

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

**NÁVRH A MĚŘENÍ PARAMETRŮ AKUSTICKÝCH
DIFÚZNÍCH PRVKŮ**

DESIGN AND MEASUREMENT OF PARAMETERS OF ACOUSTIC DIFFUSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Burda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Jan Burda

ID: 156141

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a měření parametrů akustických difúzních prvků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a popište konstrukce akustických difúzních prvků pracujících na různých principech a metody jejich návrhu. U vybraných konstrukcí proveďte detailní návrh, vytvořte výkresovou dokumentaci a realizujte vzorky difúzních prvků. Nastudujte metody měření parametrů difúzních prvků a proveďte měření vámi realizovaných vzorků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] EVEREST, F., A. Master Handbook of Acoustics, 4th ed. McGraw-Hill, 2001. ISBN: 0-07-136097-2

[2] COX, T., J., D'ANTONIO, P. Acoustic Absorbers and Diffusers, 2nd ed. Taylor&Francis, 2009. ISBN 978--415-47174-9

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

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

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na problematiku akustických difuzorů. V úvodní kapitole je popsána nezbytná teorie týkající se šíření zvuku uzavřeným prostorem. Popsána jsou také akustická pole. Následuje popis různých typů difuzních prvků a metod jejich návrhu. Zaměřeno je zejména na návrh pomocí pseudonáhodných matematických posloupností. Cílem práce je vyrobit několik typů akustických difuzorů a ověřit jejich difuzní vlastnosti pomocí měření. V práci je využito programu AFMG Reflex k simulaci difuzních vlastností navržených prvků. Dále práce obsahuje popis postupu měření difuzních vlastností metodou hraniční roviny a proces vyhodnocení naměřených dat pomocí programu Matlab.

Klíčová slova: akustický difuzor, MLS, PRD, QRD, činitel difuzity, činitel rozptylovosti, metoda hraniční roviny, AFMG Reflex

ABSTRACT

This work focuses on the issue of acoustic diffusers. The introductory chapter describes the necessary theory of the sound distribution through enclosed space. Acoustic fields are also described. A description of the different diffusion element types and their design methods follows. It focuses mainly on design, which uses pseudo-random mathematical sequences. The aim of the work is to produce several types of acoustic diffusers and to verify their diffusion properties by means of measurements. The work uses the AFMG Reflex to simulate the diffusion properties of the proposed elements. Further, the thesis contains a description of the diffusion properties measurement process by the boundary plane method and the process of evaluating the measured data using the Matlab program.

Keywords: acoustics diffuser, Maximum Length Sequence, Primitive Root Diffuser, Quadratic Residue Diffuser, diffusion coefficient, scattering coefficient, boundary plane method, AFMG Reflex

BURDA, J. *Návrh a měření parametrů akustických difúzních prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 93 stran. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh a měření parametrů akustických difúzních prvků“ 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.

V Brně dne 21. 5. 2018

podpis autora

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jirímu Schimmelovi, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou, odbornou a pedagogickou pomoc a další cenné rady při zpracování práce. Dále patří poděkování mému otci za ochotnou a trpělivou asistenci při výrobě a měření.

V Brně dne 21. 5. 2018

podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků	xi
Seznam tabulek	xiii
Úvod	1
1 Teoretický úvod	2
1.1 Šíření zvukových vln.....	2
1.1.1 Odraz zvukových vln.....	2
1.2 Akustická pole	4
2 Difuzory	5
2.1 Geometrické prvky	5
2.2 Difuzor typu MLS	6
2.2.1 Posloupnost MLS	6
2.2.2 Návrh MLS difuzoru	7
2.3 Difuzor typu QRD.....	7
2.3.1 Posloupnost QRD.....	8
2.3.2 Návrh QRD difuzoru	8
2.4 Difuzor typu PRD	9
2.4.1 Posloupnost PRD.....	9
2.4.2 Návrh PRD difuzoru.....	10
2.5 Fraktálové prvky	11
2.6 2D prvky.....	12
2.6.1 Návrh 2D difuzoru.....	12
2.7 Materiály pro výrobu.....	15
3 Měření difuzních vlastností	16
3.1 Činitel rozptylovosti.....	16
3.1.1 Korelační činitel rozptylovosti.....	16
3.2 Činitel směrové difuze.....	17
3.2.1 Normovaný činitel směrové difuze	17
3.2.2 Činitel difuze v difuzním poli	17
3.3 Princip měření.....	18

3.3.1	Požadavky na prostor	18
3.3.2	Požadavky na měřicí techniku	20
3.4	Postup zkoušky	20
3.4.1	Impulsové odezvy	20
3.4.2	Klíčování oknem	21
3.4.3	Třetinooktávová analýza.....	22
4	Návrh a výroba vzorků	23
4.1	Vlastní návrh difuzoru typu MLS	23
4.1.1	Simulace difuzních vlastností difuzoru typu MLS.....	24
4.2	Vlastní návrh difuzoru typu PRD.....	26
4.2.1	Simulace difuzních vlastností difuzoru typu PRD	27
4.3	Vlastní návrh difuzoru typu 2D QRD	29
4.3.1	Simulace difuzních vlastností difuzoru typu 2D QRD.....	31
5	Měření a zpracování dat	32
5.1	Měření.....	32
5.1.1	Měřicí aparát	33
5.1.2	Postup měření.....	34
5.2	Zpracování naměřených dat.....	34
5.2.1	Záznam a export signálů	34
5.2.2	Načtení signálu.....	36
5.2.3	Výpočet impulsových odezev	36
5.2.4	Dekonvoluce signálů a aplikace časového okna	37
5.2.5	Výpočet hladin akustického tlaku pro jednotlivá pásma	39
5.2.6	Výpočet koeficientů difuzity.....	40
5.2.7	Vykreslení polárních odezev a koeficientů difuzity.....	40
5.3	Výsledky měření	41
6	Závěr	42
	Literatura	43
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	44
	Seznam příloh	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Šíření energie zvukového vlnění při dopadu na překážku	2
Obr. 1.2: Odraz zvuku od překážky pro povrch a) rovinný – přímý odraz, b) členitý – difuze, c) konvexní – koncentrace, d) konkávní – rozptyl	3
Obr. 1.3: Difrakce zvuku na hraně překážky pro a) nízké kmitočty – překážka se chová jako bodový zdroj, b) vysoké kmitočty – dochází k odrazu.....	3
Obr. 1.4: Rozložení akustických polí od zdroje[5]	4
Obr. 2.1: Periodické struktury geometrických prvků [3]	5
Obr. 2.2: Účinnost difuze v závislosti na dopadajícím kmitočtu f [3]	6
Obr. 2.3: Model MLS difuzoru vytvořený v programu SolidWorks	7
Obr. 2.4: QRD difuzor, převzato z [10].....	9
Obr. 2.5: Model PRD difuzoru vytvořený v programu SolidWorks.....	11
Obr. 2.6: Difuzor s fraktálovými prvky, převzato z [11].....	11
Obr. 2.7: Rozdíl rozptylu 1D prvku (vlevo) a 2D prvku (vpravo), převzato z [1]	12
Obr. 2.8: 2D QRD difuzor, převzato z [12].....	13
Obr. 2.9: 2D PRD difuzor, převzato z [13]	14
Obr. 3.1: Grafické znázornění vymezení prostoru.....	18
Obr. 3.2: Polobezodrazová komora na VÚTS v Liberci [15].....	19
Obr. 3.3: Určení zrcadlové zóny odrazu pomocí obrazu zdroje	19
Obr. 3.4: Přehled impulsových odezev, a) odezva reproduktor mikrofón $h_3(t)$, b) odezva pozadí bez vzorku $h_2(t)$, c) odezva pozadí se vzorkem $h_1(t)$, d) rozdíl odezvy $h_1(t) - h_2(t)$, e) dekonvoluovaná odezva vzorku $h_4(t)$, f) vyklíčovaná odezva vzorku [9]	21
Obr. 4.1: Vyrobený difuzor typu MLS.....	24
Obr. 4.2: Řez středem difuzoru MLS	24
Obr. 4.3: Simulace kmitočtových závislostí difuzních vlastností z programu AFMG Reflex difuzoru typu MLS.....	25
Obr. 4.4: Simulace polární odezvy z programu AFMG Reflex difuzoru typu MLS pro směr šíření 0° a třetinooktávové frekvenční pásmo 2500 Hz.....	25
Obr. 4.5: Vyrobený difuzor typu PRD	27
Obr. 4.6: Řez středem difuzoru PRD	27
Obr. 4.7: Simulace kmitočtových závislostí difuzních vlastností z programu AFMG Reflex difuzoru typu PRD	28
Obr. 4.8: Simulace polární odezvy z programu AFMG Reflex difuzoru typu PRD pro směr šíření 0° a třetinooktávové frekvenční pásmo 2500 Hz.....	28

