

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULACE ZVUKOVÉHO POLE V UZAVŘENÉM PROSTORU PŘI OZVUČOVÁNÍ VÍCE REPRODUKTOROVÝMI SOUSTAVAMI

SIMULATION OF SOUND FIELD OF SOUND SYSTEM WITH MULTIPLE SPEAKERS IN CLOSED SPACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Brůna

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Michal Brůna

ID: 201230

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Simulace zvukového pole v uzavřeném prostoru při ozvučování více reproduktorovými soustavami

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku umístování reproduktorových soustav v horizontálním směru při ozvučování většího auditoria. V prostředí Matlab nebo pomocí zvoleného programovacího jazyka vytvořte aplikaci pro operační systém Windows, která bude umožňovat simulaci rozložení zvukového pole více reálných zdrojů zvuku v otevřeném a uzavřeném prostoru v horizontálním a vertikálním směru. Aplikace bude umožňovat import změřených směrových charakteristik zdrojů zvuku a simulaci odrazů, např. pomocí metody zrcadlových zdrojů, s možností volby různé materiály stěn s kmitočtově závislým činitelem pohltivosti. Pomocí této aplikace ověřte klady a zápory různých konfigurací z hlediska rozložení akustického tlaku v prostoru a spektrálního rozložení jeho energie, případně dalších kritérií kvality reprodukce zvuku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Škvor, Z., Akustika a elektroakustika. Academia, Praha, 2001. ISBN 80-200-0461-0

[2] McCARTHY, Bob. Sound Systems: Design and Optimization, 2nd Edition. Focal Press; 2009, ISBN: 978-0240521565

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

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

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce rozebírá parametry návrhu ozvučovacích systémů a zabývá se vytvořením simulačního softwaru v prostředí Matlab pro vykreslení zvukového pole v otevřeném i uzavřeném prostoru pomocí metody zrcadlových zdrojů prvního a druhého řádu. V práci jsou vysvětleny principy tvorby a šíření zvuku včetně popisu rychlostního potenciálu pro vytváření simulací. Simulace používá kmitočtově závislé absorpční koeficienty stěn. Dále jsou zde popsány různé horizontální konfigurace používané při ozvučování a za pomoci simulací demonstrovány jejich výhody a nevýhody. Pro testování nejčastějších horizontálních konfigurací je k simulačnímu softwaru vytvořeno grafické rozhraní.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zvuk, rychlostní potenciál, horizontální konfigurace, simulace, návrh ozvučovacích systémů, crossfire

ABSTRACT

In this thesis basic principles of sound system design are presented. A software simulation in Matlab is written for prediction of sound field with sources of real directivity in both freefield and in a closed room using velocity potential. Reflections are simulated using mirror sources of first and second order. Frequency dependent sound absorption coefficients are implemented in the simulation. There is a GUI designed to operate on most common horizontal configurations. Those are then evaluated and advantages and disadvantages are demonstrated using the simulation software.

KEYWORDS

Sound, velocity potential, horizontal configurations, simulation, sound system design, crossfire

BRŮNA, Michal. *Simulace zvukového pole v prostoru při ozvučování více reproduktorymi soustavami*. Brno, 2020, 94 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Simulace zvukového pole v prostoru při ozvučování více reproduktorovými soustavami“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	13
1 Teoretický úvod	14
1.1 Zvuk a jeho základní vlastnosti	14
1.1.1 Zvukové vlnění	14
1.1.2 Spektrum zvuku	14
1.1.3 Práh slyšení	14
1.1.4 Rychlost šíření ve vzduchu	14
1.1.5 Zákon převrácených čtverců	16
1.1.6 Atmosférický útlum	16
1.2 Základní veličiny akustického pole	17
1.2.1 Akustický tlak	17
1.2.2 Akustická rychlost	18
1.2.3 Akustický výkon	19
1.2.4 Intenzita zvuku	19
1.2.5 Specifická akustická impedance	20
1.2.6 Hladiny zvukových veličin	20
1.2.7 Sčítání zvukových signálů	21
1.2.8 Vlnová rovnice	25
1.2.9 Rychlostní potenciál	25
1.2.10 Vlnové číslo	26
1.2.11 Akustický vysílač 0. řádu	26
1.2.12 Vlnová délka	27
1.2.13 Pohltivost a odrazivost materiálů	27
2 Simulace rozložení zvukového pole	29
2.1 Matlab	29
2.2 Simulační program	29
2.2.1 Vstupní a výstupní proměnné	29
2.3 Výpočet zrcadlových zdrojů	31
2.4 Vstupní data	35
2.4.1 Změřené charakteristiky	35
2.4.2 Generic Loudspeaker Library	36
2.4.3 Import externě získaných dat	36
2.4.4 Koeficient akustické pohltivosti	37
2.5 Grafické uživatelské rozhraní	37
2.5.1 Ovládací prvky grafického rozhraní	37

3	Návrh ozvučovacích systémů	40
3.1	Obecné cíle SSD	40
3.2	Získání dat pro návrh systému	40
3.2.1	Analýza prostoru	40
3.2.2	Segmentace prostoru	41
3.2.3	Zjištění charakteru plánované produkce	41
3.2.4	Příklady vlivu charakteru reprodukce na návrh systému	41
3.2.5	STI	42
3.2.6	Stanovení priorit pro jednotlivé segmenty prostoru	42
3.2.7	Definice pozic pro umístění prvků ozvučovacího systému	43
3.3	Referenční signál	43
3.3.1	Formát vstupního signálu	43
3.3.2	Hodinový signál	43
3.3.3	Standard distribuce signálu pro živé ozvučování	44
3.3.4	Definice referenčního signálu	44
3.4	Cíle návrhu ozvučovacího systému	45
3.4.1	Level Variance	45
3.4.2	Tonal Variance	45
3.4.3	Ripple Variance	46
3.4.4	Sonic Image Variance	46
3.5	Hřebenový filtr	46
3.6	Lokalizace zdroje zvuku	48
3.6.1	Virtuální zdroj zvuku	48
3.6.2	Stereobáze	48
3.6.3	Interaural Intensity Difference (IID)	48
3.6.4	Interaural Time Difference (ITD)	49
3.6.5	Head-Related Transfer Function (HRTF)	49
3.6.6	Haasův efekt	49
3.6.7	Sčítání signálů v různém čase	50
3.6.8	Vjem ozvěny, echo	52
3.7	Principy návrhu systému s reálnou směrovostí	52
3.7.1	Nominální úhel vyzařování	52
3.7.2	Reproboxy s proporční směrovostí	53
3.7.3	Reproboxy s vlnovody s konstantní směrovostí	54
3.7.4	Minimum Variance Line	55
3.7.5	FAR	57
3.7.6	LAR	59
3.7.7	Koncepty návrhu	61
3.7.8	Možnosti ověření	62

4 Horizontální směřování	63
4.1 Monofonní systém	63
4.1.1 Single mono	63
4.1.2 Dual mono	65
4.1.3 Distribuovaný systém	70
4.2 Stereofonní dvoukanálový systém	71
4.2.1 Stereo konfigurace - <i>Crossfire</i>	72
4.2.2 Konfigurace <i>Dual mono</i> pro dvoukanálovou stereofonii	75
4.2.3 Další stereofonní konfigurace, reálné zdroje	75
4.2.4 Příklady simulací z prostředí Matlab	76
4.3 Vícekanálové zvukové systémy	86
5 Závěr	88
Literatura	90
Seznam symbolů, veličin a zkratk	92
Seznam příloh	93
A Přiložené soubory	94
A.1 .zip archiv s kódem v prostředí Matlab a s příklady testovacích změřených směrových charakteristik a koeficientů pohltivosti	94

Seznam obrázků

1.1	Příklad změny prahu slyšení s věkem	15
1.2	Zákon převrácených čtverců	16
1.3	Atmosférický útlum	17
1.4	Součet dvou signálů se stejnou maximální amplitudou v závislosti na relativní fázi	23
1.5	Základní rozdělení fázových rozdílů podle součtu	24
2.1	Pozice zrcadlových zdrojů	32
3.1	Hřebenový filtr s lineární frekvenční osou	47
3.2	Hřebenový filtr s logaritmickou frekvenční osou	47
3.3	Hřebenový filtr pro zpoždění 2,0 ms s lineární frekvenční osou	51
3.4	Hřebenový filtr pro zpoždění 2,0 m s logaritmickou frekvenční osou	51
3.5	Vyzařování ideální pístově kmitající membrány o průměru 34 cm	55
3.6	Typické vyzařování reproboxu	56
3.7	Minimum Variance Line	57
3.8	Minimum Variance Line - vertikální směřování	58
3.9	FAR - opsaný obdélník	58
3.10	LAR - opsaný obdélník	60
4.1	Konfigurace <i>Single mono</i>	64
4.2	Konfigurace <i>Single mono</i> mimo osu	64
4.3	Konfigurace <i>Single mono</i> v rohu	65
4.4	Matlab simulace <i>Single mono</i>	66
4.5	Matlab simulace <i>Single mono</i> mimo osu	67
4.6	Matlab simulace <i>Single mono</i> v rohu	68
4.7	konfigurace <i>Dual mono</i>	69
4.8	konfigurace <i>Dual mono, intilt</i>	70
4.9	konfigurace <i>Dual mono, outtilt</i>	70
4.10	konfigurace <i>Distribuovaný mono systém</i>	71
4.11	simulace zdrojů na 100 Hz, časový rozdíl 5 ms	73
4.12	<i>Crossfire</i> konfigurace 1	74
4.13	<i>Crossfire</i> konfigurace 2	74
4.14	Konfigurace typu <i>Dual mono</i> pro větší vyzařovací úhel, 4 kHz	78
4.15	Konfigurace typu <i>Crossfire</i> pro větší vyzařovací úhel, 4 kHz	79
4.16	Konfigurace typu <i>Dual mono</i> pro větší vyzařovací úhel, 100 Hz	80
4.17	Konfigurace typu <i>Crossfire</i> pro větší vyzařovací úhel, 100 Hz	81
4.18	Konfigurace typu <i>Dual mono</i> pro větší vyzařovací úhel, 10 kHz	82
4.19	Konfigurace typu <i>Crossfire</i> pro větší vyzařovací úhel, 10 kHz	83

4.20 Jeden ze dvou zdrojů konfigurace <i>Dual mono</i> pro větší vyzařovací úhel, 10 kHz, odraz pouze od nejbližší stěny	84
4.21 Jeden ze dvou zdrojů konfigurace <i>Crossfire</i> pro větší vyzařovací úhel, 10 kHz, odraz pouze od nejbližší stěny	85
4.22 LCR konfigurace	87

Seznam tabulek

3.1	Práh pro vjem echa podle [13]	52
3.2	Příklady rozměrů vlnovodu pro různé vyzařovací úhly	56
3.3	Tabulka závislosti <i>FAR</i> na vyzařovacím úhlu	60
3.4	Tabulka závislosti <i>LAR</i> na vyzařovacím úhlu	61

Seznam výpisů

2.1	Výpočet pozic zrcadlových zdrojů prvního a druhého řádu	33
2.2	Výpočet amplitud a rotací zrcadlových zdrojů	33
2.3	Výpočet jednotlivých rychlostních potenciálů	34

Úvod

Tato práce se věnuje oblasti SSD (návrh ozvučovacího systému – Sound System Design). Cílem práce je ohodnotit výhody a nevýhody různých horizontálních konfigurací umístění ozvučovacích systémů. V rámci práce byla v prostředí Matlab vytvořena sada funkcí a skriptů pro načtení změřených reálných směrových charakteristik zdrojů zvuku pro ozvučování, ať už z prostorů laboratoře nebo z veřejně dostupných zdrojů o komerčních reproboxech. Dále byla vytvořena dvojrozměrná simulace poslechového prostoru s umístěním libovolného množství reálných zdrojů na zvolené pozice v prostoru a odrazy jsou simulovány metodou zrcadlových zdrojů prvního a druhého řádu. V rámci práce jsou definovány a nejprve obecně a poté konkrétně pomocí simulací ohodnoceny různé kombinace horizontálního směřování reproboxů pro ozvučování.

Práce je rozdělena na kapitoly, z nichž první kapitolou je teoretický úvod, kde se definují základní vlastnosti zvuku a následně veličiny akustického pole, které umožňují vytvořit simulaci rozložení zvukového pole. V další kapitole je rozebrána tvorba a popis kódu. Následuje kapitola, která řeší obor návrhu ozvučovacích systémů z pohledu obecného a následně specificky problematiku horizontálního směřování, kde jsou klady a zápory demonstrovány na příkladech ze simulačního programu.

1 Teoretický úvod

1.1 Zvuk a jeho základní vlastnosti

1.1.1 Zvukové vlnění

Příčinou zvuku je mechanické kmitání pružného prostředí. V důsledku existence zvuku dochází ke zhušťování a zředování prostředí, ve kterém se zvuk šíří. Rychlost této změny odpovídá frekvenci, který daný signál obsahuje. Pro harmonické kmitání platí, že perioda kmitání je nejkratší doba, za kterou se bod dostane z rovnovážné polohy přes obě krajní polohy zpět do původního stavu, případně je to nejkratší časový úsek mezi dvě okamžiky se stejnou fází.

1.1.2 Spektrum zvuku

Frekvenční rozsah, který může člověk slyšet, se udává v rozsahu 16 – 20 000 kmitů za sekundu. Pod tímto pásmem ($f < 16$ kHz) hovoříme o infrazvuku, který již člověk přestává slyšet a může již pouze cítit jako mechanické vibrace. Frekvence vyšší než 20 000 Hz se nazývají ultrazvuk a ty již nelze pomocí lidského těla zaznamenat jako počitek. Slyšitelný frekvenční rozsah je individuální podle zdravotního stavu a věku a s věkem dochází k jeho snižování závislém také na dlouhodobé expozici hluku.

1.1.3 Práh slyšení

Práh slyšení udává hraniční úroveň, pod kterou není člověk schopen přijímat informaci přenášenou zvukem. Tato úroveň je silně závislá na predispozicích konkrétního jedince, na jeho zdravotním stavu a také na jeho věku. Historicky byla jako referenční hodnota prahu slyšení zvolena úroveň $p_0 = 20$ μ Pa, která odpovídala zhruba prahu slyšení pro frekvenci 1 kHz. Práh slyšení se s věkem zhoršuje celospektrálně, znatelnější je však pokles na vyšších frekvencích ($f > 2$ kHz). Práh slyšení se během života zdravého člověka může zvýšit až o desítky decibelů viz 1.1.

1.1.4 Rychlost šíření ve vzduchu

Zvuk se šíří vzduchem konečnou rychlostí, která je zhruba o 5 řádů nižší než je rychlost světla. Rychlost šíření není frekvenčně závislá, tedy všechny slyšitelné frekvence urazí danou vzdálenost ve volném prostoru za shodný čas, ovšem překážky ať už nepropustné nebo zvuk propouštějící mohou mít na rychlost šíření vliv, neboť ostatní materiály mají jiné rychlosti šíření zvuk než má vzduch - obvykle výrazně vyšší, např. ve vodě se zvuk šíří zhruba rychlostí 1500 m/s, v ledu přes 3000 m/s a např.

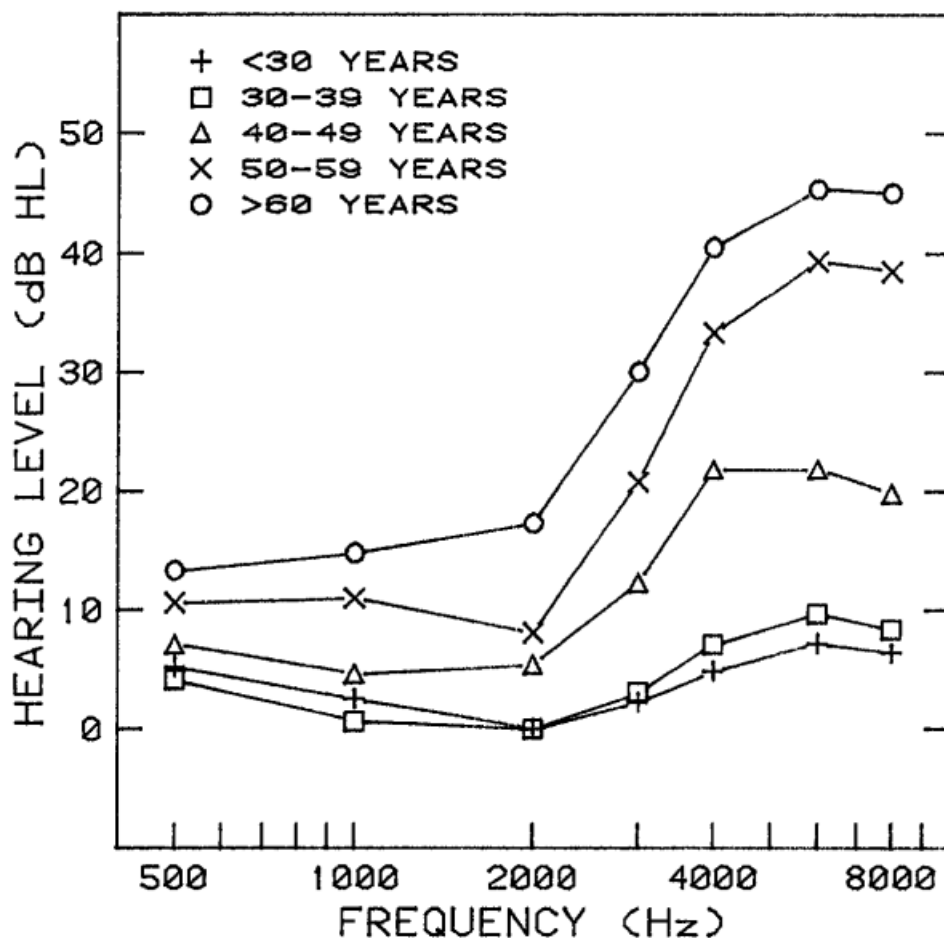


Figure 2. The mean results of the 1986 AES audiometric survey categorized by age groupings.

Obr. 1.1: Příklad změny prahu slyšení s věkem [15]

v oceli nebo hliníku přes 5000 m/s. Rychlost šíření ve vzduchu je závislá nejvíce na teplotě, částečně také na relativní vlhkosti a atmosférickém tlaku a plynném složení vzduchu. Lineární aproximace pro okolí 0 °C je

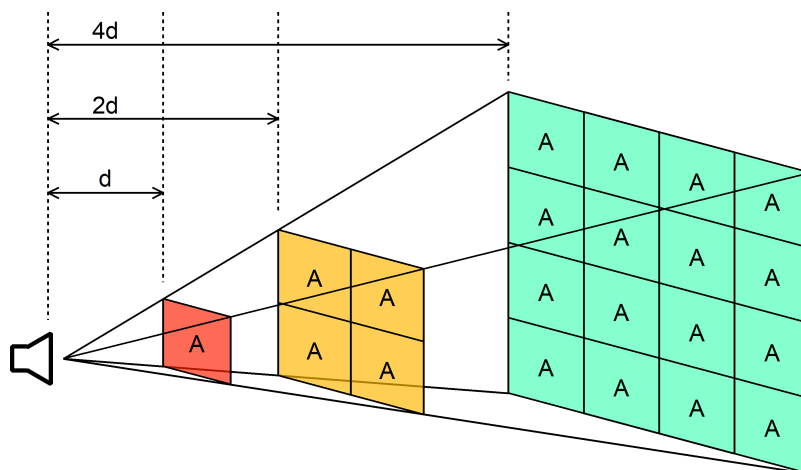
$$c_0 = 331,6 + 0,606t, \quad (1.1)$$

kde t je teplota vzduchu ve °C, má dostatečnou přesnost potřebnou pro práci s návrhem a optimalizací ozvučovacích systémů. Nepřesnosti této aproximace jsou v oblasti reálného použití ozvučovacích systému pro návrh zanedbatelné.

1.1.5 Zákon převrácených čtverců

Zákon převrácených čtverců je fyzikální zákon, který říká, že intenzita záření z bodového zdroje klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Matematicky to lze vyjádřit např. takto:

$$\text{Intenzita} \propto \frac{1}{\text{Vzdálenost}^2} \quad (1.2)$$



Obr. 1.2: Zákon převrácených čtverců [10]

Změna intenzity se změnou vzdálenosti s ze vztahu 1.2 dá vyjádřit následujícími vztahy:

$$\Delta L = L_{p2} - L_{p1} \quad (1.3)$$

$$= 10 \log(R_2/R_1) \quad (1.4)$$

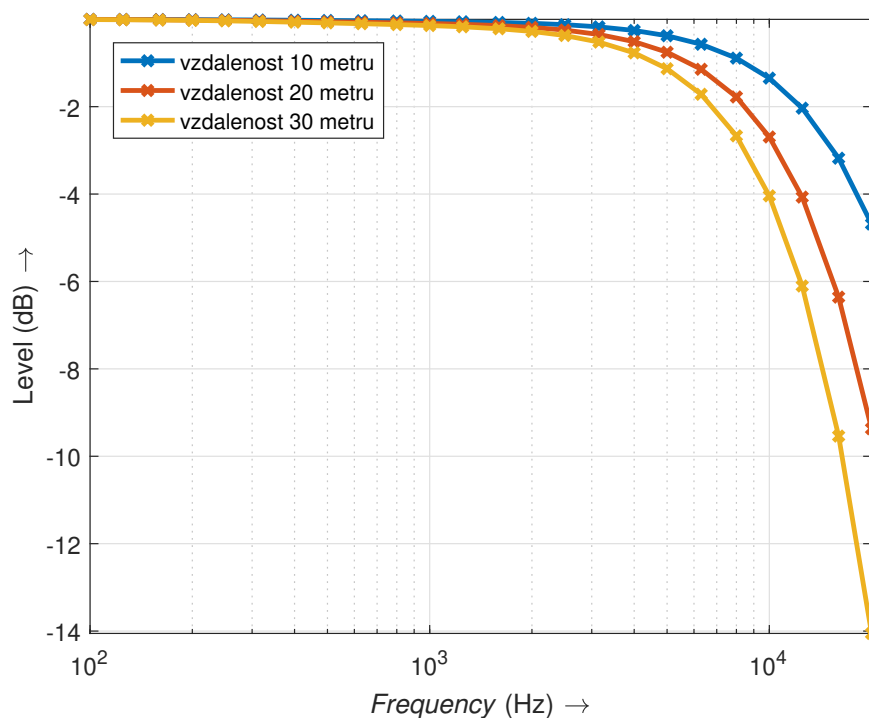
$$= 20 \log(R_2/R_1) \quad (1.5)$$

kde ΔL je poměr intenzit vyjádřený v decibelech, L_{p1} je intenzita na počáteční pozici, L_{p2} je intenzita na konečné pozici, R_1 je počáteční vzdálenost zdroje a R_2 je konečná vzdálenost zdroje.

1.1.6 Atmosférický útlum

Frekvenčně závislý je ovšem útlum prostředí. Tento útlum je vždy největší na nejvyšších frekvencích. Atmosférický útlum je závislý na frekvenci, složení atmosféry (poměru kyslíku a dusíku), relativní vlhkosti, teplotě, atmosférickém tlaku a samozřejmě na vzdálenosti. Atmosférický útlum dosahuje v rámci reálně dosažitelných teplot a vlhkostí až na úroveň, kdy například pro vzdálenost 50 metrů od zdroje se body relativního útlumu -6 dB objevují oblasti až $5-6$ kHz, čemuž v oblasti okolo 10 kHz odpovídají útlumy až -10 dB.

V rámci diplomové práce byla v prostředí Matlab napsána funkce pro výpočet atmosférického útlumu ve vzduchu pod normy ISO 9613-1:1993. Funkce má vstupní proměnné frekvenci (Hz), teplotu ($^{\circ}\text{C}$), relativní vlhkost (%), vzdálenost (m) pro výpočet útlumu pro konkrétní vzdálenost a atmosférický tlak (kPa). Na obrázku 1.3 je ukázka grafického vyjádření útlumu se vzdáleností pro shodné nastavení teploty a relativní vlhkosti.



Obr. 1.3: Atmosférický útlum pro 20°C a 50% relativní vlhkost vzduchu

1.2 Základní veličiny akustického pole

V této části budou definovány základní veličiny zvukového pole, na jejichž definice se odkazují další části této práce.

1.2.1 Akustický tlak

Akustický tlak je rozdíl mezi okamžitou hodnotou tlaku v daném místě za přítomnosti zvuku a hodnotou atmosférického tlaku. Atmosférický tlak tvoří v celkovém tlaku stejnouměrnou složku a akustický tlak tvoří složku střídavou, neboť je superponovaný na atmosférickém tlaku, který v rámci kratších časových úseků můžeme považovat za konstantní.

Jednotkou tlaku je pascal (Pa), tedy podle soustavy SI 1 N/m^2 . Atmosferický tlak se pohybuje okolo hodnoty 1000 hPa. Tzv. *normální atmosferický tlak* má hodnotu 1013,25 hPa a vyjadřuje průměrný tlak na hladině moře na 45. rovnoběžce. Akustický tlak má hodnoty podstatně nižší - slyšitelný rozsah se pohybuje zhruba do $2 \cdot 10^2 \text{ Pa}$ ($140 \text{ dB}_{\text{SPL}}$). Z toho vyplývá, že superponovaná střídavá složka dosahuje nanejvýš řádově tisíckrát menší hodnoty. Šíření zvuku ve vzduchu lze proto považovat za lineární.

Tlak je skalární veličina, definovaná jako síla působící na jednotku plochy, tedy

$$p(t) = \frac{\mathbf{F}(t)}{S}. \quad (1.6)$$

V lineární oblasti, což v oblasti zvuku znamená všechny standardní jevy v běžném životě, s výjimkou např. sonického třesku při překročení rychlosti zvuku nebo při zahřměním blesku při bouřce v blízkém poli těchto zdrojů zvuku, lze používat pro akustický tlak symbolicko-komplexní reprezentaci pomocí fázoru akustického tlaku a pomocí komplexoru. To předpokládá, že atmosferický tlak je konstantní a že se klidová pozice polohového vektoru částice v čase menění. Poté lze vyjadřovat harmonické vlnění přímo jako

$$p_A = p_{\text{Am}} e^{j\varphi}, \quad (1.7)$$

kde p_A je fázor akustického tlaku, p_{Am} je maximální amplituda tlaku a φ je fázový úhel.

Pro další výpočty bude standardně uváděna efektivní hodnota akustického tlaku, která se pro harmonické signály spočítá jako

$$p_{\text{Aef}} = \frac{p_{\text{Am}}}{\sqrt{2}}. \quad (1.8)$$

1.2.2 Akustická rychlost

Při působení rozdílných tlaků mají hmotné částice tendenci přesouvat se vždy ve směru od místa s větším tlakem k místu s menším tlakem. Pokud dochází k harmonickým změnám, kdy se mění směr gradientu tlaku, dochází k oscilaci okolo rovnovážné polohy. Aktuální vzdálenost vychýlení částice od rovnovážné polohy se nazývá *akustická výchylka* a její číselná hodnota je tedy funkcí času. K vychýlení z rovnovážné polohy dochází v libovolném směru, takže výchylku musíme považovat za prostorový, tedy třírozměrný, vektor

$$\xi(t, r_0) = r(t) - r_0, \quad (1.9)$$

Kde $r(t)$ je polohový vektor částice v čase t a r_0 je polohový vektor částice v její rovnovážné poloze.

Vektor akustické rychlosti získáme obdobně jako hodnotu rychlosti ve standardní mechanice - rychlost odpovídá první derivaci polohy (výchyly) podle času, tedy

$$v = \frac{d\xi}{dt} \quad (1.10)$$

kde ξ je akustická výchylka a v je *akustická rychlost*.

Akustická rychlost je tedy časově proměnná veličina, kterou je stejně jako akustickou výchylku nutné považovat za vektorovou.

1.2.3 Akustický výkon

Akustický výkon vyjadřuje celkovou energii zvukových vln vyzářenou zdrojem za jednotku času (jednu sekundu). Jednotkou akustického výkonu je watt, přičemž pro výpočet hladinového vyjádření akustického tlaku v decibelech 1.2.6 je stanovena referenční hodnota akustického výkonu jako $W_0 = 10^{-12}$ W. Akustický výkon lze například určit pomocí akustické intenzity, kdy pro celkový střední akustický výkon platí

$$W_S = \oiint_{(S)} \vec{I} \cdot \vec{n} \, dS, \quad (1.11)$$

W_S je střední akustický výkon generovaný zdroji uvnitř uzavřené plochy S a \vec{n} je jednotkový vektor ve směru normály k elementu plochy dS . [5]

1.2.4 Intenzita zvuku

Intenzita zvuku vyjadřuje střední hodnotu zvukové energie, která projde jednotkou plochy kolmou na směr šíření za jednotku času. Jednotkou je W/m^2 . Intenzita tedy vyjadřuje výkon přes jednotku plochy (m^2).

$$I = \frac{W}{S}, \quad (1.12)$$

kde W je akustický výkon a S je plocha, kterou vlnění prochází.

