

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Jan Kohoutek

ID: 155117

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Simulace akustického pole soustavy zdrojů zvukového signálu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte metody simulace rozložení akustického tlaku v prostoru při sčítání zvukových vlnění více zdrojů zvuku. Proveďte měření směrových charakteristik reálných reproduktorových ozvučnic. V prostředí Matlab vytvořte funkce pro simulaci akustického pole bodových zdrojů, pístově kmitajících kruhových membrán a změřených reproduktorových ozvučnic ve 2D prostoru při různých pozicích zdrojů a jejich vzájemných fázových posunech. Soustřeďte se zejména na konfigurace zdrojů pro systémy řízené směrovostí širokopásmové reprodukce zvuku a reprodukce na nízkých kmitočtech. V prostředí Matlab vytvořte grafické rozhraní, které umožní snadné zadávání parametrů simulace a zobrazení jejich výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Škvor, Z., Akustika a elektroakustika. Praha, Academia, 2001, pp. 527. ISBN 80-200-0464-0

[2] Williams E., G., Fourier Acoustics. Academic Press, 1999. ISBN 978-0-12-753960-7

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

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

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Simulace akustického pole soustavy zdrojů zvukového signálu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

..... podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Doc. Ing. Jřímu Schimmelovi, Ph.D., za pomoc které se mi dostalo jak při konzultace bakalářské práci, tak při měření které proběhlo v rámci tohoto díla. V neposlední řadě také za Jeho trpělivost a ochotu spolupráce.

V Brně dne

..... podpis autora

ABSTRAKT

Práce má za úkol popsat zákonitosti interakce zvukových vln v prostoru. Pro pochopení celého tématu jsou úvodem definovány všechny důležité fyzikální zákonitosti týkající se zvukového vlnění. Dále se zabývá frekvenčními a směrovými charakteristikami bodového zdroje, které porovnává s reálnými naměřenými charakteristikami přímo vyzařujícího elektrodynamického reproduktoru. V práci jsou ukázány některé příklady zvukových polí na kterých jsou specifikovány jejich vlastnosti. Dotýká se i tématu přímkových zdrojů. V praktické části byly změřeny hodnoty hladiny akustického tlaku, které vedly k vytvoření interpolační hladiny akustického tlaku přímkového zářiče, které porovnáváme s teoretickou mapou hladin akustického tlaku. Součástí celé práce je program umožňující zobrazení akustického pole zářičů za námi definovaných vlastností zdrojů a prostředí.

Klíčová slova

Zvuk, vlnění, reproduktor, bodový zdroj, rychlostní potenciál, liniový zdroj, směrovost, simulace

The main task of this bachelor thesis is description of interaction of sound waves in field. To understand the whole topic important physical laws related to sound waves propagation are defined. It also deals with frequency and directional response of ideal point source which compares with real measured responses of direct-radiating electrodynamic loudspeaker. Thesis are shown some examples of sound fields on which are specified their behavior. It also describe main properties for right functionality of line-array source. In practical part are measured acoustic pressure values which lead to creating a interpolation map of sound pressure level. This obtained map was compared with theoretical acoustic field. Part of this bachelor thesis is program which enable to simulate acoustic field created under variable sound and environment properties.

Keywords

Sound, sound propagation, loudspeaker, point source, , speed velocity, line source, directivity, simulation

1.	ÚVOD	1
2.	ŠÍŘENÍ ZVUKU	2
2.1.	ZÁKLADNÍ POJMY PRO POPIS ŠÍŘENÍ ZVUKOVÝCH VLN	3
2.1.1.	AMPLITUDA VLNY y_m	3
2.1.2.	VLNOVÁ DÉLKA λ	3
2.1.3.	FÁZE VLNY	4
2.1.4.	VLNOVÉ ČÍSLO k	4
2.1.5.	PERIODA T	5
2.1.6.	ÚHLOVÁ FREKVENCE ω	5
2.1.7.	FREKVENCE f	5
2.1.8.	RYCHLOST ŠÍŘENÍ ZVUKOVÉ VLNY	5
2.1.9.	INTERFERENCE ZVUKOVÉHO VLNĚNÍ	7
2.2.	ŠÍŘENÍ VLN V PROSTORU	8
2.2.1.	ODRAZ ZVUKOVÝCH VLN	9
2.2.2.	ÚTLUM PŘEKÁŽEK	10
2.3.	AKUSTICKÉ VELIČINY ZVUKOVÉHO POLE	10
2.3.1.	AKUSTICKÝ TLAK A AKUSTICKÁ RYCHLOST	11
2.3.2.	INTENZITA ZVUKU	12
2.3.3.	HLADINY AKUSTICKÝCH VELIČIN	12
3.	SMĚROVÁ A FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA REPRODUKTORU	14
3.1.	FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA REPRODUKTORU	14
3.2.	SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA REPRODUKTORU	15
3.2.1.	Index směrovosti, faktor směrovosti	17
4.	METODA SIMULACE AKUSTICKÉHO POLE ŘEŠENÍM RYCHLOSTNÍHO POTENCIÁLU 19	
4.1.	AKUSTICKÝ ZDROJ NULTÉHO ŘÁDU	19
4.2.	AKUSTICKÝ ZDROJ PRVNÍHO ŘÁDU	20
4.3.	PÍSTOVĚ KMITAJÍCÍ KRUHOVÁ PLOCHA	21
4.4.	ŘEŠENÍ AKUSTICKÉHO POLE	21
5.	AKUSTICKÉ POLE TVOŘENÉ VÍCE ZDROJI	25
5.1.	SOUČET VLNĚNÍ V AKUSTICKÉM POLI	25
5.2.	SOUČTOVÉ ZÓNY	25
5.2.1.	Slučovací zóna	27
5.2.2.	Zóna rušení	28
5.2.3.	Zóna hřebenového filtru	29
5.2.4.	Kombinovaná zóna	30
5.2.5.	Dislokace zdrojů	30
5.2.6.	Hřebenový filtr	31
5.3.	AKUSTICKÉ POLE TVOŘENÉ LINIOVÝMI ZDROJI	33
6.	MĚŘENÍ A SYNTÉZA ZVUKOVÉHO POLE A MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK REPRODUKTORU	38
6.1.	MĚŘENÍ FREKVENČNÍCH A SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK REPRODUKTORU	38
6.1.1.	Modulová charakteristika	38
6.1.2.	Směrová charakteristika	39
6.1.3.	Měření zvukového pole tvořeného liniovým zdrojem	40
7.	SIMULAČNÍ PROGRAM V PROSTŘEDÍ MATLAB	45
8.	ZÁVĚR	48
9.	SEZNAM LITERATURY	49

1 Úvod

V dnešní době, kdy se technologie posouvá každým dnem dopředu a invence, jež byla včera nová, může být dnes zastaralá, se nám nabízí stále více a více možností, jak se dívat na vědeckou diskuzi, ať už na poli biologie, fyziky, či v oboru, který nás bude zajímat nejvíce – fyzika zvukového vlnění. Zkoumání vlastností zvuku od jeho vzniku přes šíření, simulaci, měření až po syntézu nikdy nebyla jednodušší a metody zkoumání se každým dnem stále zjednodušují. To však sebou nese i zvyšování nároků na výsledky, ať už jde o výsledky vědeckého bádání, živého ozvučování, nahrávání kapely ve studiu, reprodukce hudby v domácí prostředí nebo v kině, či třeba simulace akustiky vnitřních prostor. Zvuk můžeme brát z mnohých hledisek. Můžeme jej brát jako ruch a šum ulice, proslov řečníka, či jako umělecký prožitek v podobě poslechu oblíbené hudební kapely. Zvuk tak jak jej slyší člověk může být velmi subjektivní, neboť uši každého jedince vnímají přicházející zvuk jinak. Fyzikální zákony zdroje zvuku a jejich interference však zůstanou vždy stejné a budou se měnit pouze v závislosti na prostředí ve kterém buzený zvuk posloucháme, na vlastnostech použitých zdrojů a na jejich umístění v prostoru.

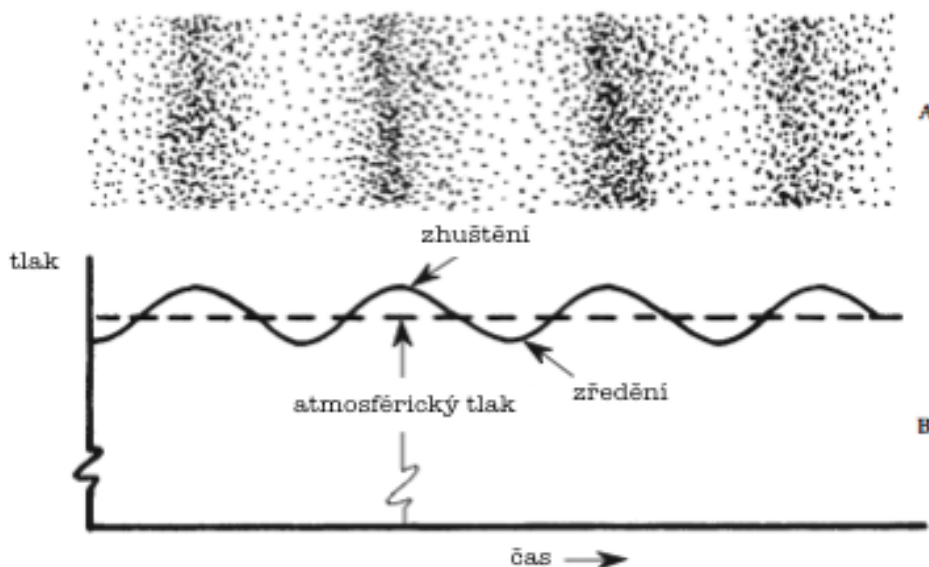
Otázka správného nastavení zdrojů zvuku vůči sobě je důležitá při návrhu živého ozvučování, či vytváření pevného uspořádání reproduktorů v kině, sále či divadle. Úkolem zvukové technika, který se tímto tématem zabývá je, aby reprodukováný zvuk byl v daném místě v prostoru za daných podmínek co nejkvalitnější. Nikdy se však nemůže zavděčit všem posluchačům a tak se může například stát, že zatímco v jednom prostoru je nízkých frekvencí nedostatek v dalším poslechovém prostoru jich bude příliš. Zkušený sound designér je schopen s pomocí správné techniky zajistit nejkvalitnější poslechový zážitek, co daný prostor umožňuje. Následující text má sloužit pro popsání základních zákonitostí které vedou k výslednému zvukovému poli, popisuje chování zdrojů zvuku v prostoru a způsob jejich interakce. Nahlíží do vlastností reálných reproduktorů i některých reproduktorových konfigurací, se kterými je možno se v praxi setkat a využít je pro náš prospěch. Součástí této práce je i simulační program, který umožní pozorovat možnosti chování zvukových vln jednoduchých konfigurací.

Téma, které práce zpracovává je příliš obsáhlé na to, aby se vešlo do několika těchto stránek, proto se nedostaneme příliš do hloubky celého tématu. Pomůže však pochopit chování zvuku a zvukových zdrojů v prostoru.

2 Šíření zvuku

Zvuk je popsán jako oscilace tlaku přenášená pružným médiem v člověkem slyšitelném pásmu kmitočtů. Zvuk je generován jakýmkoliv vibrujícím tělesem obklopeným prostředím, jehož elastické vlastnosti umožňují jeho vznik. Způsob šíření vln závisí na druhu prostředí. Fyzikálně popisujeme dva druhy šíření vlnění podle pohybu elementárních částic prostředí, kterým je vlna přenášená a to podélné a příčné vlnění. O příčné vlně (vlna transversální) mluvíme tehdy, když se amplituda vlnění mění ve směru kolmém na směr šíření vlny. Typickým příkladem je elektromagnetická vlna, či (pro náš případ zajímavější) zvuková vlna procházející pevným prostředím. Průchodu zvukového vlnění v podélném směru brání pravidelná struktura pevné látky silami působícími proti směru pohybu, čímž vznikají příčné reaktivní složky síly. Vlna se tak šíří různými směry. Podélné vlnění (longitudinální) vzniká u zvukových vln, které se pohybují v kapalném, či plynném prostředí.

Pakliže se zvuk šíří takovým prostředím, které splňuje podmínky pro vznik podélného vlnění, dochází ke zředování, zhušťování částic média a tím k jejich vychýlení ze své klidové polohy. Tuto výchylku nazýváme akustickou výchylkou. Vyvolaný rozruch se přenáší z částice na částici a pakliže není dále podporován zdrojem oscilací, kmitání částic pomalu odeznívá, dokud se částice opět neustálí ve své klidové poloze kterou nazýváme statická hodnota atmosférického tlaku, jejíž hodnota je $p_{00} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ (potažmo N/m^2). Tuto změnu tlaku vnímá naše sluchové ústrojí jako zvuk. Pro člověka je nejcharakterističtějším médiem k přenosu zvukových vln vzduch. Proto budeme při našich dalších závěrech uvažovat právě toto médium.



Obr. 2.1 zředování a zhušťování média vede k vychýlení tlaku od nominální hodnoty [1]

2.1 Základní pojmy pro popis šíření zvukových vln

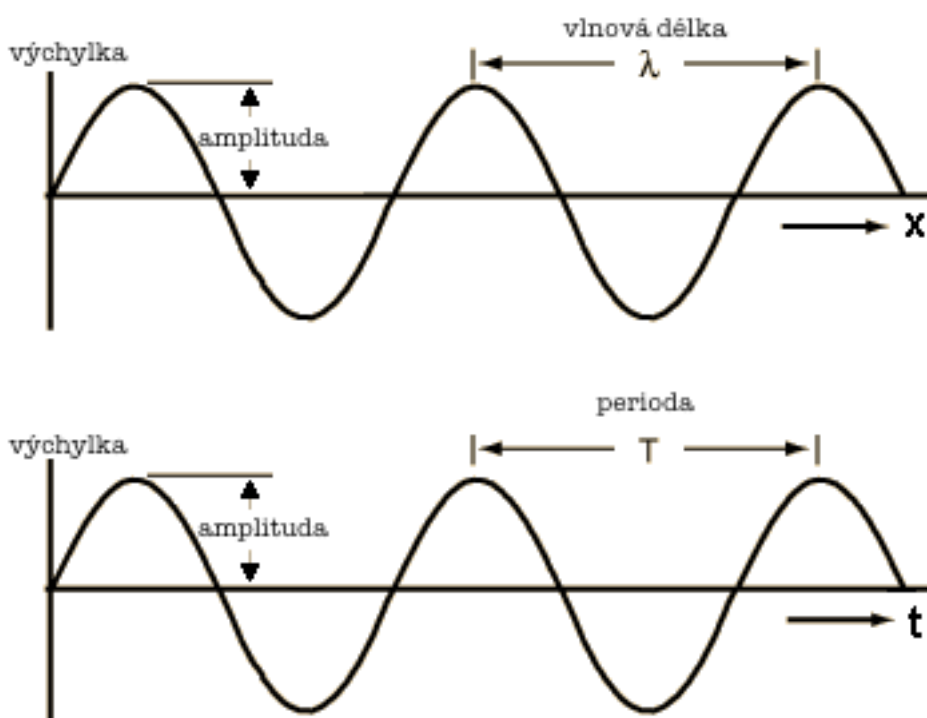
Pro popis zvukové vlny potřebujeme znát funkci, která určuje její tvar. Aneb potřebujeme znát funkční závislost $y = y(x, t)$. Z takové závislosti můžeme vyčíst příčnou výchylku určité částice vlny v určitém bodě x v čase t . Pakliže vlna postupuje prostorem ve směru osy x , je výchylka vlny v čase t popsána rovnicí podle [2]

$$y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t). \quad (2.1)$$

Význam jednotlivých konstant a proměnných si vysvětlíme v následujícím textu.

2.1.1 Amplituda vlny y_m

Amplitudou vlny rozumíme maximální možnou výchylku vlny v ose y . Její význam je lehce pochopitelný z obr 2.1.



Obr. 2.2 zobrazení veličin postupné vlny [3]

2.1.2 Vlnová délka λ

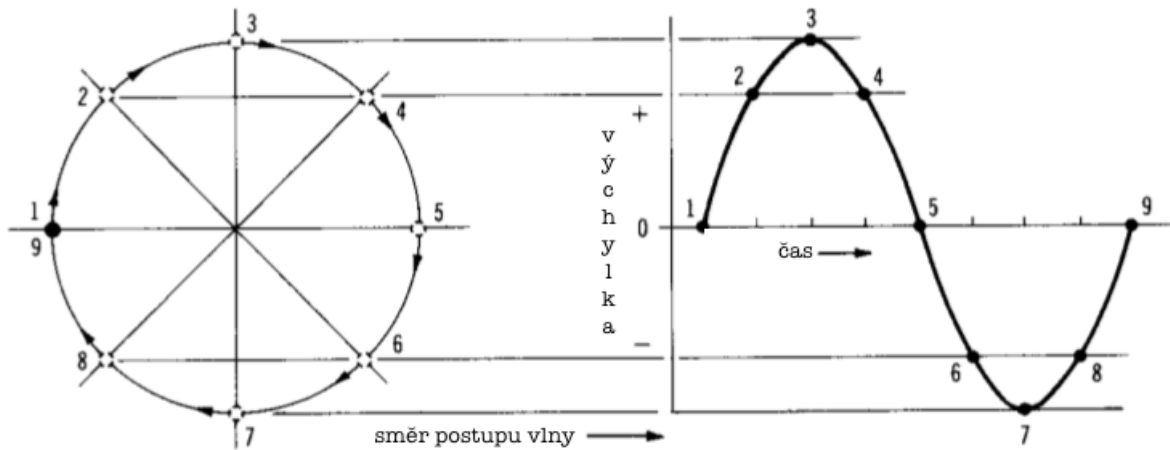
Vlnová délka je tedy nejmenší vzdálenost (měřená ve směru šíření vlny), na které dochází k opakování tvaru vlny. Pokud si na ose x zobrazené vlny zvolíme bod x_1 o souřadnicích $x_1[x, y]$, pak vlnová délka je vzdálenost na ose x , kdy se vlna posune do

bodou x_2 o souřadnicích $x_2[x+\lambda, y]$. Význam lze opět lehce vyčíst z přiloženého obrázku 2.1.

2.1.3 Fáze vlny

Pohyb vlny můžeme popsat pomocí jednotkové kružnice. Při dosažení své vlnové délky vlna zároveň obkrouží celou jednotkovou kružnici (obr. 2.3). Pokud si promítneme delší časový úsek vlny, zjistíme, že vlna kružnici kopíruje v jakémkoliv bodě svého pohybu, čímž vlna opíše celý úhel kružnice. Tento úhel můžeme zadávat buď ve stupních, či v radiánech. To v jakém bodě se vlna nachází v době započítání jejího sledování nazýváme počáteční fází nebo také argumentem (počátečním úhlem) funkce. V rovnici (2.1) je fáze vlny v bodu y rovna argumentu funkce $\sin(kx - \omega t)$.

O fázi vlny mluvíme také v případě, kdy uvažujeme dvě vlny, kde máme na mysli vzájemný fázový vztah dvou vln. Rozdíl těchto dvou fází nazýváme fázový posun vln. Fázový posun hraje velmi důležitou roli při skládání výsledného zvukového pole tvořeného dvěma, či více zdroji. Viz. kapitola 5.



Obr. 2.3 vpravo zobrazení postupné vlny, vlevo tatáž vlna zobrazena na jednotkové kružnici [1]

2.1.4 Vlnové číslo k

Dosažením času $t = 0$ do rovnice vlny rovnici zjednodušíme na tvar

$$y = y_m \sin(kx). \quad (2.2)$$

Z definice vlnové délky λ pak musí pro rovnici (2.2) platit

$$y = y_m \sin(kx + k\lambda). \quad (2.3)$$

Nyní si stačí uvědomit, že zvýšením argumentu o hodnotu 2π se sinusová funkce začne opakovat a pak platí, že $k\lambda = 2\pi$, z čehož lze lehce dopočítat hodnotu k

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.4)$$

Konstanta k se nazývá úhlový vlnčet potažmo vlnové číslo dané vlny. Její jednotkou je radián na metr [$\text{rad}\cdot\text{m}^{-1}$].

2.1.5 Perioda T

Periodu definujeme jako nejmenší časový úsek za se postupující vlna posune o svoji vlnovou délku λ . Viz. obrázek 2.2. Její jednotkou je sekunda [s]

2.1.6 Úhlová frekvence ω

Pokud pochopíme pojem perioda, pak nebude těžké odvodit si vztah pro úhlovou frekvenci ω .

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.5)$$

Jednotkou úhlové frekvence je radián za sekundu $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$. Někdy se úhlová frekvence též nazývá úhlový kmitočet.

2.1.7 Frekvence f

Frekvence je definována jako počet opakování periodického děje za daný časový úsek.

V našem případě bude naším časovým úsekem perioda T . Frekvence je pak matematicky definována rovnicí:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (2.6)$$

Jednotkou frekvence je hertz [Hz]. A jak je z její definice (2.6) patrné, je obrácenou hodnotou periody.

2.1.8 Rychlost šíření zvukové vlny

Jak jsme se již zmínili, zvuková vlna se přenáší podélným vlněním. Částice prostředí se tedy pohybují po směru i proti směru šíření zvukové vlny. Takovému vychýlení částice říkáme akustická výchylka a její rychlost nazýváme akustická rychlost částic. Nás ale nyní zajímá rychlost, kterou se vzruch šíří médium v prostoru. Budeme ji

nazývat rychlostí zvuku (rychlostí zvukové vlny). Obě rychlosti si neodpovídají a popisují zcela jiný jev.