Obr. 4.9: Vyrobený difuzor typu 2D QRD	30
Obr. 4.10: Řez středem difuzoru 2D QRD	31
Obr. 5.1: Skutečné rozmístění měřicího aparátu s nákresem bezodrazové zóny.....	32
Obr. 5.2: Zapojení měřicího řetězce.....	33
Obr. 5.3: Jednotlivé impulsové odezvy difuzoru MLS pro kombinaci zdroje S_3 a mikrofonu M_{19}	39
Obr. 5.4: Porovnání kmitočtové závislosti koeficientu d_n všech realizovaných vzorků	41

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Posloupnost MLS pro $N_{MLS} = 3$	7
Tab. 2.2: Posloupnost QRD pro $N_{PRD} = 7$	8
Tab. 2.3: Posloupnost PRD pro $N_{PRD} = 7$	10
Tab. 2.4: Posloupnost šachet 2D difuzoru typu QRD pro $N_{QRD} = 7$	13
Tab. 2.5: Posloupnost šachet 2D difuzoru typu PRD pro $N_{PRD} = 7$	14
Tab. 4.1: Posloupnost šachet pro navržený difuzor typu MLS	24
Tab. 4.2: Posloupnost šachet navržený pro difuzor typu PRD	26
Tab. 4.3: Posloupnost šachet pro navržený difuzor typu 2D QRD	29

ÚVOD

Prostorová akustika jako jeden z oborů akustiky se zabývá šířením zvuku v uzavřených prostorech. Za uzavřený prostor lze považovat každý prostor ohraničen plochami, které mají určitou schopnost zvuk odrážet, pohlcovat, koncentrovat či rozptylovat v závislosti na jejich materiálu a tvaru. Každý takový prostor může sloužit k jiným účelům a podle toho jsou normami udány akustické parametry, kterými je nutné se řídit při návrhu akustiky. Dále se prostorová akustika zabývá vhodným výběrem materiálu a z nich vyrobených akustických prvků na obklad stěn, podlahy a stropu. Za akustické prvky se považují např. kmitající panely, dutinové rezonátory nebo rozptylové (difuzní) prvky. Nejenom dostatečná úprava doby dozvuku, ale také míra rozptylování zvuku je velmi důležitým aspektem při návrhu prostorové akustiky, např. ve zvukových studiích, divadlech nebo koncertních sálech.

Cílem této práce je popsat konstrukce a metody návrhu různých rozptylových prvků, vybrat vhodné typy a vytvořit pro ně výkresovou dokumentaci, podle které by bylo možné realizovat jednotlivé vzorky a ty následně podrobit detailnímu měření a vyhodnotit jejich rozptylové vlastnosti. Jelikož toto téma nemá v české literatuře příliš velké zastoupení, je čerpáno z doporučené zahraniční literatury a odborných článků umístěných na webových stránkách.

Obsahem první kapitoly je krátký teoretický úvod do problematiky šíření zvuku v uzavřeném prostoru. Ve druhé kapitole jsou detailně popsány různé typy akustických difuzorů a matematické sekvence, které se využívají při jejich návrhu. Důležitou součástí je také zdůvodnění výběru vhodných materiálů pro výrobu. Třetí kapitola popisuje difuzní vlastnosti, jejich význam a detailně rozebírá proces jejich měření v reálných podmínkách. Tyto kapitoly tak slouží k základnímu teoretickému přehledu potřebnému ke splnění zadání diplomové práce

Následující kapitola pojednává o vlastním návrhu a výrobě vybraných typů difuzorů. Důraz je přitom kladen na jednoduchost výroby a s tím související cenové náklady. Cílem je navrhnout difuzory typu MLS, PRD a 2D QRD a vytvořit pro ně výkresovou dokumentaci, která bude použita pro realizaci vzorků určených k následnému měření.

Poslední kapitola popisuje jednotlivé kroky měření a vyhodnocení difuzních vlastností za pomoci programu Matlab.

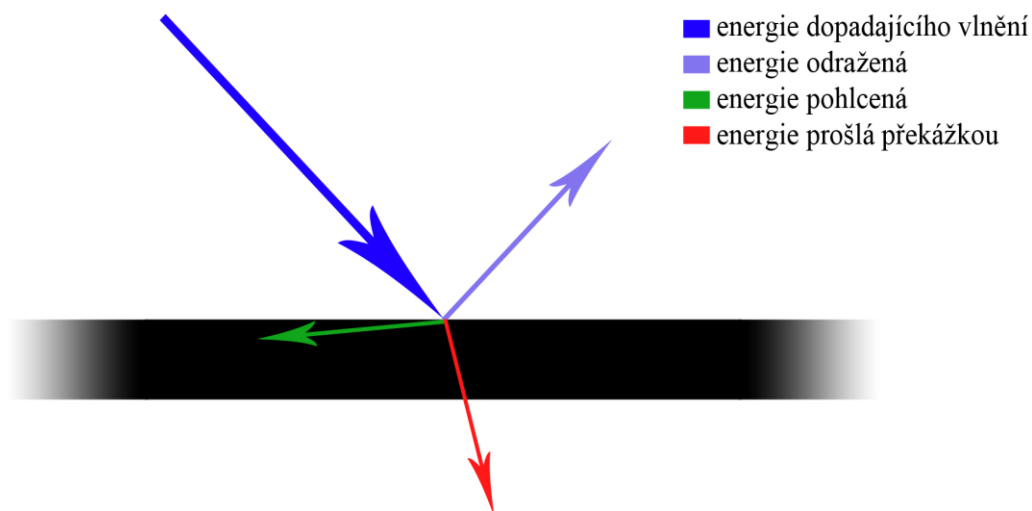
1 TEORETICKÝ ÚVOD

V této kapitole je uvedena teorie týkající se tématu diplomové práce. Je popsáno šíření zvuku a jednotlivá akustická pole v uzavřeném prostoru. Obsah této kapitoly je výtahem z [1], [3] a [4].