Pro periodické zvuky lze velikost intenzity vyjádřit vztahem

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)v(t)dt, \quad (1.13)$$

kde T je perioda harmonického kmitání, p je akustický tlak a v je velikost vektoru akustické rychlosti.

Pro hladinové vyjádření 1.2.6 intenzity zvuku je určena referenční hodnota $I_0 = 10^{-12} Wm^2$.

1.2.5 Specifická akustická impedance

Pro *akustickou impedanci* platí vztah

$$z_A = \frac{p}{vS}, \quad (1.14)$$

kde S je plocha, na kterou vlnění působí. V případě, kdy plocha $S = 1 \text{ m}^2$ poté označujeme z_0 jako *specifickou akustickou impedanci*, pro kterou platí

$$z_0 = \frac{p}{v}, \quad (1.15)$$

která představuje reakci prostředí na jednotku plochy zvukové vlny. Specifická akustická impedance je určena jak vlastnostmi prostředí tak také tvarem vlnoplochy akustické vlny dopadající na jednotkovou plochu.

1.2.6 Hladiny zvukových veličin

Abychom se při číselném vyjadřování více přiblížili téměř logaritmickému vnímání akustickému tlaku (resp. obecně úrovně resp. síly zvukových signálů obecně podle Fechner-Weberova zákona), vyjadřujeme zvukové veličiny hladinově, tedy logaritmicky. Tedy stanovíme poměr hledané/změřené hodnoty k hodnotě referenční a na tento poměr se potom aplikuje dekadický logaritmus. V případě akustického tlaku je referenční hodnotou $p_0 = 20 \text{ }\mu\text{Pa}$ (viz 1.1.3). Vztah pro výpočet hladiny akustického tlaku je

$$L_p = \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2}, \quad (1.16)$$

kde p_0 je referenční hodnota akustického tlaku a p je akustický tlak, který chceme hladinově vyjádřit. Jednotkou je jeden *bel*, bezrozměrné číslo vyjadřující obecný poměr. Číselné rozpětí *belů* je příliš hrubé a v praxi se používá jednotka číselně desetkrát větší (s předponou deci), tedy *decibel* (dB).

Celý výpočet hladinového vyjádření v decibelech pak je

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2. \quad (1.17)$$

Po úpravě:

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}. \quad (1.18)$$

Obdobným vztahem lze vyjádřit také další zvukové veličiny, například napětí nebo úroveň vzorků v bitech odpovídající signálu převedenému z akustické domény na elektrickou nebo digitální.

Decibely vyjadřují nativně poměr dvou výkonů a proto jsou ve rovnici 1.16 akustické tlaky v kvadrátu a umožňují úpravy dle rovnic 1.17 a 1.18. Tyto úpravy nejsou

možné pro veličiny úměrné přímo výkonu, např. tedy akustický výkon nebo akustická intenzita. Pro tyto veličiny platí, že pro vyjádření v decibelech se jejich poměr po logaritmování vynásobí 10, tedy např.

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}, \quad (1.19)$$

pro výpočet hladiny intenzity zvuku viz (1.2.4) nebo

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0}, \quad (1.20)$$

pro výpočet hladiny akustického výkonu (viz 1.2.3).

1.2.7 Sčítání zvukových signálů

Ke sčítání zvukových signálů nestačí znát pouze jejich konkrétní úrovně (tedy například akustický tlak vyjádřený v pascálech nebo jeho hladinové vyjádření v decibelech), ale je nutné znát i jejich vzájemný vztah. Z pohledu kmitočtů jde o signály. Pro konkrétní kmitočet je tento vztah vyjádřen fázovým rozdílem, tedy rozdílem dvou absolutních fáze dvou signálů. Pro součet zvukových signálů je tedy nutné použít sčítání fázorů akustického tlaku jednotlivých vlnění.

Při sčítání fázorů musíme postupovat vektorově. Pokud p_1 a p_2 jsou jednotlivé akustické tlaky a φ_1 a φ_2 jsou odpovídající absolutní (počáteční) fáze daných signálů, potom pro jednotlivé složky výsledného fázoru p_x a p_y platí

$$p_x = p_1 \cos(\varphi_1) + p_2 \cos(\varphi_2) \quad (1.21)$$

$$p_y = p_1 \sin(\varphi_1) + p_2 \sin(\varphi_2). \quad (1.22)$$

Pro amplitudu výsledného fázoru potom platí

$$p_c = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \quad (1.23)$$

Po dosazení rovnic 1.21 a 1.22 do rovnice 1.23 získáme rovnici pro výpočet výsledné amplitudy akustického tlaku po součtu daných signálů.

$$p_c = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2p_1p_2 \cos(\Delta\varphi)}, \quad (1.24)$$

Z rovnice 1.24 je zřejmé, že součet dvou akustických tlaků nezávisí pouze na jejich úrovních (intenzitách), ale také na vzájemném fázovém rozdílu mezi nimi vyjádřeném jako $\cos(\Delta\varphi) = \varphi_1 - \varphi_2$. Do rovnice 1.24 nyní můžeme dosazovat konkrétní hodnoty. Pokud dosadíme dva signály se stejnou úrovní, tedy $p_1 = p_2 = p$, dostaneme vztah

$$p_c = \sqrt{2p^2 + 2p^2 \cos(\Delta\varphi)}. \quad (1.25)$$

Funkce cosinus nabývá hodnot v rozsahu $\langle -1, 1 \rangle$, přičemž po dosazení -1 vychází výsledný akustický tlak 0 Pa (vyjádřeno v decibelech podle vztahu 1.18 je to $-\infty \text{ dB}_{\text{SPL}}$). Toto odpovídá fázovému rozdílu 180° , tedy situaci, kdy signály jsou v daném časovém úseku totožné, ale jeden má oproti druhému otočenou polaritou, tedy v daném časovém úseku jsou tyto dva signály vůči sobě inverzní.

Pokud do rovnice 1.25 dosadíme za $\cos(\Delta\varphi) = 1$, což odpovídá fázovému rozdílu 0° , případně celočíselnému násobku periody, získáme vztah

$$p_c = \sqrt{2p^2 + 2p^2} = 2p, \quad (1.26)$$

což tedy znamená, že sečtení dvou stejných harmonických signálů se stejnou úrovní a stejnou nulovým fázovým rozdílem znamená zdvojnásobení akustického tlaku. Vyjádřeno v decibelech podle rovnice 1.18 znamená zdvojnásobení akustického tlaku zesílení (relativní kladnou změnu) $+6 \text{ dB}_{\text{SPL}}$.

Pokud do rovnice 1.25 budeme dosazovat vektor fázových rozdílů od 0 do 2π (tedy 0° až 360°), můžeme si graficky zobrazit závislost součtu resp. odečtu dvou signálů v na jejich relativní fázovém rozdílu $\Delta\varphi$.

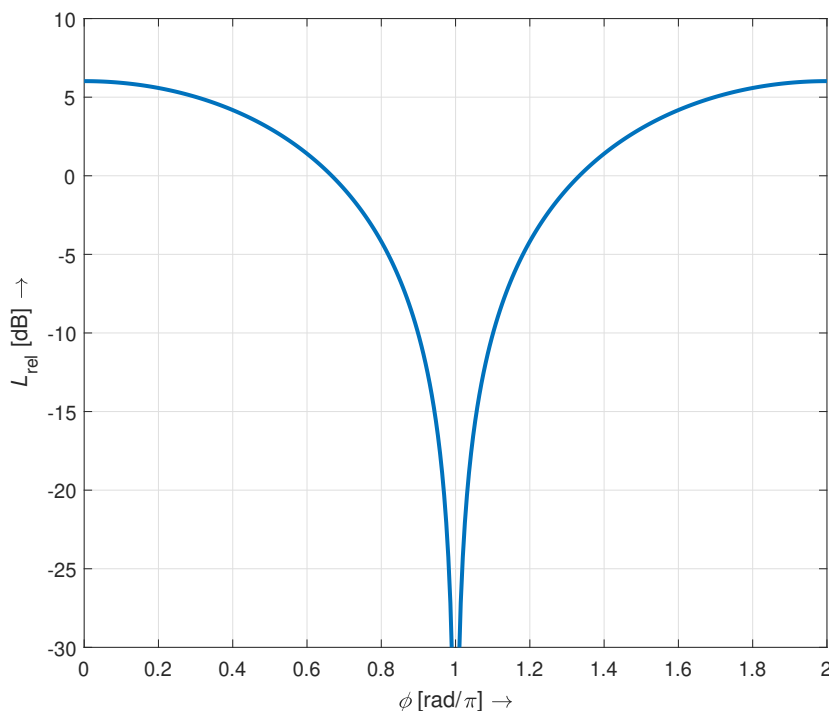
Z praktických důvodů budu od tohoto okamžiku vyjadřovat fázové rozdíly pomocí stupňů, protože radiány mají pro toto téma příliš hrubou jednotku a je nutné pracovat v nepřiliš přehledných zlomcích.

V tomto případě počítáme s nekonečně dlouhým harmonickým kmitáním, čili k ose fázového rozdílu lze přičíst nebo od ní odečíst libovolný násobek periody, tedy 2π nebo 360° . Pro všechny následující fázové údaje tedy lze uvádět

$$\varphi = \varphi + n \cdot 360,$$

pro libovolné celé číslo n . Pro přehlednost zápisu budu tento zápis vynechávat.

V grafu 1.5 jsem rozdělil oblasti relativní fáze na základní celky podle zlomových bodů součtu dvou signálů. Celou jednu polovinu kruhu, konkrétně v oblasti od -90° (tedy 270°) po dochází k zisku více než $+3 \text{ dB}$ (více než dvojnásobek výkonu). Oblast od -120° (tedy 240°) do 120° vymezuje takové fázové rozdíly, pro které platí, že přičtení druhého signálu znamená oproti jednomu samotnému signálu zisk. Mezní fázový rozdíl je právě $\pm 120^\circ$, při kterém nedochází k žádnému zisku oproti jednomu samostatnému signálu, ale zároveň také nedochází k žádné ztrátě. V rovnici 1.25 totiž $\cos(\Delta\varphi) = -0,5$ pro $\varphi = 120^\circ$. Další oblast (v grafu 1.5 vyjádřena oranžovou barvou) je oblast, ve které dochází k útlumu v rozsahu 0 až -6 dB . Tyto oblasti se nacházejí v rozsahu 120° až 150° a symetricky vůči ose 180° ještě v oblasti 210° až 240° . Zbývající oblast je v grafu vyjádřena červenou barvou a odpovídá útlumu většímu než 6 dB .

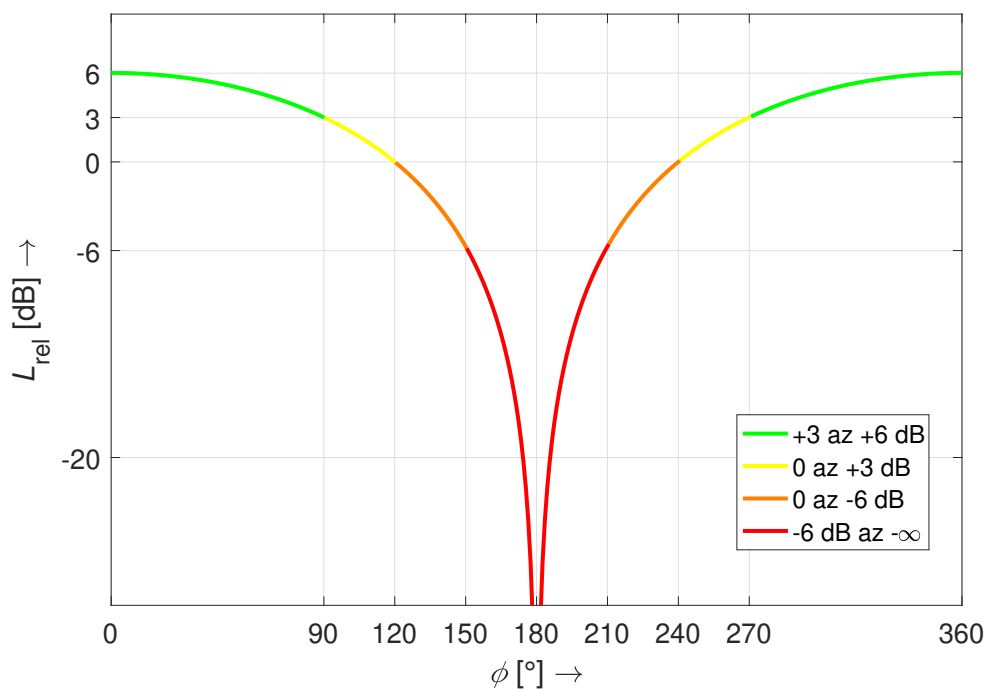


Obr. 1.4: Součet dvou signálů se stejnou maximální amplitudou v závislosti na relativní fázi

Data z grafu by se tedy také dala vyjádřit tak, že pro $2/3$ kruhu dochází k součtu, takže výsledek má hodnotu vyšší než jednotlivé signály zvlášť, zatímco v $1/3$ kruhu okolo 180° dochází k odečtu, tedy k situaci, kdy přidání dalšího zdroje zvuku znamená snížení celkové hladiny oproti každému samostatnému zdroji zvlášť.

Koherentní a nekoherentní signály

Dosavadní rovnice a grafy v sekci 1.2.7 počítaly s obecným součtem dvou signálů. Z pohledu sčítání úrovně signálu, tedy akustických tlaků, je nutné uvažovat dva typy signálů a to jsou signály koherentní a signály nekoherentní. *Koherentní* signály jsou takové signály, které mají vzájemný vztah, tedy obsahují signály, které vůči sobě mají nějaký fázový vztah. Z pohledu sčítání hladin zvuku jsou to tedy signály, které mají stejné kmitočty a které mají vůči sobě jiný než náhodný fázový vztah. Typicky se jedná například o časově nebo frekvenčně pozměněné kopie stejných signálů. Pro tyto signály platí všechny vztahy v sekci 1.2.7, tedy pro součet dvou signálů platí vztah 1.24 *Nekoherentní* signály jsou takové signály, které nemají shodný kmitočet (nevyužívají stejnou kmitočtovou oblast) nebo takové, které mají naprosto náhodný fázový vztah. V takovém případě lze jednotlivé přírůstky při součtu signálů počítat



Obr. 1.5: Základní rozdělení fázových rozdílů podle součtu pro signály o stejné úrovni

pomocí součtu energií (intenzit). Při vyjádření součtu intenzit pomocí akustických tlaků

$$L_{I_{\text{celk}}} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{I}{I_0}, \quad (1.27)$$

Intenzitu zvuku lze také na základě 1.12, 1.13 a 1.14 vyjádřit jako

$$I = \frac{P}{S} = p \cdot v = \frac{p^2}{z_0}. \quad (1.28)$$

Po dosazení 1.28 do 1.27 docházíme ke vztahu

$$L_{p_{\text{celk}}} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{p_i^2}{p_0^2}, \quad (1.29)$$

pro sčítání akustických tlaků jednotlivých nekoherentních signálů

Při porovnání se vztahem 1.24 resp. 1.25 je zřejmé, že pro sčítání nekoherentních signálů platí úplně stejná pravidla jako pro sčítání koherentních signálů, pouze za fázový rozdíl těchto dvou signálů je dosazeno 90° , což je efektivně aritmetický průměr v oblasti 0 až 180° . Poté tedy celý prvek vzájemného fázového vztahu ($\cos(90) = 0$) z rovnice 1.24 zmizí a zůstává pouhý součet kvadrátů akustických tlaků, tedy intenzitní součet.

1.2.8 Vlnová rovnice

Základní vztahy, které popisují zvukové pole v plynném prostředí, jsou *rovnice kontinuity*, *Eulerova rovnice* a *stavová rovnice plynů* [2].

$$\operatorname{div} \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1.30)$$

$$-\operatorname{grad} p = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}. \quad (1.31)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\kappa p_0}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1.32)$$

Rovnice kontinuity 1.30 popisuje spojitou změnu hustoty prostředí v závislosti na časové a prostorové změně akustické rychlosti.

1.2.9 Rychlostní potenciál

Pro jednodušší práci s řešením vlnové rovnice byla zavedena veličina nazývaná *rychlostní potenciál* Φ . Tato skalární veličina je definovaná tak, že její gradient je roven akustické rychlosti. [7]

$$\nabla \Phi = \vec{v}, \quad (1.33)$$

vyjádřeno v kartézských souřadnicích

$$\nabla \Phi = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k}, \quad (1.34)$$

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

Zavedení rychlostního potenciálu Φ přidáváme předpoklad, že ve zvukovém poli existuje pouze nevírové proudění, tedy že

$$\operatorname{rot} \vec{v} = 0. \quad (1.35)$$

Z Eulerovy rovnice 1.31 potom lze odvodit vztah mezi rychlostním potenciálem a akustickým tlakem

$$p' = -\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} + K, \quad (1.36)$$

kdy integrační konstanta K se obvykle bere rovna nule. [?]

Obecný tvar vlnové rovnice pro rychlostní potenciál je

$$\nabla^2 \Phi - c_0^{-2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0. \quad (1.37)$$

1.2.10 Vlnové číslo

Při řešení vlnové rovnice pro různá frekvenční pásma budeme předpokládat, že rychlostní potenciál Φ je harmonicky proměnný s časem a lze jej tedy vyjádřit ve tvaru

$$\Phi = \psi e^{j\omega t}, \quad (1.38)$$

kde ψ je amplituda harmonicky se měnícího rychlostního potenciálu, která je závislá pouze na souřadnici. Dosazením do vlnové rovnice 1.37 získáme *Helmholtzovu rovnici* ve tvaru

$$\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0, \quad (1.39)$$

kde k je *vlnové číslo*.

Úhlové vlnové číslo vyjadřuje vztah mezi úhlovým kmitočtem, kmitočtem a vlnovou délkou vlnění. Platí vztah

$$k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1.40)$$

kde λ je vlnová délka, ω je úhlový kmitočet a f je frekvence v Hz.

1.2.11 Akustický vysílač 0. řádu

K tomu, abychom mohli vytvořit prostorovou simulaci akustického pole, je nutné definovat zdroj zvuku, akustický vysílač.

Pro potřeby simulace postačí sférický vysílač 0.řádu, označovaný také jako monopól nebo taktéž pulzující koule. Pro účely dvourozměrné simulace budeme aplikovat změřenou směrovost na vyzařování kulového zdroje.

Z řešení vlnové rovnice pro divergentní kulovou vlnu šířící se ve směru souřadnice \mathbf{r} platí pro rychlostní potenciál pulzující koule následující vztah

$$\Phi = \frac{A}{r} e^{-jk r}. \quad (1.41)$$

Dále platí

$$p = -j\rho_0\omega\Phi = -j\rho_0kc_0\Phi. \quad (1.42)$$

Akustická rychlost musí být u pulzující koule shodná s rychlostí kmitání povrchu v_S , což je ve vzdálenosti R od počátku zvolených souřadnic. Z této rovnosti lze vyjádřit

$$A = -v_S \frac{R^2}{1 + jkR} e^{jkR}, \quad (1.43)$$

kde ϕ je rychlostní potenciál, v_S je rychlost kmitání povrchu, R je vlnové číslo a r je vzdálenost od počátku souřadnic. Tyto vztahy budou použity pro výpočet akustického tlaku v rámci simulace pokrytí stanoveného dvourozměrného prostoru.

1.2.12 Vlnová délka

Pro vyjádření vztahů koherentních zdrojů vůči sobě na daném kmitočtu budeme pracovat s *vlnovou délkou*, tedy vzdáleností dvou nejbližších bodů postupného periodického vlnění, které kmitají mají stejnou fázi.

Frekvenčnímu rozsahu slyšení 1.1.2, který je zhruba 20 Hz až 20 kHz, odpovídají vlnové délky v rozsahu zhruba 17 m až 17 mm. V grafické zobrazení sčítání dvou zdrojů v grafu 1.5, které vyjadřuje součet v závislosti na vzájemném fázovém rozdílu, lze pro konkrétní kmitočet nahradit časovým rozdílem dvou takto přicházejících signálů. Pro daný kmitočet a danou rychlost šíření (určenou zejména teplotou) lze taktéž tuto osu nahradit dráhovým rozdílem (vzdáleností) akustických středů těchto zdrojů, viz 3.5.

1.2.13 Pohltivost a odrazivost materiálů

Koeficient pohltivosti

Pro určení pohltivých vlastností materiálů byl zaveden *činitel zvukové pohltivosti* α jako poměr energií (resp. výkonů) signálu dopadajícího a signálu pohlceného.

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i}, \quad (1.44)$$

kde W_a je energie dopadající a W_i je energie pohlcená. Situace lze dále dělit na energii, protože část energie při nárazu na překážku s nějakou pohltivostí je absorbována a přeměněna se na teplo (W_q) a část energie projde stěnou W_t . Platí tedy, že energie absorbovaná je součet těchto dvou energií

$$W_a = W_q + W_t. \quad (1.45)$$

Veškerá zbývající energie se tedy odrazí W_r , tedy platí

$$W_i = W_a + W_r. \quad (1.46)$$

Z toho vyplývá, že *činitel zvukové pohltivosti* α může nabývat hodnot

$$0 < \alpha < 1, \quad (1.47)$$

kdy mezní příklad $\alpha = 0$ by odpovídal naprosto dokonalému odrazu a $\alpha = 1$ by odpovídal naprosto dokonalé absorpci.

Odras vlnění a difuze

Zvuková energie, která se odrazí od rovné překážky (definovaná v 1.2.13) se u rovných povrchů odráží podle Huygensova principu, kdy každý bod překážky, na který

dopadá vlnění, se stává zdrojem elementárního vlnění. Vnější obálka těchto elementárních vlnění následně vytvoří vlnoplochu, která má po odrazu stejný tvar, jako kdyby vlnění vycházelo ze zdánlivého bodu, který je umístěn za překážkou, zrcadlově s původním zdrojem zvuku. [6]

Toto platí pro ideálně rovné překážky. Jakmile je překážka zvlněná, začne se chovat jako sestava menších překážek, přestává tedy platit Snellův zákon a směr odrazu vlny již nemusí odpovídat pouze směru symetrickému s kolmicí v bodě dopadu, ale energie se rozprostírá i v dalších směrech. [16]

2 Simulace rozložení zvukového pole

Tato kapitola popisuje kód aplikace pro simulace zvukového pole více reálných zdrojů v otevřeném i uzavřeném prostoru.

2.1 Matlab

V rámci semestrální práce v prostředí Matlab v9.1 (R2016b) vytvořena funkce, která realizuje simulaci rozložení zvukového pole pro libovolný počet ideálních zdrojů ve 2D prostoru. Funkce umožňuje import reálně změřených směrových charakteristik. Funkce umožňuje počítat odrazy od stěn pomocí metody zrcadlových zdrojů prvního a druhého řádu s nastavitelným koeficientem pohltivosti α .

Prostředí Matlab umožňuje zpracovávat data pomocí vlastních souborových struktur a také tvorbu vlastního grafického uživatelského rozhraní.

2.2 Simulační program

Základním souborem pro simulaci je soubor "simulace.m", umístěný ve složce *Program*, který je funkcí napsanou v prostředí Matlab, která provádí výpočet výpočet pole akustického tlaku pro libovolný počet zdrojů.

```
function [x, y, L] = simulace(area, step, sourcex, sourcey, ...  
f, alpha, polarData, rotation, level, temperature)
```

2.2.1 Vstupní a výstupní proměnné

Výstupními proměnnými funkce jsou x, y a L , kde x a y jsou souřadnice 2D prostoru simulace (horizontální nebo vertikální) a L je matice hladin akustického tlaku na souřadnicích x a y . Rozsah hladin simulace na není na výstupu nijak omezen, čili očekává se, že při následném vykreslení dat se zvolí vhodný dynamický rozsah.

Výstupními proměnnými funkce jsou

area

Oblast simulace, definovaná jako vektor souřadnic v pořadí minimální a maximální hodnota na ose x a minimální a maximální hodnota na ose y . Souřadnice se zadávají v metrech.

step

Krok simulace, který stanovuje hrubost/jemnost diskretizace oblasti simulace pro jednotlivé vypočtené body. Za rozumný rozsah kroku simulace považují 0,1 m až 0,5 m. Krok simulace se zadává v metrech.

sourcex a sourcey

Vektory souřadnic zdrojů pro výpočet simulace. Tyto vektory mohou být libovolně dlouhé, simulační funkce nemá limit počtu zdrojů v simulaci. Souřadnice se zadávají v metrech.

f

Frekvence simulace. Společně s teplotou určuje vlnovou délku simulovaného kmitočtu a s tím související interakci zdrojů v simulaci při výpočtu rychlostního potenciálu. Frekvence se zadává v Hz.

alpha

Koeficient zvukové pohltivosti α se zadává ve formátu vektoru o délce čtyř prvků, kdy každý prvek odpovídá jedné ze stěn. První zadaná stěna je stěna vizuálně vlevo, tedy stěna u minimální souřadnice osy x. Další prvky jsou zadávány po směru hodinových ručiček.

polarData

Vektor útlumu v závislosti na úhlu, tedy směrovost zdroje vyjádřená pomocí vektoru. Lze zadat libovolný počet prvků, které jsou zpracovány tak, že první prvek odpovídá ose vyzařování (resp. ose reproboxu) a poslední prvek je poslední prvek před úhlem 360° , tedy například pro data s přesností 5° odpovídá poslední zadané číslo úhlu 355° .

rotation

Je vektor rotace jednotlivých zdrojů. Délka vektoru musí být stejná jako délka vektorů **sourcex** a **sourcey**. Rotace se zadává ve stupních a může být vložena jako kladné i záporné celé číslo a výchozí směr 0° odpovídá směru kladné části osy y.

level

Je vektor, který udává relativní rozdíl úrovní jednotlivých zdrojů zadaných ve stejném pořadí jako v předchozích parametrech. Pomocí tohoto vektoru lze změnit úroveň jednotlivých zdrojů vůči sobě pro účely simulace. Úrovně se zadávají v decibelech a výchozí hodnota pro zdroje stejné hlasitosti je tedy vektor plný nul. Vektor musí mít stejnou délku jako **sourcecx** a **sourcecy**.

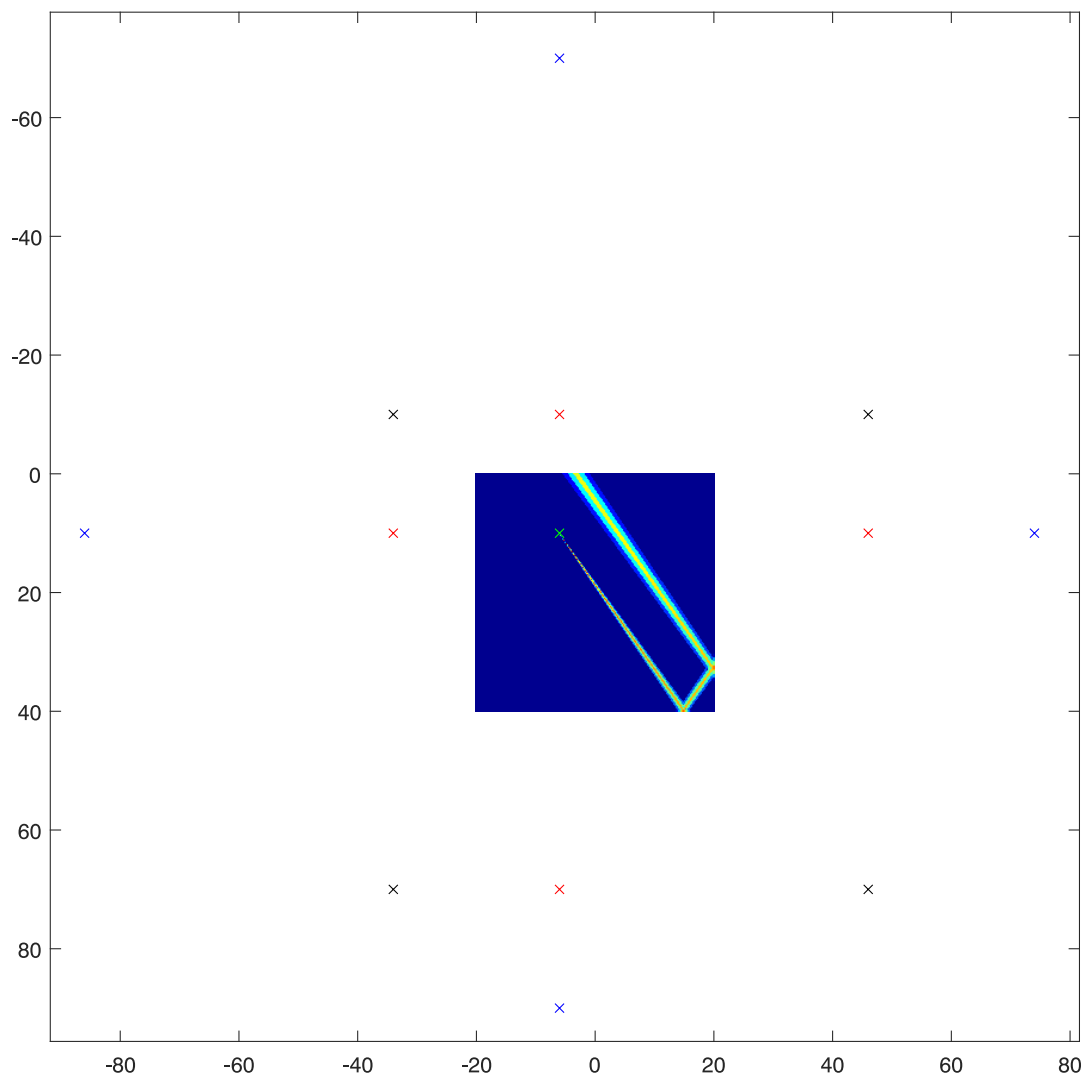
temperature

Je nepovinný údaj, který zadává teplotu vzduchu, pro kterou je simulace počítána. Pokud tato vstupní proměnná není zadána, počítá se s teplotou 20°C a za rychlost šíření je pak považována rychlost 343 m/s.