Řekli jsme si, že druh média ovlivňuje způsob šíření vlny. Ne jinak je tomu u rychlosti šíření. Ta se mění s charakterem prostředí. Závisí na jeho setrvačných a elastických vlastnostech. Rychlost lze vypočítat z rovnice podle [2]

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (2.7)$$

kde K je modul objemové pružnosti a ρ hustota prostředí. Obecně je v pevných látkách a kapalinách rychlost přenosu zvuku rychlejší než v plynech. V tabulce 2.1 jsou uvedeny rychlosti zvuku v různých prostředích.

Prostředí	rychlost šíření zvuku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
Vzduch (0 °C)	331
Vzduch (20 °C)	343
Helium	965
Vodík	1 284
Hliník	6420
Ocel	5941
Žula	6000
Voda (0°C)	1 402
Voda (20°C)	1482
Mořská voda	1552

Tab. 2.1 Tabulka rychlostí zvuku pro různá prostředí [4]

Pro rychlost přenosu zvuku v plynném prostředí c můžeme podle [5] psát

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}}, \quad (2.8)$$

kde γ je plynová konstanta, p_0 hodnota klidového tlaku pro daný plyn a ρ hustota plynu. Nás však zajímá hodnota rychlosti šíření za tepelných podmínek. Jednoduchou úpravou dostaneme vzorec

$$c = \sqrt{\gamma RT}, \quad (2.9)$$

kde R je termodynamická konstanta daného plynu jejíž jednotka je $N \cdot m$ nebo $(kg \cdot K)$ a T je teplota plynu v absolutní hodnotě. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu o teplotě 20 °C můžeme spočítat jako

$$c = \sqrt{1,47 \cdot 287 \cdot (273,2 + 20)} = 342,2 \text{ m/s}$$

Rychlost zvuku pro různé hodnoty teploty můžeme sledovat v tabulce 2.2

Teplota	rychlost	změna rychlosti
[°C]	[m/s]	[%]
0	331,4	-3,5
4,4	334,1	-2,7
10	337,6	-1,8
12,1	338,8	-1,4
15,6	340,8	-0,8
18,9	342,9	-0,2
20	343,2	0
22,2	344,9	0,4
25,6	346,9	1
28,9	348,9	1,6
30	349,6	1,8
33,3	351,6	2,4
36,7	353,7	2,9

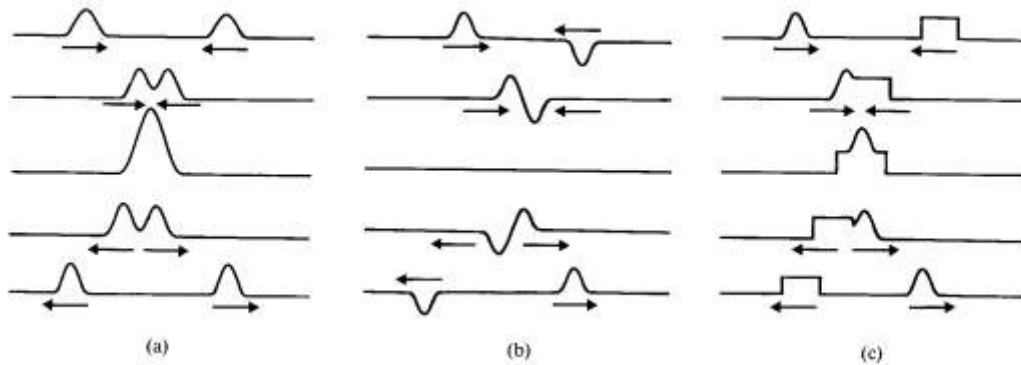
Tab. 2.2: Rychlosti zvuku ve vzduchu pro různé teploty [4]

2.1.9 Interference zvukového vlnění

V reálném prostředí se nám nepodaří setkat se s případem, že by do našeho sluchového orgánu dorazila pouze jedna vlna vyvolaná jedním zdrojem zvuku, pokud takovéto podmínky přímo nevyvoláme. Příkladem může být zdroj generující sinusovou vlnu o jedné frekvenci v bezodrazové místnosti a stejně nedosáhneme zcela dokonalých podmínek. Reálný zdroj zvuku totiž při svých oscilacích nevyvolá pouze jednu vlnu, nýbrž hned několik vln, které spolu vzájemně interagují a tvoří výslednou vlnu. Stejně tak tomu je u více zdrojů zvuku. Každý zdroj tedy vyvolává určité spektrum vln (mluvíme-li o spektru zvuku, máme na mysli všechny vlny, ze kterých se výsledný zvuk skládá). Fourierovou analýzou, která však není předmětem této práce, pak můžeme vlnu libovolného tvaru vyjádřit ve tvaru součtu velkého počtu sinusových vln [2]). Tyto vlny se smíchají (interferují) s vlněním z dalších zdrojů a výsledek je lidských uchem zaznamenan jako kompaktní zvuk. V prostoru se však každá vlna chová jako samostatný celek. To znamená, že vlny při vzájemné interakci nezanikají, ani se nemění jejich tvar, nýbrž se neporušeně pohybují dále v prostoru. Tento princip je zobrazen na obrázku (2.4). Výsledná vlna je popsána rovnicí

$$y'(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) + \dots + y_n(x, t), \quad (2.10)$$

Kde y_1 je rovnice prvního signálu, y_2 rovnicí druhého signálu a pro y_n platí, že je rovnicí n -tého signálu. Z rovnice vyplývá, že v prostředí se může nezávisle na sobě pohybovat nekonečné množství zvukových vln.



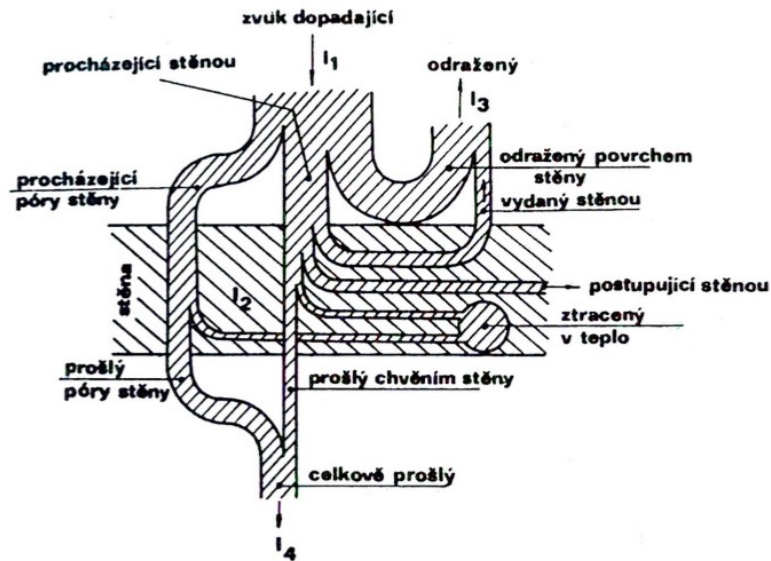
Obr. 2.4: Postup a vzájemná interference dvou vln [2]

Podrobněji je chování zvukových vln při interferenci popsáno v kapitole 5.

2.2 Šíření vln v prostoru

V reálném prostředí se vlastnosti šíření zvuku mění s vlastnostmi okolního prostředí, přičemž platí stejná pravidla, která jsme si uvedli. Při zkoumání šíření vln je tedy potřeba uvažovat jakým způsobem se mění rozložení zvukové energie při dopadu na překážku a jakým způsobem to ovlivní zvuk dopadajícího do našeho ucha. Na obrázku 2.5 je zobrazeno chování energie zvuku při dotyku s plochou.

Přicházející zvuk popsáný intenzitou I_1 je rozložen do tří složek. Část zvukové energie značené I_2 je pohlceno předmětem a část se dále mění v jiné druhy energie, či postupuje překážkou. Intenzita zvuku I_3 je odražena od překážky zpět do prostoru a interferuje se zvukem v prostoru. Podle typu a tvaru překážky projde větší, či menší množství energie I_4 za překážku.



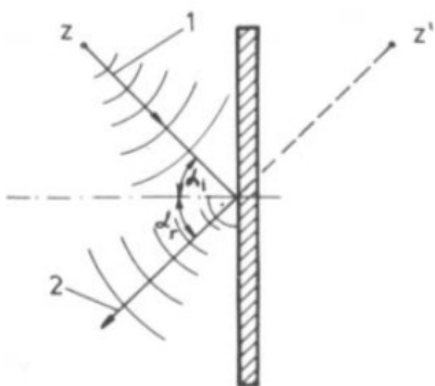
Obr. 2.5: Rozložení energie zvukového vlnění při dopadu na překážku [6]

2.2.1 Odraz zvukových vln

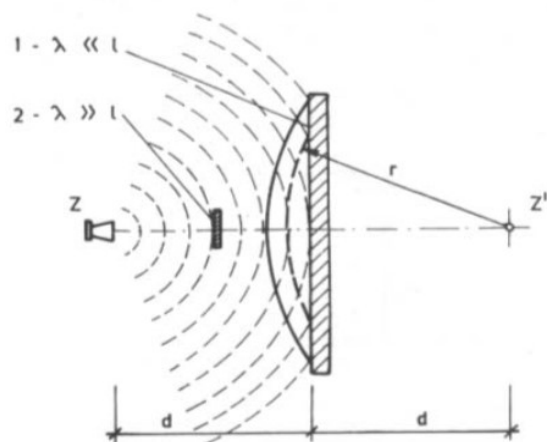
O odrazu zvukových vln mluvíme pokud se zvukové vlnění dotýká povrchu materiálu přiléhajícího na prostředí, kterým se zvuk šíří a vlnění i překážka splňují podmínky odrazu. Intenzita a směr odraženého zvuku zpět do prostoru závisí na tvaru překážky, na materiálu, ze kterého je složena na intenzitě přicházejícího zvuku a na frekvenci dopadajícího vlnění.

Můžeme říci, že pokud je vlnová délka dopadajícího vlnění větší než překážka, zvuková vlna projde bez deformace.

Při zavedení normály plochy v místě dopadu vlny je úhel dopadu definován jako úhel mezi normálou a dopadající vlnou. Pokud uvažujeme dokonale rovnou překážku s nulovou pohltivostí, je úhel odrazu zvuku od překážky stejný jako úhel dopadu (viz. obrázek 2.6) a tedy $\alpha_1 = \alpha_2$.



Obr. 2.6 Odraz zvuku od stěny o úhel α [7]



Obr. 2.6: Závislost průchodu zvuku překážkou na frekvenci zdroje [7]

2.2.2 Útlum překážek

Schopnost materiálu pohlcovat zvuk charakterizujeme činitelem zvukové pohltivosti. Činitel pohltivosti získáme poměrem pohlcené zvukové energie plochou W_a ku celkové energii dopadající na tuto plochu W_d

$$\alpha = \frac{W_a}{W_d} \quad (2.11)$$

Činitel zvukové pohltivosti nabývá hodnoty $0 \leq \alpha \leq 1$. Pokud je $\alpha = 1$, veškerá dopadající energie je pohlcena a naopak pokud $\alpha = 0$, bude se jednat o dokonale odrazovou plochu. Činitel pohltivosti závisí na použitém materiálu odrazivé plochy, na frekvenci dopadající vlny a na úhlu dopadu.

2.3 Akustické veličiny zvukového pole

Zvukové pole je prostředí, kterým se šíří zvuková vlna (zvukové vlny). Je vytvářeno zdrojem (zdroji) zvuku a je charakteristické vlastnostmi média, které je v poli obsaženo a vlastností i směrovostí zdroje zvuku. Pokud sledujeme zvukové pole v uzavřené místnosti, pak je charakterizováno i tzv. odrazivostí a pohltivostí stěn. V této publikaci budeme nadále uvažovat pole, které je homogenní (za homogenní je pole považováno tehdy, má-li veličina, která pole popisuje, v každém bodě prostoru stejnou hodnotu a izotropní prostředí je prostředí které má ve všech svých směrech stejné vlastnosti) [8]. Dále bude toto pole sestávat z plynného prostředí, ve kterém se šíří zvuk neomezeně všemi směry.

V následujícím textu si uvedeme několik definic a rovnic, které povedou k jednoduššímu pochopení principu tvorby zvukového pole v elastickém prostředí.

2.3.1 Akustický tlak a akustická rychlost

Zvuk je složen z malých pozitivních a negativních výchylek měřených jako odchylky od klidové hodnoty tlaku vzduchu p_0 (viz. kapitola 2, potažmo obrázek 2.1). Pokud chceme vypočítat hodnotu tlaku vyvolanou zvukem v uvažovaném prostředí, musíme umocnit hodnotu tlaku vzruchu přes periodu, čímž dojde k eliminaci protichůdných účinků pozitivních a negativních výchylek a hodnota tlaku vyvolaná zvukem bude vždy kladná a nenulová. Hodnota tlaku vzduchu p_{rms} (root mean square - česky doslovně odmocnina průměrů čtverců) kterou dle [9] definujeme jako

$$p_{rms} = \sqrt{\langle p^2 \rangle} = \sqrt{\frac{\int_0^{\tau} p^2 dt}{\int_0^{\tau} dt}}, \quad (2.12)$$

kde τ je námi zvolený časový interval a p je okamžitá hodnota tlaku. Pokud budeme uvažovat zvukovou vlnu jako jednoduchou funkci sinus, a τ si zvolíme jako interval jedné periody (budeme psát $T = 2\pi/\omega$), pak pro akustický tlak bude platit:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T p_m^2 \cos^2 k(x - ct) dt}{T}} = \frac{p_m}{\sqrt{2}}, \quad (2.13)$$

Kde k , c a t jsou nám již známé veličiny a p_m je maximální akustický tlak.

Akustická rychlost je rychlost, kterou kmitají jednotlivé částice prostředí okolo jejich rovnovážné polohy. Vypočítá se jako derivace akustické výchylky podle času

$$v = \frac{du}{dt} \quad (2.14)$$

Akustická rychlost je vektorová veličina, jejíž směr se neustále mění s časem. Pokud se částice pohybuje ve směru šíření vlny, pak jde o kladnou veličinou. O záporné akustické rychlosti pak mluvíme tehdy, kdy se částice pohybuje proti směru šíření zvuku. Akustická rychlost a akustický tlak spolu hrají důležitou roli nejen při uvažování druhu zvukového pole.

2.3.2 Intenzita zvuku

Intenzita zvuku I je akustický výkon zdroje procházející kolmo na jednotku plochy.

$$I = \frac{W}{S} \quad (2.15)$$

Její jednotkou je watt na metr čtvereční [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]. Zatímco akustický výkon zdroje zvuku zůstává neměnný, šířením zvuku v prostoru se mění plocha, který výkon musí obsáhnout. U bodového zdroje tedy můžeme uvažovat plochu koule, jejíž poloměr se se vzdáleností od zdroje zvětšuje a tedy $S = 4\pi r^2$. Můžeme tedy říci, že intenzita zdroje zvuku klesá se čtvercem vzdálenosti od zdroje. Pro lineární zdroj je plocha rovna $S = 2\pi r$.

Pokud nás zajímá vektor intenzity zvuku a pokud známe velikost akustického tlaku a rychlosti, můžeme intenzitu definovat podle [9]

$$\mathbf{I} = p\mathbf{v} \quad (2.16)$$

2.3.3 Hladiny akustických veličin

Vzhledem k tomu, že se intenzita zvuku I a akustický tlak p_{rms} se mohou měnit v rámci řádů, je pro nás vhodnější definovat akustický tlak jako poměrovou veličinu v logaritmickém měřítku. Je to výhodnější i z důvodů toho, že lidské ucho vnímá zvuk v logaritmické stupnici. Pro představu ucho zdravého jedince je možno vnímat zvuk od hodnot akustického tlaku $p_0 = 20 \mu\text{PA}$, jež definujeme jako práh lidské slyšitelnosti, až do hodnoty $p = 40,000,000 \mu\text{PA}$ (40 kPA) rovna hodnotě prahu bolesti. Pro hladinu akustického tlaku můžeme podle [7] psát

$$L_{p,SPL} = 10 \log\left(\frac{p_{rms}}{p_0}\right)^2 = 20 \log\left(\frac{p_{rms}}{p_0}\right) \text{ [dB]}. \quad (2.17)$$

V rovnici je L_p definováno v jednotkách decibelů [dB], p_0 se shoduje s námi již známou hodnotou referenčního tlaku vzduchu (p_0 odpovídá v jednotkách decibelů hodnotě 0 dB). Z rovnice lze vyčíst, že zdvojnásobením akustického tlaku koresponduje s přibližně 6 dB zesílením v hladině akustického tlaku. Pokud známe hladinu akustického tlaku, pak upravením vzorce (2.13) dostaneme výraz pro akustický tlak p_{rms}

$$p_{rms} = p_0 10^{\frac{L_p}{20}} \quad (2.18)$$

Obdobně můžeme zavést pojem *hladina akustické rychlosti* L_v

$$L_v = 10 \log \frac{v^2}{v_0^2} = 20 \log \frac{v}{v_0}. \quad (2.19)$$

Zde v_0 je vztažná hodnota rovna $5 \cdot 10^{-8}$ m/s. Jednotkou je opět decibel.

Jakožto v případě akustického tlaku i rychlosti, i zde pro nás bude výhodnější zavést intenzitu v logaritmické hladině.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ [dB]} \quad (2.20)$$

Jelikož jde o energetickou veličinu, neuvažujeme při výpočtu druhou mocninu. I_0 je vztažná hodnota 10^{-12} W.

Pokud sčítáme dva zdroje o stejné úrovni (např. 60 dB) výsledkem nebude 120 dB, nýbrž 63 dB. Logaritmické hodnoty totiž nemůžeme sčítat algebraicky. Pro součet dvou až n zdrojů můžeme psát:

$$L_c = 10 \log \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.21)$$

L_1 je hladina prvního zdroje, L_2 druhého zdroje a L_n hladina n -tého zdroje. Pro hladinu akustického tlaku bude rovnice stejná, akorát bude opět uvažovat mocninu dvou. Proto

$$L_{c,SPL} = 20 \log \left(10^{\frac{L_1}{20}} + 10^{\frac{L_2}{20}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{20}} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.22)$$

Několik příkladů příspěvků hladiny akustického tlaku v závislosti na počtu zdrojů je uvedeno v tabulce 2.3.

Počet zdrojů	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	24
Úroveň SPL [dB]	+6	+10	+12	+14	+17	+18	+20	+22	+24	+26	+28

Tab 2.3: Tabulka hodnot úrovní hladiny akustického tlaku v závislosti na počtu zdrojů [4]

3 Směrová a frekvenční charakteristika reproduktoru

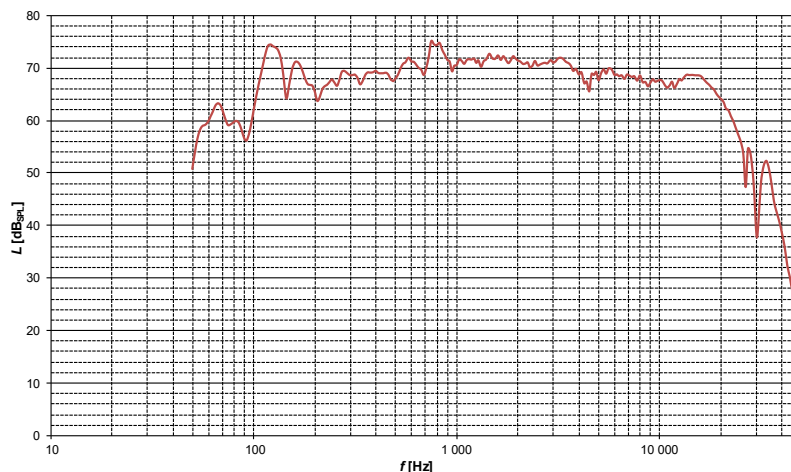
Reproduktor, jak už napovídá jeho název je analogový měnič elektrického signálu na akustický a tedy je schopen reprodukovat námi požadovaný zvuk do prostoru. Pokud chceme s reproduktory jakkoliv operovat, je dobré znát jejich základní vlastnosti a rozdělení abychom byli schopni vybrat vhodný reproduktor dle jeho účelu použití.

Reproduktory rozdělujeme podle způsobu vyzařování a podle typu elektro-mechanického měniče. V prvním případě existují dva druhy reproduktorů: přímo vyzařující a nepřímo vyzařující. Nepřímo vyzařující reproduktor k vyzařování zvukové energie používá zvukovodu, který mění mechanické vlastnosti (např. vyzařovací impedanci) a zároveň mění směrovost reproduktoru, se kterou musíme operovat při designu zvukových systémů. U přímo vyzařujících reproduktorů je signál buzen membránou přímo do prostoru bez vloženého článku v podobě zvukovodu. Jak jsme řekli výše druhé rozdělení reproduktorů je vázáno na druh elektromechanického měniče. Nejpoužívanějším druhem je elektrodynamický reproduktor. Z dalších je to například piezoelektrický, či elektrostatický měnič.

Základními vlastnostmi, které od sebe rozlišují reproduktory jsou jmenovitě: frekvenční charakteristika, směrová charakteristika, rezonanční frekvence, zkreslení, zatížitelnost, jmenovitá impedance, účinnost a charakteristická citlivost. V následujícím textu se budeme zabývat pouze prvními dvěma vlastnostmi, neboť ty budou mít v našem případě nejvyšší směrodatnost v řešení vyzařování zvuku do prostoru. Popíšeme si je na příkladu reálného reproduktoru, který byl použit při laboratorní práci vázané k tématu bakalářské práce.