1.1 Šíření zvukových vln

Zvukové vlnění je z fyzikálního hlediska mechanické vlnění, které mění své parametry v závislosti na prostředí, ve kterém se šíří. Pro účely této diplomové práce se bude nadále uvažovat šíření zvuku ve vzduchu v uzavřeném prostoru.

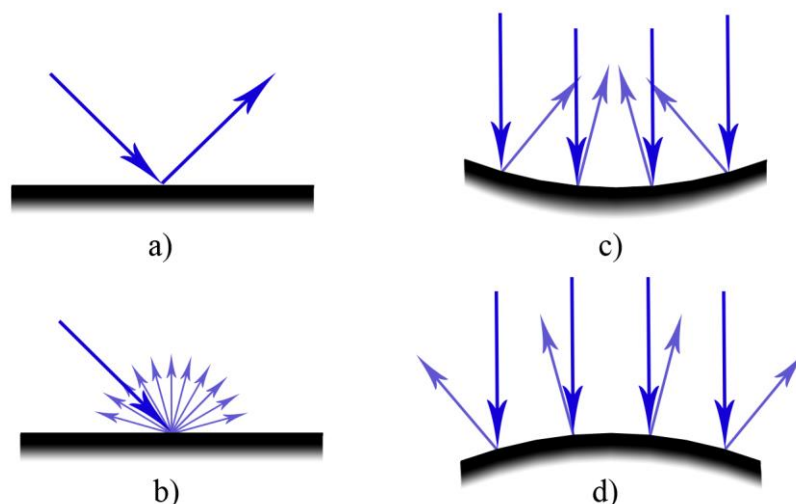
Šíření zvukových vln v uzavřených prostorech se řídí obecnými zákony pro šíření vlnění. Nachází-li se ve směru šíření zvukových vln překážka, dochází k několika jevům: odrazu, absorpci a ohybu. V závislosti na frekvenci zvukového vlnění a konečných rozměrech a materiálu překážky, dochází v různém poměru ke kombinaci těchto jevů. Šíření energie zvukového vlnění při dopadu na překážku konečných rozměrů je znázorněno na **Obr. 1.1**.



Obr. 1.1: Šíření energie zvukového vlnění při dopadu na překážku

1.1.1 Odraz zvukových vln

V případě ideálně odrazivé překážky nekonečných rozměrů dochází pouze k odrazu zvuku. Odraz se v takovém případě řídí pravidlem zrcadlového odrazu podle Snellova zákona, kdy je úhel odrazu roven úhlu dopadu. Případy odrazu od překážek různých tvarů a členitosti jsou zobrazeny na **Obr. 1.2**.



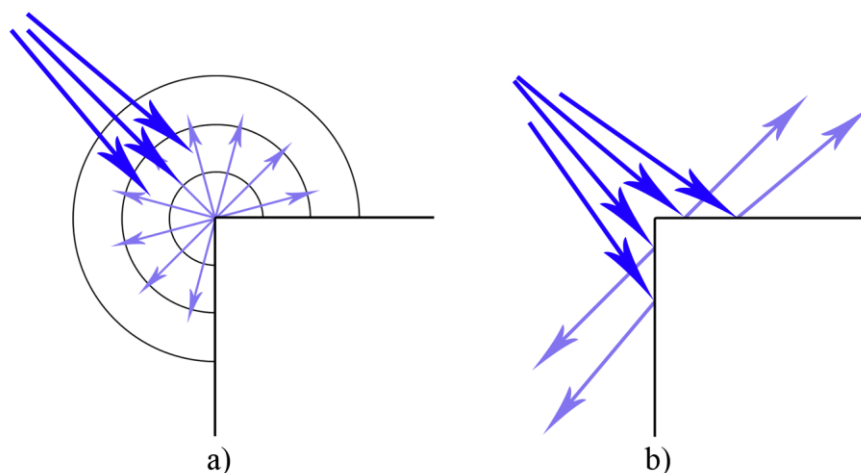
Obr. 1.2: Odraz zvuku od překážky pro povrch a) rovinný – přímý odraz, b) členitý – difuze, c) konvexní – koncentrace, d) konkávní – rozptyl

V případě ideálně odrazivé překážky konečných rozměrů, je nutné vzít v úvahu ohyb zvuku a jev difrakce, ke kterému dochází na hraně překážky. Tyto jevy jsou závislé na frekvenci zvukového vlnění, resp. na její vlnové délce. Vlnová délka zvukového vlnění je definována vztahem

$$\lambda = \frac{c_0}{f} [\text{m}], \quad (1.1)$$

kde c_0 představuje konstantu šíření zvuku ve vzduchu pro teplotu 20° C a relativní vlhkost 50 % [m/s] a f udává frekvenci zvukového vlnění [Hz].

Pokud bude konečný rozměr překážky menší než vlnová délka dopadajícího vlnění, nastane ohyb přes překážku, v opačném případě dojde k odrazu. Jevo difrakce závisí také na poměru vlnové délky k rozměru překážky. Čím větší je vlnová délka, tím výraznější je difrakce. Tento jev je znázorněný na **Obr. 1.3**.



Obr. 1.3: Difrakce zvuku na hraně překážky pro a) nízké kmitočty – překážka se chová jako bodový zdroj, b) vysoké kmitočty – dochází k odrazu

1.2 Akustická pole

V uzavřených prostorách je možné uvažovat několik typů zvukových polí, která jsou definována poměrem přímých (primárních) vln, kterými jsou vlny šířící se přímo od zdroje zvuku, a odražených (sekundárních) vln, kterými jsou vlny vzniklé po odrazu od stěn a dalších překážek. Pokud hustota akustické energie primárních vln je vyšší než hustota akustické energie sekundárních vln, jedná se o tzv. *volné pole*. Naopak, pokud hustota akustické energie sekundárních vln převyšuje hustotu akustické energie primárních vln, jedná se o tzv. *difuzní pole*. Ideální difuzní pole je dále definováno jako pole, ve kterém je směr šíření zvukového vlnění náhodný a stále se měnící, nelze v něm tedy definovat vlnoplochu, hustota zvukové energie je rovnoměrně rozložena a úhly, pod kterými dopadá zvukové vlnění, jsou také rovnoměrně zastoupeny, jedná se tedy o homogenní pole. Hranice mezi těmito poli je dána dozvukovou vzdáleností r_d , což je vzdálenost, ve které se hustoty akustické energie primárních a sekundárních vln rovnají. Dozvukovou vzdálenost lze vypočítat podle následujícího vztahu

$$r_d = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} [\text{m}], \quad (1.2)$$