2.3 Výpočet zrcadlových zdrojů

Pro simulační program byla zvolena metoda zrcadlových zdrojů druhého řádu. Druhý řád zrcadlových zdrojů dostatečně přesně simuluje situaci pro účely směřování reálných reproboxů, neboť odrazy vyšších řádů jsou úrovněmi tak nízko, že se v simulaci směřových zdrojů téměř neprojeví. Na obrázku 2.1 jsou zobrazeny pozice zrcadlových zdrojů. V samotné simulační ploše je vidět testovací zdroj (zelený křížek) a testovací úzký paprsek. Simulace počítá se stoprocentní odrazivostí a paprsek na horní stěnu dopadá s útlumem zhruba 30 dB oproti situaci ve středu sálu.

Výpočet pozic zrcadlových zdrojů byl získán kódem 2.1, kde N je počet všech zdrojů zadaných do simulace (tedy délka proměnných **sourcecx**, **sourcecy**, **rotation** a **level**).



Obr. 2.1: Pozice zrcadlových zdrojů

Výpis 2.1: Výpočet pozic zrcadlových zdrojů prvního a druhého řádu

```

for n = 1:N

sourcexx = [sourcexx ... %predchozi zdroje
sourcex(n) ... %primy zdroj
area(1) - abs(area(1)-sourcex(n)) ... %west
sourcex(n) ... %north
area(2) + abs(area(2)-sourcex(n)) ... %east
sourcex(n) ... %south
area(2) + abs(area(2)-(area(1) - abs(area(1)-sourcex(n))))
... %EE (W to E)
sourcex(n) ... % SS (N to S)
area(1) - abs(area(1)-(area(2) + abs(area(2)-sourcex(n))))
... % WW (E to W)
sourcex(n)...% NN (S to N)
area(1) - abs(area(1)-sourcex(n))... % NW (W to N)
area(2) + abs(area(2)-sourcex(n))... % NE (N to E)
area(2) + abs(area(2)-sourcex(n))...% SE (E to S)
area(1) - abs(area(1)-sourcex(n)) % SW (S to W)
];

sourceyy = [sourceyy ... %predchozi zdroje
sourcey(n) ... %primy zdroj
sourcey(n) ... %west
area(3) - abs(sourcey(n)-area(3)) ... %north
sourcey(n) ... %east
area(4)+ abs(area(4)-sourcey(n)) ... %south
sourcey(n) ... %EE (W to E)
area(4)+ abs(area(4)-(area(3) - abs(sourcey(n)-area(3))))
... % SS (N to S)
sourcey(n) ... % WW (E to W)
area(3) - abs((area(4)+ abs(area(4)-sourcey(n)))-area(3))
... % NN (S to N)
area(3) - abs(sourcey(n)-area(3))... % NW (W to N)
area(3) - abs(sourcey(n)-area(3))... % NE (N to E)
area(4)+ abs(area(4)-sourcey(n))... % SE (E to S)
area(4)+ abs(area(4)-sourcey(n)) % SW (S to W)
];
end

```

Odrazivost a rotace pro zrcadlové zdroje jsou následně získány podle kódu 2.2.

Výpis 2.2: Výpočet amplitud a rotací zrcadlových zdrojů

```

for n = 1:N

% prepočet amplitud zrcadlových zdroju
tempvs = [tempvs... $ predchozi zdroje

```

```

vs(n) ... $ primy zdroj
alpha(1).*vs(n) ... % west
alpha(2).*vs(n) ... % north
alpha(3).*vs(n) ... % east
alpha(4).*vs(n) ... % south
alpha(3)*alpha(1).*vs(n) ... %W to E
alpha(4)*alpha(2).*vs(n) ... %N to S
alpha(3)*alpha(1).*vs(n) ... %E to W
alpha(4)*alpha(2).*vs(n) ... %W to E
alpha(1)*alpha(2).*vs(n) ... %W to N
alpha(3)*alpha(2).*vs(n) ... %N to E
alpha(3)*alpha(4).*vs(n) ... %E to S
alpha(1)*alpha(4).*vs(n)... %S to W
];

% prepočet rotaci zrcadlových zdroju
rotationList = 2* [rotationList/2
... % předchozí zdroje
rotation(n) ... %primy
-rotation(n) ... %west
180-rotation(n)... %north
-rotation(n) ... %east
180-rotation(n)... %south
rotation(n) ... %west to east
rotation(n) ... %north to south
rotation(n) ... %east to west
rotation(n) ... %south to north
180+rotation(n) ... %% NW (W to N)
180+rotation(n) ...%% NE (N to E)
180+rotation(n) ...%% SE (E to S)
180+rotation(n) %% SW (S to W)
];
end

```

Pro každý bod plochy simulace je následně spočítán akustický tlak odpovídající bodovému zdroji a je aplikován útlum, který odpovídá danému směru šíření ve vztahu ke zdroji zvuku a jeho rotaci v prostoru.

Výpis 2.3: Výpočet jednotlivých rychlostních potenciálů

```

for o = 1:length(sourcexx) % pro vsechny zdroje, vcetne zrcadlovych

% amplituda a faze zdroje
A = tempvs(o).*exp(j.*tempph(o));

% pole kartezkych souradnic
[xx, yy] = meshgrid(x,y);

```

```

% prepočet na pole polárních souřadnic
[th, r] = cart2pol(xx-sourcexx(o), yy-sourceyy(o));

% zamezení delení nulou, minimalní krok je odpovídá
% nastavené diskretizaci
r(r<step) = step;
% rotace vektoru směrnosti pro daný zdroj
tempPolar_dB = circshift(polarData,rotationList(o));

[mmm,nnn] = size(th);
endsize = mmm*nnn; %pocet bodu simulace

%inicializace vektoru indexTheta
indexTh = zeros(1,endsize);

for i = 1:endsize % pro vsechny body simulace

    % nalezení nejbližšího theta ve zvoleném gridu
    [~,closestIndex] = min(abs(th(i) - th_grid));
    % zápis utlumu v daném směru, prepočteny
    % z hladinového vyjádření na lineární
    indexTh(i) = 10^(tempPolar_dB(closestIndex)/20);
end

%prepočet vektoru utlumu do tvaru matice
normTH =reshape(indexTh, mmm, nnn);

% výpočet rychlostního potenciálu daného zdroje
Phio = normTH.*A0.*A.*exp(-j.*k.*r)./r;
% celkový rychlostní potenciál
% (přičtení aktuálního zdroje k předchozím)
Phi = Phi + Phio;
end

```

2.4 Vstupní data

K otestování a následně k ohodnocení horizontálního konfigurací byly použity následující data.

2.4.1 Změřené charakteristiky

V bezdrazové komoře byly změřeny charakteristiky několika boxů pro účely otestování možností importu. Měření probíhalo na automatizovaném otočném stole v

systému PULSE od firmy Brüel&Kjaer. Měření probíhalo v třetinooktávních pásmech od frekvence 100 Hz výš a úhlová přesnost měření byla 5°. V rámci možnosti importu takto naměřených dat jsem vytvořil skript *importZmerenychDat.m*, který je dostupný ve složce *ImportData* v příloze. Ve složce *Změřená data* také naleznete ukázkou takto změřených dat ve formátu ASCII exportu uloženého do tabulky MS Excel ve formátu .xlsx. Konkrétně jde o měření reproboxu Gravelli Bespoke Audio Virtuoso v horizontálním směru. Skript načte data a po nutném formátování data uloží do nového souboru *.mat, se kterým následně Matlab může snadno a rychle pracovat. Pomocí tohoto kódu lze importovat libovolná data změřená v prostředí systému PULSE.

2.4.2 Generic Loudspeaker Library

Generic Loudspeaker Library je formát souboru vyvinutý firmou AFMG. Je to formát, ve kterém údaje o směrovosti svých reproboxů udává většina výrobců komerčního světa. Existují i další formáty konkurenčních firem, jako například soubory CLF nebo soubory Ulysses UNF, ale žádný z nich není zdaleka tolik rozšířen. Je to také standardní formát pro specifikaci reproduktoru pro použití se softwarem EASE. Tento formát souboru bohužel nemá otevřenou strukturu, ale firma AFMG vyvinula program *GLL Viewer*, který umožňuje zobrazování a částečně i exportovat data ze souborů typu .GLL. Program umožňuje zobrazit pro konkrétní frekvenci zároveň polární grafy pro horizontální i vertikální osu a exportovat tyto dva grafy ASCII textového souboru.

2.4.3 Import externě získaných dat

Pokud se soubory exportované z programu *GLL Viewer* 2.4.2 uloží do složky, kdy názvem textového souboru je frekvence odpovídající danému grafu, potom lze použít pro import dat v této složce skript s názvem *ImportFolder.m*, dostupný ve složce *ImportData/GLL Viewer*, který byl naprogramován tak, aby automatizoval import takto získaných dat a opět je uložil do nového souboru *.mat, se kterým následně lze v Matlabu snadno pracovat. Takto získaný soubor *.mat obsahuje vektor frekvencí s názvem *FreqList* a buňku s názvem *Speaker1*, která obsahuje data vždy zároveň pro horizontální a vertikální směrovost. Čili poté lze snadno po načtení jednoho souboru volit mezi horizontálním a vertikálním vyzařováním, jednoduchou volbou sloupce v odpovídající tabulce uvnitř buňky. Příklad takovéto vertikální simulace lze najít ve složce *Program*, kde je soubor *manualniSpousteniSimulace.m*, který je zde připraven pro účely, pro které by grafické rozhraní uzpůsobené pro studování problematiky horizontálního směřování reproboxů nevyhovovalo.

2.4.4 Koeficient akustické pohltivosti

Pro účely simulace odrazů reálných materiálu byly vloženy koeficienty akustické pohltivosti vybraných materiálu, které se typicky objevují na stěnách větších ozvučovaných prostor.[4] Konkrétně jde o:

- Zděnou, vymalovanou stěnu
- Neopracovaný beton
- Sklo o tloušťce 3 mm
- Dřevěné obložení o tloušťce 12 mm
- Textilní závěs umístěný 130 cm od zdi, s hustotou $0,5 \text{ kg/m}^2$
- Textilní závěs umístěný 9 cm od zdi, s hustotou $0,2 \text{ kg/m}^2$
- Minerální vata o tloušťce 5cm, s hustotou 40 kg/m^3

Data o jednotlivých koeficientech jsou vložena do tabulky *Absorbtion.xlsx*, kde je lze libovolně upravovat nebo doplňovat. Po takové úpravě je nutné spustit skript *importAbsorbtion.m*, který převede data z tabulky .xlsx na *Absorbtion.mat* soubor, který se následně použije v grafickém rozhraní a při výpočtu. Zadaná data jsou v typicky dostupném frekvenčním rozsahu 125 Hz až 8 kHz a to v oktávových pásmech. Pro přepočtení na třetinooktávová pásma je použita pchip interpolace, která vytváří hodnoty pro všechny mezilehlé kmitočty a vždy jeden krajní kmitočet (tedy 100 Hz a 10 kHz). Ostatní hodnoty nejsou definované a simulace při zapnutých odrazech se chová jako kdyby pohltivost materiálu byla nulová. Z teorie je zřejmé (např. i díky 1.3) že nejvyšší kmitočty nebudou od zrcadlových zdrojů odcházet s minimálním útlumem, naopak lze spíše čekat opačný případ. Simulační program, i jeho grafické rozhraní, umožňují odrazy úplně vypnout.

2.5 Grafické uživatelské rozhraní

V prostředí Matlab bylo vytvořeno grafické rozhraní, které vyvolává simulační funkci 2.2 a kterou také graficky vykresluje a umožňuje rychlou a snadnou úpravu parametrů pro jeden až dva zdroje v horizontální rovině pro otestování konfigurací dle 4.

Grafické rozhraní se skládá ze dvou souborů ze složky *Program*: *GUI_stereo_konfigurace.fig* a *GUI_stereo_konfigurace.m*, kdy spuštění druhého z nich otevře grafické rozhraní.

2.5.1 Ovládací prvky grafického rozhraní

Grafické rozhraní obsahuje následující prvky:

Graf simulace zdrojů

Graf je umístěný vlevo a vykresluje výstup funkce 2.2 dle zadaných parametrů uvnitř grafického rozhraní.

Načtení směrové charakteristiky

Načtení směrové charakteristiky otevře dialogové okno s načtením dat získaných podle 2.4. Je nutné najít tímto způsobem vytvořený soubor s příponou *.mat*. Ve složce *data/speakers* jsou k dispozici polární data s horizontální i vertikální směrovaností (kromě souboru *Gravelli.mat*), který obsahuje pouze data horizontální.

Frekvence

Sloupec frekvencí umístěný zhruba uprostřed okna se mění podle frekvenčního rozsahu načtených dat. Pokud načtená data nemají k dispozici některé třetinooktávové kmitočty, v seznamu se nezobrazí a simulace na nich tedy nepůjde spustit.

Rozměry a pozice

V této části grafického rozhraní lze vybrat rozměry auditoria (zadané jako šířka a hloubka v metrech), následně diskretizaci scény, umístění PA a tzv. *intilt* viz. 4.1.2. Umístění PA (ozvučovacího systému) definuje vzdálenost zdrojů mezi sebou (umístěných symetricky podél osy simulace) a hloubka vyjadřuje jak velký je odstup mezi zadní stěnou a simulovanými zdroji zvuku. V případě živého ozvučování je tento rozměr typicky dán hloubkou pódia. *Intilt* vyjádřený ve stupních vyjadřuje jak moc jsou reproboxy stočeny dovnitř oproti výchozí situaci, která je 0° ve směru osy y. *Intilt* lze samozřejmě zadat i jako záporné číslo, což znamená vytočení ozvučovacího systému směrem od středové osy.

PA control

V této sekci je na výběr možnost volby úrovně pravého zdroje oproti levému. Výchozí hodnota je 0 dB, kladné číslo znamená, že pravý zdroj bude silnější a záporné číslo znamená, že zdroj bude slabší. Zaškrtnutí políčka (tzv. check boxy) *Mute LEFT* a *Mute RIGHT* způsobí úplné vypnutí jednoho ze zdrojů zvuku v simulaci.

Teplota

Zde se zadává teplota pro výpočet simulace, v jednotkách °C.

Materiál stěn

V této části lze volit ze seznamu dostupných frekvenčně závislých absorpcí načtených ze souboru *Absorption.mat* (viz. 2.4.4). Pod nabídkou s výběrem materiálu se po každé spuštěné simulaci vypíše koeficient pohltivosti na daném kmitočtu pro daný materiál.

Odrazy

V této sekci lze globálně vypnout nebo zapnout výpočet odrazů. Také jsou zde zaškrtačací políčka pro jednotlivé stěny, čímž se nahradit některou ze stěn materiálem se stoprocentní pohltivostí, díky čemuž si lze zobrazit například vliv odrazů způsobených jednou konkrétní stěnou.

Dynamický rozsah vykreslení a x dB/barvu

Dynamický rozsah vykreslení umožňuje zvolit si dynamický rozsah hladiny akustického tlaku použitého pro vykreslení. Poměrně vhodný dynamický rozsah je 30 dB nebo 40 dB, kdy lze snadno vidět vztahy důležité pro ohodnocení vyrovnanosti pokrytí a zároveň jsou nepokrytá místa zobrazena s dostatečným kontrastem. Zaškrtačací políčko *x dB/barva* změní výchozí gradientní vykreslení přes určený dynamický rozsah podle *colormapy* "jet" na vlastní barevnou škálu, která rozdělí zobrazené škálování na 10 diskretních dílů, čímž se ztratí nuance o stojatém vlnění, ale obrázek se může v nějaké situaci stát přehlednějším pro účely kontroly pokrytí. Při použití výchozího dynamického rozsahu 30 dB potom jeden barevný odstín odpovídá 3 dB.

Tlačítko VYKRESLIT

Jak název napovídá, tlačítko VYKRESLIT spustí simulaci s aktuálně zadanými parametry uvnitř grafického rozhraní a výsledek simulace vykreslí do grafu.

3 Návrh ozvučovacích systémů

Tato kapitola se věnuje principům návrhu ozvučovacích systému. Definuje předpoklady, cíle, nástroje a limity této disciplíny.

3.1 Obecné cíle SSD

Cílem SSD (návrh ozvučovacích systému – Sound System Design) je zajistit rovnoměrnou distribuci referenčního zvukového signálu všem posluchačům. Teoretickým ideálem by bylo poskytnout všem lidem v auditoriu naprosto shodný zvukový zážitek, tedy stejnou úroveň signálu, stejnou tonalitu, stejný vjem prostoru a stejnou lokalizaci zdrojů zvuku ve všech třech rovinách. Všichni posluchači by zároveň museli mít i shodný poměr přímých a odražených vln.

Tento teoretický ideál je samozřejmě v ozvučovací praxi naprosto utopickou představou a nejspíš jediný způsob, jak tohoto dosáhnout, by bylo rozdat všem posluchačům stejná sluchátka se stejným signálovým řetězcem a bez možnosti měnit hlasitost. V následující kapitole budou zadefinovány realističtější cíle pro jednotlivé parametry.

3.2 Získání dat pro návrh systému

Získání správných informací prostorové dispozici daného sálu je jeden z nejzásadnějších kroků při tvorbě návrhu ozvučovacího systému. Je totiž nutné vhodně zvolit vymezení prostor, kde se budou vyskytovat diváci určitý prostor, pro který je vhodné se snažit dosáhnout minimálních odchylek v hladinách akustického tlaku, případně odchylek v úrovních v nějakých konkrétních frekvenčních pásmech.

3.2.1 Analýza prostoru

Před začátkem vlastního návrhu ozvučovacího systému je nutné získat a uspořádat souhrnné informace o ozvučovacím prostoru. Zejména je nutné znát základní rozměry prostoru jako jsou délka, šířka, výška a parametry elevací a balkonů. Bez těchto esenciálních informací o ozvučovaném prostoru nelze pokračovat v návrhu.

Další velmi zásadní informace, pokud jde o uzavřené prostory, je odrazivost všech stěn, případně i stropu a podlahy. Je dobré znát i pozice a rozměry významných překážek jako jsou čela balkonů, zdi, klenby stropů atp a i jejich koeficienty odrazivosti.

3.2.2 Segmentace prostoru

Je důležité znát přesnou definici jednotlivých částí daného prostoru, zejména auditoria a pódia, případně jiného prostoru, který nahrazuje funkci pódia ve smyslu zdroje, je zásadní pro správnou volbu. To může například znamenat umístění obrazovky nebo projekčního plátna v prostoru určeném pro promítání, nebo obecně množinu takových prostorů nebo bodů, pokud má požadavek na ozvučení v tomto ohledu složitější ráz a má sloužit např. v rámci nějaké 3D audio instalace nebo obecně multimediální instalace, kde nejde jednoznačně stanovit jeden prostor zdrojů.

Výstupem tohoto kroku je definice segmentů zejména prostoru, ve kterých se posluchači vyskytovat budou (včetně informace, jestli se v daném prostoru bude stát nebo sedět), a segmentů, kde se posluchači určitě vyskytovat nemůžou.

3.2.3 Zjištění charakteru plánované produkce

Pro následující body je nutné znát charakter plánované produkce. Znalost charakteru produkce umožňuje stanovit priority pro jednotlivé segmenty prostoru a určit i očekávaný požadavek na frekvenční rozsah ozvučovacího systému. S tím související určení minimální požadované hladiny akustického tlaku, kterou musí systém v auditoriu umět vytvořit. Každý typ produkce s sebou nese i typický dynamický rozsah, typický crest factor a typickou spektrální obálku. Tyto parametry lze shrnout do parametru *headroom*, který je vhodné definovat pro frekvenční pásma, která odpovídají buďto jednotlivým komponentům ozvučovacích soustav (např. středovýškové, basové, subbasové) nebo přímo jednotlivým měničům pro daná pásma. Jejich přepočítání na reálné komerčně dostupné soustavy samozřejmě vždy závisí na tom, do jaké míry je zvolený systém daného výrobce modulární, a tedy jestli a jak lze v případě potřeby škálovat.

3.2.4 Příklady vlivu charakteru reprodukce na návrh systému

Typickým příkladem zásadního vlivu charakteru plánované produkce je rozdíl mezi mluveným slovem (např. divadelní představení s ozvučenými herci, diskuzní pořad, konference, přednáška, zasedání atd.) a koncertem elektronické taneční hudby.

Elektronická taneční hudba (EDM) obvykle vyžaduje úroveň basové a subbasové složky spektra v poměru k oblasti středů okolo (1 kHz) řádově 12 a více dB. Dále jsou vyžadovány akustické tlaky $L_A > 100$ dB SPL a $L_C > 115$ dB SPL. Zvukový systém musí být schopen vyprodukovat i ty nejnižší subbasové tóny s vysokou hlasitostí a crest factor referenčního signálu bude velmi malý, nejčastěji pod 10 dB. Požadavek na rovnoměrnost pokrytí a srozumitelnost bývá typicky lehce upozaděn za frekvenčním rozsahem, požadovaným SPL, případně vzhledem.

Naproti tomu mluvené slovo může v tichém prostředí být uspokojivě nahlas již od řádově 60-70 dB SPL u uší diváků. U mluveného slova je prakticky vždy na prvním místě srozumitelnost. Srozumitelnost silně souvisí s maskováním zvuku a je závislá také např. na hluku pozadí, hlasitosti zdroje nebo poměru přímého a odraženého zvuku. Pro mluvené slovo stačí obecně výrazně menší frekvenční pásmo a poměr basových frekvencí ku středním frekvencím v oblasti okolo 1 kHz se klidně může pohybovat od 0 dB po nízké jednotky decibelů.

3.2.5 STI

STI (index přenosu řeči – Speech Transmission Index) je objektivně měřitelný parametr pro určení srozumitelnosti. Pro reálné měření na ozvučovacích systémech se používá modifikace STIPA (Speech Transmission Index for Public Address Systems). Index je v rozsahu 0–1, přičemž výsledek je rozdělen do různých kategorií od ideální kategorií A+ (kde $STI > 0,76$), která je v ozvučovací praxi téměř nedosažitelná a odpovídá např. nahrávacím studiím. Kategorie F, kde STI je v rozsahu 0,48–0,52, jako cílová hodnota odpovídá dobré srozumitelnosti evakuačních ozvučovacích systému. Návrh ozvučovacího systému by se za žádných okolností neměl pohybovat pod touto hranicí.

3.2.6 Stanovení priorit pro jednotlivé segmenty prostoru

Na základě informací o jednotlivých segmentech prostoru a o plánovaném charakteru produkce lze zvolit jednotlivé segmenty prostoru a v rámci designu k nim potom přihlížet s předem známou důležitostí. Výstupem tohoto kroku je stanovení konkrétních se zvolenou jednou hlavní prioritou nebo sadou priorit pro každý konkrétní prostor. Prioritou může být například konstantní SPL, konstantní tonalita nebo naopak co největší pokles SPL oproti jiné ploše. V tomto kroku lze také jednotlivým plochám určit důležitost, seřadit je od nejdůležitější oblasti (například sedící platící diváci v hlavním prostoru před podiem) po méně důležité (oblasti, kde se diváci vyskytují pouze zřídka případně není důvod se snažit v dané prostoru, na dané ploše, zajistit stejné SPL a stejnou kvalitu signálu jako v prioritně výše postavených oblastech. Typickým příkladem jsou oblasti spojené s gastronomií, tedy například oblast barů, jídelních koutů, lounge zón. Dále jde například o zadní nebo boční místa, která jsou doplňková k standardnímu poslechovému prostoru. Tato místa jsou často například pouze ke stání, mají sníženou cenu vstupného apod. Takovýto prostor v rámci návrhu má jistě nižší prioritu a pokud je nutné udělat během toho procesu kompromisní řešení, který negativně zasáhne jednu z ozvučovacích ploch, měla by to být plocha s nižší prioritou než ostatní.

3.2.7 Definice pozic pro umístění prvků ozvučovacího systému

Podstatnou součástí návrhu ozvučovacího systému je umístění jednotlivých prvků ozvučovacího na vhodné pozice v prostoru. Ovšem v rámci návrhu si samozřejmě nelze vybrat naprosto libovolnou pozici – základním faktorem, omezujícím možné pozice jednotlivých prvků, jsou zavěšovací možnosti daného prostoru. Zde je nutné brát v úvahu zejména nosnost zavěšovacích bodů. Při zavěšování je zásadním limitem maximální výška při zavěšení v konkrétním bodě nebo skupiny bodů v případě vícebodých zavěšovacích systémů. V případě systému umístěných na zemi nebo na samostatných konstrukcích jako jsou stojany nebo sloupy, vznikají také limity pro možnosti umístění, zejména jsou omezujícím faktorem nerovnosti terénu (schody, šikmé plochy, atd.). Samostatné konstrukce obvykle zásadním způsobem omezují možnost zvolit vlastní umístění (výšku) a sklon ve vertikální ose. Typ produkce a požadavky objednavatele jsou zásadním určujícím faktorem pro návrh pozice a umístění prvků ozvučovacího systému v prostoru. Obvykle se jedná zejména o požadavky na vizuál scény, který vymezuje prostor, ve kterém by přítomnost ozvučovacího systému byla pro koncept daného prostoru nějakým způsobem nevhodná. Poměrně častí je situace, kdy objednavatel takovým způsobem omezí možné umístění v prostoru, že tím de facto určí možnou pozici. Rozhodnutí o pozici ozvučovacího systému tedy proběhne na základě architektonického nebo designového plánu a rozvahy.

3.3 Referenční signál

V bodě 3.1 byla v rámci definice cílů SSD zmíněna distribuce referenčního signálu. Referenční signál závisí na charakteru ozvučované produkce. U referenčního signálu je potřeba znát několik parametrů.

3.3.1 Formát vstupního signálu

V první řadě jde o samotný formát, tedy počet kanálů zvuku, který tento signál přenáší, a v jaké doméně (digitální nebo analogové) bude provedeno jeho připojení ke zvukovému systému. V případě digitálního spojení je důležité znát formát (standard) digitálního zvuku, jeho vzorkovací frekvenci, v jaké formě a na jakých konektorech je výstup k dispozici.

3.3.2 Hodinový signál

Pro správnou funkci digitálního systému je nutné zajistit synchronizaci hodinového signálu (wordclock) v digitální zvukové síti. Zvolení digitálního protokolu obvykle jasně definuje, jakým způsobem může dojít k zajištění synchronizace hodinového

signálu. V případě síťových propojení (Dante, AVB, Ethersound, AES67 a jiné) obvykle dochází k distribuci uvnitř sítě např. pomocí PTP nebo PTPv2 (Precision Time Protocol). Pokud signály nemohou být synchronizovány pomocí wordclocku, například z důvodu různých vzorkovacích kmitočtů, je nutné na vstupu digitálního audia zapnout převzorkování SRC – (Sample Rate Conversion).

