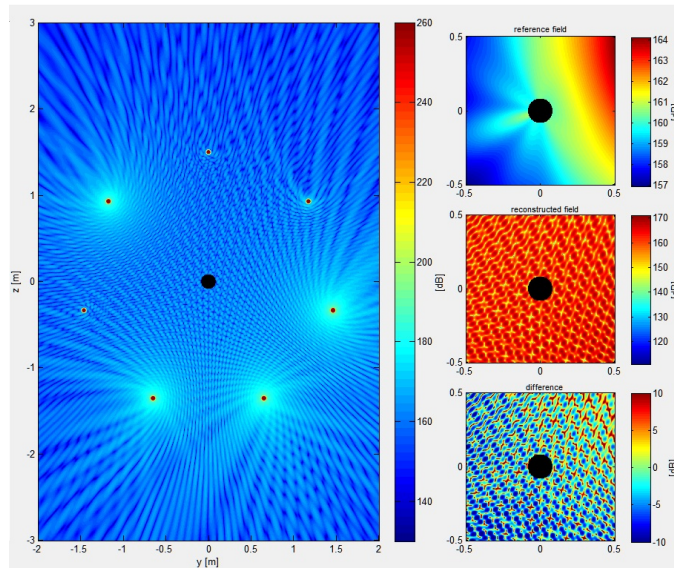
Obrázek 7.9: Simulace referenčního zdroje C systémem 5.2 na frekvenci 5 kHz



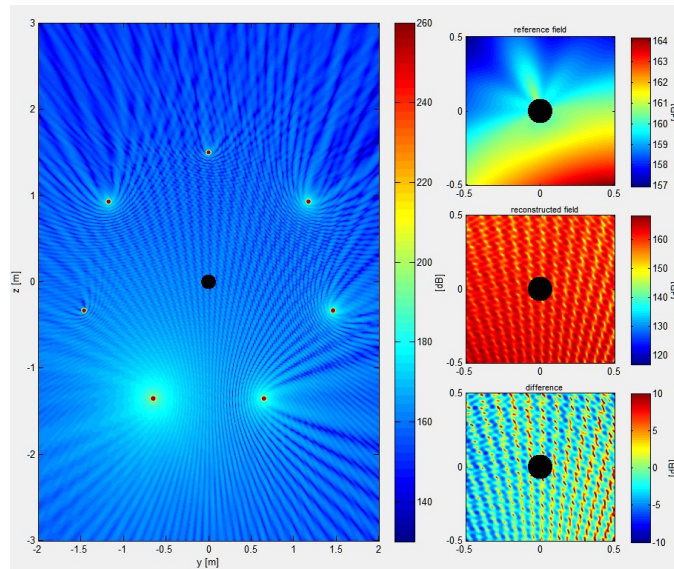
Jak je vidět z obrázku 5.2 na frekvenci 5 kHz se začne více projevovat rozptyl kolem hlavy. Oblast, ve které jsme schopni simulovat referenční akustické pole, se tak zmenší. To je příčina velkého rozdílu až 12 dB v malé části referenční oblasti při simulaci zdroje C a až 9 dB při simulaci zdroje A.

Výsledky simulací zdrojů systémem s pravidlenou kruhovou konfigurací na frekvenci 5 kHz

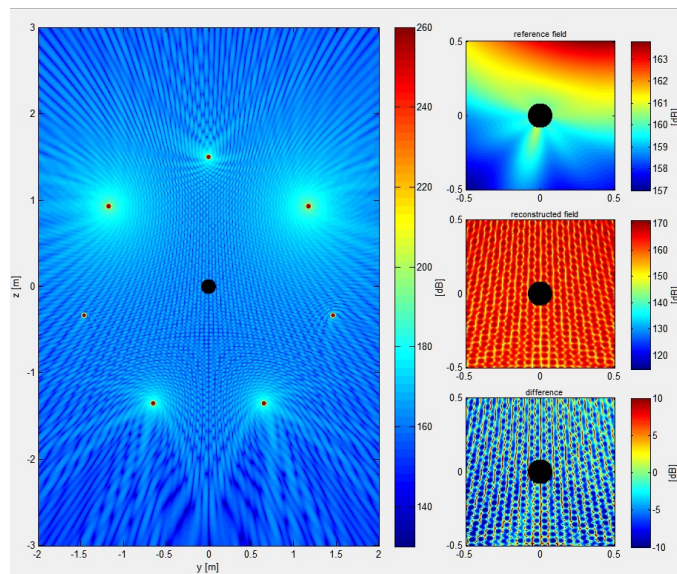
Obrázek 7.10: Simulace referenčního zdroje A systémem s pravidlenou kruhovou konfigurací na frekvenci 5 kHz