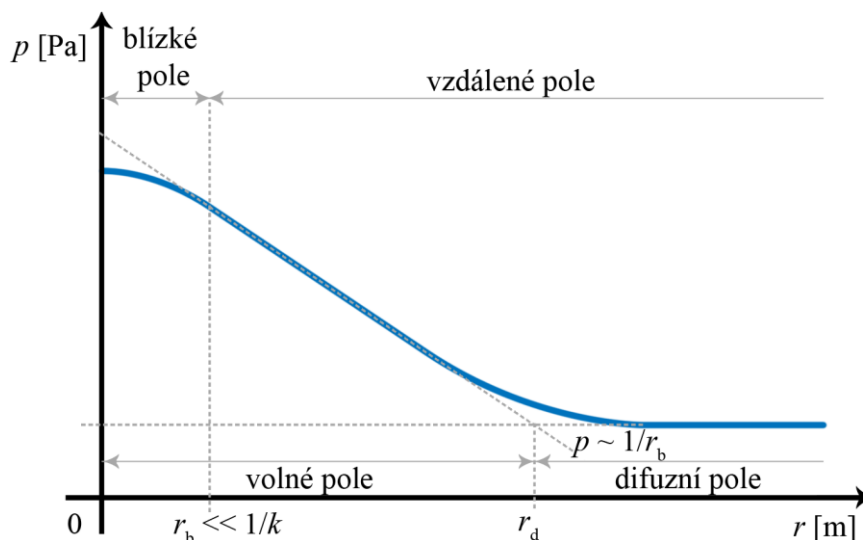
kde $V[\text{m}^3]$ je celkový objem prostoru a $T[\text{s}]$ doba dozvuku. Navíc je možné rozlišit tzv. *blízké a vzdálené pole*. Blízké pole je nehomogenní a vzniká interferencí v přímé blízkosti zdrojů zvuku. Tato část pole je definována vzdáleností r_b , která je dána vztahem

$$r_b \ll \frac{1}{k} [\text{m}], \quad (1.3)$$

kde $k[-]$ je vlnové číslo zvukového vlnění dle následujícího vztahu

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} [-], \quad (1.4)$$

kde $\lambda[\text{m}]$ je vlnová délka zvukového vlnění. Grafické znázornění jednotlivých polí je zobrazeno na **Obr. 1.4**.



Obr. 1.4: Rozložení akustických polí od zdroje [5]

2 DIFUZORY

Označení akustický difuzor se využívá pro prvky, které jsou schopné efektivně rozptylovat zvukové vlnění. Jedná se tedy o specificky navržené akustické obklady, jejichž využití se najde především při návrhu prostor, na které se kladou ty nejvyšší nároky na poslechové podmínky. Takovými prostory se rozumí koncertní a divadelní sály, nahrávací studia, režijní pracoviště a podobné. Všeobecně prostory pro snímání, kontrolu a zpracování zvuku.

Difuzory díky svým rozměrům (především hloubce konstrukce), srovnatelným s vlnovou délkou zvuku, vytváří v uzavřených prostorách pole odražených zvukových vln a tím napomáhají zlepšit celkový dojem posluchače. Poslechový prostor má díky jejich využití rovnoměrněji rozloženou intenzitu akustické energie

Pro návrh takového akustického prvku se využívá pseudonáhodných matematických posloupností, které udávají jednotlivé hloubky šachet. Tyto posloupnosti popsal Manfred Schroeder [7] a tato práce se jimi bude podrobněji zabývat v následujících kapitolách. Obecně se jedná o sekvence s dobrými autokorelačními vlastnostmi a jejich plochému výkonovému spektru. Následující popisy rozptylových prvků a vztahy pro jejich návrh jsou výtahem z [1], [2], [3] a [6].

2.1 Geometrické prvky

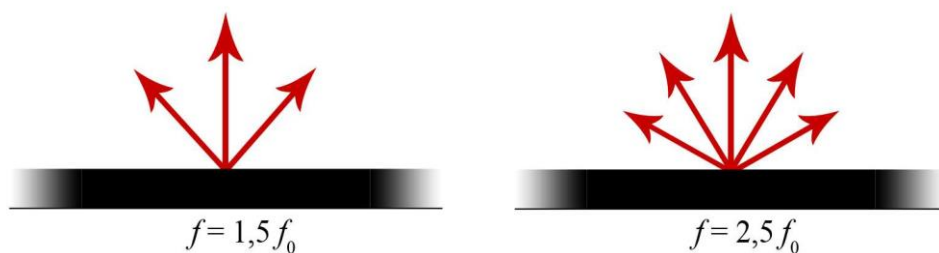
Nejjednodušším difuzním prvkem je uspořádání základních geometrických tvarů do periodické struktury, tak jak je znázorněno na **Obr. 2.1**, kde d je hloubka prvku, b je šířka prvku a L je délka periody struktury. Při dopadu rovinné zvukové vlny na periodickou strukturu dochází pro určité kmitočty k rozptylu zvuku do více směrů. Nejlepších rozptylových účinků se dosáhne za následujících podmínek:

- $d = \lambda_0/4$, kde λ_0 je vlnová délka návrhového kmitočtu f_0 ,
- $d \approx L/4$ až $L/5$,
- $d \leq b \leq L$.



Obr. 2.1: Periodické struktury geometrických prvků [3]

Schematické znázornění difuzního účinku periodické struktury pro oblast kmitočtů nad návrhovým kmitočtem účinnosti f_0 je uvedeno na **Obr. 2.2**. Nevýhodou periodických struktur s klasickými rozptylovými prvky je relativně úzké pásmo účinnosti. Dobrého rozptylu se dosahuje pouze při vlnových délkách srovnatelných s délkou periodické struktury.



Obr. 2.2: Účinnost difuze v závislosti na dopadajícím kmitočtu f [3]

Příkladem periodických struktur rozptylujících zvuk jsou i pravidelně prostřídané plochy (v pásech nebo šachovnicově) s odlišnou akustickou impedancí. Mohou to být akustické obklady na principu různě naladěných kmitajících desek a rezonátorů, nebo prostřídané odrazivé a pohltivé prvky.

2.2 Difuzor typu MLS

Dalším jednoduchým rozptylovým prvkem je difuzor MLS. Jedná se o strukturu pseudonáhodně střídající pouze dvě hloubky šachet, která vychází právě z matematické posloupnosti MLS – Maximum Length Sequence, tedy sekvence maximální délky. Nevýhodou těchto difuzorů je, podobně jako u geometrických tvarů s periodickou strukturou, malá šířka pásma, ve které prvek pracuje efektivně. Částečně lze docílit zlepšení použitím sekvencí větší délky.

2.2.1 Posloupnost MLS

Jde o binární posloupnost, nabývá tedy hodnot 0 a 1. Vychází z návrhového čísla a délka jedné periody je poté dána vztahem

$$L_{\text{MLS}} = 2^N - 1 \quad [-], \quad (2.1)$$

kde N [-] je návrhové číslo posloupnosti.

Pro generování takové posloupnosti se využívá rekursivních vztahů (různé pro každé jednotlivé N , dle [14]) a z výsledku se určí zbytek po dělení dvěma, který zajistí nabývání hodnot 0 nebo 1. Pro generování posloupnosti a její správný průběh je nutné zvolit prvních N hodnot, kde alespoň jedna z prvních N hodnot je jednička. Pro kontrolu správnosti je možné si ověřit, zda posloupnost obsahuje právě 2^{N-1} jedniček a $2^{N-1}-1$ nul.