3.3.3 Standard distribuce signálu pro živé ozvučování

Dnešní standard pro vzájemné propojování digitálních zařízení v oblasti živého ozvučování (tzv. live audio) a distribuce zvuku, je formát AES3 resp. AES/EBU. AES3 umožňuje posílat i přijímat hodinové signály v rámci digitálního audia a pro připojení přístrojů se používají standardní mikrofonní konektory typu XLR. Kabel by měl mít pro přenos AES3 charakteristickou impedanci 110 ohmů. AES3 existuje také ve formě nesymetrického RCA konektoru (cinch), 75ohmové koaxiální vedení s konektorem BNC nebo ve formě optického kabelu s konektory TOSLINK. V profesionálním audiu je standardem používání symetrických vedení signálu a tedy v první variantě AES3 s konektorem XLR.

3.3.4 Definice referenčního signálu

Referenční signál je vstupní signál do systému. Každý referenční signál je při své tvorbě vytvářen s nějakým očekávaným rozsahem použití a je vytvářen v nějakých konkrétních akustických podmínkách. Cílem SSD je distribuovat tento referenční signál s ohledem na všechny jeho parametry co nejvěrněji co největšímu množství posluchačů. Cílem je rekonstruovat řetězec při vzniku referenčního signálu takovým způsobem, aby se poslechový zážitek v auditoriu co nejvíce blížil poslechovému zážitku autora signálu při jeho vzniku (mixáži nebo masteringu). Referenční signál je definován jak počtem zvukových kanálů tak jejich prostorovým charakterem (poměr přímého a odraženého zvuku), přenosem informace o směru, odkud přichází jednotlivé složky zvukového mixu a to i v kombinaci s psychoakustikou (např. hodnocení, jestli vjem zvuku odpovídá vjemu vizuálnímu).

Ozvučování koncertů

V případě ozvučování koncertů je referenčním signálem výstup z mixážního pultu (případně k němu připojených periferií) na FOH (zvuková režie při ozvučování eventů – Front Of House). Signál, který je nutné distribuovat, je samozřejmě ovlivněn tím, jaký je charakter zvuku na pracovišti FOH zvukaře, protože jeho zvukový vjem a tedy i úkony, které dělá na mixážním pultu a dalších zvukových periferiích, reflektují to, jakým způsobem on sám (ona sama) slyší výstup z mixážního pultu

na FOH. Z toho vyplývá, že pracovišti FOH je nutné dát v návrhu a následně i optimalizaci zásadní prioritu.

Výjimku může tvořit situace, kdy mixáž může a bude probíhat přes vzdálené ovládání mixážního enginu například pomocí tabletu připojeného přes WiFi Access-Point do lokální sítě. V takovém případě nemusí být nutné dávat pracovišti FOH zvýšenou prioritu oproti zbytku auditoria. Toto rozhodnutí by mělo být konzultováno předem s obsluhou mixážního pultu (zvukař eventů, zvukař souboru).

3.4 Cíle návrhu ozvučovacího systému

V této sekci budou rozebrány cíle návrhu ozvučovacích systémů. Prostor níže označovaný jako *auditorium* je prostor definovaný v sekci 3.2 jako oblast s výskytem posluchačů.

Kvality ozvučovacího systému se níže určují na základě rozptylu jednotlivých parametrů v rámci *auditoria*, napříč celou plochou. Jako minimální požadovanou přesnost (z pohledu simulace vyjádřenou jako diskretizační krok) lze buďto nastavit minimální rozteč posluchačů (např. v případě auditoria na sezení) nebo minimální šířku hlavy. Volba diskretizačního kroku závisí na složitosti výpočtu a na konkrétním požadavku toho, co je potřeba z dané simulace odečíst. Diskretizační krok např. 1 metr je pro určení Ripple Variance (3.4.3) na vyšších kmitočtech naprosto nevhodný, protože vlnové délky jsou o řád menší než je diskretizační krok. Obecně je samozřejmě lepší mít větší než minimální přesnost.

3.4.1 Level Variance

Level Variance neboli rozsah hladiny akustického tlaku v rámci poslechového prostoru je rozdíl maximální a minimální hladiny akustického tlaku v rámci *auditoria*. Pomocí volby váhových filtrů A nebo C (případně B nebo D) lze zvolit menší nebo větší vliv basových kmitočtů na výsledek.

Rozsah ve smyslu $\max(L_p) - \min(L_p)$ by v rámci auditoria neměl překročit 6 dB.

K ověření v reálném prostoru lze použít standardní zvukoměr zdroj signálu s konstantní efektivní hodnotou.

3.4.2 Tonal Variance

Tonal Variance (Spectral Variance) [1] neboli rozsah tonálních změn vyjadřuje rozsah tonální změny v rámci *auditoria*. Jde o změnu relativního vztahu jednotlivých pásem, což z pohledu reálné jde o relativní změnu tvaru přenosové funkce

Rozsah tohoto relativního parametru by také neměl překročit 6 dB.

Ověřit Tonal Variance v reálném prostoru lze pomocí zvukoměru s integrovanými třetinooktávovými filtry.

3.4.3 Ripple Variance

Ripple Variance neboli rozsah zvlnění frekvenční odezvy vyjadřuje maximální povolený rozsah pro zvlnění signálu způsobené hřebenovým filtrem (viz. 3.5). Číselně je vyjádřen jako rozdíl mezi maximální a minimální úrovní spektra signálu v rámci vhodně zvoleného frekvenčního rozsahu.

Rozsah Ripple Variance by neměl překročit 6 dB.

K ověření Ripple Variance je nutné použít analyzátor spektra na principu FFT.

3.4.4 Sonic Image Variance

Sonic Image Variance vyjadřuje rozptyl virtuálního vjemu zdroje oproti jeho skutečné pozici v prostoru. Ani předchozí *Variance* parametry nelze snadno určit, ale tento parametr je číselně prakticky nevyjádřitelný pro soustavu o více než jednom reproboxu a jednom virtuálním zdroji, kde by ho ale nemělo velký smysl určovat. Určení Sonic Image Variance totiž závisí na tom, v jakém místě by se měl vůči referenční pozici z pohledu FOH nacházet a jakým způsobem je toho dosaženo. Dosáhnout změny virtuální pozice zdroje jde buďto pomocí rozdílu úrovně u jednotlivých uší (IID, viz. 3.6.3), nebo časového rozdílu mezi levým a pravým kanálem (ITD, viz. 3.6.4).

K určení nelze jednoznačně použít objektivní simulaci nebo měření, protože schopnost lokalizace zdroje je individuální. Lze však stanovit limitní hodnoty, kde vznik virtuálního zdroje (phantom source) nastat nemůže, viz 3.6.6.

Sonic Image Distortion

Termín Sonic Image Distortion neboli zkreslení vjemu lokalizace zvuku se používá k vyjádření rozdílu vnímaného směru zdroje zvuku vůči rozdílu na referenční pozici (viz. 3.3.4).

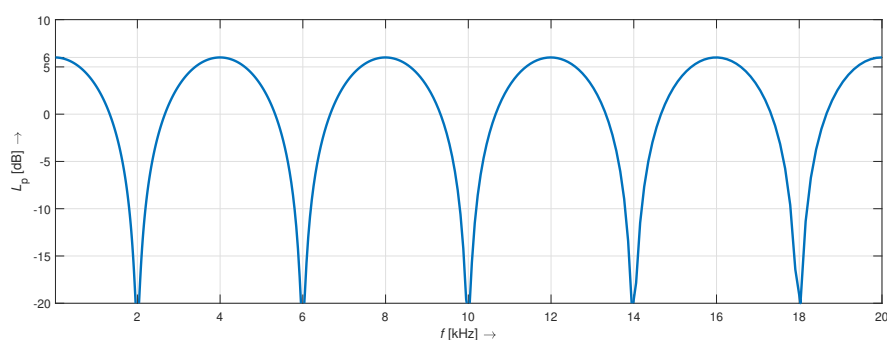
3.5 Hřebenový filtr

Hřebenový filtr (neboli comb filter nebo *combining*) je jev, který nastává v každém místě a v každé doméně, kde se setkávají alespoň dva koherentní signály ??, které mezi sebou mají nenulový časový posun. Ke combingu tak může docházet nejen v akustické doméně za ozvučovací systém, ale může k němu docházet i v rámci analogového nebo digitálního zpracování signálu v mixážním pultu nebo v DAW,

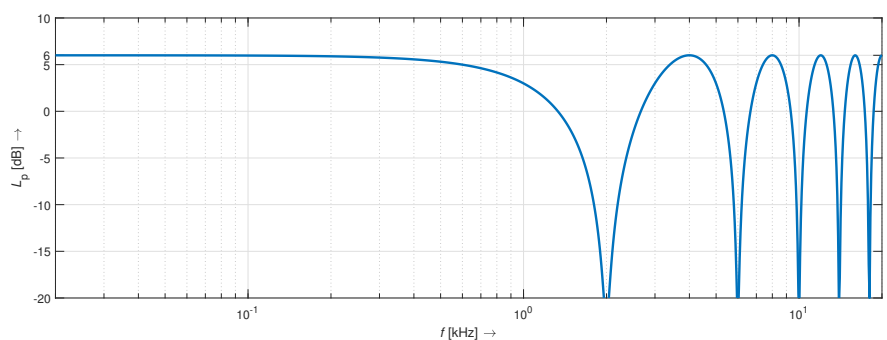
stejně tak v akustické doméně v reálných prostorech, včetně venkovních prostor, všude kde dochází k odrazům zvuku od překážek. Odrazy od překážek (podlaha, stěny, strop, vybavení místnosti atd) přicházejí v různé časy a sčítají se s přímým signálem a vůči sobě navzájem.

Název hřebenový filtr pochází z pohledu na součet dvou časově posunutých signálu ve spektru s lineární frekvenční osou, kde jsou jednotlivé *peaky* (lokální maxima) a *dipy* (lokální minima) rovnoměrně rozloženy a tvar spektra připomíná zuby hřebenu.

Tento jev vychází z principu vektorového sčítání akustických signálů, kdy výsledek součtu dvou signálu je na dané frekvenci závislý na jejich relativní fázi, tedy rozdílu fáze jednoho a druhého signálu.



Obr. 3.1: Hřebenový filtr součtu dvou stejně hlasitých signálů s časovým rozdílem 0,25 ms, lineární frekvenční osa.



Obr. 3.2: Hřebenový filtr součtu dvou stejně hlasitých signálů s časovým rozdílem 0,25 ms, logaritmická frekvenční osa.

Hřebenový filtr vznikající ze dvou kopií stejného signálu jednoznačně udává časový rozdíl mezi těmito kopiemi signálu, neboť lokální minimum s nejnižší frekvencí

vencí, tedy frekvenčně nejnižší *dip* přenosové funkce, odpovídá posunu o $1/2 \lambda$ neboli o 180° . Časové zpoždění pak tedy odpovídá přesně polovině periody kmitočtu tohoto lokálního maxima.

Rozsah zvlnění (ripple 3.4.3) vyjadřuje rozdíl úrovní těchto dvou vzájemně časově posunutých signálů. Pokud dochází

3.6 Lokalizace zdroje zvuku

Lokalizace zdroje zvuku závisí na několika parametrech. V této sekci budou rozebrány parametry, které na lokalizaci zvuku mají vliv.

3.6.1 Virtuální zdroj zvuku

Virtuálním zdrojem zvuku se je definován jako bod nebo směr, ze kterého člověk vnímá přicházející zvuk, který je ale v jiném místě, než kde jsou fyzicky umístěny reproduktory.

Nejtypičtějším příkladem je dvojice stejných reproduktorů, které vysílají naprosto shodný signál, který je tedy stejně hlasitý a reproboxy opouští ve stejný čas. Pokud umístíme posluchače na osu mezi tyto dva reproduktory, zdroj zvuku nebude lokalizován jako dva diskrétní zdroje zvuku odpovídající jednotlivým reproduktorům, ale vznikne jeden virtuální zdroj na ose těchto dvou reproduktorů.

3.6.2 Stereobáze

Stereobáze vyjadřuje virtuální osu mezi dvěma zdroji, na které se vyskytují jednotlivé virtuální zdroje v případě většího množství zdrojů v dvoukanálovém výstupu. Pohyb virtuálního monofonního zdroje po stereobázi je umožněn pomocí *panoramování*. K panoramování se používá změna úrovně mezi levým a pravým kanálem dvoukanálového mixu, které umožňuje lokalizovat zvuk na základě IID viz:(3.6.3). Tato možnost panoramování je nejčastější, protože se dá snadno implementovat a signál díky tomuto zásahu neztrácí mono-kompatibilitu. Druhá možnost panoramování je pomocí relativního zpoždění signálu jdoucím do levého kanálu vůči signálu jdoucím do pravého. Tato možnost nelze implementovat v analogových systémech a přináší s sebou nevýhodu v tom, že signál ztrácí mono-kompatibilitu. [8]

3.6.3 Interaural Intenzity Difference (IID)

Interaurální rozdíl intenzit (resp. hladin = ILD, Interaural Level Difference) vyjadřuje rozdíl intenzit zvuku dopadajících na levé a pravé ucho. Lokalizace pomocí intenzity funguje primárně v oblasti vyšších kmitočtů, řadově od 500 – 1000 Hz. ILD

lokalizace funguje hlavně díky akustickému stínu způsobenému hlavou. Lokalizace zdroje se posouvá směrem k silnějšímu zdroji.

3.6.4 Interaural Time Difference (ITD)

Interaurální rozdíl času (resp. fáze = IPD, Interaural Phase Difference) funguje na časovém resp. fázovém rozdílu mezi zvukem přicházejícím k levému a pravému uchu. ITD funguje u harmonických signálů do kmitočtu asi 800 Hz. Lokalizace zdroje se posouvá směrem ke zdroji, z něhož zvuk přichází dříve.

3.6.5 Head-Related Transfer Function (HRTF)

HRTF je zkratka pro anglický výraz head-related transfer function, tedy přenosová funkce vztažená k hlavě. Je to funkce, která pro různé body v prostoru (různé elevace a azimut) odpovídá různým útlumům nebo ziskům samostatně pro obě dvě uši. HRTF vyjadřuje, do jaké míry je signál utlumen v nějakém konkrétním směru, pouze díky tvaru hlavy, ušního boltce. S tím úzce souvisí akustický stín, který způsobuje tvar hlavy pro nejvyšší kmitočty. Do zhruba 200 Hz přichází signály z libovolného směru prakticky stejně hlasitě do obou uší. Akustický stín se začíná uplatňovat od frekvence asi 800 Hz, pro 3 kHz může rozdíl intenzit činit cca 10 dB a pro 5 kHz již rozpětí intenzity v závislosti na směru překračuje 25 dB.

3.6.6 Haasův efekt

Haasův efekt popisuje vztah lokalizace virtuálního zdroje zvuku v závislosti na relativní úrovni dvou zdrojů a jejich relativním časovém rozdílu. Zatímco Haasův efekt a jeho měření byla vykonána za účelem zjištění toho, jaký vliv má první odraz na lokalizaci a srozumitelnost signálu, z pohledu SSD je důležitý zejména kvůli začátkům os časové a intenzitní změny. Z této oblasti grafu totiž přímo vyplývají limity potřebné pro vznik virtuálního zdroje na ose mezi reálnými zdroji. Číselné vyjádření těchto limitů je velmi závislé na spektrálním a časovém průběhu signálu, kterým je to testováno. Historicky jsou hodnoty udávány zejména pro lidskou řeč, kdy většina energie leží v oblasti nižších středních kmitočtů, tedy v okolí prvních několika harmonických. Z pohledu spektra kde o signál, který má na středních kmitočtech v dlouhodobém spektru sklonem zhruba -6 dB/okt, tedy sklon tedy zhruba odpovídá červeného šumu (Brownian noise). Hudební signály mohou mít daleko menší sklon spektra, resp. daleko větší zastoupení vyšší frekvencí než mluvené slovo.

Lidské sluchové ústrojí signály s převládajícími nižšími a středními kmitočty analyzuje z pohledu směrovosti spíše na základě fázového rozdílu signálů (viz. 3.6.4).

Výsledky poslechových testů ukazují, že virtuální zdroj se ztrácí zhruba v oblasti 2–5 ms časového rozdílu a 5–10 dB rozdílu úrovně [12]. Obor SSD se zabývá distribucí referenčního signálu, který ale může samozřejmě obsahovat rychlé, transientní zvuky s krátkou ADSR obálkou, které obvykle obsahují větší množství vysokých frekvencí. V hudbě se typický jedná o činely a jiné perkusní nástroje, ve filmech například o střelbu nebo výbuchy. Pro tyto zvuky jsou parametry pro vznik virtuálního zdroje výrazně kratší na časové ose a virtuální zdroj se začíná rozpadat pro relativního zpoždění již okolo hodnoty 1 ms.

Jako limit pro vznik virtuálního zdroje ve dvoukanálovém (stereo) systému bude nadále uvažován časový rozdíl 5 ms a dráhový rozdíl 10 dB, což jsou nejzazší hodnoty, které lze uvažovat pro vznik virtuálního zdroje s obecným referenčním zvukem. Zvukové signály, které by obsahovaly pouze nejnižší oktávy slyšitelného pásma, tedy de facto žádné střední a vysoké kmitočty, budeme v tomto případě zanedbávat.

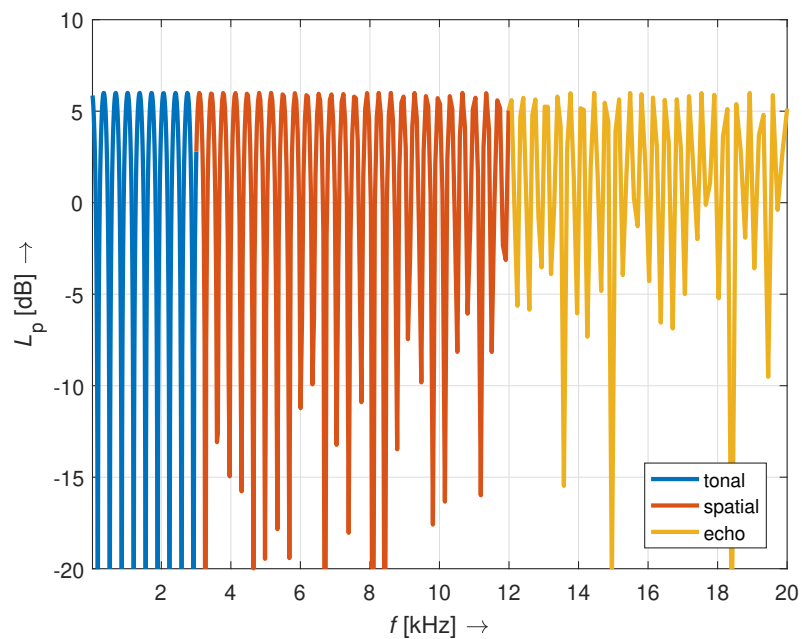
Například podle [11] je nutné ke vzniku virtuálního zdroje splnit limit 2 ms.

3.6.7 Sčítání signálů v různém čase

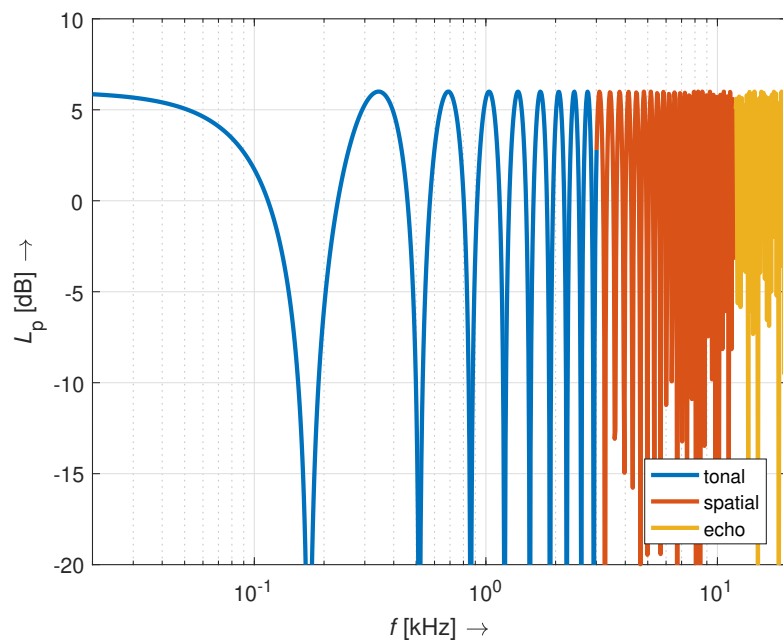
Vlivem odražených a později přicházejících kopií stejného výchozího signálu vzniká na přijímači (mikrofon, ucho) hřebenový filtr. Jeho vliv na subjektivně vnímaný signál jde podle [1] rozdělit do třech kategorií podle vlnové délky λ :

- $< 6\lambda$ odpovídá změně tonality
- $6 - 24\lambda$ odpovídá změně prostorovosti, přidání dozvuku
- $24 < \lambda$ diskrétně rozeznatelné echo

V následujících grafech je znázorněn rozsah jednotlivých pásem v tomto případě pro zpoždění 2,0 ms, což odpovídá dráhovému rozdílu zhruba 0,7 m. Hraniční body, kde 0,7 m odpovídá 6 resp 24 λ jsou 3 kHz a 12 kHz.



Obr. 3.3: Hřebenový filtr součtu dvou stejně hlasitých signálů s časovým rozdílem 2 ms, lineární frekvenční osa.



Obr. 3.4: Hřebenový filtr součtu dvou stejně hlasitých signálů s časovým rozdílem 2 ms, logaritmická frekvenční osa.

Práce	Stimul	Práh pro vjem echa
Haas (1951)	Řeč	30–40 ms
Lochner & Burger (1958)	Řeč	50 ms
Schubert & Wernick (1969)	Šum (20ms burst)	5–6 ms
	Šum (50ms burst)	12 ms
	Šum (100ms burst)	22 ms
Ebata a kol.(1968)	Impulzní zvuky	10 ms
Freyman a kol. (1991)	Impulzní zvuky	5–9 ms
Yang & Graham (1997)	Impulzní zvuky	5–10 ms
Litovsky a kol. (1999)	Impulzní zvuky	5–10 ms

Tab. 3.1: Práh pro vjem echa podle [13]

3.6.8 Vjem ozvěny, echo

Způsob vyjadřování vztahu časového zpoždění a vjemu prostorovosti a slyšitelnosti podle vlnové délky [1] oproti jednoduchému časovému rozdělení v [12] nebo definici echa na úrovni středoškolských fyzikálních učebnic s přesným limitem času (obvykle udávané číslo je 100 ms), umožňuje daleko přesněji rozlišit vztah frekvenčního obsahu zpožděného signálu a slyšitelnosti odražených zvuků jako diskretních kopií. Haas sice hodnotu slyšitelnosti alespoň [12] naznačuje na dvou příkladech s pásmově omezeným šumem (v rozsahu oktávy 200–400 Hz a v rozsahu oktávy 3200–6400 Hz, že percepce prostorovosti se může s frekvenčním obrazem zdroje lišit. Tabulka 3.6.8 podle [13] ukazuje výstupní data o prahu zpoždění nutného k vjemu odrazu jako diskretního echa na základě různých prací z druhé poloviny 20. století. Z tabulky považují za zjevné, že existuje korelace mezi spektrálním rozložením signálu a slyšitelnosti vnímání echa tak jak to popisuje Bob McCarthy. [1]

Z výše uvedených skutečností a citací lze usoudit, že platí, že se zvyšujícím se kmitočtem obsaženým v excitačním signálu se snižuje doba, která je nutná pro to, aby člověk při vnímání odrazu sečteného s původním zvukem již neslyšel pouze větší prostorovost, ale začal slyšet rušivé diskretní echo.

3.7 Principy návrhu systému s reálnou směrovostí

V této sekci budou popsány přístupy k směřování boxů s reálnou směrovostí.

3.7.1 Nominální úhel vyzařování

Vyzařovací úhel elektroakustického vysílače pro konkrétní frekvenci v jedné konkrétní rovině určuje úhlové rozpětí okolo osy vysílače (osy vyzařování), kde akus-

tický tlak neklesne oproti ose vyzařování o více jak 6 dB. Vyzařovací úhel tedy určuje úhel mezi dvěma body, které mají oproti ose (0 dB) útlum 6 dB, tedy akustický tlak oproti ose je zde poloviční. Samozřejmě při měření úhlu je nutné dodržet stejnou vzdálenost od zdroje.

Nominální vyzařovací úhel nemá žádnou přesnou standardizaci. Obvykle vyjadřuje jakýsi průměrný úhel v rámci nějaké části spektra. Většina reálných dostupných boxů představuje na nejnižších kmitočtech (okolo 100 Hz a níže) prakticky kulový zdroj, protože nejčastějším typem basových sekcí vícepásmových boxů jsou přímovyzařující konfigurace, kdy směrovost je z naprosté většiny určena vlastní směrovostí použitého nízkotónového reproduktoru (wooferu). Vyzařovací úhel standardního reproduktoru (simulovaného pístově kmitající membránou) se progresivně zužuje se stoupající frekvencí, ovšem pro většinu frekvenčního pásma, ve kterém je reprobox užíván, je vyzařovací úhel větší než 180° a ho lze tedy považovat za téměř všesměrový zdroj. U boxů s konstantní směrovostí tedy obvykle nominální vyzařovací úhel vyjadřuje průměr za frekvenční pásmo, ve kterém box nějakou alespoň částečně vyrovnanou směrovostí disponuje.

Pro návrh zvukových systému by bylo ideální používat takové reproboxy, případně reproboxy v takových konfiguracích, aby v rámci jejich frekvenčního rozsahu docházelo k minimálním odchýlkám ve směrovosti. Ideální by tedy byl box, který pro který by nominální vyzařovací úhel šel určit přesně a jednoznačně, protože by měl přes celé vyzařované spektrum vyzařovací úhel konstantní.

3.7.2 Reproboxy s doporuční směrovostí

Pro vyjádření směrovosti reálných nízkotónových měničů, aproximovaných v lineární oblasti jako pístově kmitající membrány, můžeme použít výpočet pro rychlostní potenciál vyjádřený z Besselových funkcí ve tvaru

$$\Phi = -A \frac{e^{-jkr}}{r} S \frac{2J_1(kR \sin \alpha)}{kR \sin \alpha}, \quad (3.1)$$

kde

$$A = \frac{\mathbf{v}_n}{2\pi}, \quad (3.2)$$

kde k je vlnové číslo, R je poloměr membrány, S je plocha membrány ($S = \pi R^2$), \mathbf{v}_n je normálová rychlost kmitání, J_1 je Besselova funkce prvního druhu a α je úhel mezi osou vysílače a bodem, kde zjišťujeme akustický tlak.

Pro akustický tlak ve vzdáleném poli pro pístově kmitající zářič umístěný v nekonečně rozlehlé rovinné stěně (infinite baffle) platí [2]

$$p = -j\rho_0\omega\Phi = -j\rho_0kc_0\Phi, \quad (3.3)$$

kde ρ_0 je hustota vzduchu a c_0 je rychlost šíření.

Pro výpočet směrové charakteristiky použijeme normalizovanou směrovou funkci

$$\eta = \left| \frac{\lambda J_1\left(\frac{2\pi R}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\pi R \sin \alpha} \right|. \quad (3.4)$$

Na grafu 3.5 jsou zvoleny po oktávách rozmístěné kmitočty s tím, že prostřední hodnota odpovídá kmitočtu 1 kHz, který má stejnou vlnovou délku jako je průměr simulované pístové kmitající membrány. Z grafu je patrné, že pro tento kmitočet je vyzařovací úhel membrány dvakrát 45° , tedy celkem 90° . Tento vztah platí nejen pro tento příklad, ale platí pro každý poloměr (průměr) pístové kmitající membrány.

Pro kmitočty vyšší směrovost progresivně stoupá. Na dvojnásobném kmitočtu je směrovost poloviční, na čtyřnásobném kmitočtu je směrovost čtvrtinová. Za předpokladu, že budeme očekávat, že se k reproduktoru těchto parametrů určeného pro nižší frekvence (17 cm poloměr odpovídá průměru přibližně 13,5" reproduktoru - rozhodně se tedy bavíme o měničích, který by měl obsluhovat nízké frekvence slyšitelného zvukového rozsahu), měli bychom se bavit o tom, v jaké oblasti půjde alespoň rámcově dodržet požadavek na kmitočtově vyrovnaný vyzařovací úhel 3.7.1.