Obrázek 7.11: Simulace referenčního zdroje B systémem s pravidlenou kruhovou konfigurací na frekvenci 5 kHz



Obrázek 7.12: Simulace referenčního zdroje C systémem s pravidlenou kruhovou konfigurací na frekvenci 5 kHz



Při těchto simulacích se u zdrojů A a C vyskytly velké rozdíly ve velmi malé části referenční oblasti. Je zde tedy opět vidět, že čím vyšší frekvenci používáme, tím menší musí být referenční oblast kolem uší. Při simulaci zdroje B byl maximální rozdíl referenčního a simulovaného zdroje 5 dB.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo optimalizovat algoritmus pro výpočet rozptýleného akustického tlaku na tuhé kouli. V prostředí Matlab lze s výhodou využít maticového počtu, který mnohonásobně urychlí výpočet. Na druhou stranu má velké požadavky na operační paměť a výpočetní výkon počítače. Na průměrném notebooku s procesorem i5 2400 MHz a pamětí RAM o velikosti 4 GB trvá výpočet jednoho zdroje přibližně 6 minut. Nejdéle trvají operace s Legendrovými polynomy, které se s každým řádem stávají složitějšími a značně tak prodlužují dobu výpočtu. Z původní myšlenky, ukládat výstup jako univerzální textový soubor, sešlo, jelikož formátování výstupu trvalo příliš dlouho. Proto byl zvolen formát struktury *.mat, který ukládání značně urychlil. Tento formát navíc dovoluje uložit společně se zdroji i použité nastavení a snadné editování v prostředí Matlab. Nicméně jeden takto uložený zdroj počítaný na ploše 4x6 metrů má okolo 90 MB.

Druhý program je grafickým rozložením ovládacích prvků podobný prvnímu. Lze do něj načíst až sedm zdrojů ozvučovacího systému a jeden referenční zdroj. I zde hraje velikost uloženého pole velkou roli a načítání souboru do programu tak chvíli trvá. Samotný výpočet parametrů a zobrazení výsledků je však poměrně rychlý. Programu dominuje velké grafické okno pro zobrazení nově spočítaného pole. Vpravo jsou pak detaily referenčního a nového pole. Dole je pak jejich rozdíl.

Ve výpočtu hraje frekvence zásadní roli v přesnosti simulování referenčních zdrojů. Je to dáno tím, že na vyšších kmitočtech se rozptýl kolem hlavy projevuje více a začínou se kolem ní tvořit laloky s nižším a vyšším akustickým tlakem. Jako druhou příčinu nepřesností bych uvedl umístění referenčního zdroje vůči ostatním zdrojům. Čím blíže je referenční zdroj jinému zdroji, tím je simulace přesnější. S tím souvisí i rozmístění a počet zdrojů, kdy například stereo zdaleka nedokáže simulovat všechny referenční zdroje tak, jako třeba systém 5.2. Obecně by se dalo říct, že čím více pravidelně umístěných zdrojů použijeme, tím dosáhneme přesnějších výsledků. Přesnost určování polohy zdroje za námi je ale výrazně nižší, než určení polohy zdroje před námi. Proto má například ozvučovací systém 7.1/7.2 pouze dva vykrývací zdroje umístěné za hlavou (v záporné části osy z).

Porovnáme-li výsledky simulací pro systémy 5.2 a systém s pravidelnou kruhovou konfigurací na frekvenci 1 kHz, dává právě druhá jmenovaná v simulování zdroje A a C o něco lepší výsledky. V případě simulování zdroje B je neporovnatelně lepší systém s pravidelnou kruhovou konfigurací, jelikož systém 5.2 nemá v záporné části osy z žádné zdroje. Podobně dopadly i výsledky simulací na frekvenci 5 kHz, kdy už ale i pravidelný kruhový systém přestává být přesný. Z výsledků je i vidět, že se program nesnaží váhovat pouze nejbližší zdroje, které jsou referenčnímu zdroji nejbližší, ale že se snaží i kompenzovat laloky vzniklé kolem hlavy všemi zdroji, které má k dispozici.