Příklad výpočtu posloupnosti s návrhovým číslem 3:

- $N_{\text{MLS}} = 3$
- $L_{\text{MLS}} = 2^3 - 1 = 7$
- rekursivní polynom: $a_{\text{MLS}i+3} = (a_{\text{MLS}i+1} + a_{\text{MLS}i}) \bmod 2$

Tab. 2.1: Posloupnost MLS pro $N_{MLS} = 3$

i	1	2	3	4	5	6	7
a_{MLS_i}	1	0	0	1	0	1	1

2.2.2 Návrh MLS difuzoru

Při návrhu MLS difuzoru se vychází z návrhového kmitočtu f_0 . Hloubka šachty d_{MLS} se poté vypočítá podle vztahu

$$d_{MLS} = \frac{\lambda_0}{4} \quad [\text{m}], \quad (2.2)$$

kde λ_0 [-] je vlnová délka návrhového kmitočtu f_0 . Šířka šachty s_{MLS} se vypočítá podle vztahu

$$s_{MLS} = \frac{\lambda_0}{2} \quad [\text{m}], \quad (2.3)$$

kde λ_0 [-] je vlnová délka návrhového kmitočtu f_0 .

Střídání šachet je dáno posloupností MLS, kdy 1 určuje šachtu plnou a 0 šachtu prázdnou. Návrhové číslo N_{MLS} se určí dle potřeby s ohledem na délku posloupnosti a s tím spojený konečný rozměr prvku. Příklad MLS difuzoru je na **Obr. 2.3**.



Obr. 2.3: Model MLS difuzoru vytvořený v programu SolidWorks

2.3 Difuzor typu QRD

Difuzory označované zkratkou QRD – Quadratic Residue Diffuser mají strukturu stejně širokých šachet s různou hloubkou. Šachty jsou symetricky rozdělné od prostředku prvku. Díky různým hloubkám šachet je tento prvek schopný efektivně rozptylovat zvuk ve větším frekvenčním pásmu.

2.3.1 Posloupnost QRD

Posloupnost pro návrh QRD je popsána vztahem

$$a_{QRDi} = i^2 \bmod N_{QRD} \quad [-], \quad (2.4)$$

kde $i[-]$ je index posloupnosti. Vychází se od hodnoty 0 až k $N_{QRD} - 1$. N_{QRD} je návrhové číslo posloupnosti, za které se volí prvočíslo a délka jedné periody L_{QRD} je poté dle vztahu (2.5) rovna N_{QRD} .

$$L_{QRD} = N_{QRD} \quad [-] \quad (2.5)$$

Příklad výpočtu posloupnosti s návrhovým číslem 7:

- $N_{QRD} = 7$
- $L_{QRD} = 7$
- posloupnost: $a_{QRDi} = i^2 \bmod 7$, pro $i = 0, 1, 2, \dots, N_{QRD}-1$

Tab. 2.2: Posloupnost QRD pro $N_{PRD} = 7$

i	0	1	2	3	4	5	6
a_{QRDi}	0	1	4	2	2	4	1

2.3.2 Návrh QRD difuzoru

Při návrhu QRD difuzoru se vychází z návrhových kmitočtů f_d a f_h , které udávají dolní a horní hranici pásma pro efektivní rozptyl. Dále je potřeba určit požadovaný počet směrových laloků n_l při dopadu vlny o kmitočtu f_d v kolmém směru na prvek. Pro dosažení dobré účinnosti by mělo existovat alespoň pět směrových laloků rozptylu. Následujícím krokem je výpočet návrhového prvočísla N_{QRD} , které se získá pomocí vztahu (2.6) od jehož výsledku se určí nejbližší vyšší prvočíslo.

$$N_{QRD} = (n_l - 1) \frac{f_h}{f_d} \quad [-], \quad (2.6)$$

kde $n_l [-]$ je požadovaný počet směrových laloků, f_h [Hz] je horní mezní kmitočet a f_d [Hz] je dolní mezní kmitočet návrhového pásma.

Dalším krokem je určení šířky šachty s_{QRD} podle vztahu

$$s_{QRD} = \frac{\lambda_h}{2} - t_d \quad [m], \quad (2.7)$$

kde λ_h [m] je vlnová délka horního mezního kmitočtu f_h a t_d [m] je síla přepážky mezi jednotlivými šachtami.

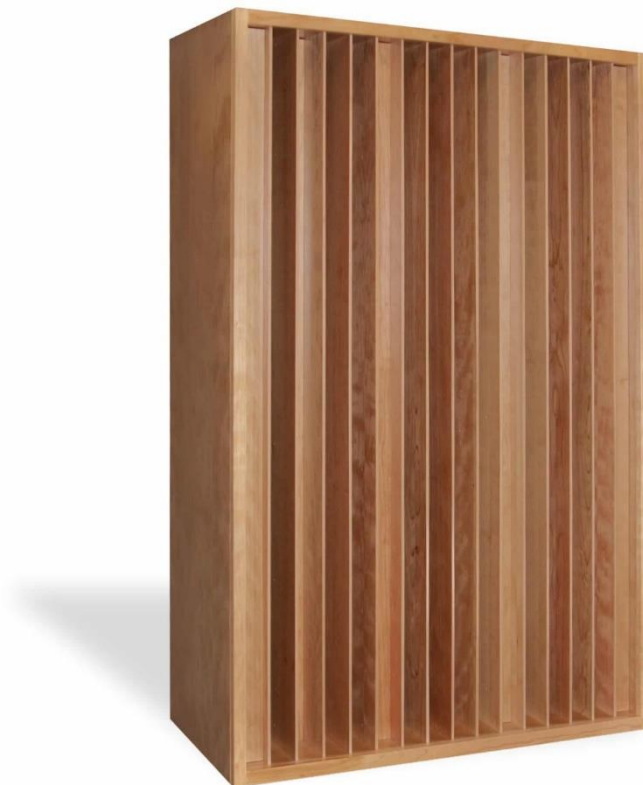
Pro určení hloubky šachet je nejprve nutné určit krok, se kterým se jednotlivé hloubky od sebe mění. Tento krok změny je značen d_{QRD} a je možné ho získat vztahem

$$d_{QRD} = \frac{\lambda_d}{2N_{QRD}} [m], \quad (2.8)$$

kde λ_d [m] je vlnová délka dolního mezního kmitočtu f_d a N_{QRD} je návrhové prvočíslo posloupnosti. Každá jednotlivá hloubka šachty je poté dána vztahem

$$d_{QRDi} = a_{QRDi} d_{QRD} [\text{m}], \quad (2.9)$$

kde a_{QRDi} [-] je hodnota posloupnosti a d_{QRD} [m] je krok, se kterým se mění hloubka šachty. Příklad QRD difuzoru je na **Obr. 2.4**.



Obr. 2.4: QRD difuzor, převzato z [10]

2.4 Difuzor typu PRD

V tomto případě značí zkratka PRD – Primitive Root Diffuser. Podobně jako u QRD se jedná o strukturu stejně širokých šachet s různou hloubkou. Šachty však nejsou rovnoměrně rozloženy od prostředku prvku, ale jejich uspořádání je pseudonáhodné. Pracovní pásma, ve kterém dochází k efektivnímu rozptylu zvuku, je v případě PRD také širší v porovnání s jednoduchými difuzními prvky.