3.1 Frekvenční charakteristika reproduktoru

Pokud nás zajímá kvalita přenosu hudebního signálů reproduktory, budeme se zabývat odezvou úrovně výstupního signálu na frekvenci signálu vstupujícího do reproduktoru. Tuto vlastnost nazýváme frekvenční charakteristika systému a můžeme z ní vyčíst schopnost reprodukce zdroje v celém frekvenční pásmu. Toto frekvenční pásmo redukuje na rozsah 20 Hz – 20 kHz, neboť právě v tomto rozsahu pracuje i lidské ucho a proto se pro nás další zvyšování rozsahu stává bezpředmětné. Drtivá většina výrobců uvádí na svých zařízeních právě tento rozsah. Bohužel už většinou neuvádí frekvenční charakteristiku, čímž pádem nemá uvedený samotný rozsah žádnou informativní hodnotu o kvalitě reprodukce zvuku. Charakteristiku přímovyzařujícího elektrodynamického reproduktoru, který se využívá pro laboratorní činnost v hodinách elektroakustiky na VUT v Brně můžeme sledovat na obrázku 3.1 (tento graf můžeme najít ve větším měřítku v příloze této práce). Je to tedy graf odezvy hladiny akustického tlaku buzeného signálu na jeho frekvenci.



Obr. 3.1: Skutečná frekvenční charakteristika přímovytvářejícího elektrodynamického reproduktoru používaného ve zvukové laboratoři na VUT v Brně

Nyní si můžeme položit otázku, jak by měla správně vypadat frekvenční charakteristika reproduktoru. Obecně můžeme říci, že čím je graf „rovnější“, tím je výsledná reprodukce kvalitnější - vyrovnanější. Snahou návrháře reproduktoru je maximální rovnocennost buzení signálu v závislosti na frekvenci. I když nutno podotknout, že zde mohu zavádět nepravdivou hypotézu, neboť každý reproduktor má svoje optimální frekvenční pásmo buzení. Proto naše tvrzení upravme do podoby: Každý reproduktor by měl mít co nejrovnější graf v úseku jeho efektivnosti (tzn. u basového reproduktoru nebudeme vyžadovat optimální frekvenční charakteristiku v celém pásmu slyšitelnosti, ale pouze v pásmu frekvencí cca 20 Hz – 300 Hz. Podobně u výškového reproduktoru nás bude stěžejně zajímat frekvenční rozsah cca 2500 Hz – 20 kHz).

Z přiloženého grafu můžeme vyzorovat, že rozdíl maximální a minimální hodnoty hladiny akustického zvuku je cca 55 dB (hodnoty odečteny z frekvencí 750 Hz a 14 kHz). Tato hodnota zvlnění však nemá vypovídající hodnotu, neboť se nám nikdy nepovede zmenšit rozměry reproduktoru na takovou velikost, aby byli schopni efektivně reprodukovat signál na vysokých kmitočtech. Proto někteří výrobci uvádění tzv. *efektivní hodnotu frekvenčního rozsahu*. Kupříkladu námi zkoumaný reproduktor bych popsal efektivní frekvenční odezvou 120 Hz – 10 800 Hz (± 4 dB).

Kvalita přenosu je však limitována dalšími vlastnostmi, které jsme si uvedli na začátku této kapitoly. V případě problematiky simulace a generace akustického pole nás bude kromě frekvenční charakteristiky zajímat i směrovost reproduktoru.

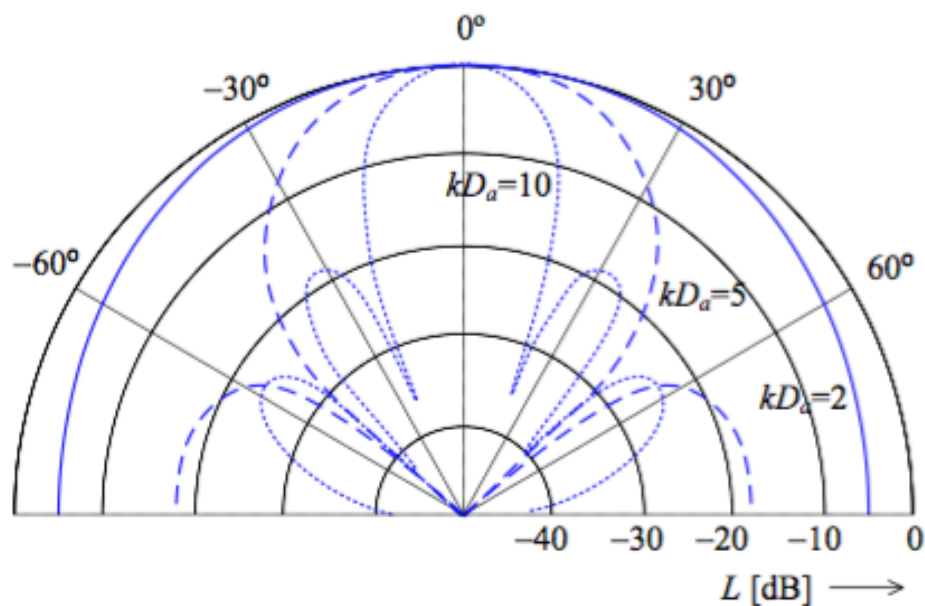
3.2 Směrová charakteristika reproduktoru

Pokud se budeme zabývat praktickým zvukovým designem (ať už při živém ozvučování akcí, či při návrhu ozvučení do vnitřních prostor) bude pro nás jedním z důležitých aspektů schopnost „vyplnit prostor zvukem“. Tato schopnost není dána

jenom počtem zdrojů zvuků a jejich amplitudovým slučováním. Velkou roli zde hraje i direktivita neboli směrovost zdroje zvuku.

Směrovost zvuku obecně udává kolik zvuku buzeného reproduktorem bude směřováno do pole akustické osy reproduktoru ve srovnání s celkovou energií, která je zdrojem buzena. Pojďme si uvést jednoduchou analogii: Pokud potřebujeme komunikovat s člověkem, který je příliš vzdálený, aby byl schopen nás slyšet, začneme vést komunikaci křikem. Tedy zvýšíme amplitudu signálu. Ani to však nemusí vždy být správným východiskem. Proto si pomůžeme směřováním zvuku přiložením rukou k ústům tak, aby směřovaly zvuk k posluchači. Zvětšujeme tak energii signálu, který jde v „akustické ose“ našich úst, a zvyšuje se tak pravděpodobnost, že se k našemu kolegovi dostane dostatečné množství zvukové informace.

Směrovost reálných reproduktorů určují čtyři faktory: ozvučnice reproduktoru, zvukovod a velikost a druh použitého elektromechanického měniče. Jelikož tyto aspekty nespádají do kompetencí a obsáhlost tématu by vydala za samostatnou práci, budeme se zabývat pouze závislostí směrovosti na relativním vztahu fyzické velikosti zdroje reproduktoru a vlnové délce reprodukováného zvuku. Také si ukážeme směrovost reálného reproduktoru v polárních souřadnicích.



Obr. 3.2: Směrová charakteristika ideálního zdroje v polárních souřadnicích [8]

Na obrázku 3.2 můžeme sledovat směrovou charakteristiku ideálního reproduktoru pro čtyři různé hodnoty $kD = kR/2$. Tento graf v polárních souřadnicích je v podstatě směrovou funkcí citlivosti reproduktoru na úhlu od akustické osy reproduktoru. Jak vidno čím je vlnová délka buzeného signálu kratší, tím je větší směrovost reproduktoru. Při nízké frekvenci se zdroj chová jako všesměrový (kulový) budič a jeho energie se šíří do celého prostoru. S rostoucí frekvencí se energie přesouvá do tzv. laloků. Vzniká hlavní lalok a vedlejší laloky. Je důležité si uvědomit, že směrovost se ve vertikální i horizontální rovině nemusí shodovat. V našem případě mluvíme o horizontální směrové charakteristice.

Z hlavního laloku definovaného v ose reproduktoru můžeme vyčíst vyzařovací úhel reproduktoru. V polárním grafu určíme body, kde je ztráta hladiny akustického tlaku rovna 6 dB oproti maximální intenzitě v akustické ose. Úhel mezi spojnicemi těchto bodů s bodem, kterým lokalizujeme zdroj je námi hledaný úhel. Ten bude pro každou jednu frekvenci odlišný. Určení směrovosti měřeného reproduktoru pro frekvenci 4000 Hz je v příloze A. Obecně můžeme říci, že čím je zdroj, který je fyzicky větší ve srovnání s vlnovou délkou, kterou budí, tím má větší kontrolu nad jeho směrovostí. Matematický popis směrovosti dle velikosti membrány a buzené frekvence zavádíme v kapitole 4.

3.2.1 Index směrovosti, faktor směrovosti

Předpokládejme, že máme všesměrový zdroj umístěný ve volném poli a ve vzdálenosti l umístíme poslechový bod, kde měříme hladinu akustického tlaku (obr. 3.3) V prvním případě naměřenou hodnotu označíme jako hodnotu L . Nyní položíme vedle zdroje velkou odrazivou rovinu, čímž zredukujeme směr šíření zvuku do prostoru před rovinu a zároveň vznikne za rovinou imaginární zdroj shodný s naším zdrojem, čímž dojde ke zdvojení akustického tlaku v bodě A. Hodnotu L_2 bude rovna hodnotě $L_2 = L_1 + 6$ dB. Následně položíme další roviny. Každým snížením vyzařovacího úhlu o polovinu zdvojíme směrovost zdroje a zvedne se hladina akustického tlaku o +6 dB.[10] Nyní můžeme definovat tzn. index směrovosti DI a faktor směrovosti Q. Index směrovosti je rozdíl hladin akustického tlaku směrově vyzařovacího zdroje v daném směru na měřicí ploše a průměrné hladiny akustického tlaku všesměrového zdroje, který má ve stejném úhlu a v stejné vzdálenosti od obou zdrojů v logaritmické stupnici.

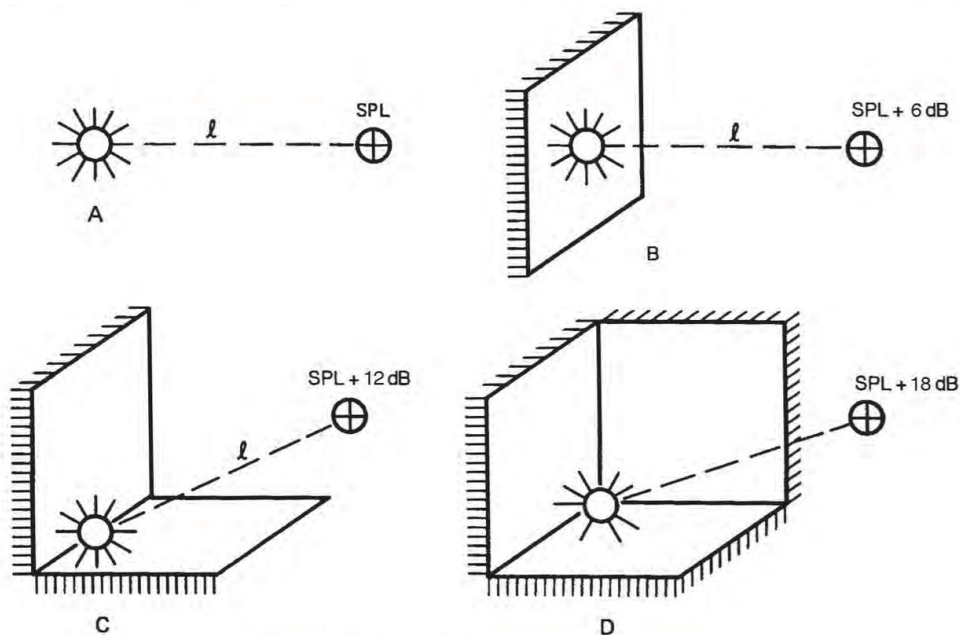
$$I_Q = 10 \log Q, \quad (3.1)$$

výsledek vychází v jednotkách decibelů a Q je tzv. faktor směrovosti pro který platí

$$Q = \frac{p_a^2}{p_{stř}^2}, \quad (3.2)$$

kde p_a je akustický tlak směrově vyzařujícího zdroje a $p_{stř}$ průměrná hodnota akustického tlaku všesměrově vyzařujícího zdroje.

Každým snížením vyzařovacího úhlu o polovinu zdvojíme zároveň i faktor směrovosti Q. Pro všesměrový zdroj je faktor $Q = 1$, Pro zdroj se směrovou charakteristikou poloviční koule je hodnota faktoru směrovosti $Q = 2$, Pro další snížení směrovosti zdroje o polovinu zvýšíme faktor směrovosti na hodnotu $Q = 4$.



Obr. 3.3: Přidáváním dokonale odrazivých ploch okolo zdroje zmenšujeme vyzařovací úhel zdroje, což vede ke zvýšení akustického tlaku v poslechovém bodě [10]

Máme-li zdroj umístěný v místnosti s celkovou pohltivostí A [m^2], středním činitelem pohltivosti α [-] a činitelem směrovosti Q [-], bude jeho hladina akustického tlaku ve vzdálenosti r [m] při hladině akustického výkonu zdroje L_I [11]

$$L_p = L_p + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha)}{A} \right). \quad (3.3)$$

Celkovou pohltivost místnosti vypočítáme ze vztahu dle [11]

$$A = \sum_{i=1}^n S_i \alpha_{iS} = S_1 \alpha_{1S} + S_2 \alpha_{2S} + \dots + S_n \alpha_{nS}. \quad (3.4)$$

Ohraničující stěny místnosti jsou tvořeny dílčími plochami S_1, S_2, \dots, S_n a α_{1S}, α_{2S} a α_{nS} jsou pohltivosti jednotlivých ploch.

Faktor směrovosti Q a index směrovosti I_Q jsou teoretické parametry a dost často tyto hodnoty liší od hodnot reálného reproduktoru. Tyto faktory se také mění s uvažováním frekvence, kterou reproduktory budí. Reprodukter může mít hodnotu Q na 2 kHz rovnou $Q = 12$, při kmitočtu 500 Hz $Q = 4$ a na frekvenci 125 Hz $Q = 1$.

4 Metoda simulace akustického pole řešením rychlostního potenciálu

Rychlostním potenciálem rozumíme skalární hypotetickou veličinu, která byla zavedena pro usnadnění řešení vlnové rovnice v poli které je zaplněno tekutým prostředím. Hlavní aplikací však nadále zůstává při řešení akustického pole, které je vyvolané jedním, či více zdroji. V roce 1788 ji popsal italský matematik Joseph-Louis Lagrange. Pro jeden zdroj buzení zvukového pole je jeho hodnota definovaná takto

$$\text{grad } \Phi = v = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k}, \quad (4.1)$$

kde \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} jsou opět jednotkové vektory ve směru x , y a z .

Pro pochopení principu rychlostního potenciálu je dobré si uvědomit, že místa se stejnou hodnotou rychlostního potenciálu $\Phi(x, y, z) = \text{konst.}$ se nazývají ekvipotenciální plochy. Pokud pracujeme s více zdroji zvuku, pak dle [8] platí

$$\Phi_x = \sum_{i=1}^n \Phi_i. \quad (4.2)$$

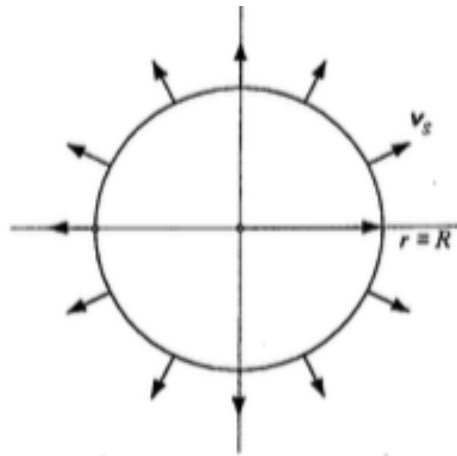
Tato rovnice nám říká, že hodnota rychlostního potenciálu Φ_x v jakémkoli bodě x je rovna součtu hodnot rychlostních potenciálů Φ_i vyvolaných jednotlivými zdroji v tomto bodě, přičemž n udává konečný počet zdrojů [8]. Abychom mohli určit rychlostní potenciál zdroje který zkoumáme, je nutné znát jeho charakter, tzn. způsob kterým zdroj budí zvukové pole v prostoru.

4.1 Akustický zdroj nultého řádu

Nejjednodušším zdrojem pro naše zkoumání bude akustický zdroj nultého řádu, neboli monopól (obr. 4.1). Tento zářič si můžeme představit buď jako kouli, jejíž povrch je v kontaktu s tekutinou a kmitá ve všech bodech stejnou radiální rychlostí co do amplitudy i fáze, anebo jako tenkou membránu tvaru kulové plochy, jejíž vnější část je v dotyku s okolní tekutinou a u níž buzení vnitřní části koule neuvažujeme. Výchylinky kmitajícího povrchu koule jsou nepatrné vůči poloměru R zářiče [12]. Takový zdroj můžeme považovat za všesměrový a příkladem takového zdroje bude tzv. pulzující koule. Pro rychlostní potenciál takového zářiče může psát dle [12]

$$\Phi = -v_s \frac{R^2}{1 + jkR} \frac{e^{-jk(r_i - R)}}{r_i}, \quad (4.3)$$

Kde v_s je akustická rychlost zdroje, R je klidový poloměr zářiče, k je vlnové číslo a r_i je vzdálenost od počátku souřadnic.

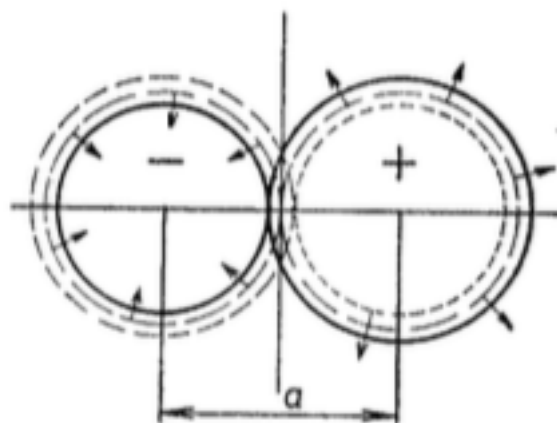


Obr. 4.1: model pulzující koule [12]

4.2 Akustický zdroj prvního řádu

O akustickém zdroji prvního řádu (obr. 4.2) mluvíme v případě, kdy uvažujeme dva zdroje nultého řádu, které budí shodný signál co do amplitudy a fáze signálu a jsou od sebe ve vzdálenosti daleko menší než je vlnová délka. Charakter buzení takového zářiče zpodobňujeme s tvarem osmičky. Rychlostní potenciál takového zdroje je pak dán rozdílem rychlostních potenciálů jednotlivých zdrojů a platí pro něj rovnice

$$\Phi_{12} = A \left(\frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right). \quad (4.4)$$



Obr 4.2: Model akustického zdroje prvního řádu [11]

4.3 Pístově kmitající kruhová plocha

Pístově kmitající zdroj je takový hypotetický zdroj zvuku, jež se dá ztotožnit s chováním reálného zdroje zvuku. Proto jej používáme při modelování akustických polí vytvořených reproduktorem. Matematické vyjádření

$$\Phi_i = -v_s \frac{R^2}{1 + jkR} e^{jkR} \frac{e^{-jkr}}{r_i} \pi R_i^2 \frac{2J_1(kR_i \sin \vartheta_i)}{kR_i \sin \vartheta_i}, \quad (4.5)$$

ve které je R_i je roven poloměru kruhového zářiče, ϑ_i je úhel mezi místem poslechu A a kolmicí k rovině zářiče a $J_1(x)$ je definováno jako Besselova funkce prvního druhu.

4.4 Řešení akustického pole

Znalost rychlostního potenciálu a vlastností definovaných hypotetických zdrojů zvuku můžeme jednoduše popsat akustické pole. Předtím si ještě zavedeme rovnici pro amplitudu signálu dle [12]:

$$A = -v_s \frac{R^2}{1 + jkR} e^{jkR}. \quad (4.6)$$

Pokud budeme uvažovat bodový zářič z kapitoly 4.1, pak můžeme pro rychlostní potenciál od zdroje i ve vzdálenosti r_i od sledovaného místa A psát podle [12]

$$\Phi = A_i \frac{e^{-jkr_i}}{r_i}, \quad (4.7)$$

kde $k = \omega/c_0$ je vlnové číslo a A_i je amplituda příslušného zdroje, která se pro určitý zdroj vypočítá pomocí rovnice [12]

$$A = -v_s \frac{R^2}{1 + jkR} e^{jkR}. \quad (4.8)$$

kde v_s je rovno radiální rychlosti zdroje. Rovnice amplitudy zdroje vychází z podmínky, že pro $r = R$ musí být splněna okrajová podmínka rovnosti akustické rychlosti a radiální rychlosti kmitajícího povrchu $V = v_s$:

$$v(r = R) = v_s = -A \frac{1 + jkR}{R} \frac{e^{-jkR}}{R} \quad (4.9)$$

Řešení zvukového pole však musíme uvažovat i pro jiné případy než je jednoduchý bodový zdroj. V našem případě nás tedy bude kromě rovnice pro bodový

zdroj zajímat i rovnice pro pístově kmitající kruhový zdroj. Pro takový zdroj píšeme rovnici (4.7) podle [12] jako

$$\Phi_i = -A_i \frac{e^{-jkr}}{r_i} \pi R_i^2 \frac{2J_1(kR_i \sin \vartheta_i)}{kR_i \sin \vartheta_i}, \quad (4.10)$$

ve které je R_i je roven poloměru kruhového zářiče, ϑ_i je úhel mezi místem poslechu A a kolmicí k rovině zářiče a $J_1(x)$ je definováno jako Besselova funkce prvního druhu.