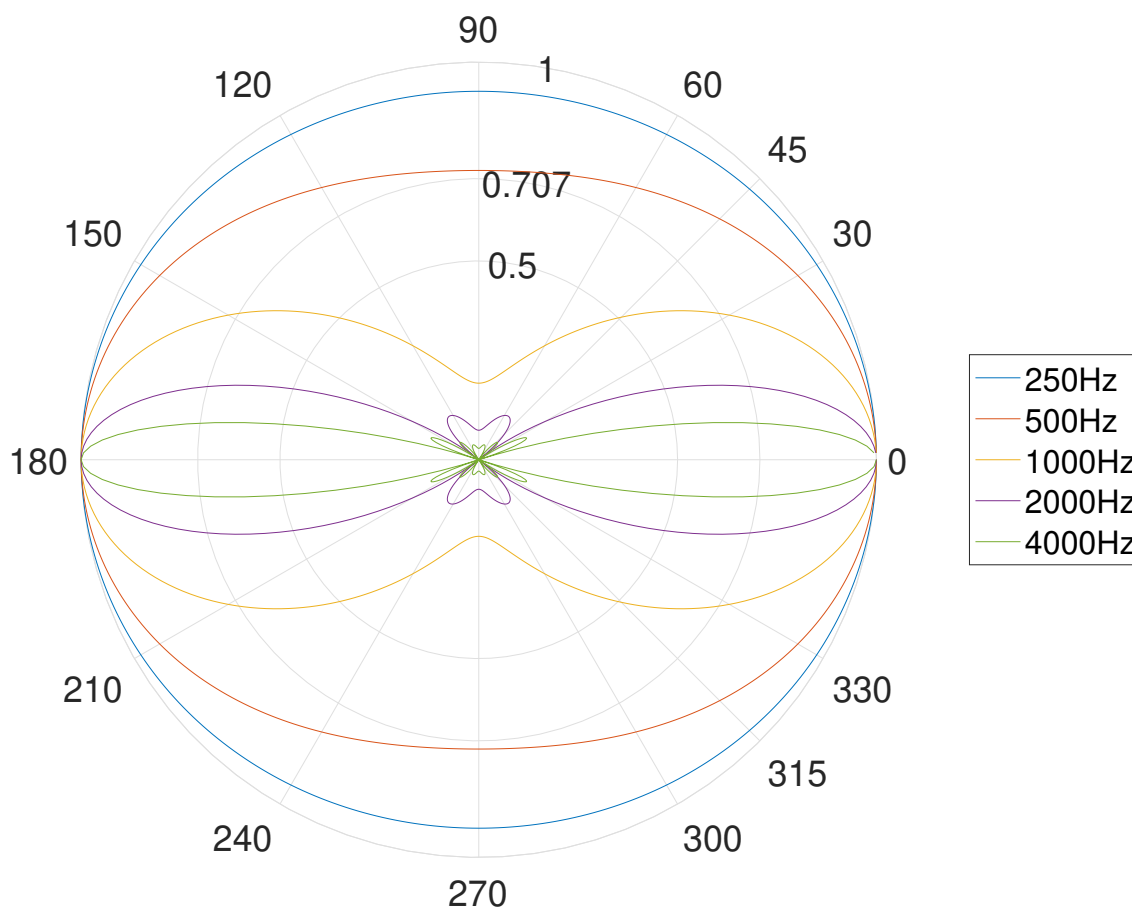
3.7.3 Reproboxy s vlnovody s konstantní směrovostí

Jak je naznačeno v sekci 3.7.1, pro účely návrhu rovnoměrného pokrytí je ideální pracovat se zdroji zvuku, jejichž vyzařovací úhly se nemění v rámci jejich frekvenčního spektra. Pokud bude vyzařování uniformní v rámci daného frekvenčního pásma, nazýváme takové vyzařování jako konstantní směrovost. Konstantní směrovosti lze dosáhnout a nejtypičtěji se dosahuje pomocí *vlnovodů*, tedy tzv. horen.

Vlnovody se v ozvučovací praxi dnes používají téměř u každého vysokotónového měniče. Hlavními důvody pro použití jsou snaha o získání maximálního výstupu, maximální citlivosti v požadovaném směru a zamezení vyzařování v mimo tento směr a dále snaha vlnovodem zajistit co nejrovnoměrnější vyzařovací v rámci konkrétního kmitočtového pásma, kde má být vlnovod používán. Ideální vlnovod by měl poskytovat naprosto konstantní směrovost a představovat shodnou imitanci přes celý frekvenční rozsah [14].

Pro rozměr vlnovodu v daném směru (vlnovody samozřejmě nemusí být symetrické, naopak je typické jiné vyzařování pro vertikální a pro horizontální směr) platí empirický zjištěný vztah, který popisuje jaký rozměr (průměr nebo šířka/výška) ústí vlnovodu je nutný k tomu, by bylo dosaženo požadovaného vyzařovacího úhlu

$$X = \frac{K}{\theta f_0}, \quad (3.5)$$



Obr. 3.5: Vyzařování ideální pístové kmitající membrány o průměru 34 cm.

kde X je rozměr ústí vlnovodu, θ je vyzařovací úhel a f_0 je požadovaná frekvence. Pro konstantu K platí

$$K = 2,5 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{Hz}} [14].$$

Při dosazení např. 1 kHz do rovnice 3.5 získáváme limity pro nutné vnější rozměry vlnovodů v následující tabulce

Z tabulky 3.2 je patrné, že fyzický rozměr vlnovodu, zejména průměr nebo výška a šířka vyústění, má dramatický vliv na nejnižší frekvenci, na které půjde směrovosti dosáhnout. Dalším dosazováním do rovnice 3.5 lze dojít k závěru, že čím nižší frekvence a zároveň čím užší vyzařovací úhel je požadován, tím musí být vlnovod delší. Kdybychom např. chtěli vyrobit vlnovod, který bude mít vyzařování 20° pro 500 Hz, musel by být rozměr ústí v daném směru 2,5 m.

3.7.4 Minimum Variance Line

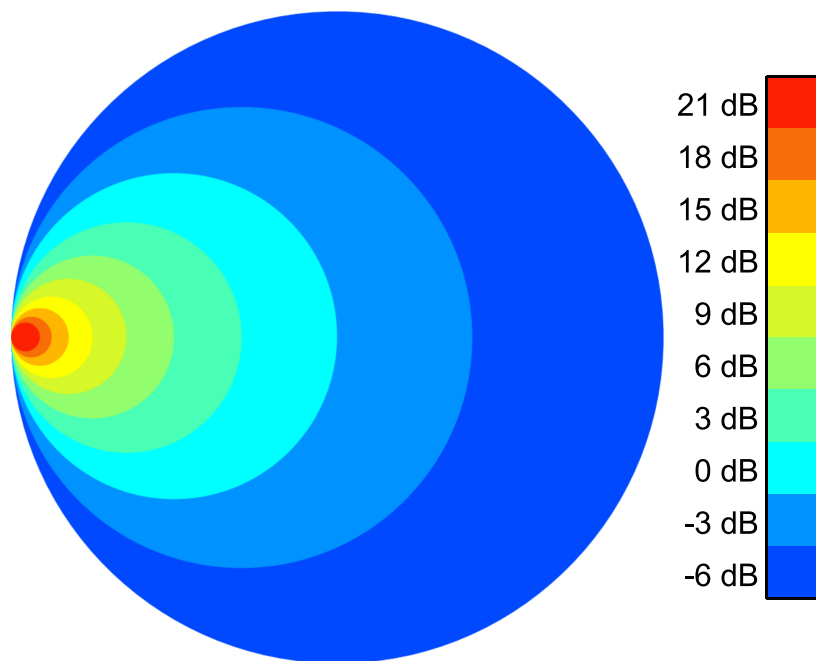
V rámci návrhu ozvučovacích systémů lze stanovit takzvaný *Minimum Variance Line*, tedy přímkou maximálně se blížící isobaře spojující shodné hladiny akustických

vyzařovací úhel	rozměr ústí
[°]	[cm]
60	42
90	28
120	21

Tab. 3.2: Příklady rozměrů vlnovodu pro různé vyzařovací úhly

tlaků.

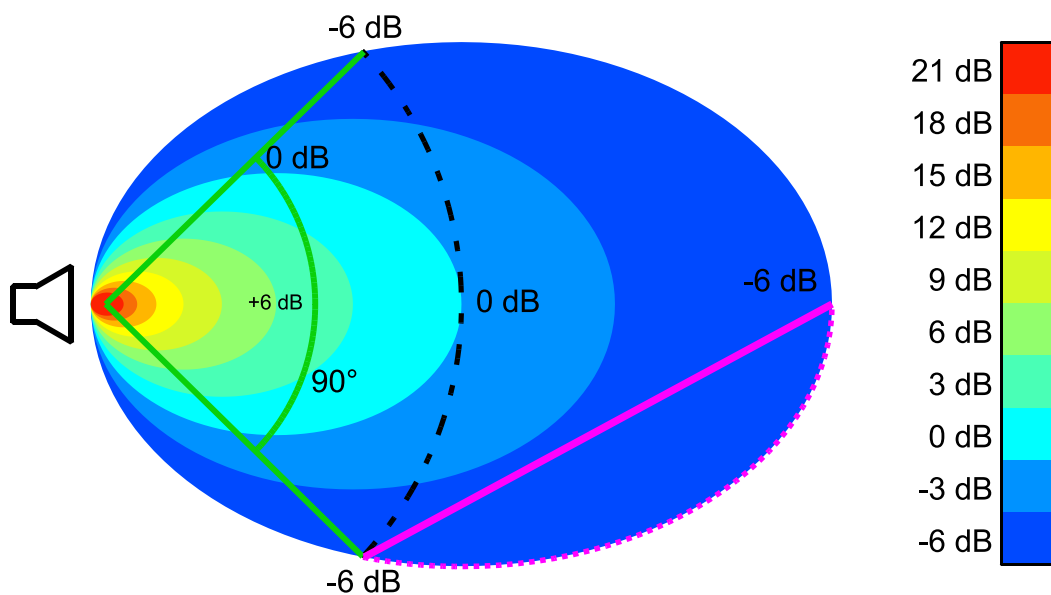
Vlnovod s konstantní směrovostí má obvykle v simulacích isobary přibližně ve tvaru jako na obr 3.6.



Obr. 3.6: Typické vyzařování reproboxu

Pro účely rovnoměrného pokrytí auditoria je tedy ideální snažit se umístit publikum do oblasti jedné z isobar. Na obrázku 3.7 lze vidět tři body o úrovni -6 dB relativně proti středu 0 dB. Dva z těchto bodů mají útlum 6 dB z důvodu směrovosti boxu, tedy například kvůli směrovým vlastnostem vlnovodu ovlivňujícího vyzařování a úhel, který mezi sebou svírají odpovídá vyzařovacímu úhlu, viz. 3.7.1. Bod na ose vyzařování boxu se na úroveň -6 dB dostane díky 1.1.5, tedy díky rozložení vyzářeného výkonu v daném směru na $1/4$, tedy snížení intenzity.

Ideální spojení těchto bodů je samozřejmě isobarické, jak naznačuje čárkovaná čára na obr. 3.7. Ovšem jakmile začneme chtít použít tyto boxy pro účely ozvučování



Obr. 3.7: Minimum Variance Line

reálných prostor, obvykle nenarazíme na tvar podlahy nebo zdí, který by odpovídal tomuto tvaru. Nejčastějším tvarem podlahy i stěn je jednoznačně rovná plocha, která tedy v průmětu do dvourozměrné simulace bude vypadat jako rovná čára. úsečku spojující dva body o stejné úrovni (na obrázku vyznačené růžovou barvou) nazveme *Minimum Variance Line* a budeme ji považovat za jeden ze základních stavebních kamenů návrhu ozvučovacích systémů.

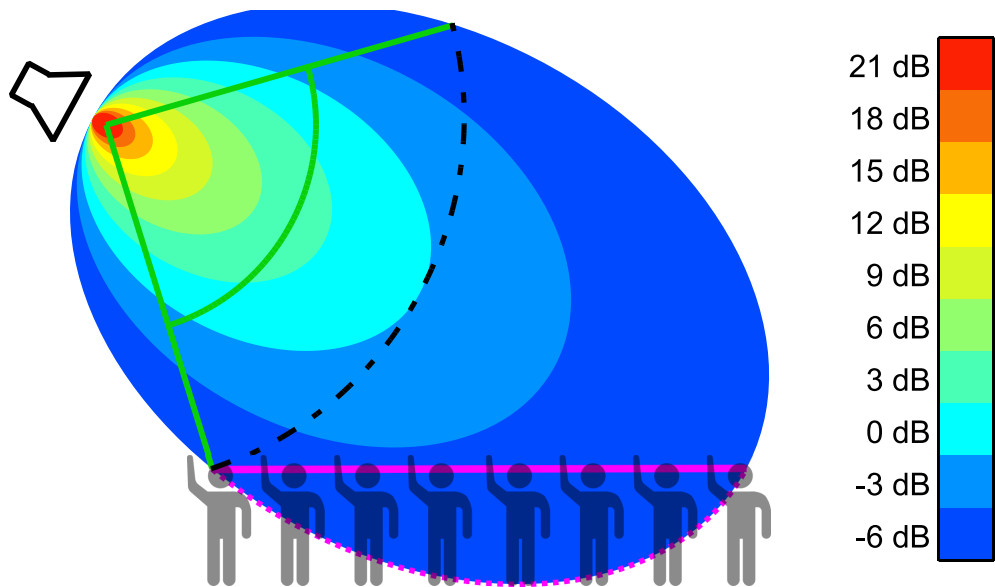
Pokud budeme předpokládat, že použitý systém je v oblasti nejnižších kmitočtů svého frekvenčního rozsahu (tedy v oblasti 100 Hz a níže) téměř všesměrový, potom takto stanovená spojnice dvou bodů na isobaře ve volném poli bez odrazů splňuje i 6dB cíl pro vyrovnanou tonalitu (rozdíl úrovně přímého mezi nejbližším a nejvzdálenějším bode úsečky z obrázku 3.7 je totiž právě těch 6 dB.

Minimum Variance Line se nejvíce uplatňuje při vertikálním směřování ozvučovacího systému. Na obrázku 3.8 je načrtnuté směřování boxu podle principu *Minimum Variance Line*.

Z předchozích odstavců vyplývá, že existuje vztah mezi směrovostí (velikostí nominálního vyzařovacího úhlu 3.7.1), výškou zavěšení a délkou *Minimum Variance Line*.

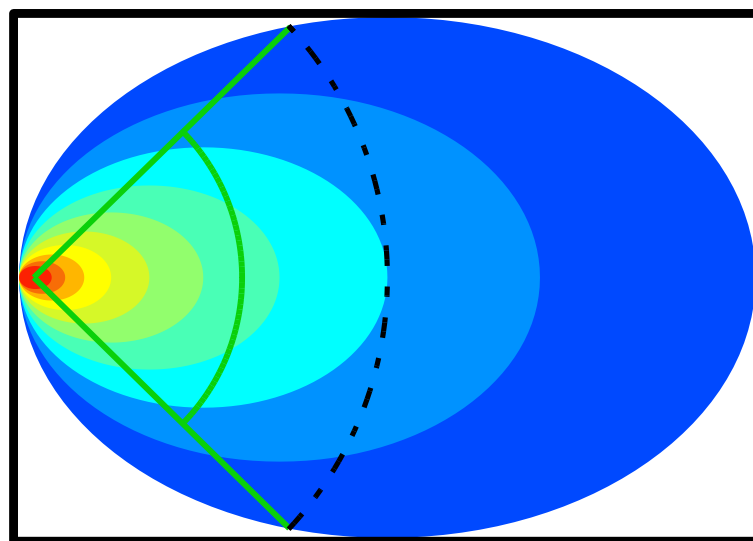
3.7.5 FAR

Vztahu vyzařovacího úhlu a prostoru nabízí možnost definovat použitelnost jednotlivých reproboxů, jejich rozdělení a možnosti z hlediska praktického použití. Je tedy



Obr. 3.8: Minimum Variance Line - vertikální směřování

nutné vyjádřit vztah mezi směrovostí a poměrem stran (ve vertikálním pohledu jako na obrázku 3.8 by to byla délka auditoria a výška zavěšení PA).



Obr. 3.9: FAR - opsaný obdélník

Pro snadné určení tohoto vztahu zvolil Bob McCarthy [1] postup opsání obdélníka grafu s isobarami, viz obrázek 3.9. Tento postup nazval *Forward Aspect Ratio*, tedy poměr stran dopředné části, protože *Forward Aspect Ratio* počítá vždy pouze s polovinou celého grafu směrovosti a to samozřejmě polovinou dopřednou, odtud je

v názvu slovo *Forward*.

Pro výpočet přepočten daného vztahu (poměr stran FAR) a vyzařovacího úhlu ϑ platí vztah

$$FAR = \frac{1}{\sin(\frac{\vartheta}{2})}. \quad (3.6)$$

Tento vztah platí pro všechny vyzařovací úhly menší nebo rovné 180° . Pro všesměrové vyzařování (úhel 360° lze určit FAR graficky, kdy obdélník opsaný kruhu má poměr stran 1:1, ale pokud aplikujeme pouze polovinu vyzařování (směrem dopředu – *Forward*), pak se poměr stran změní na 0,5:1. V tabulce 3.3 je vypočtený parametr FAR pro vybrané vyzařovací úhly, které se typicky objevují ve specifikacích reprosoustav určených pro ozvučování.

Z tabulky jsou patrné dramaticky rozdílné poměry stran vhodné pro rovnoměrné pokrytí v rámci 3.7.4. Pro praktické použití je samozřejmě vhodné použít naprosto přesný tvar vyzařování konkrétního boxu, vzít v potaz např. výšku hlav diváků (s využitím informace, jestli auditorium bude primárně sedící nebo stojící).

Vztah vyzařovacího úhlu a vhodného poměru stran FAR lze vyjádřit i pro opačný případ, tedy známý poměr stran a neznámý vhodný vyzařovací úhel. Tento vztah získáme úpravou rovnice 3.6:

$$\vartheta = 2\sin^{-1}\left(\frac{1}{FAR}\right). \quad (3.7)$$

3.7.6 LAR

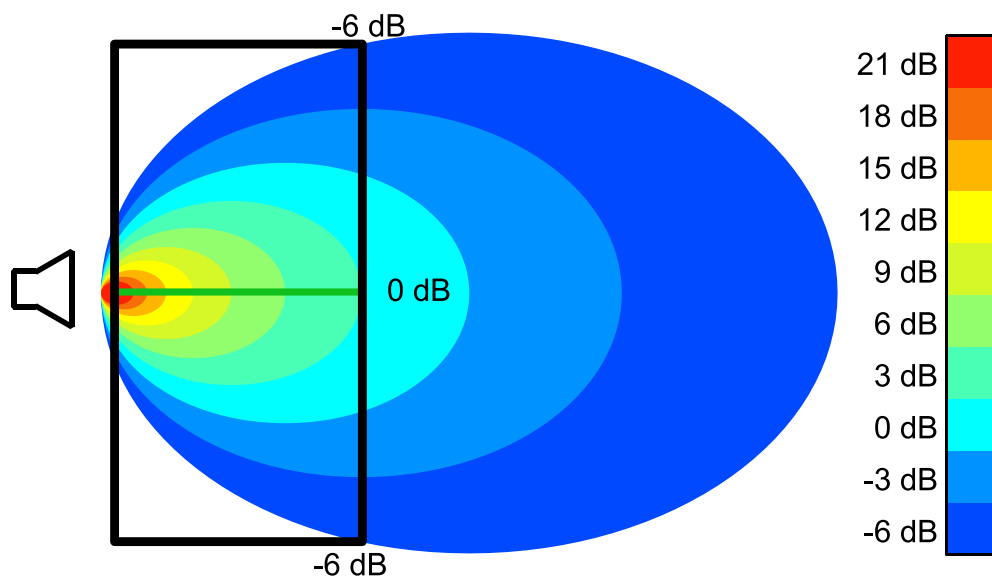
Obdobným způsobem, jako lze popsat opsáním obdélníku vyjádřit poměr stran prostoru, který chceme pokrýt s největší možnou rovnoměrností, lze zadefinovat i opsání obdélníku, který bude vyjadřovat, jak širokou linii lze aplikovat v dané vzdálenosti od zdroje s daným vyzařovacím úhlem. K analýze tímto způsobem je nutné opsat obdélník okolo oblasti, kde bude splněna nějaká podmínka ve vztahu k ose vyzařování. Za tuto podmínku byla zvolena variace hlasitosti 6 dB (viz. 3.4.1. To znamená, že takto opsaný obdélník na protější straně než je zdroj, tedy na kolmici s osou zdroje, spojuje průsečíky s dvěma isobarami s hladinami 6 dB od sebe. *Lateral Aspect Ratio* (LAR)) vyjadřuje koeficient, kterým je potřeba vynásobit vzdálenost od zdroje, abychom získali šířku, kterou půjde s daným zdrojem v rámci stanoveného limitu úrovně rovnoměrně pokrýt. Graficky je tato situace znázorněna na obrázku 3.10. Na rozdíl od FAR zde je poměr stran vlastně opačný, dle definice [1], čili poměr stran je šířka ku hloubce.

Matematicky lze tento poměr stran vůči FAR vyjádřit jako

$$LAR = \frac{2}{FAR}, \quad (3.8)$$

vyzařovací úhel [°]	FAR
360	0,5
180	1
150	1,04
120	1,15
90	1,41
80	1,56
70	1,74
60	2
50	2,4
40	2,9
30	3,7
20	5,8
15	7,7
10	11,5
7,5	15
5	23

Tab. 3.3: Tabulka závislosti *FAR* na vyzařovacím úhlu



Obr. 3.10: LAR - opsaný obdélník

tedy *LAR* je vlastně dvojnásobek převrácené hodnoty *FAR*. Pro vyjádření vztahu s vyzařovacím úhlem pak platí vztah

vyzařovací úhel [°]	LAR
360	3,46
180	2,0
150	1,9
120	1,75
90	1,4
80	1,3
70	1,15
60	1
50	0,85
40	0,7

Tab. 3.4: Tabulka závislosti LAR na vyzařovacím úhlu

$$LAR = 2 \cdot \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \quad (3.9)$$

Srovnání dat z tabulek 3.3 a 3.4 lze dosáhnout poměrně jasné představy o možnostech pokrytí v horizontálním a vertikálním směru boxu pro různé poměry stran. Tedy tento základní typ analýzy lze provést bez nutnosti použít simulační software.

3.7.7 Koncepty návrhu

Jedním ze základních konceptů při návrhu ozvučovacího systému podle cílů, které si tento obor stanovuje, je volba minimálního množství zdrojů [1]. Čím je menší počet zdrojů, tím snazší je dosáhnout vyrovnanosti a omezit problémy s rozsahem zvlnění frekvenční odezvy 3.4.3, kterou kromě odrazů způsobuje právě kombinace více zdrojů, které nepřichází ze stejného místa a ve stejný čas. Menší počet zdrojů má samozřejmě také řadu výhod praktického charakteru, tedy nutnosti zajišťování místa, možnosti uchycení, distribuce signálu na daná místa a v neposlední řadě čas implementace a pořizovací cenu, kdy obvykle platí, že dva zdroje (i kdyby byly např. výkonově slabší) obvykle stojí více než jeden samostatný, silnější zdroj. Toto ovšem neznamená, že by návrh měl automaticky směřovat např. pouze na jeden reprobox - pokud se snažíme splnit vytyčené cíle návrhu, je nutné zohlednit všechny parametry, které mohou ovlivnit naši volbu vhodného kusu ozvučovací techniky. Cílem návrhu stále zůstává maximální vyrovnanost, čili pokud je nutné použít větší množství zdrojů, tak je to nutné - důležité je ovšem udržet myšlenku toho, že by měl být kladen důraz na snahu zvolit vždy nejmenší možný počet zdrojů. Každý další zdroj, který bude k systému přidán, zvyšuje prostor akustického prostorového crossoveru (přechodu pokrytí), tedy prostoru v auditoriu, kde se potkávají dva (nebo více)

koherentní signály, které ovšem přicházejí z různých míst a nelze tedy zajistit jejich dokonalé načasování tak, aby přicházely ve stejný čas na všechny body crossoveru ve stejný čas. Čili připojení dalšího zdroje, i když budeme předpokládat, že bude zvolen nejlepší možný kompromis, s sebou nutně přináší rozšíření míst se zvýšeným rozsahem zvlnění frekvenční odezvy.

Jakmile je nutné použít více než jeden box (ať už jde o situaci z pohledu pouze jedné roviny, jednoho řezu, nebo z pohledu celého návrhu), je nutné pro tento box samostatně stanovit nové, dílčí cíle. Koncept by měl stále dodržovat to, aby pokud možno jeden zdroj (nebo jedna uspořádaná skupina zdrojů, např. dvojice) měla snahu pokrýt bez pomoci dalšího zdroje maximální plochu auditoria. Přidané boxy (typicky v literatuře nazývané jako vykrývací boxy, tzv. *fillly* [1], [6]), by měly být primárně považovány za lokální řešení lokálního problému a pokrytí většiny auditoria by mělo být zajištěno hlavním systémem, tedy jedním reproboxem (nebo jednoduchou soustavou reproboxů, kterou pro tento účel budeme považovat za jeden zdroj), jehož parametry v maximální míře odpovídají charakteru a rozměrům prostoru a požadavků na splnění cílů návrhu.

3.7.8 Možnosti ověření

V rámci ověřování kvality návrhu je nejčastějším nástrojem získání přenosové funkce a impulzní odezvy pomocí dvoukanálového měřicího systému. Tento způsob umožňuje získat pro libovolný bod prostoru, kam lze umístit mikrofon, přenosovou charakteristiku použitého zdroje zvuku v kombinaci s celým zvukovým řetězcem případně jenom s jeho částí, což souvisí s tím, odkud se odbočí referenční signál. Pro ohodnocení vlastností vícekanálového systému je vhodné na místech, kde je cílem ověřit funkci přenosového systému, změřit přenos od všech zdrojů samostatně a následně také dohromady a z těchto dat mít k dispozici kromě přenosové funkce i její obraz vzniklý aplikováním inverzního FFT, tedy *impulzní odezvu*. Přenosová funkce zobrazí relativní úroveň jednotlivých frekvenčních pásem a například vliv hřebenevého filtru na přenos v daném místě. Impulzní odezva může snáze ukázat vztahy jednotlivých odrazů vůči sobě z pohledu časové domény.

4 Horizontální směřování

Tato kapitola se bude zabývat tématem práce, tedy problematice umístování reproduktorových soustav v horizontálním směru při ozvučování.

Základní charakteristikou, podle které budeme dělit různé ozvučovací konfigurace v horizontálním směru, je počet různých zvukových kanálů, které bude systém přenášet. Tedy dělení proběhne podle počtu kanálů, které nesou informaci, kterou je cílem přenést posluchačům.

Diskutovány budou konfigurace hlavní části systému, tedy hlavní části systému, které mají za úkol pokrývat naprostou většinu auditoria, viz. 3.7.7 Pokud v návrhu zůstane patrný lokální nedostatek v pokrytí, tento nedostatek by měl být v následující fázi návrhu systému vyřešen vhodným lokálním řešením v podobě vykrývacího reproboxu parametrů odpovídajícím prostoru s nedostatečným pokrytím, který bude třeba tímto reproboxem dodatečně pokrýt.

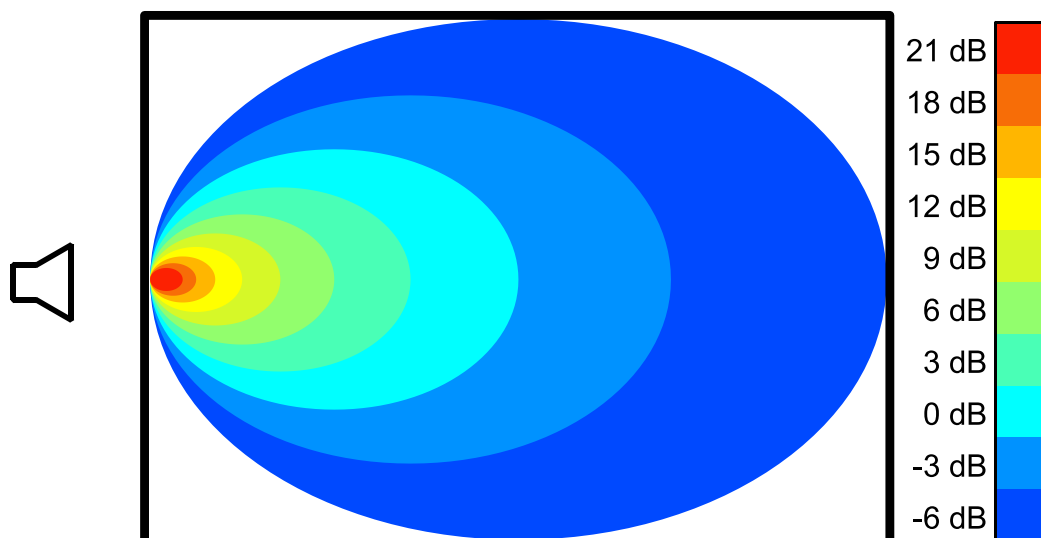
4.1 Monofonní systém

Monofonní systém má za úkol přenést informaci pouze jednoho kanálu. Referenčním signálem (3.3.4) tedy takový zdroj zvuku, který buďto z definice monofonní signál (například lidský hlas bez snahy přenést informaci o prostoru) případně zdroj může původně mít nějakou prostorovou informaci, ale ať už kvůli zvolené technice snímání a nebo z důvodu účelu požadovaného není nutné přenášet víc než jeden zvukový kanál.