2.4.1 Posloupnost PRD

Posloupnost pro návrh PRD je popsána vztahem

$$a_{PRDi} = r_N^i \bmod N_{PRD} [-], \quad (2.10)$$

kde i [-] je index posloupnosti, $N_{\text{PRD}}[-]$ je návrhové číslo posloupnosti, za které je nutné volit prvočíslo a r_N [-] je nejmenší primitivní kořen z návrhového prvočísla N_{PRD} . Vychází se od hodnoty 1 až k $N_{\text{PRD}} - 1$. Tuto posloupnost je také možné zapsat pomocí rekurzivního vztahu

$$a_{\text{PRD}i} = (r_N * a_{\text{PRD}i-1}) \bmod N_{\text{PRD}} \quad (2.11)$$

Délka jedné periody L_{PRD} je určena podle vztahu

$$L_{\text{PRD}} = N_{\text{PRD}} - 1 \quad [-]. \quad (2.12)$$

Příklad výpočtu posloupnosti s návrhovým číslem 7:

- $N_{\text{PRD}} = 7$
- $r_N = 3$
- $L_{\text{PRD}} = 7 - 1 = 6$
- posloupnost: $a_{\text{PRD}i} = 3^i \bmod 7$, pro $i = 1, 2, \dots, N_{\text{PRD}}-1$

Tab. 2.3: Posloupnost PRD pro $N_{\text{PRD}} = 7$

i	1	2	3	4	5	6
$a_{\text{PRD}i}$	3	2	6	4	5	1

2.4.2 Návrh PRD difuzoru

Návrh PRD difuzoru je velmi podobný jako u QRD. Vychází se z návrhových kmitočtů f_d a f_h určujících pracovní pásmo difuzoru. Dále je potřeba určit požadovaný počet směrových laloků n_l . Následujícím krokem je výpočet návrhového prvočísla N_{PRD} , to se získá opět pomocí vztahu (2.6) od jehož výsledku se určí nejbližší vyšší prvočíslo. Z N_{PRD} je nutné dále určit nejmenší primitivní kořen r_N . Dalším krokem je určení šířky šachty s_{PRD} podle vztahu (2.7) a kroku hloubky d_{PRD} podle vztahu

$$d_{\text{PRD}} = \frac{\lambda_d}{2(N_{\text{PRD}} - 1)} [\text{m}], \quad (2.13)$$

kde λ_d [m] je vlnová délka dolního mezního kmitočtu f_d a N_{PRD} je návrhové prvočíslo posloupnosti. Zde dochází ke změně, která zajistí, podle [2], dosažení poklesu odražené energie ve směru od zrcadlového zdroje, avšak jen na kmitočtech odpovídajících celočíselným násobkům kmitočtu f_d . Každá jednotlivá hloubka šachty je následně dána vztahem

$$d_{\text{PRD}i} = a_{\text{PRD}i} d_{\text{PRD}} [\text{m}], \quad (2.14)$$

kde $a_{\text{PRD}i}$ [-] je hodnota posloupnosti a d_{PRD} [m] je krok, se kterým se mění hloubka šachty. Příklad PRD difuzoru je na **Obr. 2.5**.



Obr. 2.5: Model PRD difuzoru vytvořený v programu SolidWorks

2.5 Fraktálové prvky

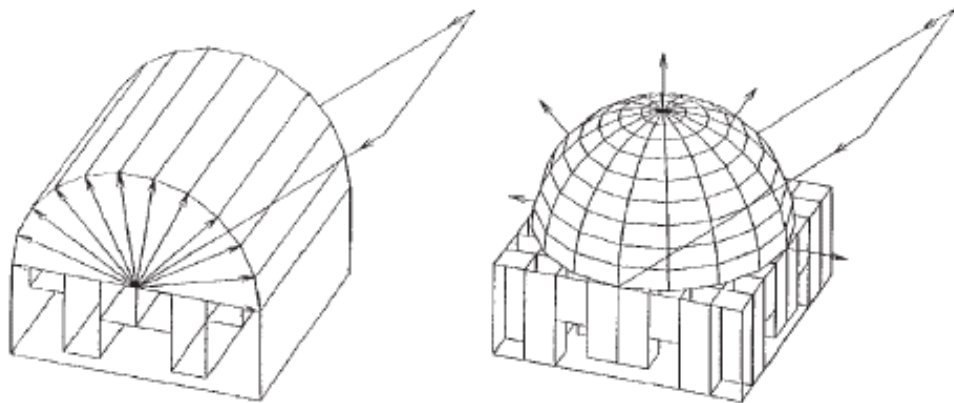
Principiálně se jedná o difuzní prvky s více úrovněmi, kdy každá z úrovní rozptyluje zvuk v jiném pracovním pásmu. Do jednotlivých šachet jsou vnořeny menší difuzory na základě fraktálového principu. Takové prvky dosahují velké šířky pracovního pásma, aniž by bylo nutné zvětšovat délku sekvencí. Jednotlivé úrovně difuzoru se chovají nezávisle, přičemž existují fraktálové difuzory s až třemi stupni. Příklad difuzoru s fraktálovými prvky je na **Obr. 2.6**.



Obr. 2.6: Difuzor s fraktálovými prvky, převzato z [11]

2.6 2D prvky

Všechny výše zmíněné typy difuzorů jsou schopné rozptylovat zvuk pouze v jedné rovině, horizontální či vertikální, v závislosti na otočení prvku. Díky 2D rozptylovým prvkům je možné docílit rozptýlení do obou rovin současně. Dochází zde sice ke větší absorpci, ale také k několikanásobně většímu počtu různě odražených zvukových vln. Vyšší absorpci je poté nutné vzít v úvahu při komplexním návrhu akustiky prostoru. Poslechový prostor je poté subjektivně vnímán jako objemnější. Ilustrace rozptylu je zobrazena na **Obr. 2.7**.



Obr. 2.7: Rozdíl rozptylu 1D prvku (vlevo) a 2D prvku (vpravo), převzato z [1]

2.6.1 Návrh 2D difuzoru

Při návrhu 2D difuzoru je postup velmi podobný jako u jednorovinných prvků. Zprvu je nutné si vybrat, které z posloupností bude využito. Stanoví se pracovní pásmo určené kmitočty f_d a f_h , počet směrových laloků n_l a opět podle vztahu (2.6) návrhové prvočíslo N_{QRD} . V případě návrhu 2D PRD difuzoru je ještě nutné stanovit nejmenší primitivní kořen r_N prvočísla N_{PRD} . Šířka každé šachty, v případě 2D difuzoru také výška, je dána vztahem (2.7). Posloupnosti pro návrh tabulky určující hloubky jednotlivých šachet jsou v případě QRD určeny vztahem (2.15) a v případě PRD vztahem (2.16).