Besselova funkce je řešením Besselovy diferenciální rovnice. Tyto funkce jsou nesmírně důležité díky své aplikaci v úlohách rotační, či sférické symetrie. Proto se jim též říká (nepříliš vhodně) cylindrické funkce. Pokud budeme pracovat pouze se zdroji u kterých platí $kR < 1$ pak můžeme nahradit vztah (4.10) vztahem (4.7) a tím pádem nebudeme Besselovu funkci vůbec uvažovat [13]. V tabulce (3.1) můžete sledovat limitní velikost poloměru zářiče pro různé frekvence.

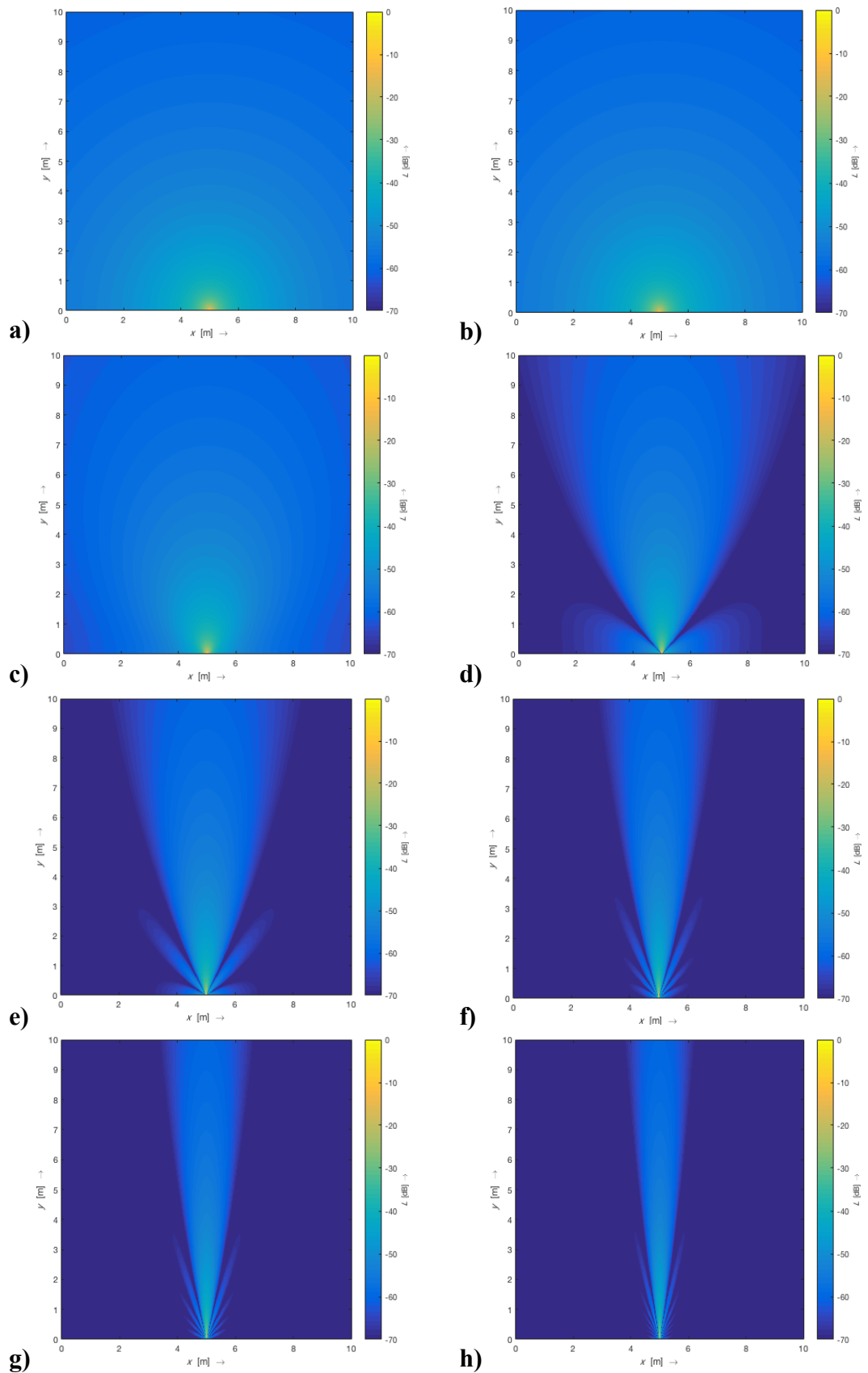
Vypočítáním rychlostního potenciálu již jednoduše zjistíme hodnotu akustického tlaku p , ze kterého už pro nás nebude složité zjistit podle rovnice (2.17) hladinu akustického tlaku, který jsme schopni lehce zobrazit v grafech. Tyto grafy můžeme vidět na obrázku AB. Pro hodnotu tlaku vzduchu ve zvoleném místě zvukového pole můžeme použít vztah [13]

$$p = -j\omega\rho_0\Phi, \quad (4.11)$$

ve kterém je ρ_0 hustota obklopujícího prostředí.

Výše zmíněné rovnice pro rychlostní potenciál nám poslouží k simulaci akustického pole vytvářeného jednoduchými zdroji zvuku v prostředí Matlab. Pro simulaci zvukového pole zdroje byla uvažována hustota vzduchu s hodnotou $\rho_0 = 1,2047 \text{ kg/m}^3$, což odpovídá hodnotě teploty vzduchu 20° C . Proto volíme rychlost šíření zvuku $343,71 \text{ m.s}^{-1}$.

Z obrázku (4.2) je patrné, že se zvětšujícím se poloměrem membrány se mění i charakter budiče z kulového na pístově kmitající kulový zdroj a směrovost zdroje se zmenšuje.



Obr. 4.2: Horizontální směrová charakteristika bodového zdroje a), b) a pístově kmitajícího kruhového zdroje c) – h) pro frekvenci 1000 Hz. Limitní velikost poloměru membrány R , při které se podstata zdroje mění z bodového

na pístově kmitající kruhový zdroj je 0,0541m. Velikosti membrán pro jednotlivé obrázky simulace jsou: a) 0,04 m, b) 0,05406 m, c) 0,15 m, d) 0,3 m, e) 0,5 m, f) 0,7 m, g) 0,9 m f) 1,2 m

5 Akustické pole tvořené více zdroji

K popisu akustického pole tvořeného dvěma, či více zdroji budeme potřebovat znalost chování vln v prostoru. Proto se budeme v dalších odstavcích zabývat zákonitostmi vedoucím k dedukci výsledného akustického pole. O součtu zvukového signálu mluvíme tehdy, pokud se v jakémkoli prostoru kombinují dva, či více signálů. Při takové kombinaci spolu vlny vzájemně interferují a tvoří tak nové zvukové pole, potažmo nový tvar vlny v definovaném místě zvukového pole. Takový součet je vždy okamžitou událostí a je závislý na vzájemném fázovém posunu signálů, na jejich počáteční amplitudě, na odrazu zvuku od stěn, na charakteristice budiče, aj. Nás ale budou stěžejně zajímat první dvě proměnné.

Při interferenci signálů můžeme uvažovat dva případy. Příspěvek signálů o jedné frekvenci (sčítání) a buzení signálů s různou frekvencí (směšování). Jakmile je signál buzen zdrojem do prostoru, zajímá nás součet akustických hladin. Výsledek akustického součtu může být předvídatelný a stabilní, avšak nikdy se nevyhneme hluchým místům v prostoru. V dalším textu si řekneme, jakým způsobem funguje slučování signálů.

5.1 Součet vlnění v akustickém poli

Vztah mezi dvěma sečtenými signály můžeme popsat algebraickou analogií jako součet, či rozdíl dvou jedniček. Dvěma extrémními výsledky bude 0 ($-\infty$ dB v relativní míře hladiny akustického tlaku), či 2 (a tedy +6 dB). Rozsah našich výsledků je $-\infty$ dB až +6 dB. Sčítání signálu se dá analogicky přirovnat k hazardní hře. Do hry vsázíme výslednou amplitudu signálu a o tom, zda vyhrájeme či nikoli, rozhoduje relativní fáze interferujících signálů. Pokud se signály shodují v amplitudě, pak vyhrájeme (0 až +6 dB), či prohrajeme a tím pádem můžeme o vše přijít. S rostoucím rozdílem amplitud vstupních signálů se sázení stává bezpředmětným, neboť nemůžeme mnoho ztratit, ani vyhrát. Tato analogie však není zcela přesná, neboť ze zákonů fyziky víme, že energie nemůže být ani vytvořena, ani zničena (pouze měníme její aktuální stav, či chování). Pro komplexní pochopení pravidel hry musíme definovat jak se sčítají amplitudy signálů a jakou roli přitom hrají jejich fáze a vzájemné postavení zdrojů a jejich vzdálenost od poslechového bodu.

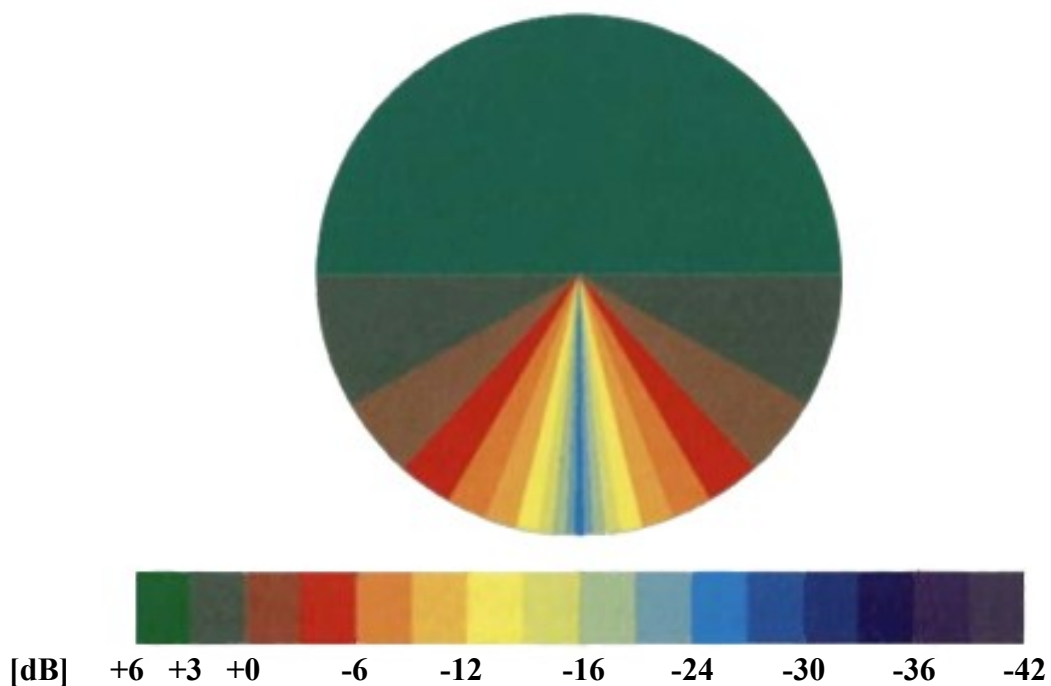
5.1.1 Amplitudový součet

Úrovňový součet signálů jsme definovali v kapitole 2.2.3. Snižováním úrovně druhého signálu se bude snižovat i jeho přídavek k celkovému signálu. Pokud se hodnotu signálů liší o více jak 12 dB, má slabší signál zanedbatelný adiční příspěvek. Zvýšením počtu zdrojů zvyšujeme úroveň signálu (viz. tab. 2.3). Naší snahou při návrhu zvukového systému je dosáhnout co nejrovnoměrnějšího pole. V reálném světě má však tento požadavek své limity, takže nikdy nebudeme schopni dosáhnout rovnoměrně rozložené hladiny akustického tlaku. Naopak. Pole vždy bude složeno ze špiček a

propastí v hodnotách signálu. Roli v tom však většinou nehraje hodnota amplitudy, nýbrž fázový rozdíl přicházejících vln.

5.1.2 Fázový součet

Relativní fáze je velikost části vlnové délky, o kterou dojde vlna dříve (či později) do určitého poslechového bodu v prostoru. Hodnota fáze je vyjádřena ve stupních, potažmo v radiánech. Nulová hodnota fázového posunu koresponduje s 0° relativní fáze, zatímco 180° stupňů odpovídá půlce vlnové délky. Fáze a její vliv na výsledek sumace audiosignálů si ukážeme na jednotkové kružnici (obr. 5.1).



Obr. 5.1: jednotková kružnice s vyobrazením efektu vzájemného fázového posunu signálů na celkové amplitudě.[4]

Jednotkovou kružnici, kterou zde můžeme nazývat i fázovým cyklem, je rozdělena barevně do několika zón, které určují, zda se signály budou sčítat, či odečítat. Adiční/rozdílový efekt relativní fáze je založen na radiální pozici hodnoty relativní fáze.

Vlastnosti fázového cyklu se dají popsat následovně: Maximální součet signálů zaznamenáme při fázovém rozdílu 0° . O součtu obecně budeme mluvit, pokud se fázový rozdíl nachází v mezích hodnot $\pm 120^\circ$. Pokud je relativní fáze rovna 120° nepozorujeme žádnou vzájemnou amplitudovou reakci obou vlnění. Se zvyšující úhlem se pak dostáváme do zóny, kde se hodnoty budou vzájemně odečítat až se dostaneme na hodnotu 180° , kde probíhá maximální odečet signálů. Můžeme si všimnout, že součet se v rozsahu fáze nechová symetricky. Zatímco adice probíhá ve dvou třetinách kruhu a

její účinnost nedosahuje takových hodnot jako v případě pohybu ve spodní třetině kruhu, kde má součet destruktivní chování.

Co se však bude dít, pokud do námi vybraného poslechového bodu v prostoru dorazí vlna se zpožděním větším než jedna vlnová délka? Pro takový případ si zavedme analogii s kolem[4]. Velké kolo připevněné k pedálové hřídeli, je spojené s menším zadním kolem řetězem. Rychlost pohybu druhého kolečka je definována převodovým poměrem mezi kolečky. Pokud zvolíme poměr 2:1, znamená to, že při jedné otočce hřídele se menší kolečko otočí dvakrát. V naší analogii hřídel pedálu určuje čas a malé kolečko fázový cyklus. Výše uvedený rozdíl v převodovém poměru je analogický se změnou frekvence o jednu oktávu. Nyní rozšíříme naši analogii na audio systém. Jedna hřídel pedálu je připojena k 600 dalším kolečkům vykazujících 600 různých fázových cyklů. Každý převodový stupeň je jedinečný a pohybuje se od 1:1 (30 Hz) po 600:1 (18 kHz). Na začátku je vzájemný fázový posun nulový. Jakmile šlápneme do pedálu, všechny kolečka se začnou pohybovat s rozdílným tempem. Výsledkem je odlišná frekvenční odezva pro každou změnu času, ale přitom platí stejná součtová pravidla, která jsme si zavedli dříve.

Z této analogie můžeme vyvodit několik pouček:

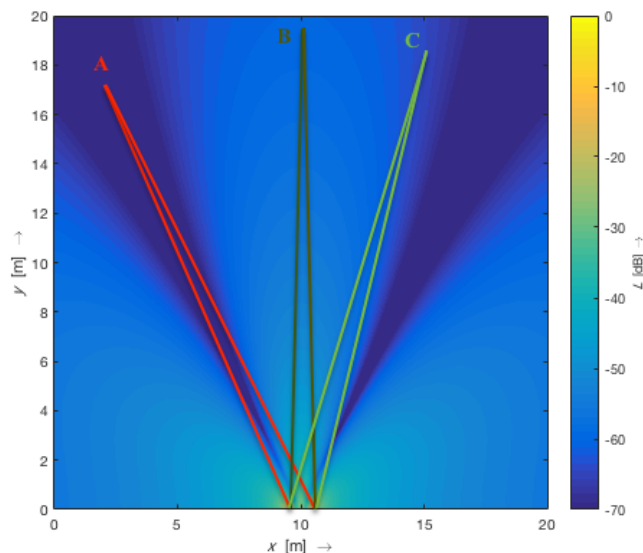
- Pevně daný fázový posun vytvoří odlišnou velikost zpoždění na každé frekvenci
- Fázový cyklus probíhá rychleji s rostající frekvencí
- Fázový posun se zvyšuje se zvyšujícím se zpožděním signálu.
- Počet propastí ve zvukovém poli se zvyšuje lineárně s násobkem vzdáleností mezi reproduktory o celé vlnové délky buzeného signálu

5.2 Součtové zóny

V případě, kdy se zabýváme zvukovým designem není pro nás důležité vyčlenit špičky a spády signálu, nýbrž se snažíme minimalizovat jejich rozdílnost v prostoru co do amplitudy. Proto je pro nás výhodné zavést pojem zvlnění, který je vlastně kvalitativním popisem součtového efektu. Pro různé hodnoty zvlnění můžeme zavést čtyři kategorie, podle výsledků interference vlnění.

5.2.1 Slučovací zóna

Je charakterizována maximálním ziskem a nulovými ztrátami na amplitudě. Množství zisku se tedy bude pohybovat v rozmezí 0 až 6 dB a rozdíl hladin bude menší než ± 3 dB. V takovém případě se vzájemný fázový posun pohybuje mezi hodnotami $\pm 1/3$ vlnové délky ($\pm 120^\circ$). Žádaného účinku se nejlépe dosahuje na nízkých frekvencích, právě díky velikosti jejich vlnové délky.

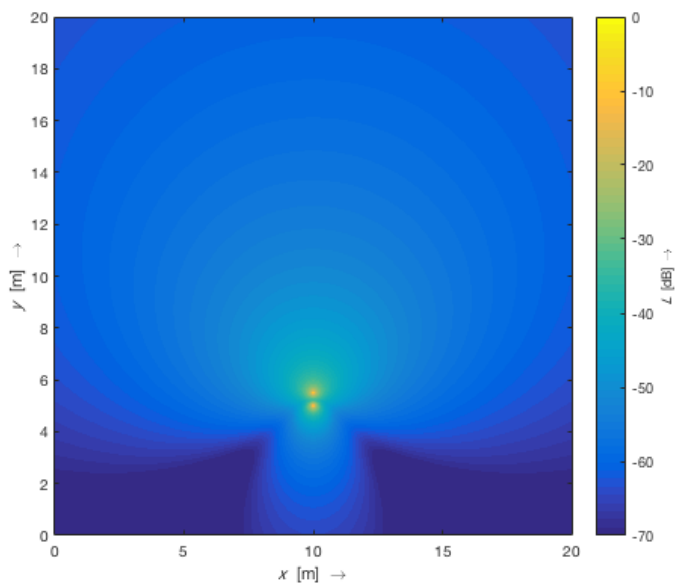


Obr. 5.2: Zobrazení součtových a ztrátových zón. V bodě A je vzájemná polarita signálů opačná – maximální odečet signálu. V bodě B je maximální součet - vlny se nacházejí ve fázi. Bod C se nachází ve slučovací zóně - relativní fázový posun je mezích hodnot $\pm 120^\circ$

5.2.2 Zóna rušení

Zóna rušení je přesným opakem slučovací zóny. Tato zóna tedy nabízí nulové zisky a větší, či menší ztráty, neboť vzájemná fáze se pohybuje v rozmezí hodnot $\pm 120^\circ$ a $\pm 180^\circ$. Anulace signálu se dá zredukovat snížením amplitudy jednoho ze zdroje. Rozdíl hodnot hladin akustického pole bude v tomto případě nejvyšší: ± 50 dB. Při návrhu zvukového sestupu můžeme využít vlastností této zóny k vytvoření tichých míst v požadovaném místě. Příkladem může být aplikace basových line-array. Při správném nastavení a polohování zdrojů můžeme změnit směrovost zdroje na hodnotu faktoru směrovosti $Q = 2$. V živé praxi rušíme signál z basových reproduktorů na jevišti a naopak jej posíláme do poslechového prostoru. Díky tomu se muzikantům hraje přirozeněji, neboť si mohou na pódiu vytvořit „vlastní“ zvuk, který se nemaskuje s basovkami.

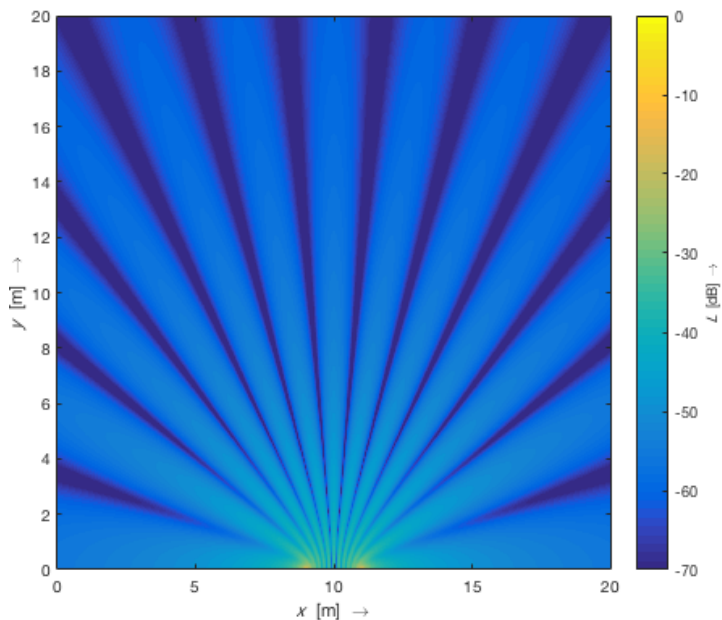
Na obrázku 5.3 je zvukové pole basové array které se nazývá *end fire*. Její vlastnosti buzení zvuku jsou takové, jak jsme si je popsali v předchozím odstavci. Vzájemná relativní fáze zdrojů je taková, že se signály obou zdrojů slučují se stejnou fází v bodě, kde vyzařuje druhý zářič. Toho se dosahuje časovým zpožděním zadního reproduktoru. Směrová charakteristika takové arraye má kardioidní charakter.