4.1.1 Single mono

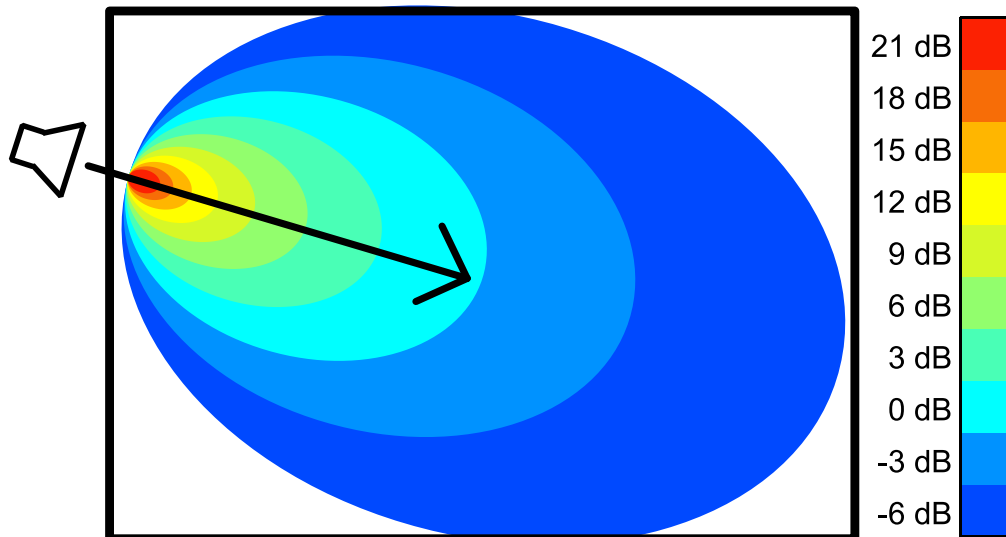
První nejjednodušší konfigurací je konfigurace *Single mono*, případně pouze *Mono*, tedy konfigurace, kdy cílem je pokrýt celý prostor auditoria pouze jedním boxem. V takovém případě vychází jako nejvhodnější volba reprobox s horizontálním vyzařovacím úhlem, kdy jako základní vodítko poslouží přepočet *FAR* na vyzařovací úhel dle rovnice 3.7. Tento princip maximalizuje pokrytí zatímco minimalizuje energii, kterou budou vybuzeny boční stěny, jak naznačuje obrázek 4.1. V závislosti na umístění v místnosti je možné, že by v této konfiguraci mohlo být nutné volit vykrývací boxy pro jednotlivé rohy, minimálně tedy pouze ty, kde jedna strana rohu je stěna, u které je umístěn zdroj zvuku.

Za předpokladu, že by nebylo možné zdroj umístit na osu sálu, ale zdroj je nutné posunout mimo střed stěny směrem k jednomu z rohů, potom jako nejvhodnější konfigurace vychází namíření reproboxu přes geometrický střed střed místnosti. Toto



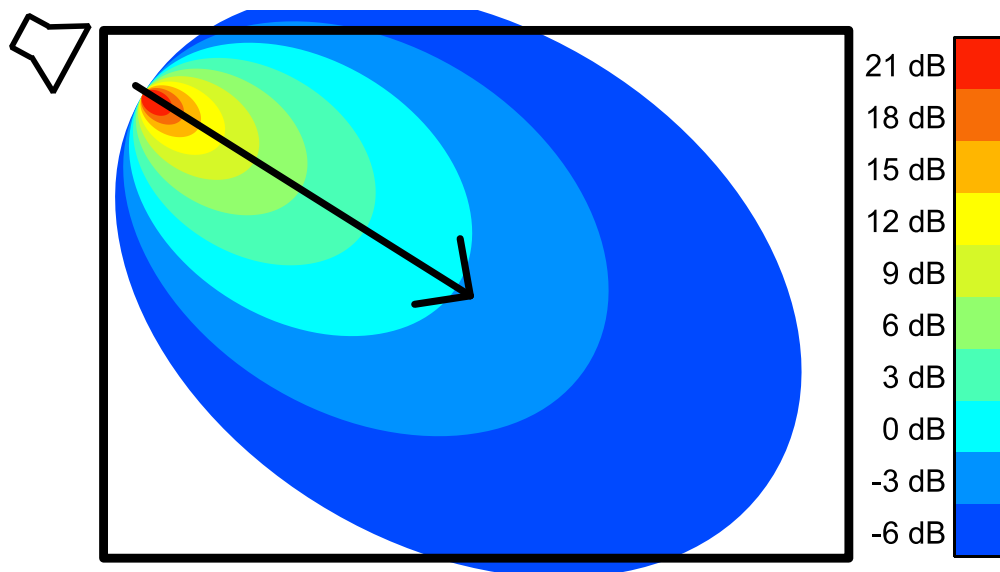
Obr. 4.1: Konfigurace *Single mono*

je zobrazeno na obrázcích 4.2 a 4.3. Následně na obrázcích 4.4, 4.5 a 4.6 jsou obdobné situace s odrazy stěn (zděné, vymalované místnosti) s reálně změřenými daty aplikovanými v Matlab simulaci pro frekvenci 4 kHz.



Obr. 4.2: Konfigurace *Single mono* mimo osu

Je zřejmé, že čím více začneme vychylovat zdroj z osy místnosti, tím méně vyrovnaného pokrytí nakonec budeme schopni dosáhnout. Dá se očekávat, že s čím více se bude zdroj vzdalovat od osy, tím větší bude nutnost použít vykrývací box



Obr. 4.3: Konfigurace *Single mono* v rohu

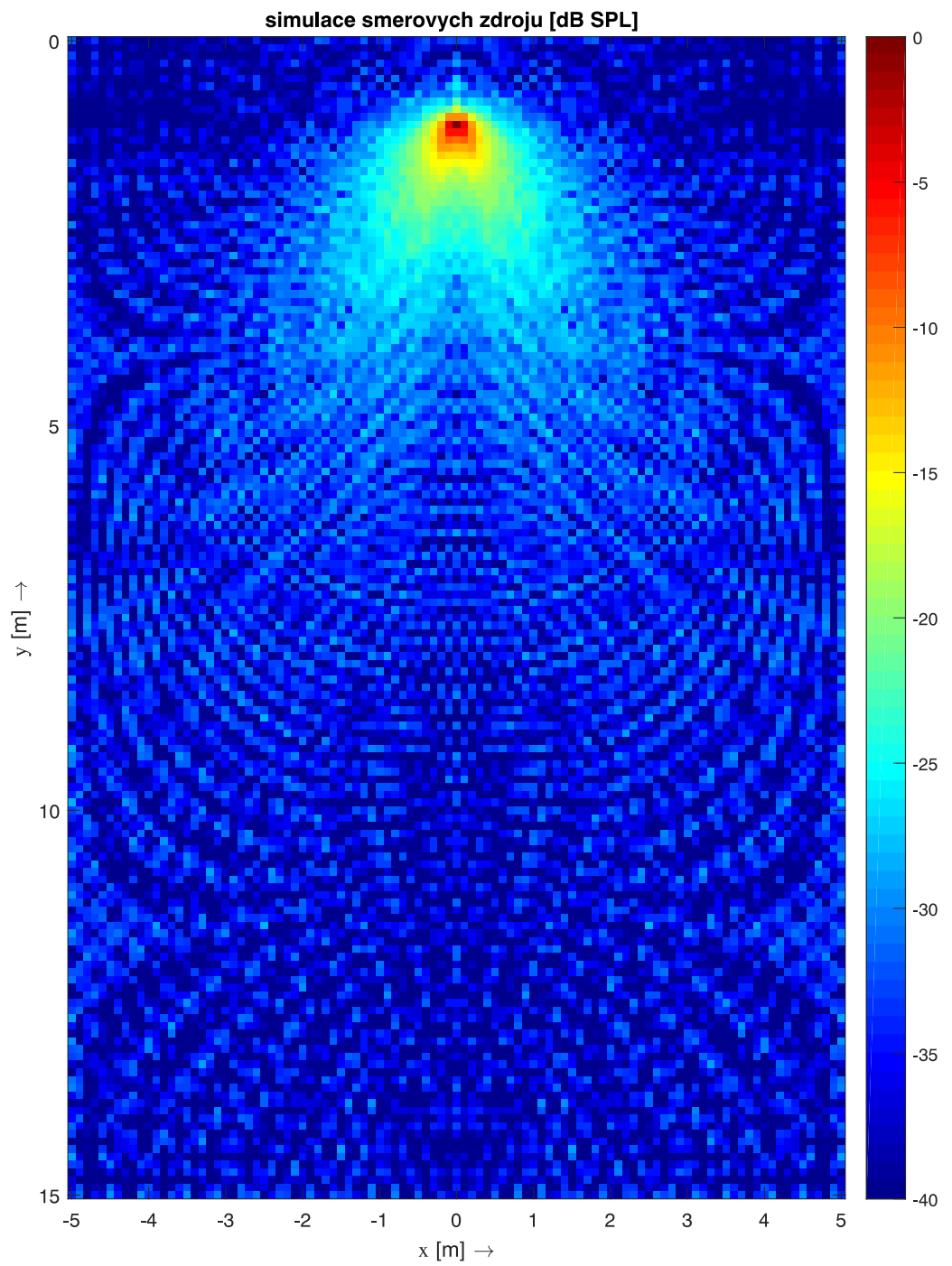
pro pokrytí blízkého rohu na opačné straně, než kam se posouvá zdroj (na obrázku 4.3 tedy vlevo dole).

Výhoda této konfigurace je v nejpřesnější možné lokalizaci zdroje na konkrétní místo a v minimalizaci hřebenového filtru, kdy jediným možným zdrojem hřebenového filtru jsou odrazy od stěn, podlahy a stropu místnosti, ale již ne interakcí jednotlivých součástí systému.

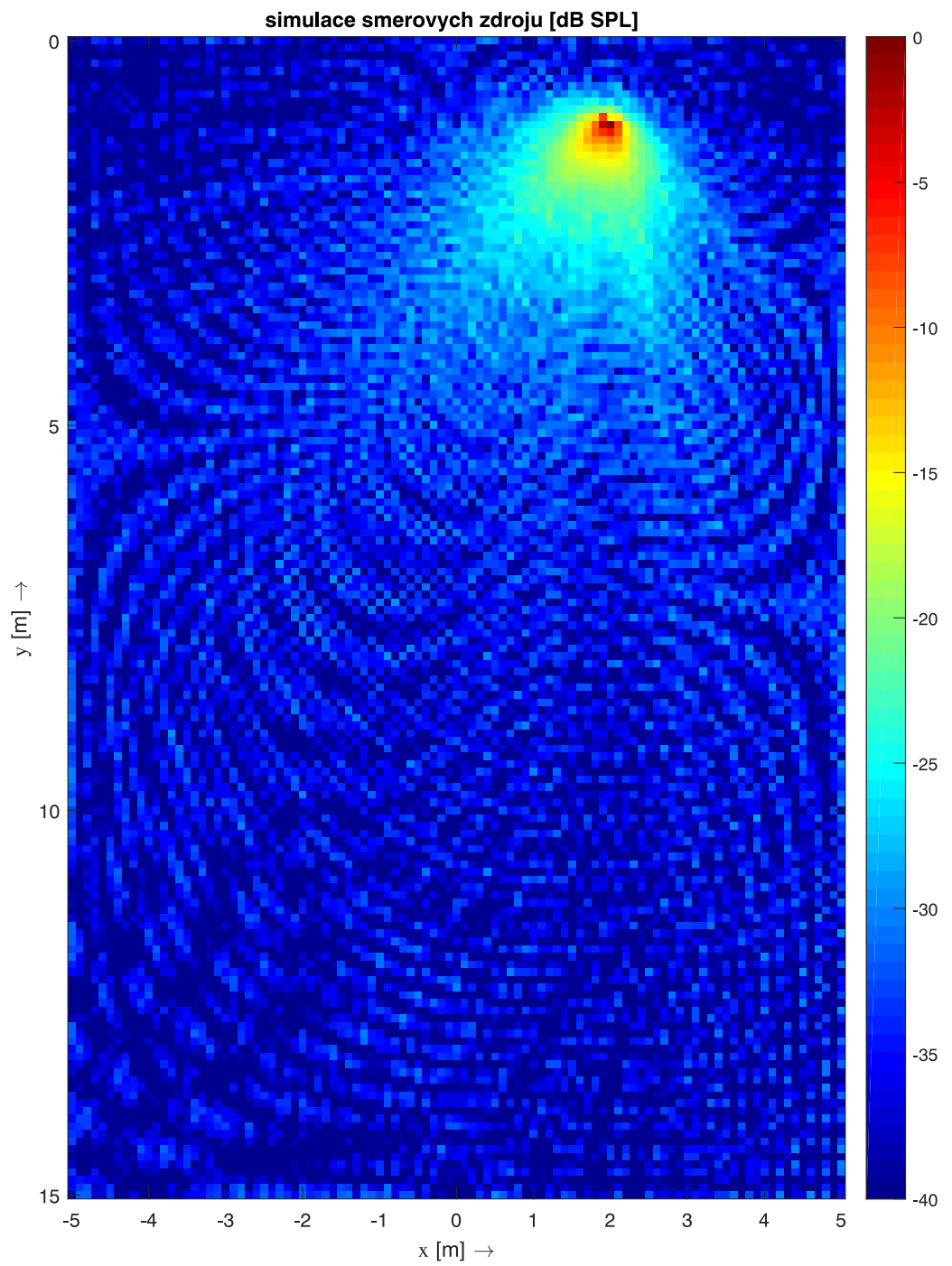
4.1.2 Dual mono

Pravděpodobně nepoužívanější a výrobci ozvučovací techniky nejdoporučovanější konfigurací je konfigurace *Dual mono*. Tato konfigurace předpokládá, že se používá k ozvučení hlavní dvojice boxů, zatímco každý z těchto boxů má za úkol pokrývat jednu polovinu auditoria. Pomyslné rozdělení auditoria je zobrazené na obrázku 4.7.

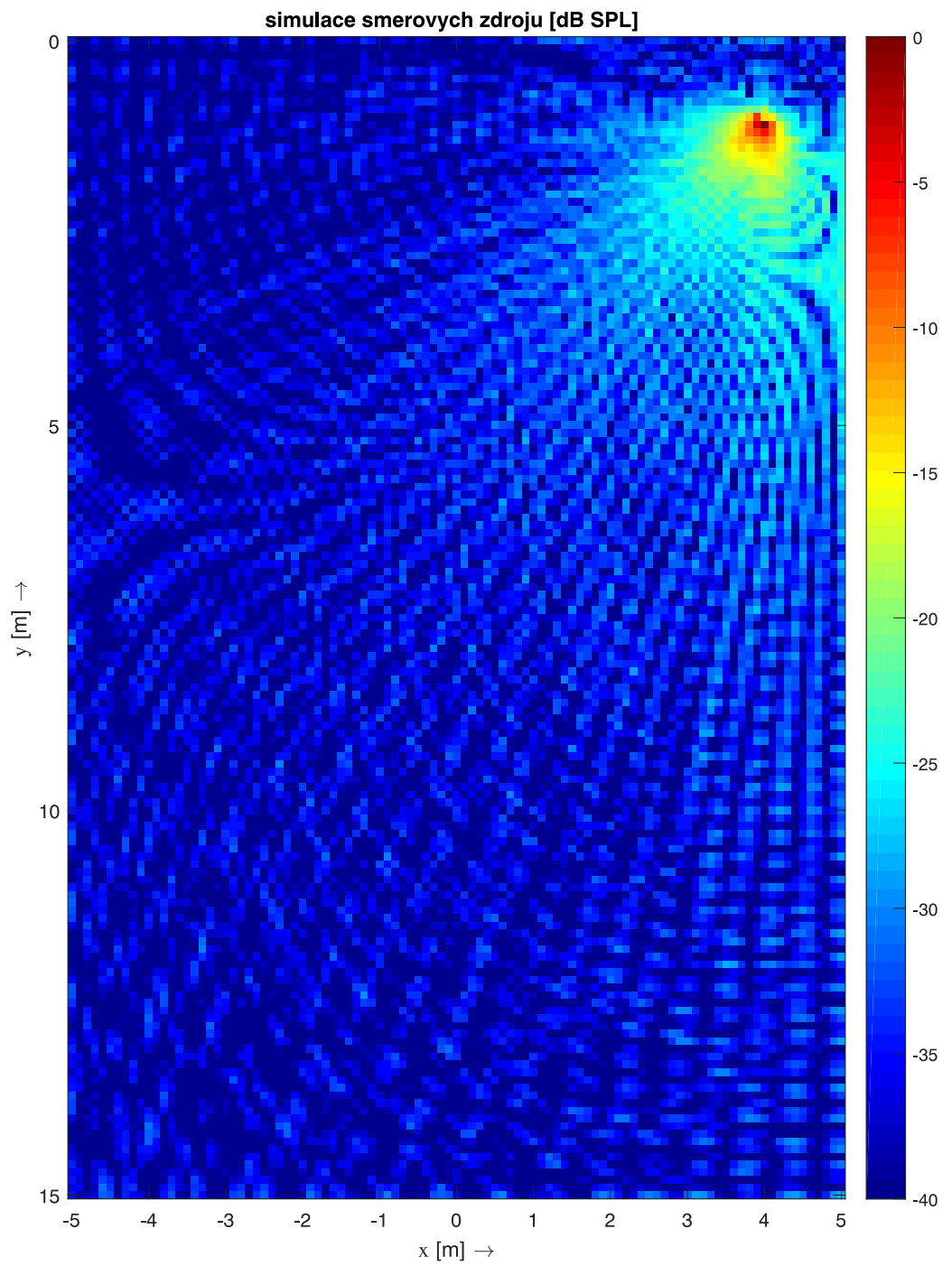
Důvodem k použití konfigurace *Dual mono* oproti konfiguraci *Single mono* je v praxi typicky jedna z následujících možností. Buďto není možné umístit mono zdroj zvuku dostatečně do středu sálu tak, aby byla zachována maximální vyrovnanost pokrytí jednotlivých stran, viz. obrázek 4.1 a nebo existuje snaha poskytnout auditoriu stereo poslech, čili v ten okamžik by se již nejednalo o zdroj *Dual mono* z definice nastavené 4.1. Čili k této možnosti a jejím výhodám a nevýhodám se ještě vrátíme v konfiguraci s dvoukanálovým zdrojem zvuku. Typickým důvodem, proč nelze použít konfiguraci *Single mono* bývá nemožnost umístit zdroj do geometrického středu, protože v geometrickém středu se obvykle vyskytuje něco, co má vizuální kvalitu, která v praktickém použití bohužel neumožňuje umístit zdroj zvuku do náležité pozice.



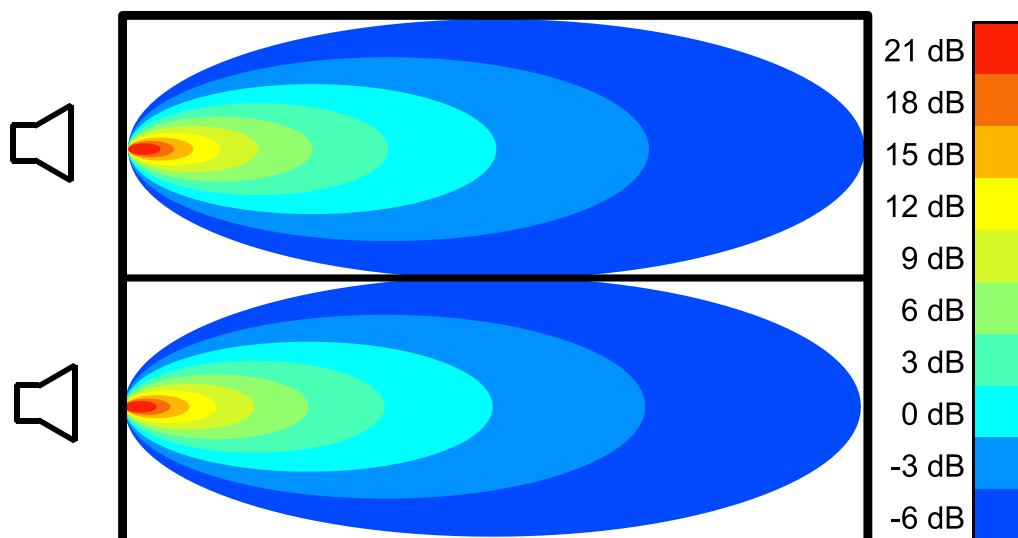
Obr. 4.4: Matlab simulace *Single mono*



Obr. 4.5: Matlab simulace *Single mono* mimo osu

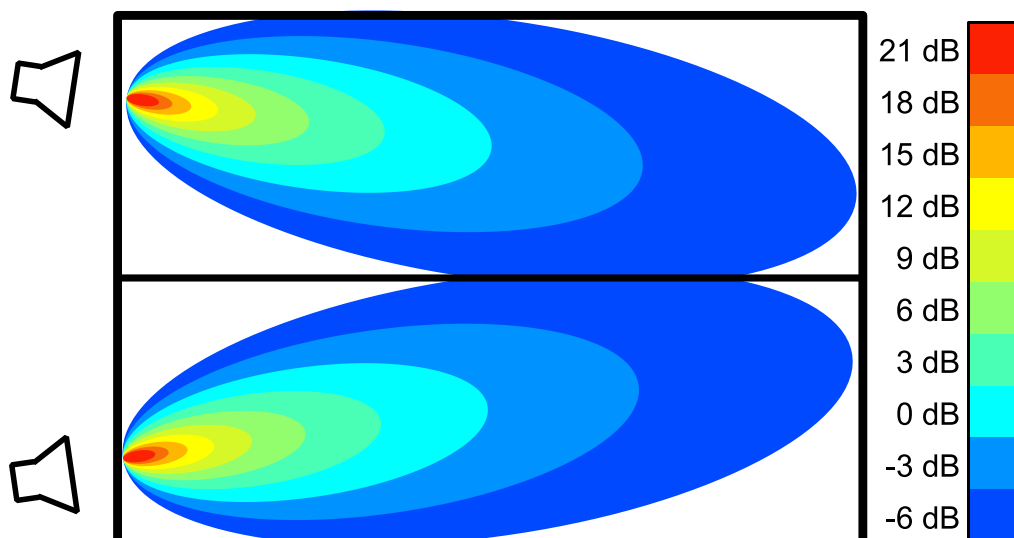


Obr. 4.6: Matlab simulace *Single mono* v rohu

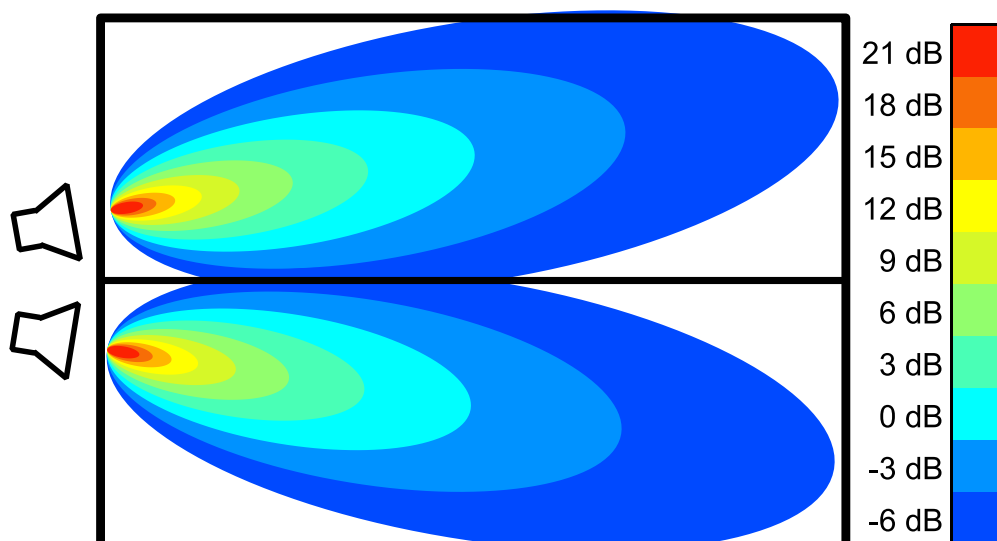


Obr. 4.7: konfigurace *Dual mono*

Což samozřejmě může mít nejen produkčně-komerční důvody požadavku na vizuální vjem, ale i důvody ryze praktické - například umístění monofonního zdroje zvuku v případě živého ozvučení většího auditoria mluvčím nebo zpěvákem přímo před tuto osobu by zvukově samozřejmě byla varianta naprosto ideální, ale zakrytí prostoru mluvčího nebo zpěváka ozvučovací technikou by mohlo být ze zřejmých důvodů přinejmenším komplikací. Situace vyžadující konfiguraci *Dual mono* nastává ještě v jednom podstatném případě a to tehdy, pokud je auditorium příliš široké na to, aby bylo v horizontálním směru pokryto pouze jedním reproboxem. Za předpokladu, že budeme očekávat použití standardně komerčně dostupných reproboxů s vlnovody, potom máme v horizontálním směru k dispozici úhly někde řádově ke 140–150°, čili podle tabulky 3.3 je zřejmé, že nelze úspěšně pokrýt místnost, která bude mít poměr stran nižší než 1, tedy místnost, kde auditorium bude širší než delší. V takovém případě je nutné použít konfiguraci *Dual mono* z důvodů zajištění pokrytí. Ke směřování reproboxu v takto definovaném prostoru pokračujeme na základě stejného principu jako v případě 4.1.1, tedy ke každé polovině auditoria přistupujeme samostatně a snažíme se aplikovat stejný princip umístění na osu prostoru a rotaci (*intilt* – horizontální natočení směrem dovnitř, k ose sálu, případně *outtilt* – horizontální natočení směrem ven) volíme podle stejného pravidla, tedy osa reproboxu by měla mířit na geometrický střed. Tyto konfigurace jsou načrtnuty na obrázcích 4.8 a 4.9. Systém *Dual mono* má oproti systému *Single mono* 2x vyšší FAR a tomu odpovídající požadavky na směrovost.