$$a_{n,m} = (n^2 + m^2) \bmod N_{QRD}[-], \quad (2.15)$$

$$a_{n,m} = (r_{N_{PRD}}^n + r_{N_{PRD}}^m) \bmod N_{PRD}[-], \quad (2.16)$$

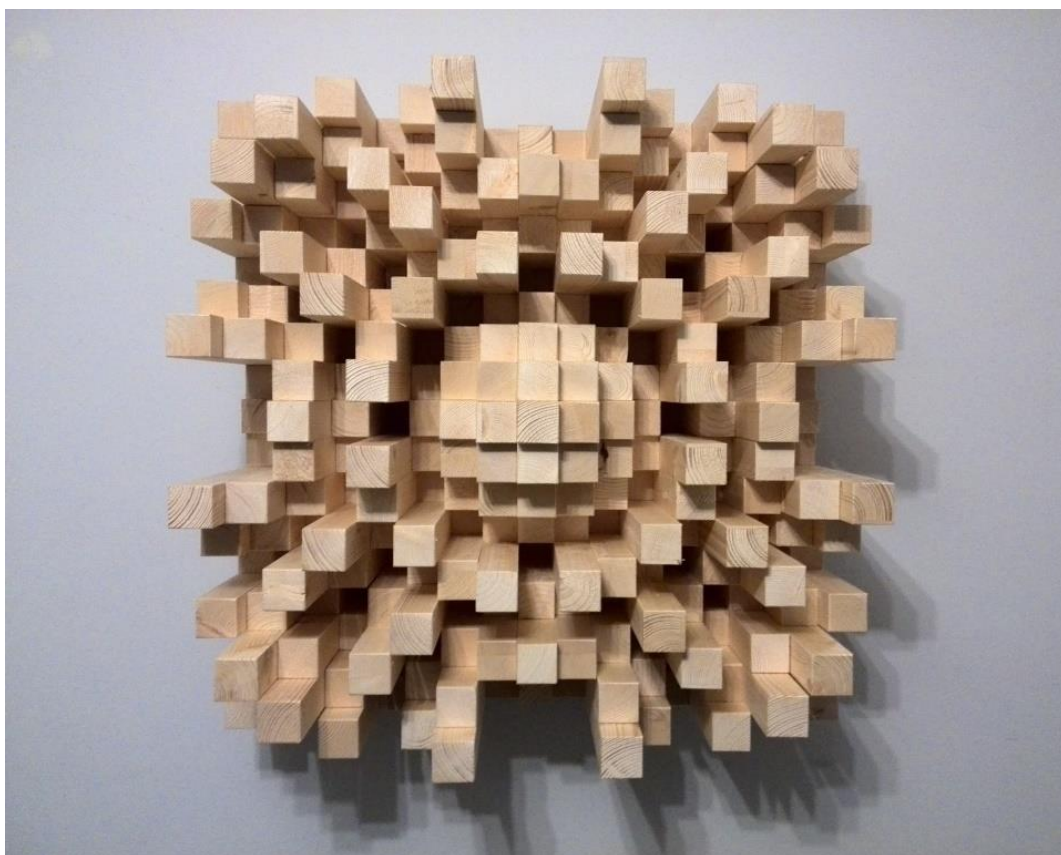
kde n značí index řádku a m značí index sloupce. V případě návrhu QRD jsou indexy od 0 do $N_{QRD} - 1$, v případě návrhu PRD jsou indexy od 1 do $N_{PRD} - 1$. Ilustrace difuzoru typu 2D QRD a 2D PRD je na **Obr. 2.8**, resp. na **Obr. 2.9**. Stejně tak jako je 1D QRD difuzor středově souměrný, je také provedení 2D středově souměrné.

Příklad výpočtu posloupnosti pro 2D QRD s návrhovým číslem 7:

- $N_{\text{QRD}} = 7$
- posloupnost: $a_{n,m} = (n^2 + m^2) \bmod 7$, pro n a $m = 0, 1, 2, \dots, N_{\text{QRD}}$

Tab. 2.4: Posloupnost šachet 2D difuzoru typu QRD pro $N_{\text{QRD}} = 7$

n/m	0	1	2	3	4	5	6
0	0	1	4	2	2	4	1
1	1	2	5	3	3	5	2
2	4	5	1	6	6	1	5
3	2	3	6	4	4	6	3
4	2	3	6	4	4	6	3
5	4	5	1	6	6	1	5
6	1	2	5	3	3	5	2



Obr. 2.8: 2D QRD difuzor, převzato z [12]

Příklad výpočtu posloupnosti pro 2D PRD s návrhovým číslem 7:

- $N_{\text{PRD}} = 7$
- $r_N = 3$
- posloupnost: $a_{n,m} = (3^n + 3^m) \bmod 7$, pro n a $m = 0, 1, 2, \dots, N_{\text{PRD}} - 1$

Tab. 2.5: Posloupnost šachet 2D difuzoru typu PRD pro $N_{\text{PRD}} = 7$

n/m	1	2	3	4	5	6
1	6	5	2	0	1	4
2	5	4	1	6	0	3
3	2	1	5	3	4	0
4	0	6	3	1	2	5
5	1	0	4	2	3	6
6	4	3	0	5	6	2



Obr. 2.9: 2D PRD difuzor, převzato z [13]

2.7 Materiály pro výrobu

Veškeré typy difuzních prvků mohou být vyrobeny z mnoha různých materiálů. Je důležité volit takové materiály, které je možné snadno opracovávat. Protože se takovýchto akustických obkladů využívá především v prostorách, ve kterých plní svoji funkci jak praktickou, tak estetickou, je další důležitou vlastností možnost téměř jakékoliv barevné úpravy. Difuzory mají ve své podstatě zvuk především odrážet, a proto je vhodné použít materiály, které nemají pórovitou strukturu a nebude tak docházet k nechtěné absorpci některých kmitočtů. Materiály také musí plnit určité požadavky na požární odolnost a v neposlední řadě také na váhu. S přihlédnutím na všechny tyto požadavky se jeví jako vhodný materiál např. dřevo různých druhů a povrchových úprav, plast, kov či polystyren s vysokou hustotou.

3 MĚŘENÍ DIFUZNÍCH VLASTNOSTÍ

Jak již bylo uvedeno, difuzní prvky jsou schopné díky své konstrukci efektivně rozptylovat zvuk, vytváří tím více homogenní pole. Právě rovnoměrné rozložení akustické energie napříč celým slyšitelným spektrem je v celém poslechovém prostoru velmi žádoucí. Vyhodnocené výsledky měření difuzních vlastností rozptylových prvků dávají přehled o praktickém využití. Sledovaných parametrů je přitom hned několik a jsou popsány v následujících podkapitolách. K popisu jednotlivých difuzních vlastností a procesu samotného měření bylo čerpáno z [2] a českých technických norem ČSN ISO 17497-1 [8] a ČSN ISO 17497-2 [9].

3.1 Činitel rozptylovosti

Činitel rozptylovosti popisuje míru odražené energie mimo hlavní směr zrcadlového odrazu. Jedná se o hodnotu vypočítanou podle vztahu

$$s = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} [-], \quad (3.1)$$

kde α_{spec} [-] je činitel zvukové pohltivosti pro zrcadlový odraz a α_s [-] je činitel zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad. Oba tyto činitele se získají z měření vzorku v dozvukové místnosti. Protože měření činitele zvukové pohltivosti není náplní této práce, není zde ani uveden postup měření v příslušném prostoru. Nicméně je tento postup obsahem normy ČSN ISO 17497-1 [8], kde jsou detailně popsány principy měření, požadavky na prostor i měřený vzorek.