Obr. 5.3: Basová array typu *End fire*

5.2.3 Zóna hřebenového filtru

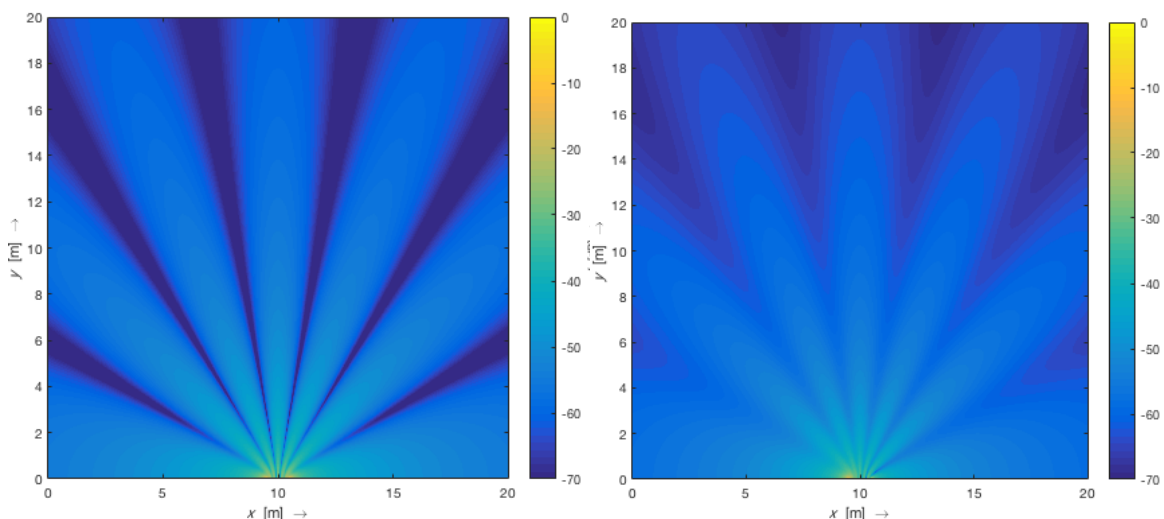
V případě, že jsou si amplitudy interferujících signálů blízké a signály mají za sebou několik fázových cyklů, pak se jedná o nejvíce nestálou oblast, která se potýká s tvořením hřebenového filtru. Hodnota výsledného signálu se v tomto bodě neustále mění. Může zde dojít k adici až +6 dB ale naopak i k velkým ztrátám signálů. Rozdíl hodnot v této zóně se pohybuje mezi hodnotami ± 28 dB.



Obr. 5.3: Pole ovlivněné hřebenovým filtrem

5.2.4 Kombinovaná zóna

O kombinované zóně mluvíme u signálů, jež se liší v amplitudě o více než 4 dB s vědomím, že neznáme vzájemnou fázi signálů. V takovém případě je rozdíl hodnot lehceji kontrolovatelný a pohybuje se v rozmezí ± 6 dB, z čehož můžeme usuzovat, že maximální součet i odečet signálu je hrubě limitován.



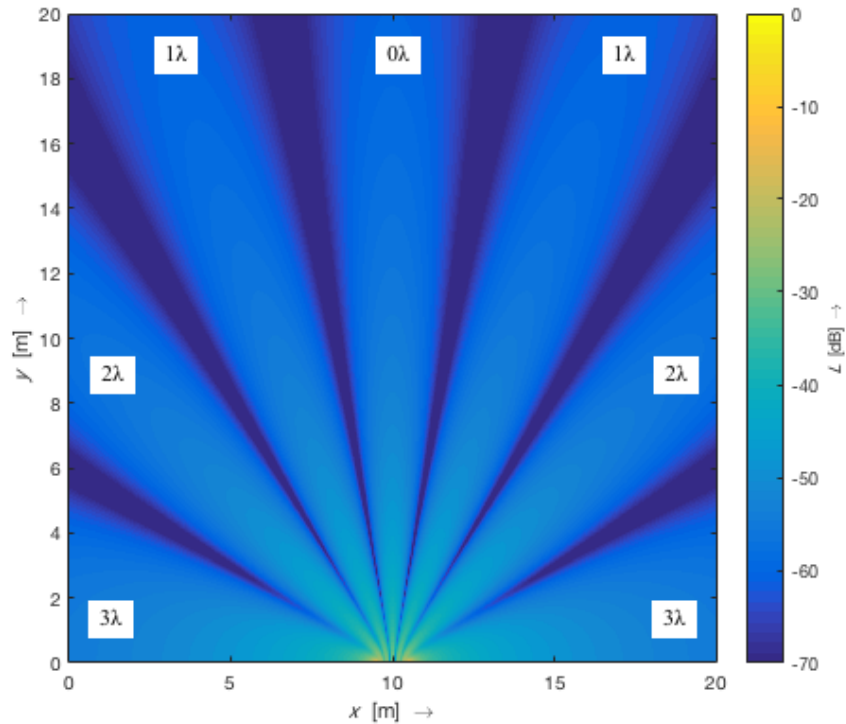
Obr. 5.4: Akustické pole vytvořené dvěma zdroji o stejné amplitudě (vlevo). Akustické pole vytvořené zdroji, kdy druhý zdroj budí signál s menší amplitudou. Jak vidno míra odečtu se v druhém případě snížila

Pokud budeme nyní uvažovat systém o dvou zdrojích budící signál v celém frekvenčním rozsahu, můžeme sledovat chování sumace signálů pro každou frekvenci. V takovém případě totiž může dojít k tomu, že se výsledném akustickém poli mohou objevit všechny čtyři kombinační zóny. Určujícím faktorem je vzájemný časový posun (který má přímou návaznost na fázový posun). Časový posun 0 má odpovídá maximálnímu součtu signálů (součtová zóna). Zvětšováním časového posunu začnou vznikat ve frekvenční charakteristice zóny střídající adice a odečty signálů (zóna hřebenového filtru). S dalším zvětšováním časového posunu se interakce zmenšuje (kombinovaná zóna) až přejde do izolační zóny (zóna rušení).

5.2.5 Dislokace zdrojů

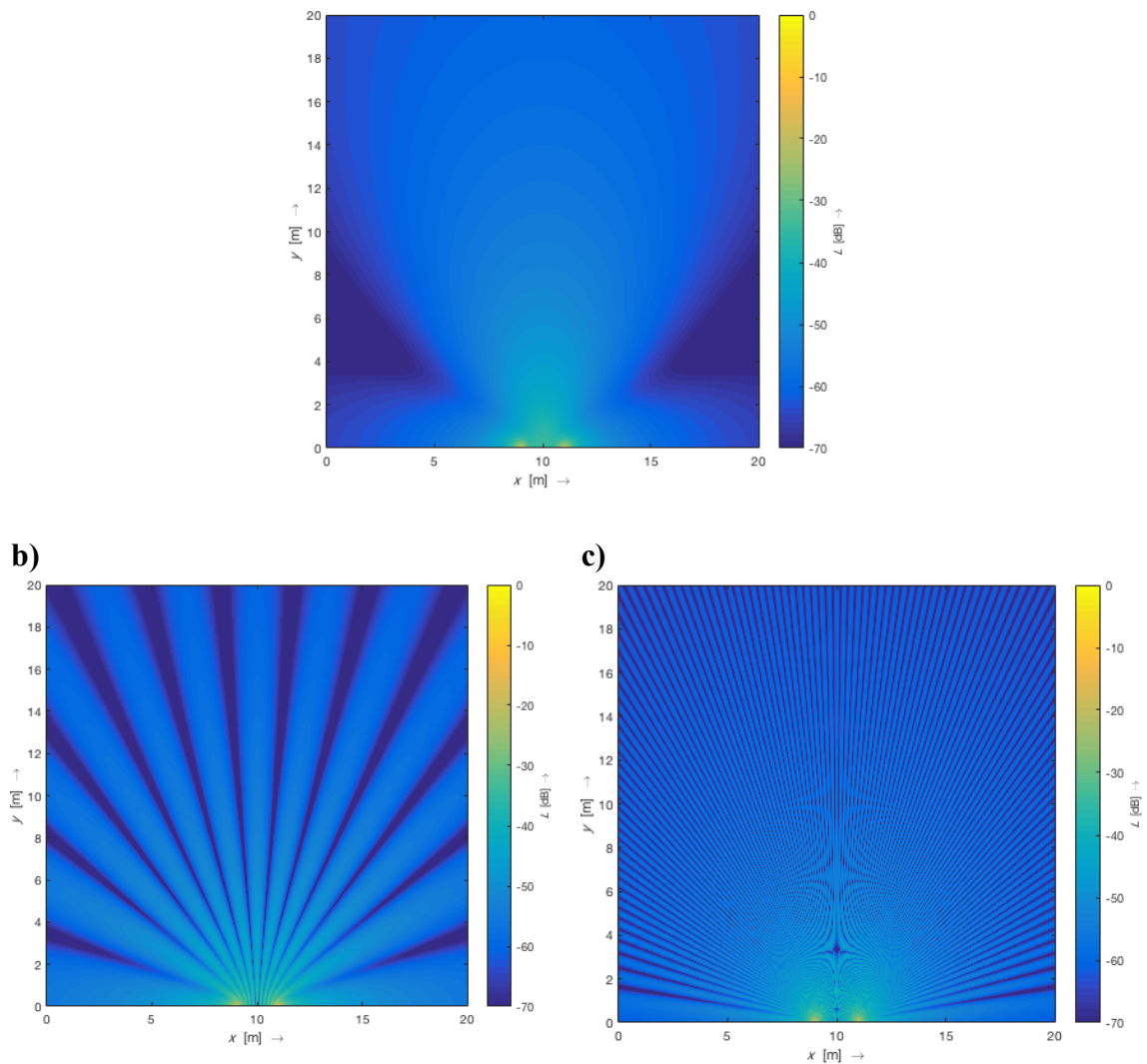
Nyní budeme sledovat chování zvukového pole při změně vzdálenosti mezi dvěma zdroji zvuku. Ke zjednodušení vysvětlení nebudeme měnit vzdálenost reproduktorů nýbrž frekvenci. V tomto případě bude hrát prim poměr dislokace reproduktoru a buzené vlnové délky. Můžeme říci, že počet špiček, potažmo propastí ve zvukovém poli se zvyšuje lineárně s násobkem vzdáleností mezi reproduktory o celé vlnové délky buzeného signálu. Pole tedy bude pro nízké frekvence ustálenější na rozdíl od zvukového pole vytvořeného buzením vysoké frekvence při uvažování stejné lokace zdrojů. Uveďme si příklad pro reproduktory, jejichž vzdálenost je 2 metry. Na třech

frekvencích které nás zajímají (100, 1000 a 10 000 Hz) je dislokace rovna cca 0,6, 6 a 60 vlnových délek. Ve zvukovém poli se taky vytvoří v případě 100 Hz signálu nekompletní nulový prostor, 6 nulových zón na 1 kHz a 60 nulových zón na 10 kHz. λ



Obr. 5.6: Na obrázku můžeme pozorovat vliv poměru velikosti dislokace a buzené frekvence. Počet laloků je stejný jako počet vlnových délek signálu, které signál oběhne mezi oběma zdroji. Zdroje jsou dislokovány o 2 metry, buzená frekvence 1000 Hz

a)



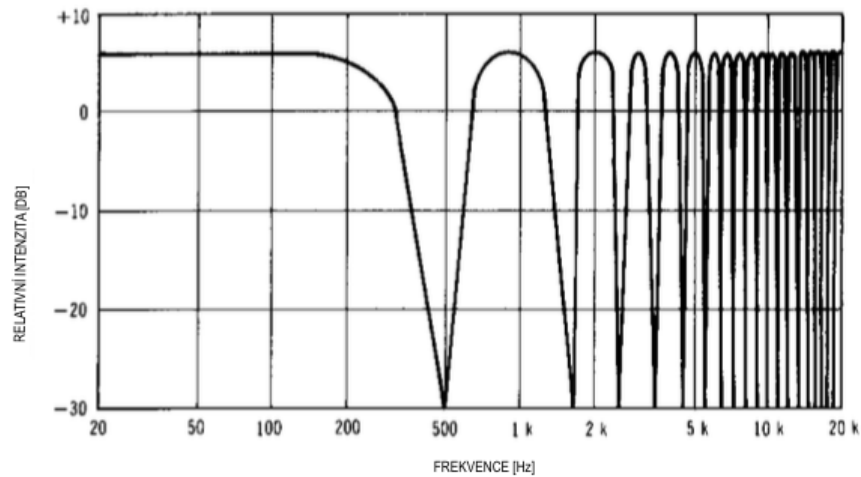
Obr. 5.7: Akustické pole při dvoumetrové dislokaci zdrojů. a) Akustické pole při frekvenci 100 Hz, vzdálenost reproduktorů 0,6 vlnové délky. b) 1000 Hz, vzdálenost 6 vlnových délek. c) 10 000 Hz, vzdálenost 60 vlnových délek

5.2.6 Hřebenový filtr

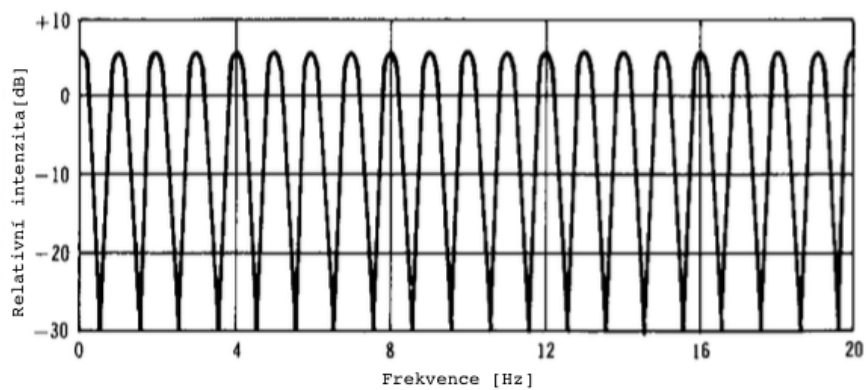
Pokud zkombinujeme dva signály – jeden nezpožděný, druhý zpožděný, bude se lišit jejich vzájemný fázový posun s frekvencí. To je dáno tím, že čas není, na rozdíl od fáze, frekvenčně závislou veličinou. Výsledkem je série opakujících se špiček a poklesů amplitudy ve frekvenční charakteristice. Taková charakteristika připomíná zuby hřebenu a proto také tento efekt nazýváme hřebenovým filtrem. Rozdíl počtu vlnových délek mezi dvěma signály je rozhodující faktor na to do jaké míry bude filtrována celá šířka pásma. Zpoždění jedné vlnové délky vytvoří špičku, která přemostí jednu celou oktávu a na obou krajích vzniknou „hluchá místa“. Zpoždění dvou vlnových délek zkrátí špičku na půl oktávy a tak dále.

Hřebenový filtr nevzniká pouze při časovém posunu dvou signálů. Může vzniknout i v případě odrazu zvuku zpět do akustického prostoru zdroje, kde interaguje se zvukem jdoucím od zdroje, čímž pádem může vzniknout hřebenový filtr.

S hřebenovým filtrem se potýká každý zvukový inženýr, který navrhuje zvukové prostředí pro živé ozvučování a to jak ve venkovním prostředí, tak hlavně ve vnitřním prostředí, kde můžeme očekávat odrazy ode stěn budovy.



a)



b)

Obr. 5.5: Efekt hřebenového filtru při zpoždění signálů 1 ms a) v logaritmické frekvenční stupnici b) v lineární frekvenční stupnici [14]

5.3 Akustické pole tvořené liniovými zdroji

Liniový zdroj (v praxi lépe známý jako *line array*) je zdroj zvuku tvořený několika reproduktory většinou stejné velikosti a stejného charakteru, které na sebe těsně naléhají a leží v jedné rovině. Definice line array dle Harryho Olsona zní: „Liniový zdroj je přímá řada ideálně kulových zdrojů, které reprodukovávají identický signál a jsou od sebe vzdáleny o méně než polovinu vlnové délky ($\lambda/2$) nejvyšší vyzařované frekvence“ [14]. Délka liniového zdroje poté určuje vyzařovací úhel celé line array v závislosti na frekvenci. Pokud je délka takového zdroje kratší než $\lambda/2$ pak se chová jako všesměrový zdroj. Výsledné akustické pole liniové soustavy reproduktorů vznikne superpozicí polí jednotlivých zářičů, přičemž maximální hodnoty pole budou rozloženy radiálně okolo osy soustavy podle velikosti vyzařované frekvence. Pro směrovost liniové soustavy identických zvukových zdrojů v dostatečně vzdáleném bodu

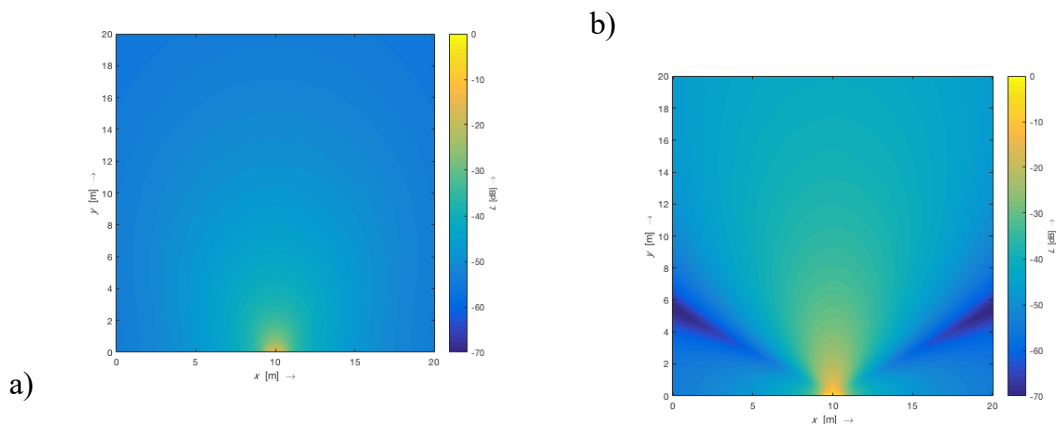
poslechu od soustavy (alespoň 10ti násobek délky zdroje) a pod úhlem α od osy zdroje můžeme psát rovnici[14]:

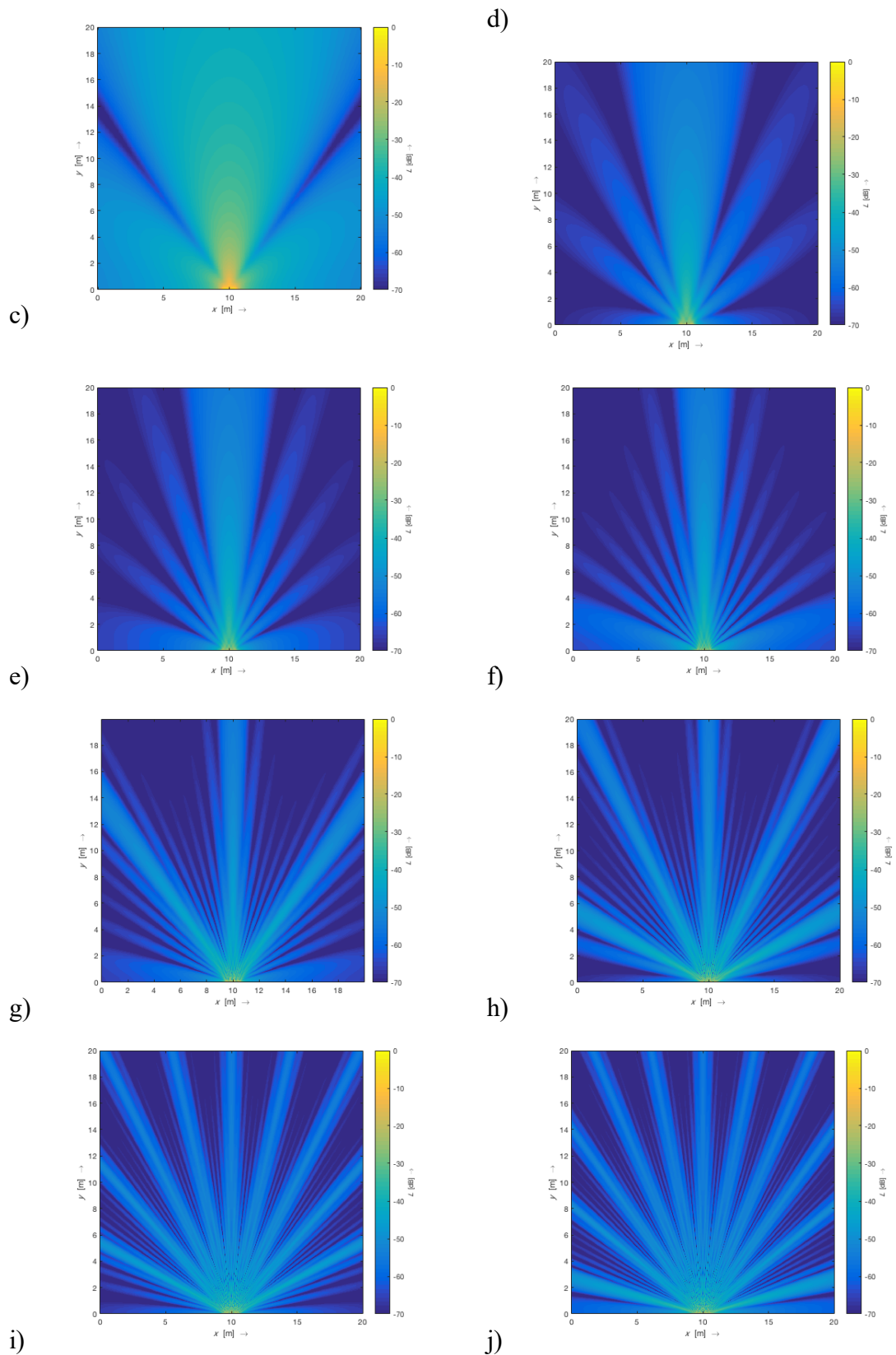
$$S_\alpha = \left| \frac{p(\alpha)}{p(0)} \right| = \left| \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)} \right|, \quad (5.1)$$

kde je $p(\alpha)$ celkový akustický tlak soustavy v měřicím bodě P ležícím ve směru pod úhlem α v Pascalech, $p(0)$ celkový akustický tlak ve stejně vzdáleném bodě v ose zdroje, n je počet zářičů soustavy, d je vzdálenost mezi sousedními zářiči v metrech, λ je vlnová délka vyzařovaného signálu v metrech. Tato rovnice vlastně udává poměr akustického tlaku v úhlu α a akustického tlaku v ose zdroje.