Obr. 4.8: konfigurace *Dual mono, intilt*

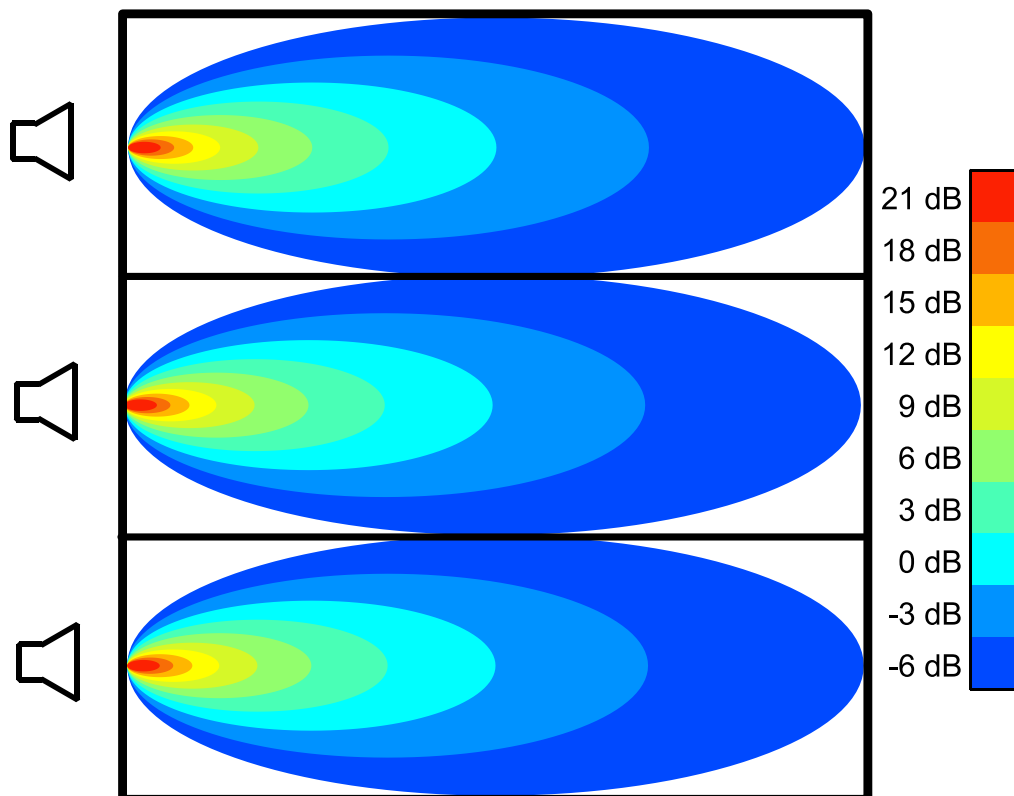


Obr. 4.9: konfigurace *Dual mono, outtilt*

4.1.3 Distribuovaný systém

Poslední konfigurace s mono zdrojem předpokládá, že ani konfigurace *Single mono*, ani konfigurace *Dual mono* stále umožňují zajistit pro větší část auditoria rovnoměrné pokrytí v horizontálním směru. Tato konfigurace je naznačena pro tři zdroje na obrázku 4.10. V takovém případě jde de facto o tzv. *Uncoupled line source* [1], tedy konfiguraci, kdy zdroje vyzařují ve stejném směru, ale nejsou umístěny blízko

sebe, ale jsou distribuovány tak, aby se vhodným způsobem doplňovaly. Pokud by bylo nutné nedodržet rovnoměrné rozestupy mezi jednotlivými boxy, potom lze situaci částečně kompenzovat opět podle stejného pravidla jako konfiguraci *Single mono* 4.1.1, tedy v jednotlivých částech auditoria, které jsou rozděleny mezi jednotlivé zdroje, se snažit vždy zvolit rotaci tak, aby zdroj zvuku mířil na geometrický střed této části.



Obr. 4.10: konfigurace *Distribuovaný mono systém*

4.2 Stereofonní dvoukanálový systém

Následující konfigurace předpokládají, že je snaha přenést signál, který je dvoukanálový a nese v sobě prostorovou informaci, tedy že tyto dva kanály jsou různé. V kapitole 3.6 bylo definováno, že vjem virtuálního zdroje, umožňující práci s pozicí zdroje ať už pomocí intenzitní nebo časového posunu po stereobázi, je striktně limitován maximálním možným úroňovým rozdílem mezi těmito dvěma zdroji a maximálním časovým rozdílem, který tyto signály od sebe mohou mít, aby vjem virtuálního zdroje (a tedy i samotná stereobáze) mohl vzniknout. Limity, které jsou

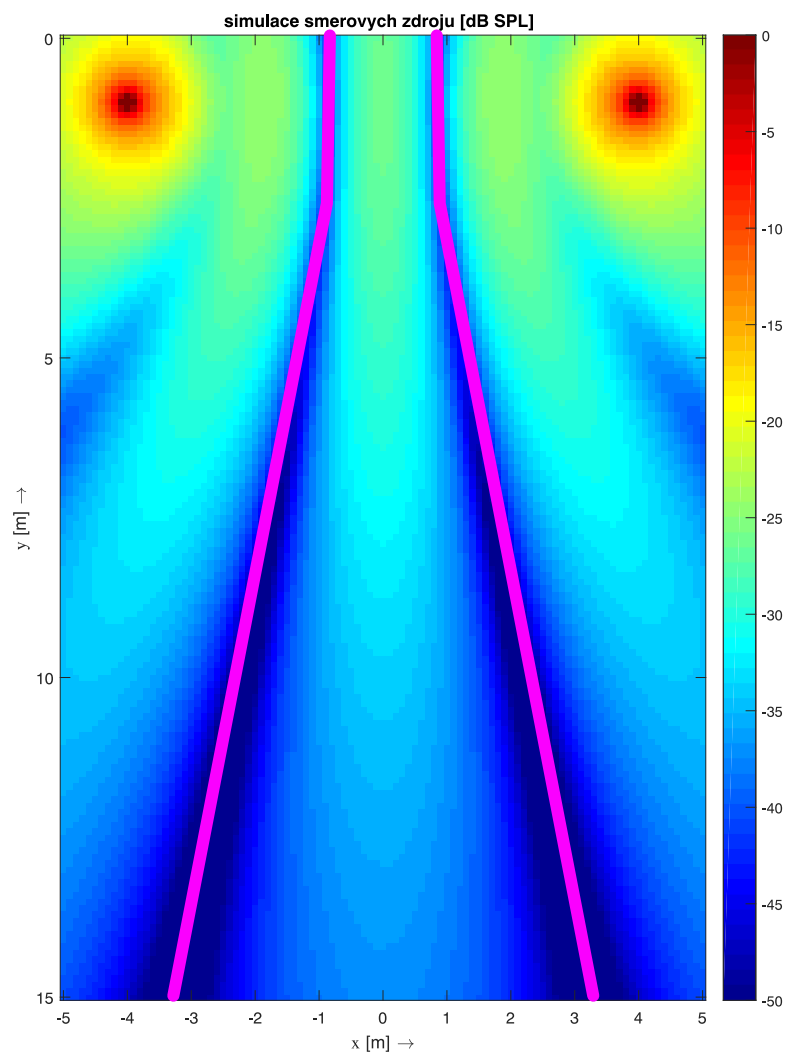
jednoznačným nejzazším limitem podle 3.6.6, je 10 dB a 5 ms. Jakýkoliv časový rozdíl vyšší než 5 ms (což při pokojové teplotě odpovídá 170 cm dráhového rozdílu jedné a druhé strany) znamená, že virtuální zdroj nemůže vzniknout a tedy snaha o přenos stejné prostorové informace jako má referenční signál 3.3.4, ať už vzniknul jako studiová nahrávka nebo třeba při živém koncertě vzniká na ose, v reálném prostoru umístěném v ideálních podmínkách vrcholu rovnoramenného trojúhelníku s podstavou určenou úsečkou mezi těmito dvěma zdroji.

Tento čas nelze bohužel nijak škálovat, čili nezávisle na použité technologii PA systému není možné zajistit, aby se tento vjem virtuálního zdroje a stereobáze rozšířil mimo oblast s dráhovým rozdílem přes 170 cm. Pro účely testování tohoto parametru je nejsnazší použít simulační software pro stereo konfiguraci a zobrazit si simulaci téměř libovolného zdroje na frekvenci 100 Hz. Vlna o frekvenci 100 Hz má periodu 10 ms, čili 5 ms odpovídá přesně jedné polovině periody dané frekvence. Simulace akustického tlaku (samozřejmě ve volném poli, tedy bez odrazů) zobrazí pro dráhový rozdíl půl periody výrazný propad, ze kterého lze poté snadno odečíst tvar a rozměry prostoru, pro který daná konfigurace splňuje dráhový rozdíl 170 cm, tedy časový rozdíl do 5 ms.

4.2.1 Stereo konfigurace - *Crossfire*

Pokud je naším cílem distribuovat referenční signál 3.3.4 s minimální možnou změnou během přenosu a referenční signál obsahuje informaci ve stereobázi, je nutné se jí snažit maximálním způsobem zachovat. Protože nelze škálovat časové rozdíly související s dráhovým rozdílem, množství diváků, pro které bude tento parametr platit, je bohužel předem určeno vztahem tvaru auditoria a rozteče reproboxů mezi sebou. Pokud například rozteč mezi oběma stranami ozvučovacího systému je zvolena příliš velká, potom si vjem virtuálního zdroje odnese opravdu jen velmi úzká skupina víceméně na ose ozvučovacího systému. Ovšem druhý parametr lze plnit o něco lépe, protože druhým parametrem je rozdíl úrovní, tedy vztah úrovně jednoho signálu vůči druhému v nějakém konkrétním místě nebo na určité ploše. Ve snaze zajistit maximální vyrovnanost levé strany oproti pravé je nutné zvolit pro obě strany reprobox, jehož *FAR* odpovídá celému rozměru místnosti, viz. konfigurace *Single mono* 4.1.1. Následně jsou podle tohoto principu boxy horizontálně směřovány tak, aby byla plocha auditoria pokryta s maximální možnou rovnoměrností. Použití této konfigurace (viz. obrázky 4.12 a 4.13). Tuto konfiguraci budeme nazývat *Crossfire*, tedy "křížová palba".

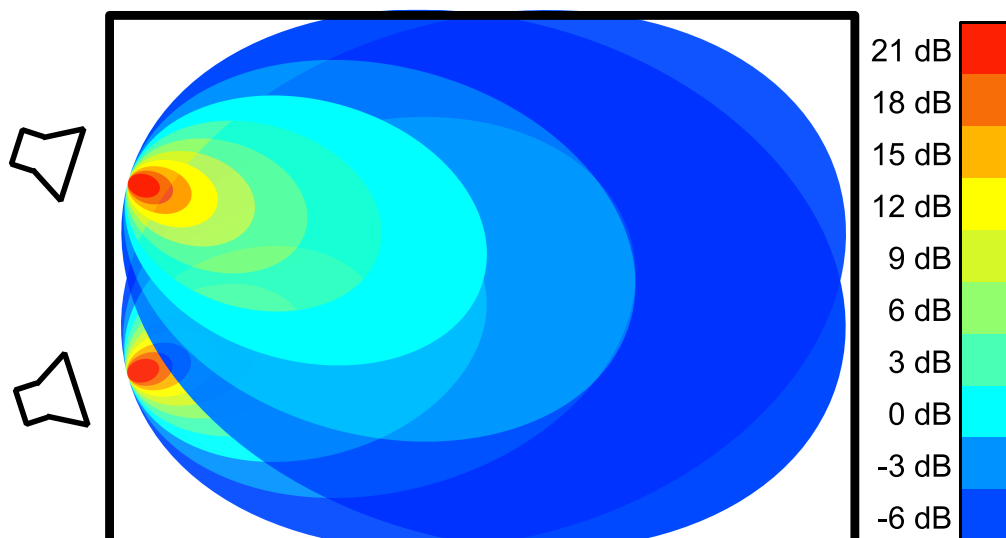
Výhodou této konfigurace je možnost distribuovat větší než zanedbatelné části publika dvoukanálový stereo vjem. Pokud referenční signál je a musí být stereo informace, ve smyslu dvoukanálové mixáže zdrojů, které jsou na stereobázi umístěny



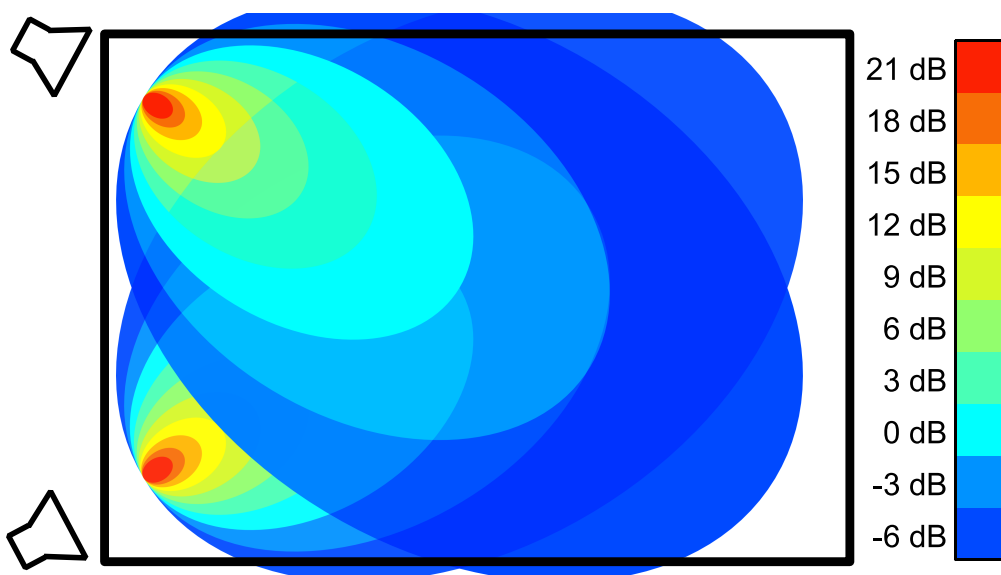
Obr. 4.11: simulace zdrojů na 100 Hz, časový rozdíl 5 ms

i jinde než uprostřed, potom tato konfigurace dává možnost splnit přinejmenším úroňový limit nutný nejen pro vznik stereobáze. Jde tedy hlavně o to, aby měl posluchač alespoň nějakou šanci slyšet zároveň obě strany referenčního signálu. I když pro nějaké množství diváků (řádově se v praxi reálného ozvučování místností pohybujeme zhruba mezi 30–70 % auditoria, které nemá možnost vnímat virtuální zdroj z důvodu nesplnění časového limitu, ale má alespoň možnost slyšet obě strany ozvučovacího systému díky prostorovému pokrytí jednotlivých stran při dané konfiguraci.

Nevýhodou tohoto systému může být míra excitace prostoru zdroje, zejména



Obr. 4.12: *Crossfire* konfigurace 1



Obr. 4.13: *Crossfire* konfigurace 2

pokud jde o živé ozvučení prostoru nějakého pódia, potom tato konfigurace (samozřejmě v závislosti na konkrétních parametrech instalace a použité techniky) může negativně ovlivnit funkci ozvučovacího řetězce, pokud vystaví oblast pódia zvuku o téměř stejné intenzitě jaká je použitá pro ozvučení auditoria. Kromě komfortu projevu na takovémto pódiu může tato konfigurace i negativně ovlivnit odstup signálu od zpětné vazby díky zvýšení intenzity zvuku přeneseného do oblasti pódia (tzv.

stage wash).

4.2.2 Konfigurace *Dual mono* pro dvoukanálovou stereofonii

Jedním v praxi často používaných případů, je použití konfigurace *Dual mono* (4.1.2), což je konfigurace, která je svou kombinací určena pro monofonní zdroj signálu, se zdrojovým signálem, který je stereo, tedy obsahuje prostorovou informaci. Z pohledu přístupu, který byl popsán v kapitolách výše, toto není ideální postup, pokud je cílem přenést posluchačům stejný vjem, který přenáší referenční signál 3.3.4. Snaha přenést stereo vjem je čistě z důvodu pozice omezena časovou roztečí signálů mezi sebou, viz. 3.6 a obrázek 4.11. Tento parametr již obvykle dost dramaticky limituje oblast auditoria, kterému lze předat stereofonní zážitek s zdroji pohybujícími se okolo virtuálního zdroje, tedy lokalizovány na místech, kde se fyzický žádný reprobox nevyskytuje. Použití *Dual mono* konfigurace pro reprodukci dvoukanálové stereofonie navíc nad rámec tohoto limitu ještě omezuje možnost samotné slyšitelnosti obou zdrojů. Tedy na rozdíl od konfigurace 4.2.1 není zajištěno pokrytí celého auditoria každým zdrojem zvláště, takže zejména na bocích ozvučovacího prostoru dojde k situaci, kdy je vztah úrovně z levé a pravé strany ozvučovacího systému výrazně víc než 6 dB, čímž tedy kromě možnosti lokalizovat správně zdroj na virtuální pozici není být ani zajištěna možnost slyšet zdroj, který z pohledu intenzity přichází pouze ze vzdálenější strany ozvučovacího systému, bez výrazného laterálního zkreslení způsobeného rozdílem intenzit v daném místě oproti referenčnímu signálu 3.3.4. Extrémním případem samozřejmě je situace, kdy z důvodu maskování při velkém rozdílu intenzit přestane být jedna strana signálu slyšet úplně, tedy situace, kdy vlastně pro daný prostor auditoria není přenesena polovina informace referenčního signálu.

4.2.3 Další stereofonní konfigurace, reálné zdroje

K vylepšení situace z konfigurace 4.2.2 s rozdílnými úrovněmi mezi levou a pravou stranou ozvučovacího systému lze v této konfiguraci použít zdroje, které mají horizontálně širší vyzařování, než by podle 3.7.5, resp. tabulky 3.3 bylo dostačující. Zde je nutné výrazně rozlišit případy, kdy se jedná o ozvučování prostoru uvnitř místnosti, haly, jednoduše prostoru, který má přinejmenším stěny, oproti otevřenému venkovnímu prostoru, kde odrazy nejbližší odrazy přichází se zanedbatelnou intenzitou. Pro případy otevřeného prostoru v horizontální rovině je volba konfigurace s rozšiřováním vyzařování nad rámec *FAR* dané části prostoru postup, který s sebou nese oproti 4.2.2 téměř samé klady. Rozšiřuje se pokrytí jednotlivých stran samostatně, tedy plocha auditoria, na které jsou oba zdroje vůči sobě ve vztahu ± 6 dB.

Čím širší vyzařování oproti původnímu vyzařování podle 3.3, tím více se tato konfigurace postupně blíží ke konfiguraci 4.2.1, tedy variantě, kdy každá strana v rámci svého pokrytí je schopna pokrýt většinu auditoria. Pro případy uzavřeného prostoru ovšem situace není tak jednoznačná. Snaha pokrýt maximální možnou šířku prvních řad podle přepočtu *LAR* (3.7.6) může sice stejně jako ve venkovním případě přinášet pozitiva ve smyslu šířky pokrytí jedné a druhé strany ozvučovacího systému, ovšem v případě vnitřního ozvučování je nutno vzít v potaz odrazy od stěn a jejich frekvenční charakter. Pro ozvučovací techniku určenou pro pokrytí velkých prostor je typické (a důvody k tomu jsou jak mechanické a fyzikální, tak i komerční ve smyslu "univerzálnosti"), že disponuje vyzařovacími úhly nejčastěji v oblasti 70–120°. Užší vyzařování než 70° a širší než 120° v horizontálním směru je u velkoformátových ozvučovacích systémů výjimkou. Pravděpodobně nejčastější horizontální vyzařování pro velkoformátové systémy je 80–90°, čemuž odpovídají poměry stran zhruba 1,3–1,4:1. Naopak typické sály disponují poměrem stran zhruba od 1:1 (čtverec) po zhruba 3:1. Například poměru stran 2:1 by podle 3.7.5 odpovídal vyzařovací úhel 60°. Pokud by cílem bylo splnit princip 4.1.2, tak rozdělením sálu na polovinu by se poměr stran zvýšil na dvojnásobek, čemuž odpovídá zhruba 30° vyzařování, což neodpovídá prakticky žádnému ozvučovacímu systému z aktuální nabídky na trhu systému pro ozvučování velkých prostor. Dá se tedy očekávat, že vyzařovací úhel, který budeme mít k dispozici, bude často vyšší, než by vyžadovala striktní analýza podle *Dual mono* a *FAR*. Čili pokud bychom zachovali směřování podle *Dual mono* principu, pak je zjevné, že část energie ze zdroje s širším než nutným vyzařováním se dostane do prostoru z diváky na druhé polovině sálu (což je pozitivní), ale stejné množství této energie navíc se na druhé straně vyzařovacího úhlu vydá proti stěně místnosti nebo sálu. Vliv tohoto odrazu lze simulovat pomocí aplikace 2 pro vybrané materiály stěn.

4.2.4 Příklady simulací z prostředí Matlab

V této kapitole budou zobrazeny vybrané výsledky simulací konfigurací uvedených výše v kapitole 4.

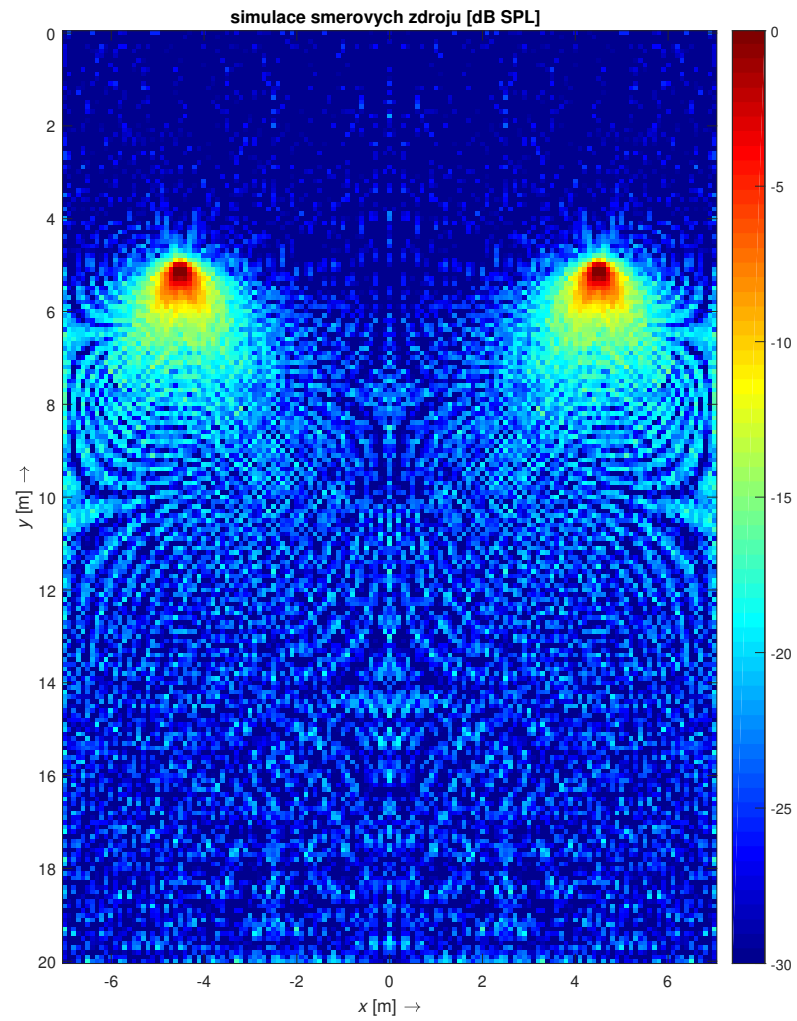
Pro zvolené auditorium o šířce 14 m a délce 20 m si zobrazíme výsledky pro 100 Hz, 4 kHz a 10 kHz pro systém dvou zdrojů uzavřených v místnosti s vymalovanými zdmi a jako reprobox zvolíme d&b Y10P, což je reprobox s nominálním vyzařovacím úhlem 110° horizontálně. Tento reprobox je koncepcí konfigurace d'Apollito, kdy vertikálně od zhora dolů jde o konfiguraci přímovyzářující 8"woofer, vlnovod na výškový kompresní driver s 1,4"vyústěním do vlnovodu s konstantní směrovostí a druhý 8"woofer. Box na šířku není dramaticky širší než samotné 8"měniče, takže se dá očekávat, že v horizontálním směru bude na nižších kmitočtech převládat přirozená

směrovost měniče a reprobox tedy zhruba do kmitočtu 500 Hz bude všesměrový.

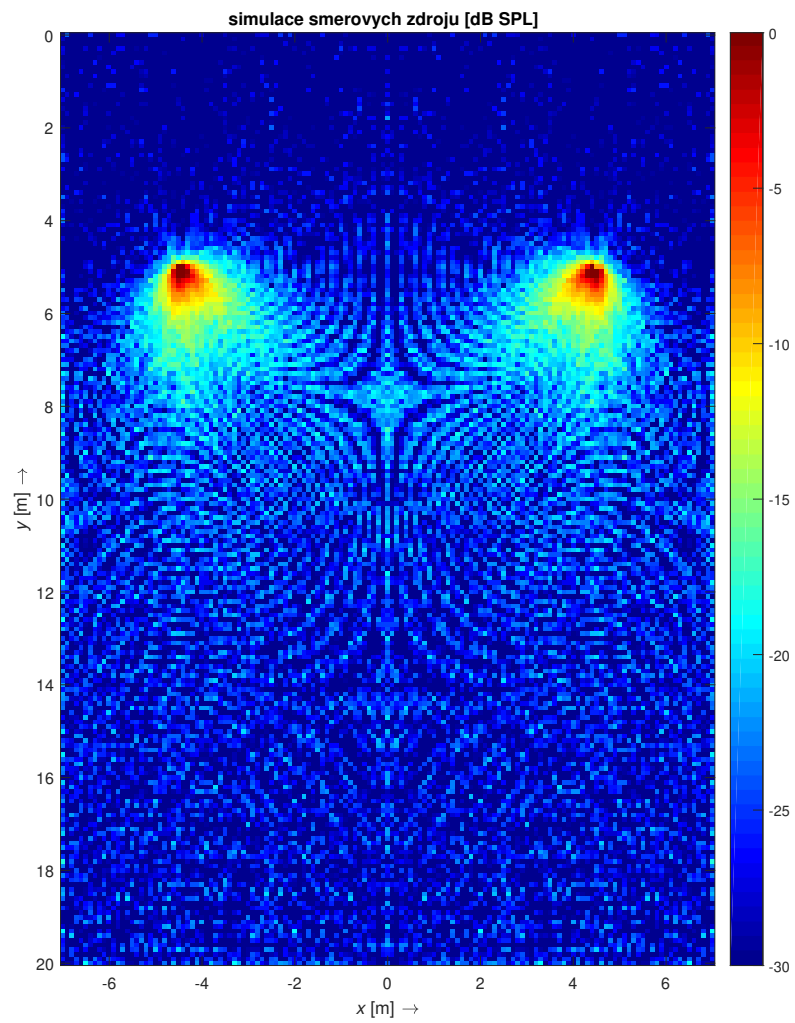
Auditorium o šířce 14 m a délce 20 m má *Forward Aspect ratio* 3.7.5 1,42, tudíž vhodný box pro konfiguraci *Dual mono* by měl mít horizontální vyzařovací úhel zhruba 45° a pro konfiguraci *Crossfire* by měl být ideální vyzařovací úhel asi 90° . Tento příklad, přestože je zřejmé, že přinejmenším na metodu *Dual mono* podle principu *Forward Aspect Ration* reprobox vhodný není, uvádím z toho důvodu, že toto je v praxi poměrně typická situace, kdy v uzavřeném prostoru je k dispozici výrazně širší box než by na první pohled stačil. Na obrázku 4.18 lze vidět konfiguraci typu *Dual mono*, kde intilt je tedy 0° . Ze simulace je zřejmý výrazný vliv odrazů od stěn na obou stranách poslechového prostoru. Tento netlumený odraz způsobuje na daném místě výrazný hřebenový filtr 3.6.7, který se mění s každým bodem prostoru, který je tím jevem zasažen, protože se pro každý bod mění časový rozdíl příchodu jednoho a druhého signálu. Na obrázku 4.19 je vidět stejná situace v konfiguraci *Crossfire*, kde je vidět výrazné snížení vlivu odrazů na vyzařování.

Simulace identické situace pro frekvenci 100 Hz. Na obrázcích 4.16 a 4.17 lze vidět, že v pro rozhodování o rotaci v horizontálním oblast nejnižších kmitočtů prakticky nenese smysluplnou informaci, neboť (téměř) všesměrové zdroje jsou (téměř) imunní vůči rotaci. Proto jsou tyto dva obrázky prakticky identické.