LITERATURA

- [1] Škvor Z. Elektroakustika a akustika. 1. vydání, Praha: ČVUT, 2012, pp 574. ISBN 978-80-01-025034-7
- [2] Olšák P. Lineární algebra, Praha: ČVUT, 2007
- [3] Hollerweger F. An Introduction to Higher Order Ambisonics [online]. [vid. 28.4.2013] Dostupné z: <http://flo.mur.at/writings/HOA-intro.pdf>
- [4] Rund F. Simulace zvukoveho pole více zdroju [online]. Praha: Humusoft, 2009, ISBN 978-80-7080-733-0, [vid. 3.3.2013] Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB09/prispevky/089_rund.pdf
- [5] Verheijen E. Sound Reproduction by Wave Field Synthesis [online]. 2. vydání, 2010 [vid 28.4.2013] Dostupné z: http://www.dbvision.nl/bestanden/overons/publicaties/ouder/Thesis_Edwin_Verheijen.pdf
- [6] Oellers H. The path towards genuine spatial audio reproduction [online]. [vid. 27.4.2013] Dostupné z: <http://www.holophony.net/Wavefieldsynthesis.htm>
- [7] Wittek H. Perceptual differences between wavefield synthesis and stereophony [online], [vid. 26.4.2013] Dostupné z: http://www.hauptmikrofon.de/HW/Wittek_thesis_201207.pdf
- [8] Herzog Ph., Husník L. Cabine de restitution 3D - synthèse de champ binaurale. Interni zprava LMA, 2012
- [9] Spherical Wave Scattered by a Rigid Sphere [online]. [vid. 3.5.2013] Dostupné z: http://ansol.us/Products/Coustyx/Validation/MultiDomain/Scattering/SphericalWave/HardSphere/Downloads/dataset_description.pdf

Přílohy

Příloha A

Besselovy funkce

Za Besselovy funkce jsou označovány řešení Besselovy rovnice

$$x^2 y'' + xy' + (x^2 - n^2)y = 0 \quad (.1)$$

kde n je libovolné reálné číslo, označující řád Besselovy funkce. Obecné řešení této rovnice je

$$y(x) = c_1 J_n(x) + c_2 Y_n(x) \quad (.2)$$

Funkce J_n označuje Besselovy funkce prvního druhu, Y_n pak označuje Besselovy funkce druhého druhu, někdy též nazývané Neumannova funkce nebo Weberova funkce.

Besselovu funkci prvního druhu n -tého řádu můžeme vyjádřit

$$J_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{n+2k}}{k! \Gamma(n+k+1)} \quad (.3)$$

pro neceločíselná n a kde $\Gamma(x)$ značí gamma funkci. Besselova funkce druhého druhu n -tého řádu pak

$$Y_n(x) = \lim_{p \rightarrow n} \frac{J_p(x) \cos p\pi - J_{-p}(x)}{\sin p\pi} \quad (.4)$$

pro $n=0, 1, 2, \dots$. Dalšími funkcemi jsou Besselovy funkce třetího druhu, někdy též označované jako Hankelovy funkce.

$$H_n^{(1)}(x) = J_n(x) + iY_n(x) \quad (.5)$$

$$H_n^{(2)}(x) = J_n(x) - iY_n(x) \quad (.6)$$

Pro výpočet rozptýleného akustického pole ale potřebujeme sférické Besselovy funkce. Ty se ze základních Besselových funkcí vypočítají jako:

$$j_n(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} J_{n+\frac{1}{2}}(x) \quad (.7)$$

$$y_n(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} Y_{n+\frac{1}{2}}(x) \quad (.8)$$

Legendrové polynomy

Legendrovými polynomy se označují funkce, které jsou řešením Legendrovy rovnice

$$(1-x^2)y'' - 2xy' + n(n+1)y = 0 \quad (.9)$$

kde n je celé, nezáporné číslo a vyjadřuje řád Legendrova polynomu. Řešení této rovnice můžeme vyjádřit jako

$$P_n(x) = 2^n \sum_{k=0}^n x^k \binom{n}{k} \binom{\frac{n+k-1}{2}}{n} \quad (.10)$$

Tyto polynomy dále pro náš výpočet normujeme, čímž dostaneme normované Legendrové polynomy

$$p_n^m = (-1)^m \sqrt{\frac{(n+\frac{1}{2})(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(x) \quad (.11)$$

Prvních několik řádů je vyjádřeno níže.

Tabulka .1: Legendrové polynomy

n	$P_n(x)$
0	1
1	x
2	$\frac{1}{2}(3x^2 - 1)$
3	$\frac{1}{2}(5x^3 - 3x)$
4	$\frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3)$
5	$\frac{1}{8}(63x^5 - 70x^3 + 15x)$