V rovnici (5.1) je nd rovno celkové velikosti soustavy pro n zářičů. Linii n zářičů můžeme aproximovat přímkovým zářičem. Položme tedy $nd = l$. Se zvyšujícím se poměrem l/d se hlavní lalok zužuje, přičemž se zvětšuje počet bočních laloků, které „vedou“ zvukovou energii do prostoru.

Pro lepší názornost si uvedeme příklad takového přímkového zářiče, který bude mít stejné rozměry, jako liniový zdroj, který byl podroben měření. Při použití 8 zdrojů o šířce jednoho zdroje 15 cm je vzdálenost obálek krajních reproduktorů 120 cm. Pokud ale délku line array uvažujeme od akustické osy jednoho krajního budiče k akustické ose druhého, bude její délka 105 cm. Při uvažování limitního případu, kdy se velikost liniového zdroje rovná polovině vlnové délky budeme v takovém případě vyzařovat frekvenci 145 Hz. Budeme zvyšovat frekvenci a sledovat, jakým způsobem se mění hodnoty hladin akustického tlaku v akustickém poli před tímto přímkovým zářičem (obr. 5.8).



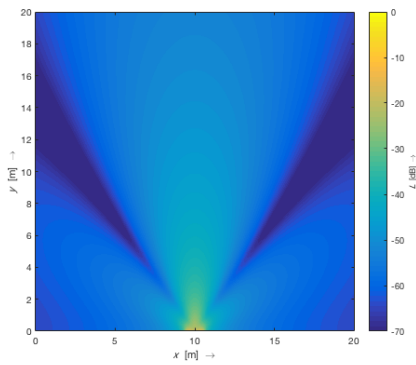


Obr. 5.8: Zobrazení akustického pole pro přímkový zdroj o osmi budičích zvukového pole. S rostoucím poměrem l/d se zvětšuje směrovost zdroje. Příklad a) až j) ukazuje směrovost přímkového zdroje pro všesměrové budiče. Poměr l/d je

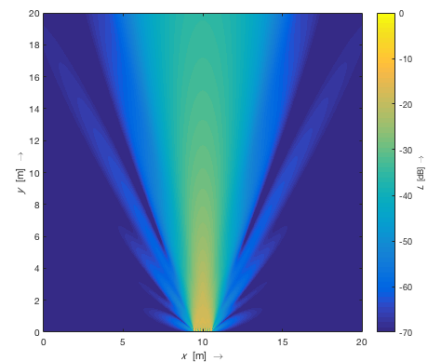
roven postupně a) $l/d=0,5$ b) $l/d=1$ c) $l/d=1,5$ d) $l/d=2$ e) $l/d=4$ f) $l/d=6$ g) $l/d=12$ h) $l/d=16$ i) $l/d=32$ j) $l/d=36$

Při uvažování směrových charakteristik se nebude energie reproduktorů rozprostírat rovnoměrně do laloků jako můžeme pozorovat na obrázky 5. 8, nýbrž se bude soustředit do hlavního laloku, zatímco ostatní zůstanou upozaděny. Tento proces můžeme sledovat na obrázku kde měníme velikost frekvence a hodnota kR je konstantní a je rovna hodnotě $kR = 10$. (5.9)

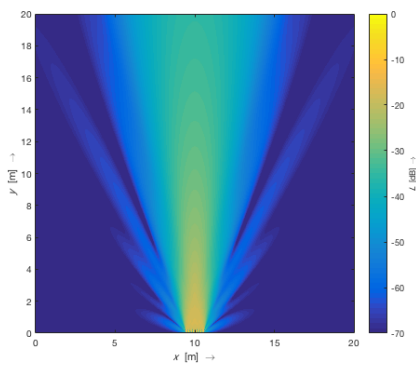
a)



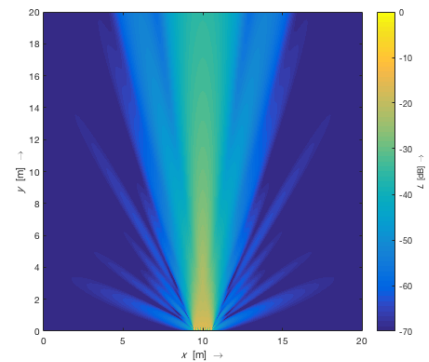
b)



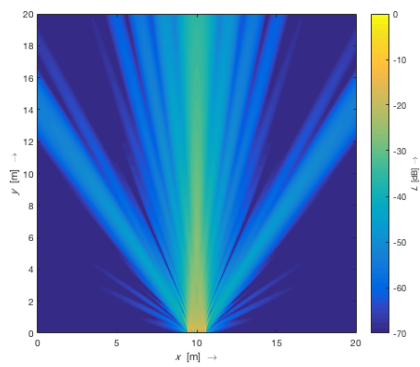
c)



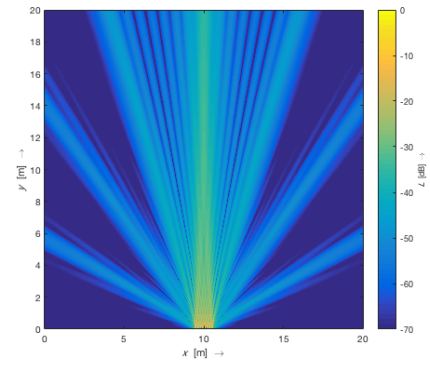
d)



e)



f)



Obr. 5.9: Směrová charakteristika přímkového zdroje o $l = 1,05$ m při charakteru membrány $kR = 10$ pro frekvenci a) 500 Hz, b) 1000 Hz, c) 2000 Hz, d) 4000 Hz, e) 8000 Hz, f) 16 000 Hz

6 Měření a syntéza zvukového pole a měření charakteristik reproduktoru

Součástí bakalářské práce bylo i měření v bezodrazové komoře na VUT v Brně. Toto měření bylo rozděleno do dvou fází. V první fázi jsme se zabývali měřením frekvenčních a směrových charakteristik samostatného přímovyzařujícího reproduktoru s elektrodynamickým měničem. Další fáze sestávala z naměření hladiny akustického tlaku v prostoru před liniovým zdrojem a následné zobrazení reálného pole hladiny akustického tlaku.

6.1 Měření frekvenčních a směrových charakteristik reproduktoru

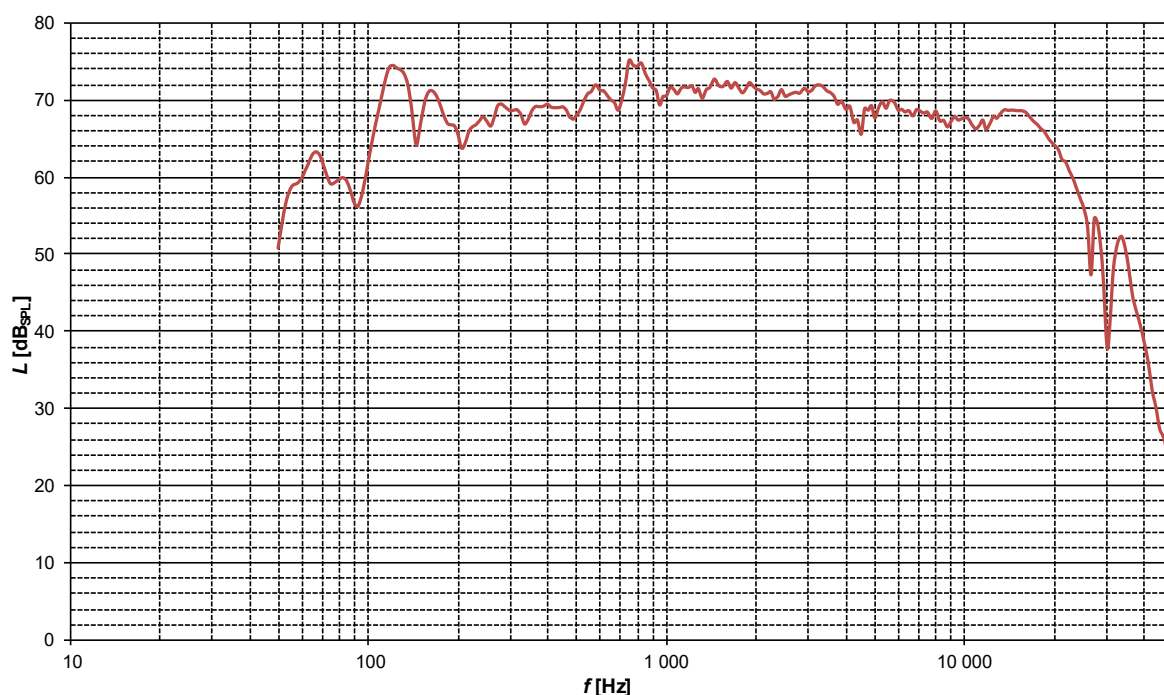
Pro měření frekvenčních a směrových charakteristik bylo použito těchto přístrojů:

- stereofonní zesilovač Bittner Basic 800
- měřicí mikrofón Burel & Kjaer 4189
- mikrofonní zesilovač Brüel & Kjaer Nexus 2690
- modul pro zpracování dat Brüel & Kjaer LAN-XI
- laboratorní přímovyzařující elektrodynamický reproduktor
- otočný stůl
- stolní počítač s operačním systémem Windows

Modul od společnosti Brüel & Kjaer, byl zapojen k měřicímu mikrofónu a měřenému reproduktoru v bezodrazové místnosti. Tento modul byl ethernetovým rozhraním připojen k počítači, na kterém byl nainstalovaný program LabShop, který spolu s modulem LAN-XI kontroloval měření. Reproduktor byl umístěn na točnu, která byla ovládána z počítače. K počítači byla připojena USB rozhraním. Točnu bylo možno ovládat i mechanicky ovladačem. Ovladač však nebyl potřeba, neboť byla zvolena automatizovaná metoda měření. Točna byla použita pouze pro měření směrové charakteristiky.

6.1.1 Modulová charakteristika

Mikrofón byl umístěn na vzdálenost 1 metr od reproduktoru a nasměrován tak, aby byl umístěn v akustické ose reproduktoru. Pokud bychom dali mikrofón blíž ke zdroji, mohli bychom se ocitnout v blízkém (Fresnelově) poli, což je pro naše měření nežádoucí. Citlivost reproduktoru byla nastavena na minimum. V programu LabShop nastavíme postupně parametry měření na rozmítání frekvence od 50 Hz do 20 kHz a zvolíme 1/24 oktávový krok. Výsledkem měření je tabulka hodnot, která slouží jako vstupní data pro graf závislosti modulu amplitudy na frekvenci (obr. 6.1, příloha B).



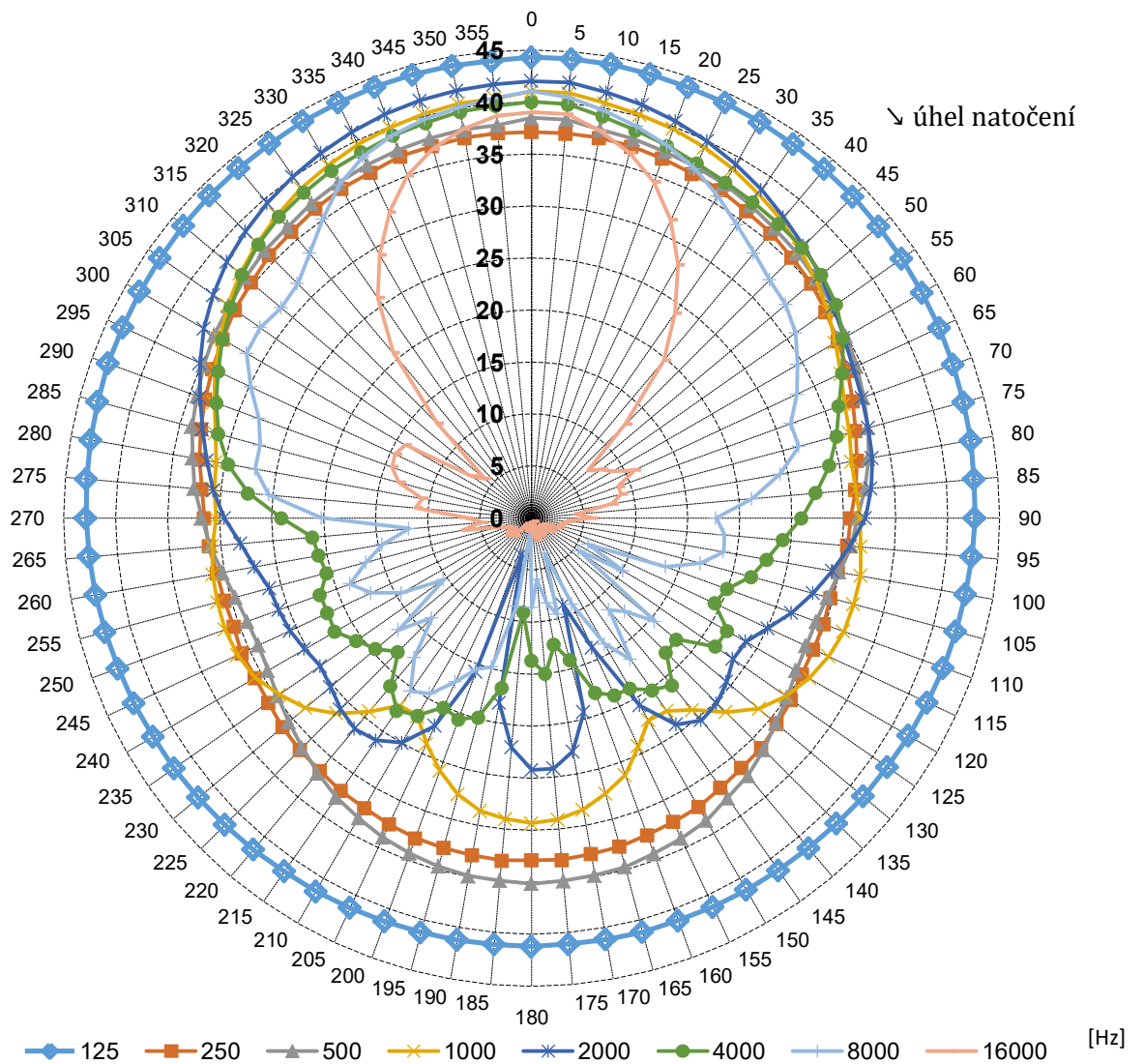
Obr. 6.1: Frekvenční charakteristika reálného laboratorního přímo vyzařujícího elektro dynamického reproduktoru

6.1.2 Směrová charakteristika

Měření směrových charakteristik probíhá buď otáčením reproduktoru při statické pozici mikrofону, či vychylováním mikrofону okolo akustické osy pozici neměnného reproduktoru. V naše případě zjišťování směrovosti reproduktoru byla využita točna na které byl umístěn reproduktor. Mikrofon byl opět posazen do pozice akustické osy budiče ve vzdálenosti 1 metr. V programu LabShop byly nastaveny základní parametry měření. Bylo zvoleno rozmítání frekvence, tentokrát v oktávových intervalech. Hodnoty buzených frekvencí odpovídaly hodnotám:

- 125 Hz
- 250 Hz
- 500 Hz
- 1 000 Hz
- 2 000 Hz
- 4 000 Hz
- 8 000 Hz
- 16 000 Hz

Počáteční hodnota úhlu natočení reproduktoru byla 0° a úhlový krok byl v programu nastaven na 1° . O tuto hodnotu byl otočen stůl před každým začátkem rozmítání frekvence. Zahájením měření začne automatizované měření směrové charakteristiky reproduktoru. Výstupem byla tabulka hodnot hladiny akustického tlaku v závislosti na frekvenci a na úhlu natočení. Tyto hodnoty byly zpracovány pomocí Excelu, ve kterém byl vytvořen graf v polárních souřadnicích pro všechny frekvence (Obr. 6.2, potažmo příloha C).



Obr. 6.2: Směrová charakteristika reálného laboratorního přímo vyzařujícího elektrodynamickeho reproduktoru.

6.1.3 Měření zvukového pole tvořeného liniovým zdrojem

Pro měření zvukového pole liniového zdroje bylo použito těchto přístrojů:

- stereofonní zesilovač Bittner Basic 800
- měřicí mikrofon Brüel & Kjaer 4189
- mikrofonní zesilovač Brüel & Kjaer Nexus 2690
- akustický analyzátor NTI Audio XL2
- tónový kalibrátor Brüel & Kjaer 4231
- 8 laboratorních přímo vyzařujících elektrodynamickech reproduktorů
- stolní počítač s operačním systémem Windows
- programovací jazyk Matlab

V další fázi praktické části bakalářské práce byly v pravidelně definované prostorové síti naměřeny hodnoty hladin akustického tlaku v akustickém poli liniového zdroje zvuku (schéma měřicích bodů je příloze jako příloha D). Liniový zdroj sestával z osmi identických zdrojů zvuku (při ideální představě. Žádné dva reproduktory, byť od stejného výrobce, nebudou mít zcela shodné vlastnosti). Zdroj zvuku byl buzen ze dvou kanálů zesilovače. Z každého kanálu byl signál veden do čtyř reproduktorů. Reproduktory byli umístěny tak, že se v linii vždy střídal reproduktor připojen na první kanál, s reproduktorem těsně sousedícím (A B A B A B A B). V poli dostatečně vzdáleném od liniového zdroje (mimo blízké pole) byla navolena síť bodů, do kterých byl vkládán měřicí mikrofon. Body byly zvoleny ve vzdálenosti 1, 2 a 3 metry od zdroje. Měření probíhalo na čtyřech frekvencích při ustálené hodnotě tlaku v bezodrazové komoře přibližně 35 dB a teplotě vzduchu 26 °C:

- 1120 Hz
- 2240 Hz
- 4482 Hz
- 8964 Hz

Tyto frekvence nebyly voleny náhodně. Byla změřena vzdálenost dvou sousedících akustických os reproduktorů, která odpovídala hodnotě 15 cm. Následně byla zjištěna rychlost zvuku v bezodrazové komoře podle, ve které v době měření bylo 26 °C. Dle rovnice 2.9 rychlost zvuku odpovídala hodnotě 347,352 m.s⁻¹. Z těchto dvou veličin byla vypočtena vlnová délka $\lambda=2240, 981$ Hz. Zbylé tři frekvence jsou násobky tohoto kmitočtu. Bude nás zajímat chování hladiny akustického tlaku v prostoru.