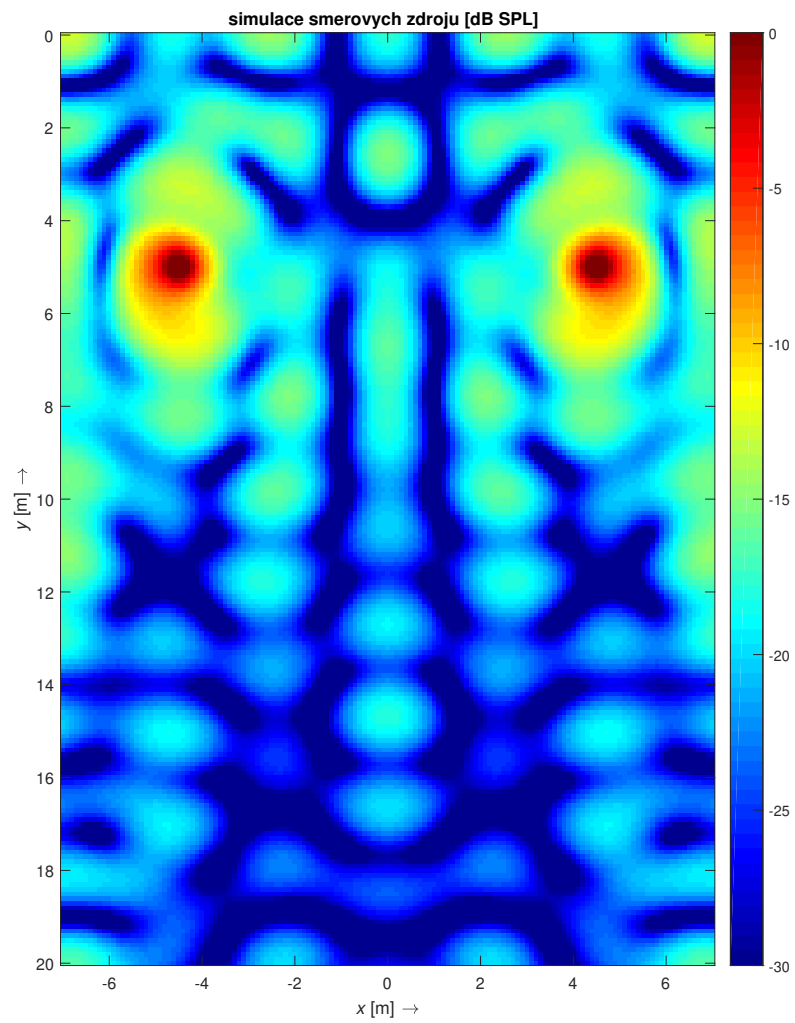
Stejná geometrická situace z pohledu 10 kHz vypadá následujícím způsobem ?? a ?? . Z pohledu 10 kHz, vypadá vypočtený obraz zdánlivě obdobně, ovšem zde je nutné mít na paměti hned několik akustických fenoménů. Jednoznačně nezanedbatelným jevem na těchto kmitočtech je útlum vyšších frekvencí ve vzduchu 1.3. To znamená, že další každý další odraz bude mít reálně menší vliv než simulace ukazuje. Další jev, který je nutné vzít v potaz, je tvar hlavy a HRTF (head-related transfer function), které nám určují do jaké míry lidská hlava může utlumovat signály přicházející v jiném směru, resp. obecně směrovou charakteristiku ucha jako akustického přijímače. Pro 10 kHz může útlum způsobený stínem hlavy, způsobit rozdíl až 30 dB pro signály přicházející z opačné strany, než té na které je ucho, které analyzujeme. Signálům přicházejícím pod úhlem odpovídající odrazu z druhé strany (a to jak co se týče přímého tak odraženého zvuku) v této simulaci odpovídá útlum zhruba 10-20 dB[11]. Využijeme tedy nyní funkce umožňující v simulačním programu jeden ze zdrojů vypnout a vypnout odrazy na všechny stěny, kromě stěny přilehlé, jejíž odraz bude jistě mít na sluchový vjem stále významný vliv. Tato situace je tedy demonstrována na obrázcích 4.21 a 4.20. Zde je patrný výrazný rozdíl mezi jednotlivými konfiguracemi, který v takto odrazivém prostředí jednoznačně hovoří ve prospěch konfigurace typu *Crossfire*.



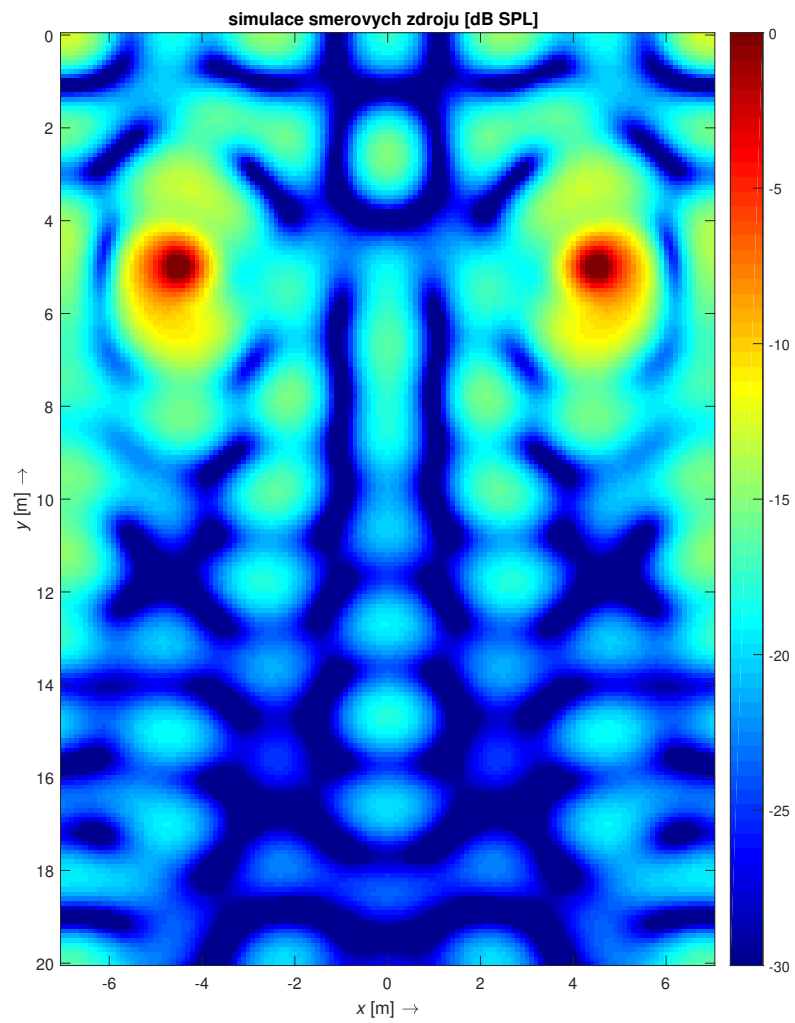
Obr. 4.14: Konfigurace typu *Dual mono* pro větší vyzařovací úhel, 4 kHz



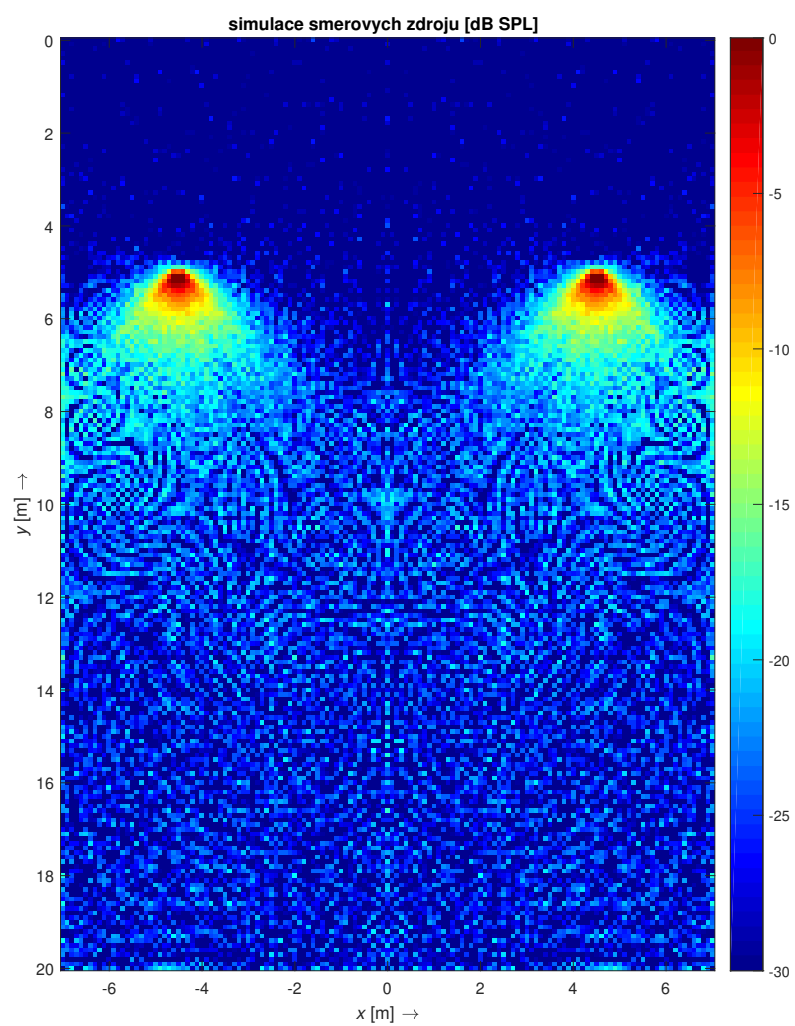
Obr. 4.15: Konfigurace typu *Crossfire* pro větší vyzařovací úhel, 4 kHz



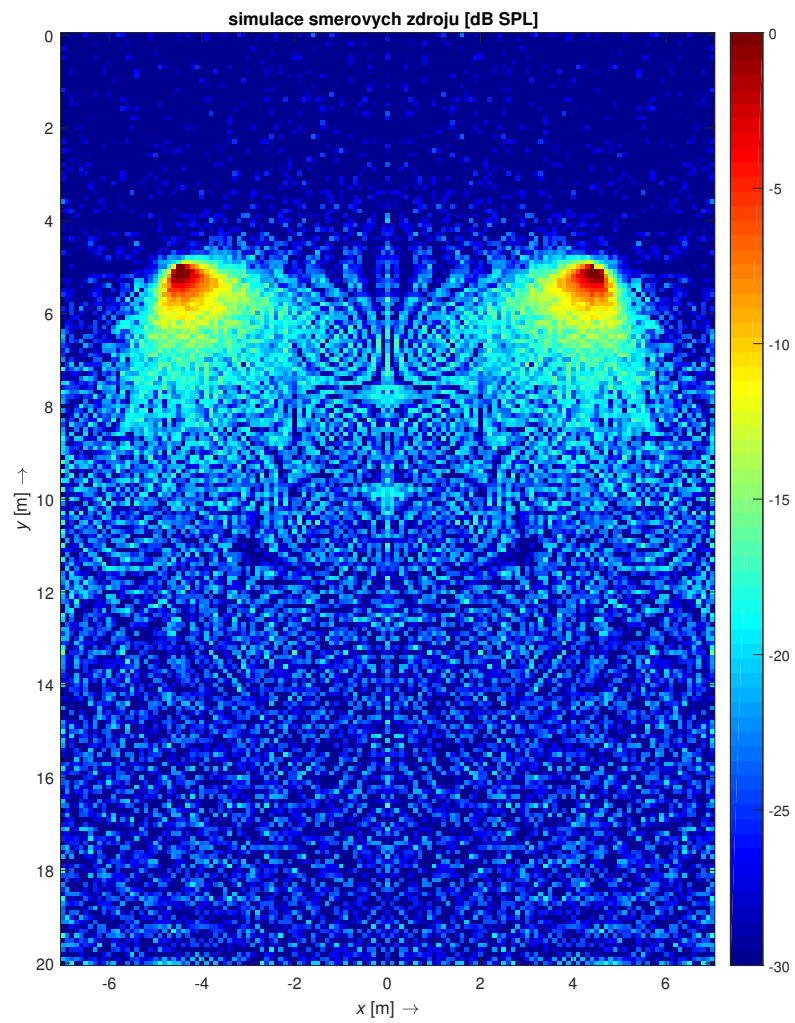
Obr. 4.16: Konfigurace typu *Dual mono* pro větší vyzařovací úhel, 100 Hz



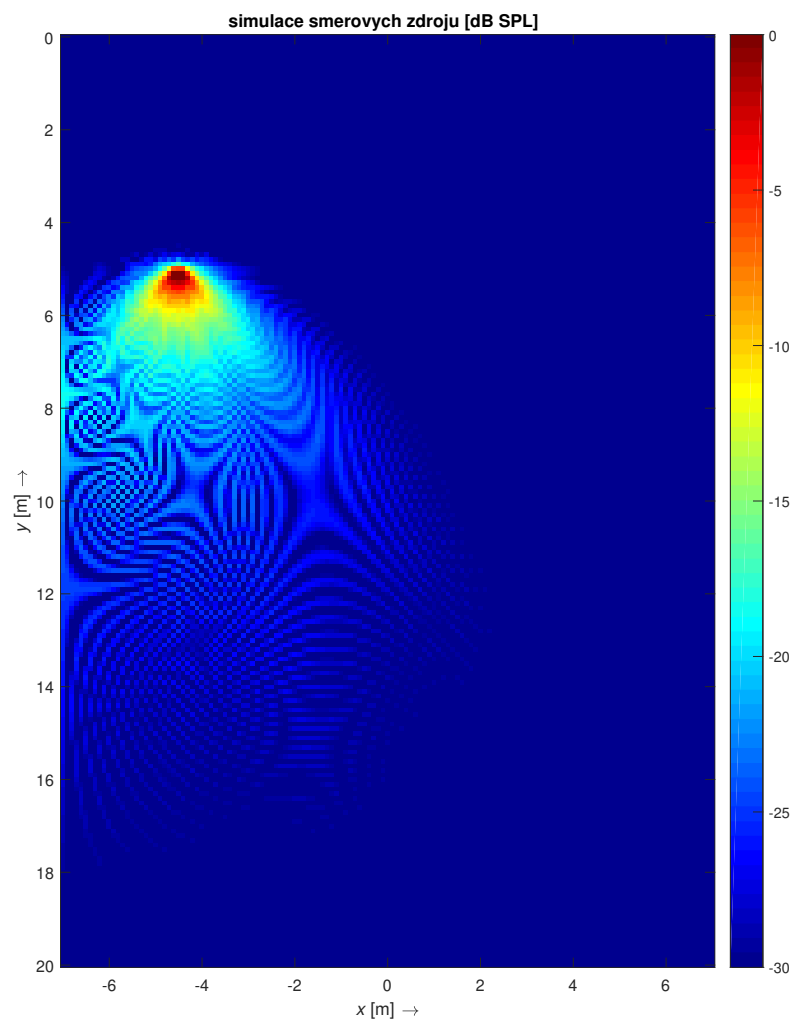
Obr. 4.17: Konfigurace typu *Crossfire* pro větší vyzařovací úhel, 100 Hz



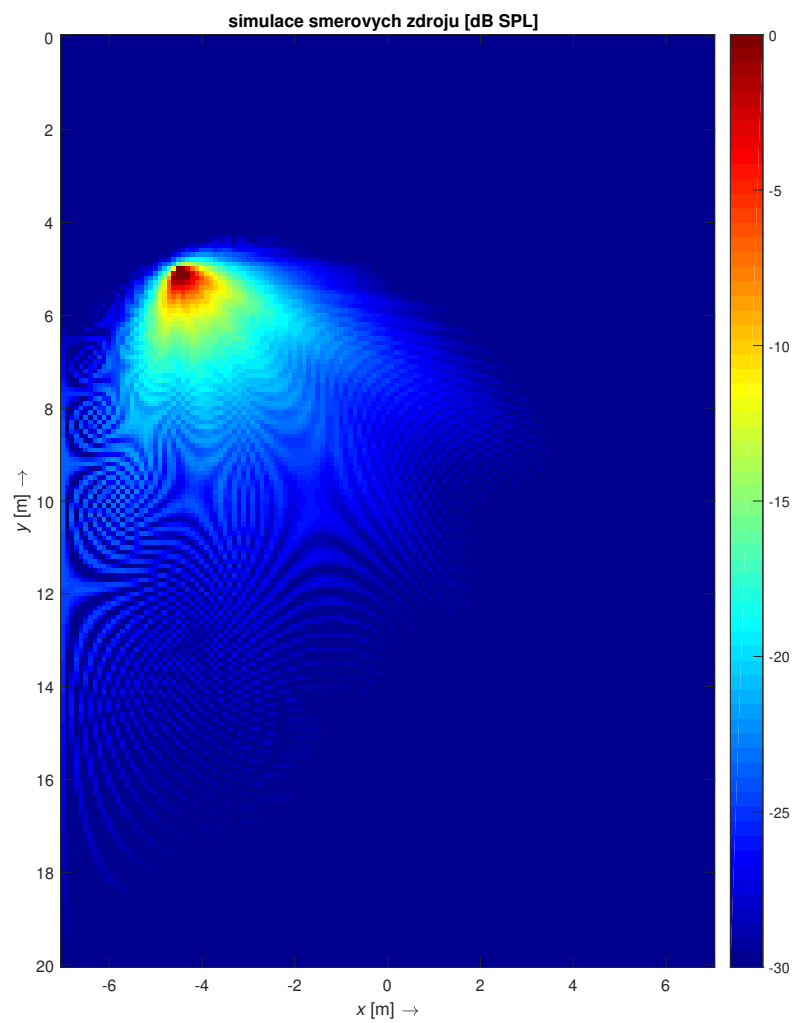
Obr. 4.18: Konfigurace typu *Dual mono* pro větší vyzařovací úhel, 10 kHz



Obr. 4.19: Konfigurace typu *Crossfire* pro větší vyzařovací úhel, 10 kHz



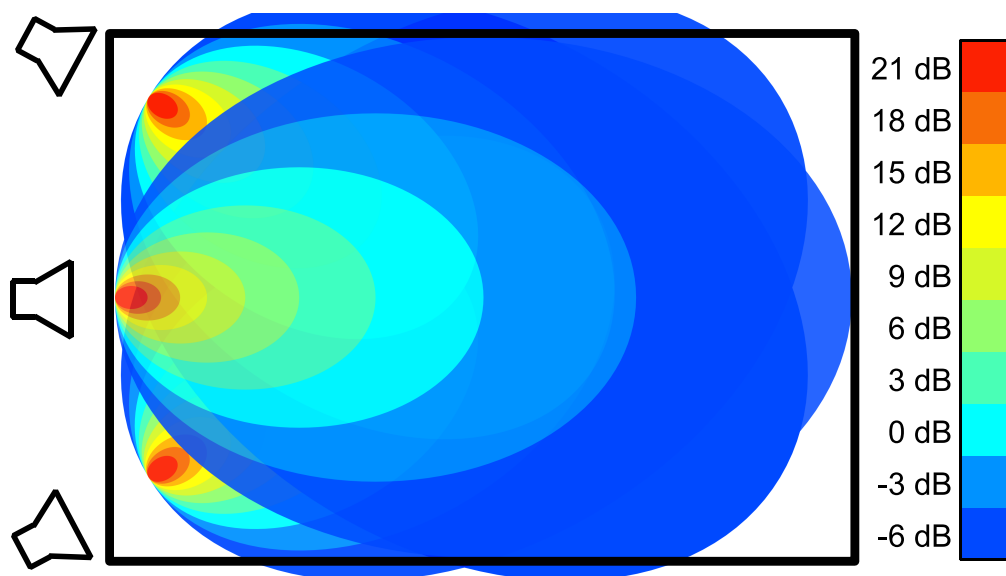
Obr. 4.20: Jeden ze dvou zdrojů konfigurace *Dual mono* pro větší vyzařovací úhel, 10 kHz, odraz pouze od nejbližší stěny



Obr. 4.21: Jeden ze dvou zdrojů konfigurace *Crossfire* pro větší vyzařovací úhel, 10 kHz, odraz pouze od nejbližší stěny

4.3 Vícekanálové zvukové systémy

Pro vícekanálové systémy, kdy zdrojovými daty je větší množství zvukových kanálů než dva, platí obdobná pravidla jako v předchozích případech. Ať už se jedná o tříkanálový systém LCR nebo o vícekanálový systém určený primárně pro filmovou produkci (konfigurace 5.1, 7.1, Dolby Atmos, DTS:X, atd.) nebo o vícekanálový systém určený primárně pro živé ozvučování (např. d&b audiotechnik Soundscape, L-Acoustics L-ISA, Meyersound Spacemap), prostorová konfigurace musí stále splňovat přinejmenším slyšitelnost jednotlivých zdrojů. Tedy z pohledu konfigurace reproboxů je pro každý zdroj, který má za cíl pokrývat určitý prostor (ve vícekanálových systémech toto obvykle znamená celé auditorium), vhodné dodržet stejný princip umístování a směřování jako je definován výše 4.1.1. Pro úplně každou konfiguraci, tedy včetně takových, které nemají za cíl vytvářet virtuální zdroj, tedy nepotřebují nutně striktně splňovat 5ms limit časového rozdílu mezi zdroji, stále platí, že pokud má tato konfigurace být schopna přenášet původní informaci 3.3.4 i mimo tzv. *sweet spot*, tedy mimo jeden ideální bod prostoru (typicky bod uprostřed auditoria), je nutné přinejmenším zajistit dostatečně vyrovnanou distribuci od jednotlivých zdrojů z pohledu úrovně. Jakmile se při postupování mimo tzv. *sweet spot* směrem do krajů auditoria dostaneme do situace, kdy rozdíl dvou zdrojů (typicky aktuálně nejvzdálenějšího a aktuálně nejbližšího) činí víc jak 10 dB, potom již slabší z těchto dvou zdrojů na daném místě nebude dobře plnit svůj účel a prostorovou informaci obsaženou v referenčním signálu nebude na to místo již možné přenést. Příkladem vícekanálového systému může být například LCR systém, jehož konfiguraci lze vidět na obrázku 4.22



Obr. 4.22: LCR konfigurace

5 Závěr

Práce rozebírá základy zvuku a jeho šíření, na kterých staví obor *Sound system design* - návrh systému pro ozvučování. V teoretické části byly popsány základní vlastnosti zvuku a fyzikální vztahy jednotlivých veličin, které umožnily vytvořit simulační software určený pro návrh a analýzu ozvučovacího systému v rovinném zobrazení za pomoci výpočtu rychlostního potenciálu a jeho přepočtu na akustický tlak. Dále byly popsány cíle návrhu ozvučovacího systému a jednotlivé parametry, kterými lze kvalita návrhu hodnotit, ať už na úrovni návrhu nebo ověření reálných instalací. Byly popsány možné horizontální konfigurace, s důrazem na ty, které lze v praxi realizovat. Také byly rozepsány jejich obecné výhody a nevýhody. Pro účely ověření jednotlivých konfigurací pomocí počítačové analýzy byl vytvořen simulační program v prostředí Matlab, který umožňuje vykreslovat pokrytí akustickým tlakem v rovině vertikálního nebo horizontálního řezu ozvučovaného prostoru. Byly ověřeny všechny zmíněné konfigurace s důrazem na horizontální dvouzdrojové konfigurace a to včetně konfigurací, které sice nejsou ideální, ale blíží se reálnému použití s obecnými dispozicemi sálů s boxy dle nabídky trhu.

Z ověření těchto konfigurací pomocí simulací vyplývá, že v případě, že není možné aplikovat konfiguraci *Dual mono* z důvodu širší směrovosti zdrojů, než by bylo žádoucí podle principu *FAR*, potom je vhodnější řešení přejít na konfiguraci *Crossfire*. Toto je situace, která nastává v praxi často. Obě konfigurace se na nejnižších kmitočtech chovají prakticky stejně, pokud jsou použity zdroje, které jsou na nejnižších kmitočtech téměř všesměrové, což platí pro naprostou většinu komerčně dostupných ozvučovacích systémů. Na nejvyšších kmitočtech (zhruba od 5 kHz výše) může simulace pokrytí statického akustického tlaku mírně zkreslovat, protože nebere v potaz útlum hlavy (Head-Related Transfer Function) ani časové vztahy přímého a odraženého zvuku. Zanedbání těchto jevů a k ohodnocení použití pouze data ze simulace, může vést k mylnému úsudku. Ze simulace na takto vysokých kmitočtech se v určité situaci může např. zdát, že hřebenový filtr vznikající mezi levým a pravým kanálem (počítaným pro koherentní zdroje) ozvučovacího systému má být považován automaticky za větší hrozbu než odraz od rovné a odrazivé stěny na stejné straně, ze které přichází přímá vlna. Je velmi pravděpodobné, že reálný vliv odrazu od stěny bude na vjem z pohledu vyrovnanosti i z pohledu lokalizace zdroje horší.

Tyto parametry měly být původně ověřeny měřením impulzních odezev v reálných konfiguracích, ale z důvodu omezení provozu všech s kulturou spojených institucí v rámci opatření proti šíření Covid-19 tato ověření nakonec nebylo možné získat. Data ověřující tyto konfigurace, která jsou k dispozici, nejsou dostatečně systematická pro použití v této práci, neboť nebyly získány za účelem prezentace těchto jevů. Zadaní práce po změně z doby karantény, toto ověření již nevyžaduje. Vypracovaný simu-

lační software umožňuje výše zmíněné konfigurace ohodnocovat, včetně možnosti nezávisle zobrazovat jednotlivé zdroje a jednotlivě zapínat odrazivost stěn. Pomocí tohoto přístupu lze snadno odhalit potenciální potíže plynoucí např. z nevyrovnanosti směrové charakteristiky, nevhodně zvoleného překryvu zdrojů nebo přílišné excitace odrazivých ploch na stěnách. Používání reálných změřených dat směrovosti a jejich procházení v jednotlivých frekvenčních pásmech je nenahraditelná součást procesu návrhu. Neexistuje žádný způsob, jak by šlo zároveň do jednoho grafu vyjádřit problematiku směrovosti a distribuce signálu pro 10 oktáv slyšitelného frekvenčního rozsahu. Pro účely základního návrhu, který tuto přesnost nevyžaduje, jsou zavedeny parametry *FAR* a *LAR*, které umožňují udělat orientační návrh na základě údaje o nominální směrovosti reproboxu.

Literatura

- [1] MCCARTHY, Bob. *Sound systems: design and optimization : modern techniques and tools for sound system design and alignment*. 3rd Edition New York: Focal Press, 2013. ISBN 978-0-240-52156-5.
- [2] ŠKVOR, Zdeněk: *Akustika a elektroakustika* Praha: Academia, 2001. ISBN 80-200-0461-0.
- [3] DAVIS, Don, Eugene PATRONIS, Pat BROWN a Glen BALLOU *Sound system engineering* Fourth edition, Burlington, MA: Focal Press, 2013 ISBN 9780240818467
- [4] VORLÄNDER, Michael.: *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Berlin: Springer, 2007
- [5] JIŘÍČEK, Ondřej.: *Úvod do akustiky*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002
- [6] F. Alton Everest & Ken C. Pohlmann *Master Handbook of Acoustics*. 6th Edition, McGraw-Hill Education, Kindle Edition, 2015 ISBN: 978-0-07-184103-0
- [7] MERHAUT, J.: *Teoretické základy elektroakustiky*. Academia, Praha, 1971
- [8] GEIST, Bohumil. *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, 2005. ISBN 80-86253-31-7.
- [9] WIRSUM, Siegfried. *Abeceda nf techniky*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-26-0.
- [10] *Inverse square law*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Inverse-square_law
- [11] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*, 3., dopl. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 2013 ISBN 978-80-7331-297-8.
- [12] Haas, Helmut: *The Influence of a Single Echo on the Audibility of Speech*, AES journal 20/2, stránky (146–159), březen 1972
- [13] Litovsky R. Y., Colburn H. S., Yost W. A., Guzman S. J.: *The precedence effect*,” AES journal Vol.106 (1999), 633-1654
- [14] Keele, Jr., D. B.: *What’s So Sacred About Exponential Horns?*, Audio Engineering Society Convention 51, květen 1975

- [15] Martinez, Charles and Gilman, Samuel *Results of the 1986 AES Audiometric Survey*, Audio Engineering Society Convention 83, říjen 1987 Dostupné z: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=4884>
- [16] M. R. Schroeder, *Diffuse sound reflection by maximum-length sequences*, Journal of Acoust. Soc. Am.,57. 1975

Seznam symbolů, veličin a zkratk

SSD	návrh ozvučovacího systému – Sound System Design
FOH	zvuková režie při ozvučování eventů – Front Of House
STI	index přenosu řeči – Speech Transmission Index
DAW	program pro úpravu a mixáž zvuku – Digital Audio Workstation
DSP	číslicové zpracování signálů – Digital Signal Processing
Tonalita	tvar přenosové funkce
IID	Interaurální rozdíl intenzit – Interaural Intensity Difference
ILD	Interaurální rozdíl hladin – Interaural Level Difference
ITD	Interaurální rozdíl času – Interaural Time Difference
IPD	Interaurální rozdíl fáze – Interaural Phase Difference
FAR	Poměr stran odpovídající dopředné části směrovosti – Forward Aspect Ratio
LAR	Poměr stran odpovídající šířce vyrovnaného vyzařování proti hloubce – Lateral Aspect Ratio
HRTF	Přenosová funkce vztažená k hlavě – Head-Related Transfer Function

Seznam příloh

A	Přiložené soubory	94
A.1	.zip archiv s kódem v prostředí Matlab a s příklady testovacích změ- řených směrových charakteristik a koeficientů pohltivosti	94

A Přiložené soubory

- A.1 .zip archiv s kódem v prostředí Matlab a s příklady testovacích změřených směrových charakteristik a koeficientů pohltivosti**