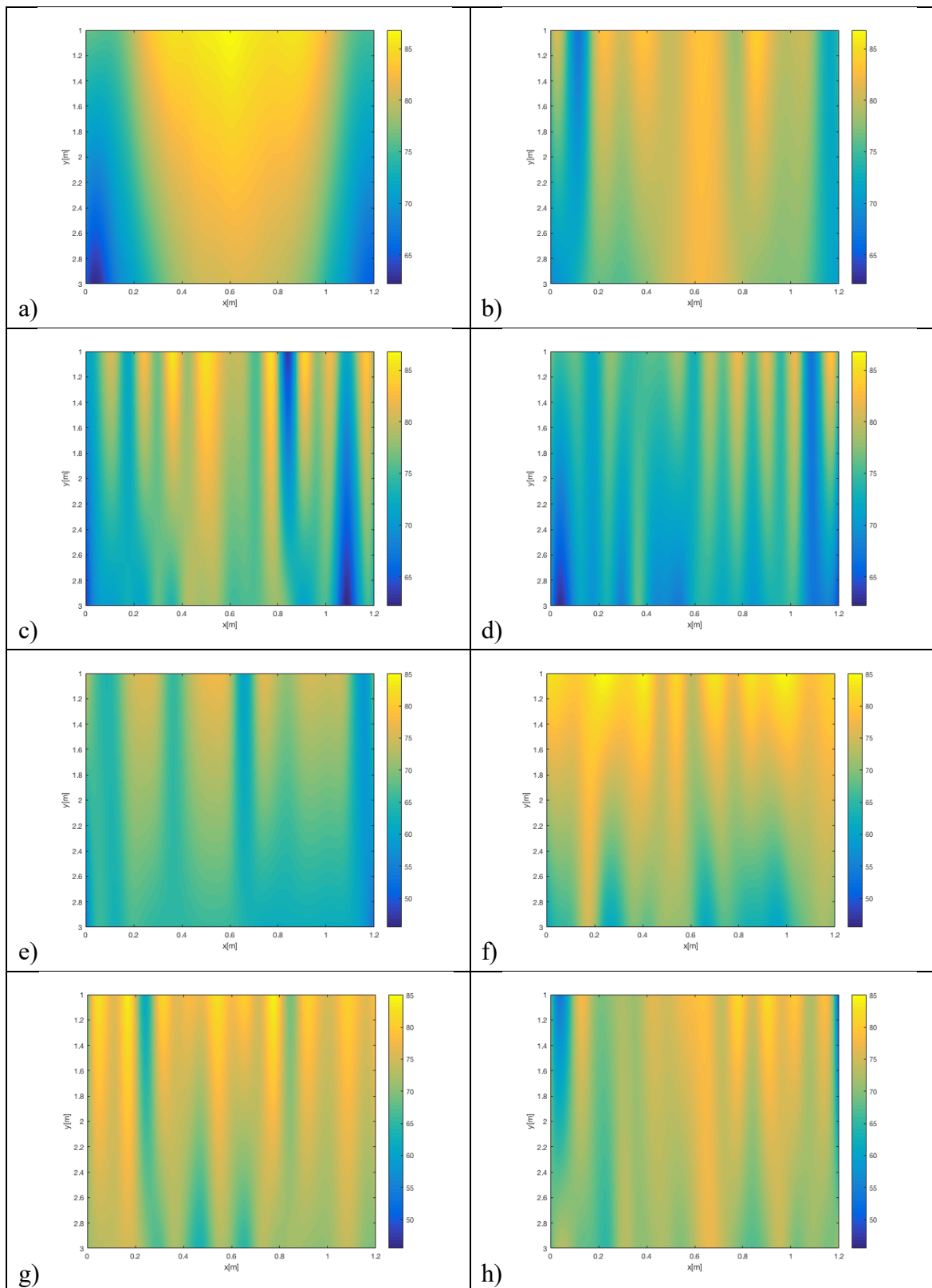
Pomocí programu Matlab 2016a byl vytvořen jednoduchý stereo generátor. Kanál 1 byl spřažen s levým kanálem, zatímco kanál 2 s pravým kanálem generátoru. V každém bodu našeho zájmu byla změřena hladina akustického tlaku signálu pro všechny čtyři frekvence. Následně byla otočena polarita kanálu 2 a celý proces se opakovat. Po změření byl mikrofon přemístěn do dalšího poslechového bodu. Tento proces se opakovat pro všech 66 bodů v prostoru. Při měření jsem vytvořil chybu v kódu pro buzení stereo kanálu, čímž pádem jsem naměřil špatné hodnoty pro rovinu vzdálenou od reproduktoru 2 metry. Tím pádem jsem z naměřených hodnot mohl použít pouze hodnoty ve vzdálenosti jednoho a tří metrů. Díky tomu není hustota naměřených bodů taková, aby byla následná interpolace hodnot „čistší“.

Výsledné hodnoty byly vloženy do programu Matlab 2016a, aby byly vstupem pro vznik interpolační mapy hladiny akustického tlaku. Výsledek můžeme pozorovat na obrázku 6.3. Na obrázku 6.4 jsou pak zobrazena nasimulovaná akustická pole pro stejné frekvence a stejnou konfiguraci zdrojů jako v případě měření. Při sledování obrázku si uvědomme, že zatímco naměřené pole má rozsah 1,2 krát 3 metry, v případě simulace je velikost pole 3 krát 3 metry.

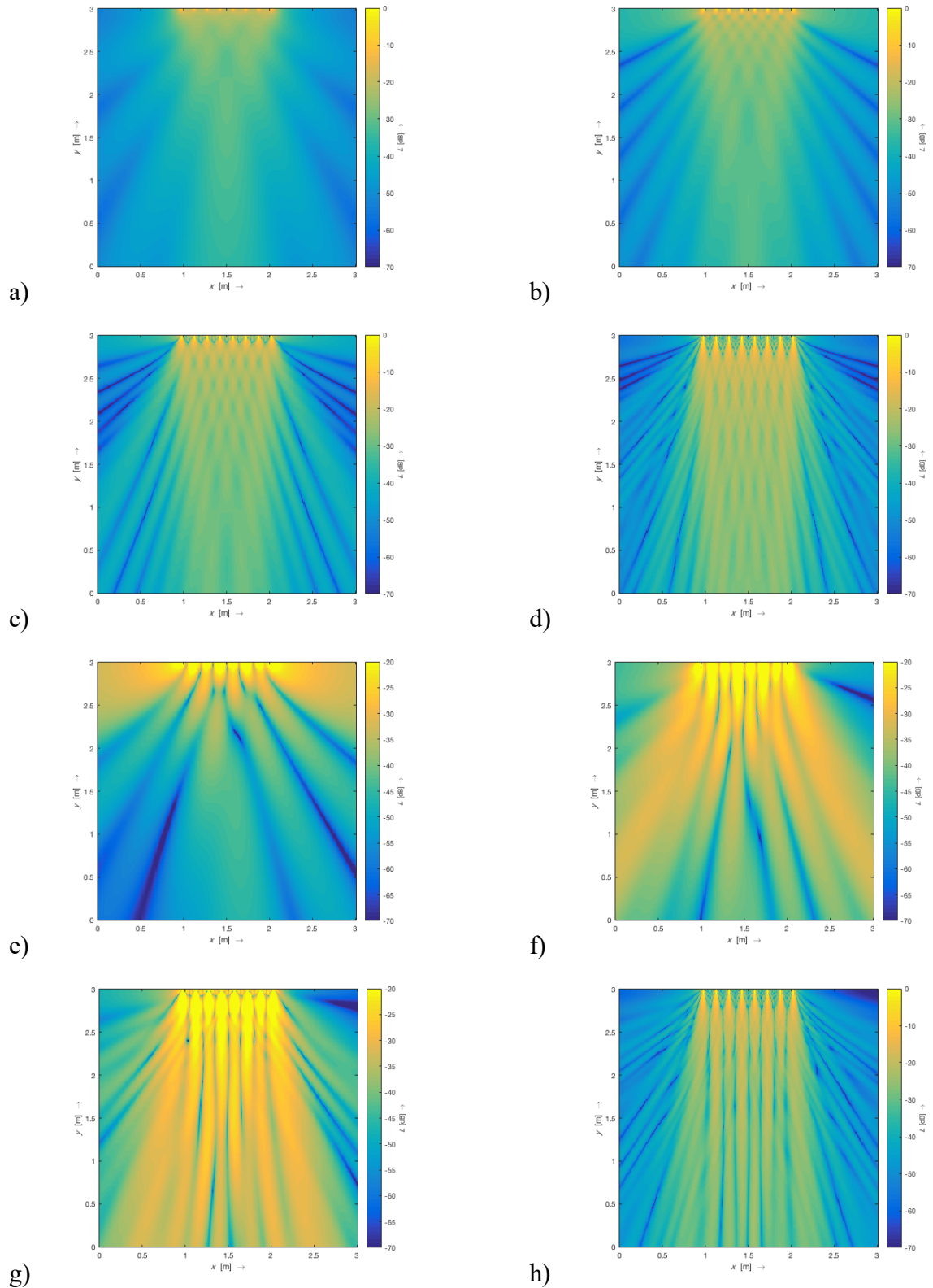
Můžeme sledovat, že naše měřená line-array se chová dle předpokladů. Se zvyšující se frekvencí se zvětšuje směrovost celého přímkového zářiče a tím pádem je hlavní část přenášené energie v blízkosti osy zdroje. Přitom se zvětšuje počet bočních laloků. Můžeme také pozorovat, že se zvětšující se frekvencí se v hlavním laloku vytváří kombinační zóna. V případě otočení polaritu jednoho z kanálu pak můžeme sledovat úbytek energie v ose reproduktoru, neboť se energie posunula do bočních laloků. Při zvyšování frekvence začne převažovat směrovost reproduktorů a energie ze

začne orientovat zpět do hlavní osy. Tentokrát však bude směřována v tenkých paprscích, které budou odděleny tichými místy.

Dokonalé shodnosti obou výsledků by se dosahovalo těžko, neboť měření bude vždy zatíženo svojí odchylkou. Ta může být způsobena už i rozlišností našich reálných zdrojů oproti zdrojů v simulaci. Zatímco simulace uvažuje dokonale shodné zdroje, u reálných zdroje stačí nepatrná změna parametrů jednotlivých zdrojů, počínaje směrovou a frekvenční charakteristikou, a výsledek tak může být zkreslený. Na odchylce měření se mohlo podepsat i manuální přesouvání měřicího mikrofonu. Vzhledem k nefunkčnosti automatického ramena pro přesné umístění mikrofonu nebylo v našich silách mít vždy mikrofon na měřícím místě s přesností desetin milimetru a i malá odchylka v umístění může znamenat velkou změnu v zaznamenané hladině akustického tlaku.



Obr. 6.3: Interpolační mapa hladiny akustického tlaku přímkového zářiče o délce $l = 1,05$ m při buzení shodného signálu obou kanálů o frekvenci a) 1120,5 Hz, b) 2241 Hz, c) 4482, d) 8964 Hz. A při buzení při otočené polaritě kanálu 2 e) 1120,5 Hz f) 2241 Hz g) 4482 Hz, H) 8964 Hz



Obr. 6.4: Simulované pole hladiny akustického tlaku tvořené přímkovým zářičem o délce $l = 1,05$ při buzení shodného signálu v oběma kanály o frekvenci a) 1120,5 Hz b) 2241 Hz c) 4482 Hz, d) 8964 Hz a při buzení signálu s obrácenou polaritou kanálu 2 pro frekvenci e) 1120,5 Hz, f) 2241 Hz, g) 4482 Hz, h) 8964 Hz

7 Simulační program v prostředí Matlab

Součástí práce je vytvoření grafického programu v prostředí Matlab. Tento program umožňuje simulaci zvukového pole vytvořeného interakcí jednoho, či více akustických zářičů u kterých je možné měnit umístění, buzenou frekvenci, velikost membrány a počáteční fázi. V programu můžeme dále nastavit velikost prostoru, rozlišení zobrazení a můžeme si zvolit možnost, zda chceme simulovat prostor s odrazivými stěnami, či bez. Vizualizaci programu můžeme sledovat v příloze E, kde jsou popsány i ovládací prvky programu. Stručně si popíšeme funkce některých prvků:

- *Definování počtu zdrojů*

Do programu je možné zadat jeden až teoreticky nekonečný počet zdrojů.

- *Definování velikosti grafu*

V tomto poli definujeme velikost akustického pole v metrech. Zobrazení souřadnic grafu je nastaveno tak, že souřadnicový bod [0,0] se nachází ve středu grafu. Je potřeba zadávat stejné hodnoty pro obě osy, jinak program nezobrazí žádný výsledek.

- *Definování buzené frekvence*

Zde nastavíme frekvenci, která je stejná pro všechny zdroje.

- *Určení souřadnic zdrojů v grafu*

Do tohoto pole zadáváme pozice zdrojů. Souřadnice je potřeba zadávat v hranatých závorkách a jednotlivé zdroje oddělovat středníkem. Zdroj může být definován i mimo zobrazené akustické pole a přitom bude stále interagovat s ostatními zdroji. Program zahlásí chybu a ukončí výpočet, pokud se počet zdrojů zde nastavených nerovná hodnotě v poli počtu zdrojů.

- *Pole pro změnu rozlišení grafu*

V programu můžeme upravovat rozlišení grafu zvolením krokování po ose x a po ose y . Ze zmenšováním této hodnoty se bude zlepšovat rozlišení grafu.

- *Nastavení počáteční fáze zdrojů*

Počáteční fáze zdroje je velmi důležitý aspekt, proto je zahrnut do prvků ovlivňujících konečný výsledek. Počáteční fáze je potřeba zadat v hranatých

závorkách a fáze jednotlivých zdrojů oddělit mezerou. Opět bude platit, že v případě, kdy se počet nastavených fází nerovná hodnotě počtu zdrojů, program zahlásí chybu.

- *Pole pro definování poloměru membrány zdrojů*

V tomto poli nastavujeme poloměr membrány. Můžeme tak jednoduše určit akustické pole při uvažování teoretické směrovosti zdroje.

- *Přepínač pro výpočet s uvažováním odrazů, či bez*

Program je po zapnutí nastaven tak, aby vypočítával zvukové pole bez uvažování odrazů (Volné pole). Přepínačem však můžeme zvolit i vykreslení výsledků při uvažování odrazů (Uzavřené pole). Odrazivými plochami se stanou „kraje grafu“.

- *Určení pohltivosti stěn*

Po přepnutí přepínače na počítání v uzavřeném prostoru se nám objeví v hlavním okně doposud neviditelné pole pro zadání hodnot pohltivosti stěn. Pro každou stěnu můžeme nastavit jinou hodnotu pohltivosti. Které hodnoty odpovídají které stěně se dá zjistit instinktivně dle porovnání stěn grafu a zobrazeného pole pohltivosti. Pohltivost je nutné zadávat pouze v rozmezí hodnot $(0,1)$ a žádné pole nesmí nikdy zůstat prázdné.

- *Indikace probíhajícího výpočtu*

Indikace slouží k tomu, abychom poznali, zda stále probíhá výpočet. V případě probíhajícího výpočtu má indikátor červenou barvu. Po ukončení výpočtu se indikátor změnil na zelenou barvu.

- *Tlačítko pro přepnutí režimu zobrazení*

Změna režimu zobrazení slouží pro lepší vykreslení požadovaného výsledku. Při některých konfiguracích se bez změny režimu neobejdeme. Zobrazení „Bez normalizace“ vypočítá zvukové pole s hodnotou zjištěné hladiny akustického tlaku. Při přepnutí na „Normalizace“ pracuje program s hodnotou hladiny akustického tlaku, od které jsou odečteny v každém sloupci matice výsledků maximální hodnoty akustického tlaku.

Z matematického hlediska pracuje program způsobem výpočtu rychlostního potenciálu pro každý bod v prostoru dle (4.7). Celkový rychlostní potenciál je součet rychlostních potenciálů všech zdrojů ve všech zobrazovacích bodech. Výsledný

rychlostní potenciál je matice, jež má shodnou velikost řádků i sloupců. Jejich počet je určen definicí prostoru a rozlišovacím krokem. Tato matice je přepočítána dle (4.8) na matici akustických tlaků, která je následně znovu přepočítána dle (2.16) na hladiny akustických tlaků, které jsou vstupními hodnotami výsledného grafu.

Program vykazuje při výpočtech některých zvukových polí chybu, která neumožní rozumné zobrazení výsledků. Při náročnějších reproduktorových konfiguracích je výpočet pole zdlouhavý. Čas výpočtu můžeme snížit zvýšením hodnoty krokování na úkor rozlišení obrázku. Zvolením uzavřeného pole taktéž prodlužujeme dobu výpočtu, stejně jako zvýšením počtu zdrojů. Pokud bychom měli snahu udělat program uživatelsky příjemnější (tj. snížit čas výpočtu při stejném rozlišení, doporučil bych napsat program v jiném programovacím prostředí, jehož výpočty budou trvat kratší čas.

8 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo popsat a namodelovat chování zvukového signálu buzeného jedním, či více zdroji a naměřit námi definovanou konfiguraci několika zdrojů a naměřená data využít jako vstup pro vytvoření interpolační mapy hladiny akustického tlaku.

Na začátku práce jsme se věnovali základním fyzikálním zákonům zvukového vlnění a popsali jsme si několik důležitých veličin, které definují chování zvuku v prostoru. Bylo zapotřebí znát i matematické pozadí simulace programu, proto jsme si definovali a podrobně popsali veličinu rychlostního potenciálu a chování této veličiny při různých charakteristických vlastnostech zdrojů. Na několika příkladech jsme popsaly interakci jednoho i více zdrojů a jakým způsobem ovlivňují vlastnosti zdrojů výsledné akustické pole. Popsali jsme si několik možností chování akustického pole tvořeného několika zdroji. Nadefinovali jsme si směrovou a frekvenční charakteristiku reálného reproduktoru a v praktické části jsme tyto frekvenční charakteristiky i získaly měřením. Ukázali jsme si jaké akustické pole budí přímkový zdroj složený ze stejných zdrojů a popsali si jak se mění směrová charakteristika zdroje a tento poznatek jsme poté ověřili v praxi.

Praktická část práce sestávala z naměření reálných frekvenčních a směrových charakteristik reálného, naměření hladiny akustického tlaku přímkového zářiče a vytvoření simulačního programu pro zobrazení akustického pole.

Měření probíhalo na půdě VUT která disponuje bezodrazovou komorou. Ta byla důležitá pro objektivní popis chování zdroje zvuku, který by při měření v prostoru odrazivých ploch nebyl možný. První část měření byla jednoduchá. Zabývali jsme se vlastnostmi reálného přímovyzářujícího elektrodynamického reproduktoru. Naměřili jsme hodnoty akustického tlaku v závislosti na úhlu natočení reproduktoru a síly buzení reproduktoru v závislosti na frekvenci a ty využili pro zobrazení grafu směrové a frekvenční charakteristiky jednoho z laboratorních reproduktorů. Mohli jsme porovnat rozdíl chování ideálního zdroje a reálného zdroje. Poté jsme vzali osm takových reproduktorů, a využili je pro nasimulování pole vytvořeného zdrojem. Naměřené hodnoty hladin tlaku sloužili pro vykreslení interpolační mapy hladiny akustického tlaku ke kterým byl použit programovací jazyk Matlab.

Programovací rozhraní Matlab posloužilo k vytvoření simulačního programu, který zobrazuje mapu hladiny akustického tlaku pro jeden či více zářičů, přičemž je možné měnit jejich charakteristiky zdrojů, jejich pozici, ale i prostředí ve kterém zdroj budí zvukový signál. Tento program dostal uživatelské rozhraní pro co nejpohodlnější ovládání. Díky tomuto programu jsme mohli vytvořit akustická pole na kterých jsme si ukázaly základní vlastnosti pole a také jsme díky simulaci mohli porovnat chování reálného liniového zdroje s idealizovaným liniovým zdrojem.

Tato práce by mohla být přínosná pro Ty, kteří se zabývají živým ozvučováním, ale i pro laika, který má zájem pochopit téma interference několika zdrojů v prostoru. Dobrým nastavením liniových zdrojů i jednodušších reproduktorových konfigurací můžeme dosáhnout kvalitního poslechového zážitku, ale také můžeme konečný výsledek pokazit, pokud neznáme chování zdrojů. Tato práce sice nepopisuje praktické znalosti při nastavování zvukových systémů, ale informace v ní obsažené mohou

pomoci pochopit toto téma, které zdaleka nepopisuje simulaci a chování akustického pole natolik jako některé odborné publikace.

Tuto publikaci bych ve svém volném čase rád přeložil do angličtiny, aby práce mohla mít větší dosah, neboť věřím, že by mohla být dobrým vstupním textem do problematiky tohoto problému. Také by se dala rozšířit o detailnější popis různých reproduktorových konfigurací a jejich aplikace v praxi.

9 SEZNAM LITERATURY

- [1] F. ALTON EVEREST. *Master handbook of acoustics*. 4. vyd. McGraw-Hill/TAB Electronics. 615 stran. 2001. ISBN 978-0071603324
- [2] HALLIDAY DAVID, RESNICK ROBERT, WALKER JEARL. *Fyzika* Akademické nakladatelství VUTIUM, 1200 stran, 2007, ISBN: 978-80-214-4123-1
- [3] Ing EBERHARD SENGPIEL, *Forum für Mikrofonaufnahmetechnik und Tonstudiotekni*,. Dostupné na internetu: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-period.htm>
- [4] BOB MCCARTHY. *Sound Systems: Design and Optimization: Modern Techniques and Tools for Sound System Design and Alignment* 2nd Edition. 566 stran, Nakladatelství: Focal Press; 2009 ISBN: 978-0240521565
- [5] R. E. APFEL. *Physics 4830 Course Notes*. 1998. Dostupné na internetu: <http://www.colorado.edu/physics/phys4830/phys4830_fa01/lab/n0911.htm>
- [6]JANOUSĚK, Ivo. *ABC akustiky pro hudební praxi*. Praha: Supraphon, 1979. Příručky ABC.
- [7]HALAHYJA, Martin, Ivan CHMÚRNÝ a Zuzana STERNOVÁ. *Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov*. Bratislava: Jaga, 1998. ISBN 8088905044.
- [8] Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph. D. *Elektroakustika*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav telekomunikací. 200 stran. 2016. ISBN: 978-80-214-4716-5
- [9_7] DANIEL R. RAICHEL, *Science and application of acoustic, second edition*. Springer Science+Business Media, Inc. 647 stran. 2006. ISBN: 978-0387-26062-4
- [10]EARGLE, John, *JBL Sound System Design Reference Manual*, dostupné z http://www.jblpro.com/ProductAttachments/pssdm_1.pdf
- [11]SMETANA, Ctirad. *Praktická elektroakustika*. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 692 stran, 66 Kčs, 1981
- [12] prof. Ing. ŠKVOR ZDENĚK DrSc. *Akustika a elektroakustika*. Vyd. 1. Nakladatelství Academia, akademie věd České Republiky. 527 stran. 2001. ISBN 80-200-0464-0
- [13] RUND F. *Simulace zvukového pole více zdrojů*. Katedra radioelektroniky, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze. Nakladatelství Academia. 527

stran. 2001. ISBN 80-200-0461-0.

[13] SPORER Thomas, Wave field synthesis – generation and reproduction of natural sound environments. Fraunhofer Institute for Digital Media Technology IDMT Ilmenau, Germany. Publikace pro účely 7 konference Digital Audio Effects (DAFx'04) v Naples, Italy, Říjen 5-8, 2004

[14] JOLSON, Harry F. *Elements of acoustical engineering*. 2d ed. New York: D. Van Nostrand Co., 1947.

[14] BALLOU, Glen. *Handbook for sound engineers: the new audio cyclopedia*. Indianapolis, Ind.: H.W. Sams, c1987. ISBN 0672219832.

[15] GUNNARSSON Fredrik, *Single bipolar Loud speaker system for stereo reproduction*, 2000

[16] ELORZA David Oliva, *Room acoustics modeling using the ray- tracing method: implementation and evaluation*, Licentiate Thesis University of Turku Department of Physics 2005. 102 stran.

[17] Bc. ČERNÝ Filip. *Simulace šíření zvukové vlny v uzavřeném prostoru*, diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 67 s. Vedoucí práce byl Ing. Kristián Orlovský

[18] HAMPL, Filip *Software pro simulaci rozložení akustického tlaku*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 51 s. Vedoucí práce byl Ing. David Kurc,

Seznam příloh

A Určení směrovosti reproduktoru na směrové charakteristice

B Naměřená frekvenční charakteristika

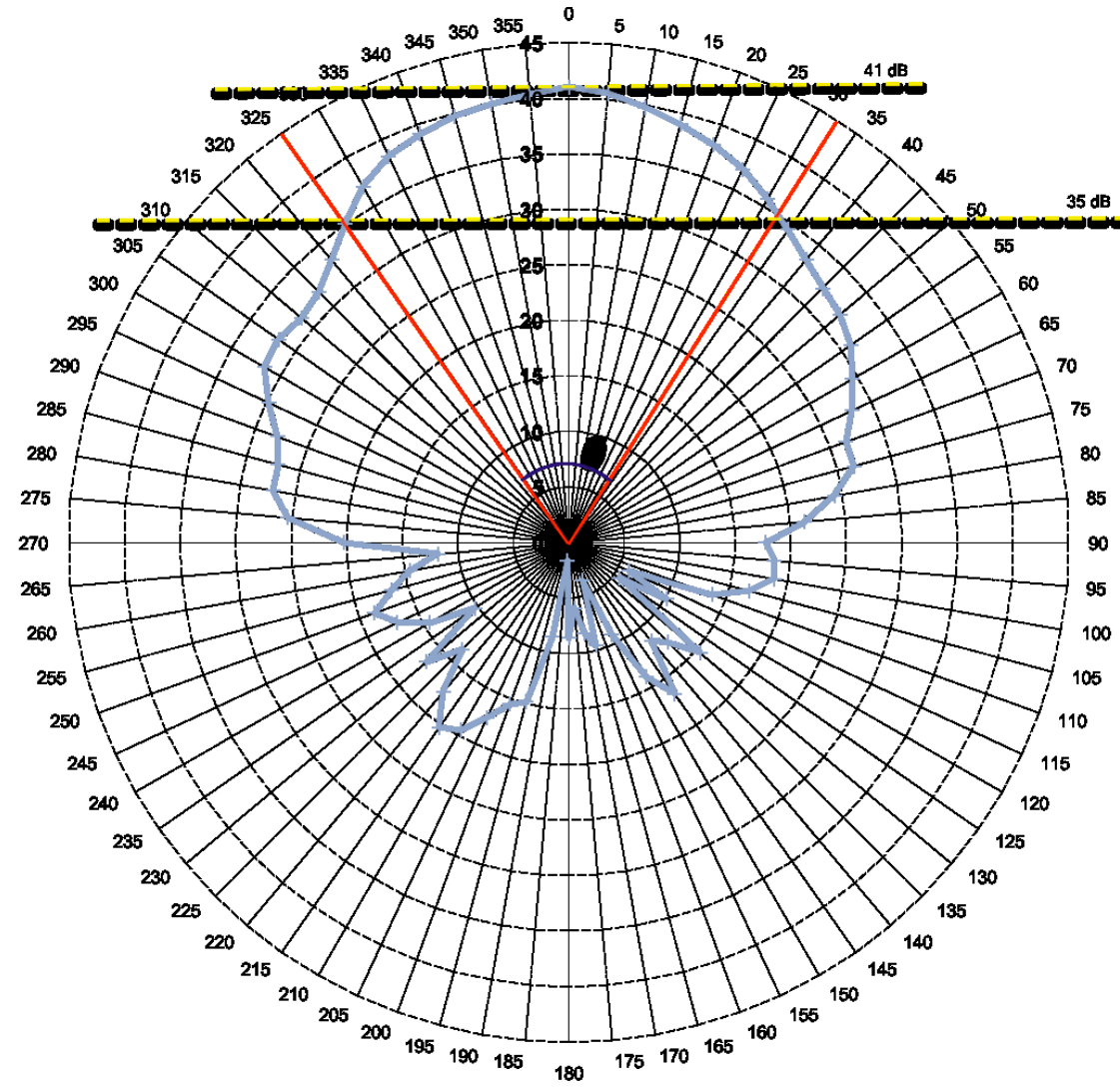
C Naměřená směrová charakteristika

D Nákres mapy měřicích bodů

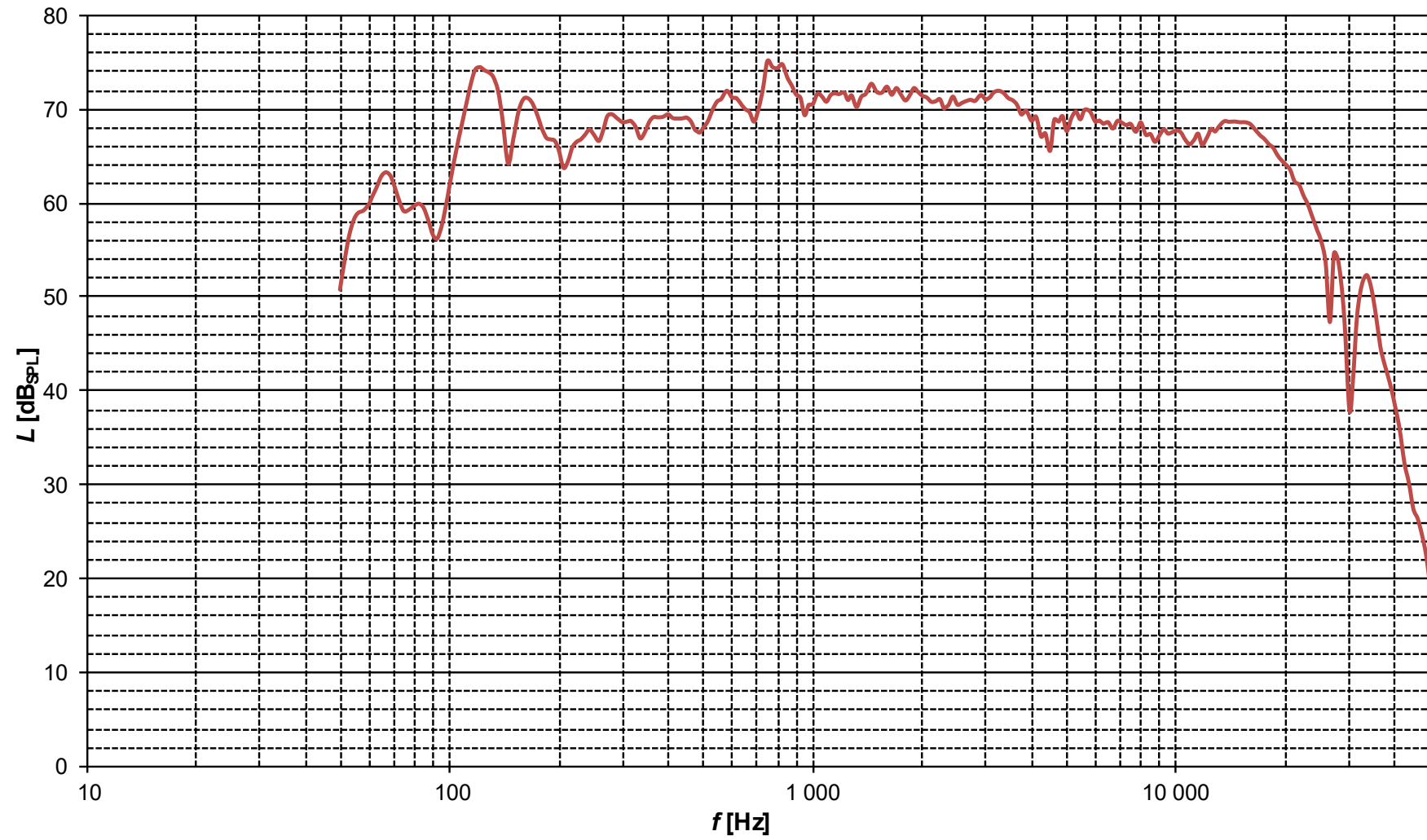
E Popis uživatelského rozhraní simulačního programu

F CD s elektronickou verzí bakalářské práce a simulačním programem

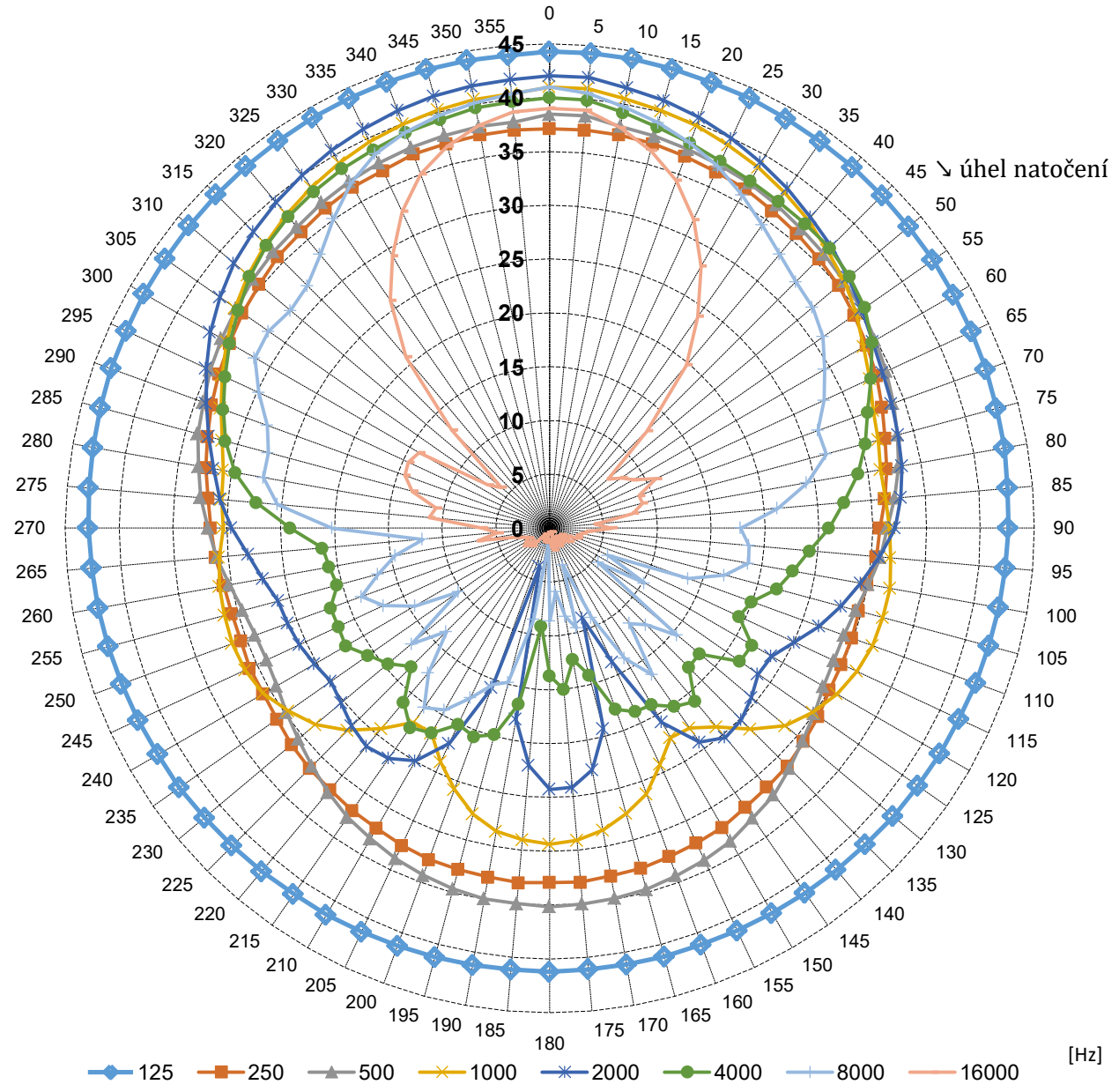
A



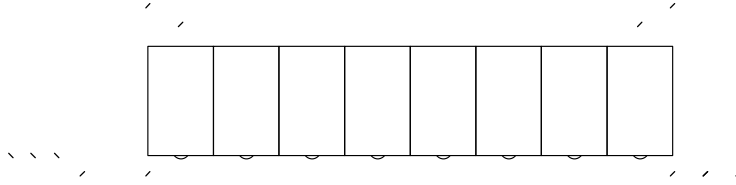
B



C



D



、 x

、 x

、 x

••

E.1

vzdálenost 1 metr		[Hz]	body	11	12	13	14	15	17	18	P zdroj	20	21
	1/2fmez	1120,49		86,8	86,1	85,5	85,2	85,6	83,9	81,2	77,5	75,5	75,6
	fmez	2240,98		82,9	83	80,5	78,3	83,8	79,7	79,9	79,2	73,2	75,6
	2xfmez	4481,96		80	79,3	76,2	84,5	63	77,9	82,2	71,9	80,7	76,6
	4xfmez	8963,92		73,1	80,2	76,3	82,1	75,5	74,4	81,8	67,3	79,6	72,8
	s fází 180												
	1/2fmez	1120,49		73,7	60,2	74,2	74,4	70,8	75,2	74,7	72,5	59,5	71,4
	fmez	2240,98		74	80,7	82,4	77	83,1	84,1	83,8	79,1	80,1	81,4
	2xfmez	4481,96		78	80,6	75,6	84,1	69,1	77,8	76	80,9	77,2	81,3
	4xfmez	8963,92		78,6	78,2	74,1	82,1	75	76,5	80	72,4	79	45,5
vzdálenost 2 metry				11	12	13	14	15	17	18	19	20	21
	1/2fmez	1120,49		90	90,1	88,3	87,7	84,8	82,4	82,6	81,9	82,3	81,8
	fmez	2240,98		83,6	83,4	82,7	83,8	84,7	82,7	79,2	79,1	78,6	74,5
	2xfmez	4481,96		79,8	80,8	79,7	81,3	85,5	80,9	69,6	76,1	80	73,4
	4xfmez	8963,92		78,4	78,4	75	81,5	71,3	74,7	71,3	70,6	75,4	72,9
	s fází 180												
	1/2fmez	1120,49		68,5	68,6	67,2	66,3	63,7	61,2	61,2	60,6	60,9	62,9
	fmez	2240,98		70,9	68,1	67,4	68,5	69,3	67,2	66,3	66,3	63,5	59,5
	2xfmez	4481,96		71,2	71,8	70,8	72,2	76,5	71,7	60,4	67,1	71	66,7
	4xfmez	8963,92		76,6	76,4	73	79,5	69,4	72,8	71,2	70,6	75,3	71
Vzdálenost 3 metry				11	12	13	14	15	17	18	19	20	21
	1/2fmez	1120,49		80,8	80,9	80,5	79,9	79,2	75,9	72,9	70,3	66,8	65,2
	fmez	2240,98		82,1	82	81	79,5	77,9	77,1	77,3	75,7	72,7	70,9
	2xfmez	4481,96		75,2	75,4	75,9	78	76,3	74	73,4	62,3	70,6	71,9
	4xfmez	8963,92		72,9	73,5	71,9	73,2	70,1	73,7	74,4	67,7	68,2	63,1
	s fází 180												
	1/2fmez	1120,49		65,4	63,9	62,3	61,9	62,2	62,2	61,9	62	60	52,6
	fmez	2240,98		68,7	61,1	66,1	65,9	62,8	60,3	65,3	68,9	71,4	69,3
	2xfmez	4481,96		69,4	64,9	72,7	70,8	71,8	70,6	71,5	73,9	70,9	70,2
	4xfmez	8963,92		73	76,8	73,7	69,3	67	74,1	68,8	71,3	69,4	72,3

E.2

vzdálenost 1 metr		[Hz]	body	11	12	13	14	15	17	18	P zdroj	20	21
	1/2fmez	1120,49		86,8	86,1	85,5	85,2	85,6	83,9	81,2	77,5	75,5	75,6
	fmez	2240,98		82,9	83	80,5	78,3	83,8	79,7	79,9	79,2	73,2	75,6
	2xfmez	4481,96		80	79,3	76,2	84,5	63	77,9	82,2	71,9	80,7	76,6
	4xfmez	8963,92		73,1	80,2	76,3	82,1	75,5	74,4	81,8	67,3	79,6	72,8
	s fází 180												
	1/2fmez	1120,49		73,7	60,2	74,2	74,4	70,8	75,2	74,7	72,5	59,5	71,4
	fmez	2240,98		74	80,7	82,4	77	83,1	84,1	83,8	79,1	80,1	81,4
	2xfmez	4481,96		78	80,6	75,6	84,1	69,1	77,8	76	80,9	77,2	81,3
	4xfmez	8963,92		78,6	78,2	74,1	82,1	75	76,5	80	72,4	79	45,5
vzdálenost 2 metry				11	12	13	14	15	17	18	19	20	21
	1/2fmez	1120,49		90	90,1	88,3	87,7	84,8	82,4	82,6	81,9	82,3	81,8
	fmez	2240,98		83,6	83,4	82,7	83,8	84,7	82,7	79,2	79,1	78,6	74,5
	2xfmez	4481,96		79,8	80,8	79,7	81,3	85,5	80,9	69,6	76,1	80	73,4
	4xfmez	8963,92		78,4	78,4	75	81,5	71,3	74,7	71,3	70,6	75,4	72,9
	s fází 180												
	1/2fmez	1120,49		68,5	68,6	67,2	66,3	63,7	61,2	61,2	60,6	60,9	62,9
	fmez	2240,98		70,9	68,1	67,4	68,5	69,3	67,2	66,3	66,3	63,5	59,5
	2xfmez	4481,96		71,2	71,8	70,8	72,2	76,5	71,7	60,4	67,1	71	66,7
	4xfmez	8963,92		76,6	76,4	73	79,5	69,4	72,8	71,2	70,6	75,3	71
Vzdálenost 3 metry				11	12	13	14	15	17	18	19	20	21
	1/2fmez	1120,49		80,8	80,9	80,5	79,9	79,2	75,9	72,9	70,3	66,8	65,2
	fmez	2240,98		82,1	82	81	79,5	77,9	77,1	77,3	75,7	72,7	70,9
	2xfmez	4481,96		75,2	75,4	75,9	78	76,3	74	73,4	62,3	70,6	71,9
	4xfmez	8963,92		72,9	73,5	71,9	73,2	70,1	73,7	74,4	67,7	68,2	63,1
	s fází 180												
	1/2fmez	1120,49		65,4	63,9	62,3	61,9	62,2	62,2	61,9	62	60	52,6
	fmez	2240,98		68,7	61,1	66,1	65,9	62,8	60,3	65,3	68,9	71,4	69,3
	2xfmez	4481,96		69,4	64,9	72,7	70,8	71,8	70,6	71,5	73,9	70,9	70,2
	4xfmez	8963,92		73	76,8	73,7	69,3	67	74,1	68,8	71,3	69,4	72,3

Poznámka: Hodnota naměřených hodnot je dB_{SPL}.

F

Výsledné akustické pole

Definování počtu zdrojů

Definování velikosti grafu

Definování buzené frekvence pro všechny zdroje

Určení souřadnic zdrojů v grafu

Pole pro změnu rozlišení grafu

Nastavení počáteční fáze zdrojů

Pole pro definování poloměru membrány zdrojů

Přepínač pro výpočet s uvažováním odrazů, či bez

Určení pohltivosti stěn

Tlačítko pro zahájení výpočtu

Indikace probíhajícího výpočtu

Tlačítko pro přepnutí režimu zobrazení

GUI_BP

Definice velikosti prostoru v metrech [x,y]

20 20

Frekvence [Hz] Počet zdroju

1000 4

Pozice zdroju [x, y]

[-8 8; -8 -8; 8 8; 8 -8]

Krokovani Pocatecni faze [phi]

0.03 [0 0 0 0]

Polomer membrany [m] Button Group

0.1 Volne pole Uzavrene pole

1 1 1

Pohltivost

START

Normalizovane

Normalizace

Y [m] →

x [m] →

0 -10 -20 -30 -40 -50 -60 -70