3.1.1 Korelační činitel rozptylovosti

Tento koeficient je možné získat z hodnot vypočítaných během zpracování měření činitele směrové difuze, které je popsáno v podkapitole 3.4.3. Z výsledku zkušebního měření uvedeného v [2] je možné posoudit rozdíl mezi činitelem rozptylovosti změřeným v dozvukové místnosti a korelačním činitelem rozptylovosti vypočítaným z měření směrové difuze. Tyto rozdíly jsou natolik nevýrazné, že je možné korelační činitel rozptylovosti uvádět při prezentaci difuzních vlastností prvku. V případě vydání protokolu o měření však nesmí být zaměněn za měřený činitel rozptylovosti. Hodnoty korelačního činitele rozptylovosti jsou dány vztahem (3.2).

$$s_c = 1 - \frac{|\sum_{i=1}^n p_1(\theta_i) p_2^*(\theta_i)|^2}{\sum_{i=1}^n |p_1(\theta_i)|^2 \sum_{i=1}^n |p_2(\theta_i)|^2} [-], \quad (3.2)$$

kde p_1 [Pa] je tlak rozptýlený od vzorku, p_2 [Pa] je tlak rozptýlený od referenčního plochého povrchu, θ_i je označení úhlu pro měřicí bod s indexem i a n je počet měřících bodů prostorové odezvy.

3.2 Činitel směrové difuze

Tento koeficient popisuje míru rovnoměrnosti difuze vyvolané prvkem pro jeden směr šíření zvukového vlnění. Dává tím lepší přehled o skutečné funkci prvku než rozptylový činitel, který posuzuje pouze míru odraženého zvukového vlnění mimo zrcadlový odraz. Koeficient směrové difuze pro jeden konkrétní směr šíření zvuku je možné vypočítat podle vztahu (3.3)

$$d_{\theta} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10}\right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(10^{L_i/10}\right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(10^{L_i/10}\right)^2} [-], \quad (3.3)$$

kde θ je označení úhlu příchozího směru šíření a L_i [dB] je vypočítaná hladina akustického tlaku pro měřicí bod s indexem i z celkového počtu n měřících bodů.

3.2.1 Normovaný činitel směrové difuze

Jedná se o činitel směrové difuze prvku normovaný činitelem směrové difuze referenčního plochého povrchu, který je svými rozměry (výškou a šířkou) identický s prvkem. K normování se přistupuje z důvodu kompenzace jevu difrakce, ke kterému dochází na hraně difuzoru při nízkých kmitočtech, při kterých se difuzor chová jako bodový zdroj a nenormovaný činitel tak podává nepřesné údaje o výsledné difuzitě při použití v reálných podmínkách. Normovaný činitel difuze je možné vypočítat z následujícího vztahu

$$d_{\theta,n} = \frac{d_{\theta} - d_{\theta,r}}{1 - d_{\theta,r}} [-], \quad (3.4)$$

kde $d_{\theta,r}$ je činitel směrové difuze pro referenční plochý povrch.

3.2.2 Činitel difuze v difuzním poli

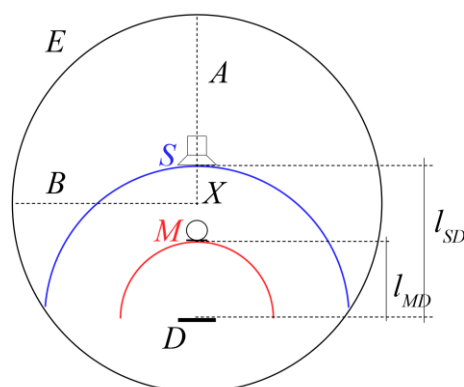
Tímto koeficientem lze interpretovat difuzitu prvku při všesměrovém dopadu zvukového vlnění. Pro simulaci všesměrového dopadu se měří činitel difuze pro několik bodů zdroje. K výpočtu se používá průměr nebo vážení činitelů směrové difuze pro rozdílná místa zdroje, která jsou stanovena v podkapitole 0. Tento činitel se značí d . Stejným způsobem je možné získat také normovaný činitel difuze pro všesměrový dopad, který se značí d_n .

3.3 Princip měření

Činitel difuze kvantifikuje, jak je energie odražená od měřeného vzorku prostorově rozložená. Toto prostorové rozložení je popsáno polárními odezvami hladiny odraženého akustického tlaku. Princip měření je popsán normou ČSN ISO 17497-2 [9] a spočívá v zaznamenání odražené zvukové energie od vzorku na celém půlkruhu či polokouli v uvažované polorovině odrazu. Jedná se o měření ve volném poli technikou hraniční roviny. Pro správné naměření dat a následné vyhodnocení koeficientů je důležité držet se pokynů popsaných v následujících podkapitolách.

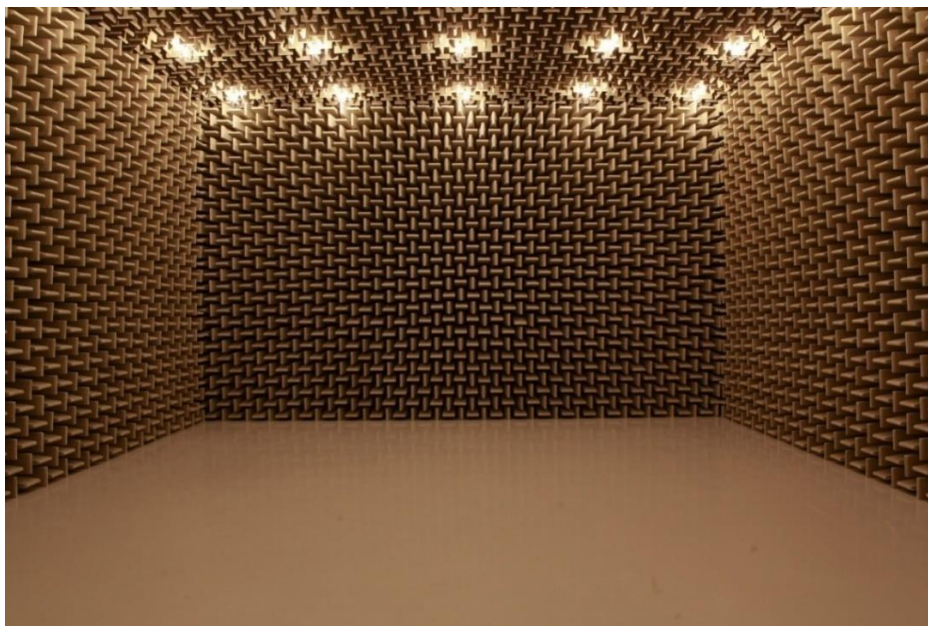
3.3.1 Požadavky na prostor

Základním předpokladem pro vhodný prostor k měření je odrazivý povrch podlahy. Činitel odrazu by dle normy měl být minimálně 0,99. Dále musí měřicí prostor vykazovat odstup signálu od šumu 40 dB (viz podkapitola 3.4.2). Při takových požadavcích je velmi vhodné využít tzv. polobezodrazovou komoru (ilustrace na **Obr. 3.2**), která zajistí volné pole. Připouští se však také měření v dostatečně velkém, nikoliv bezodrazovém prostoru. K simulaci bezodrazového volného prostoru se vkládá časové pravoúhlé okno do změřených impulsových odezev. Požadavky na rozměry takového prostoru vycházejí z poloměru mikrofonního pole. Grafické znázornění vymezení prostoru je na **Obr. 3.1**.



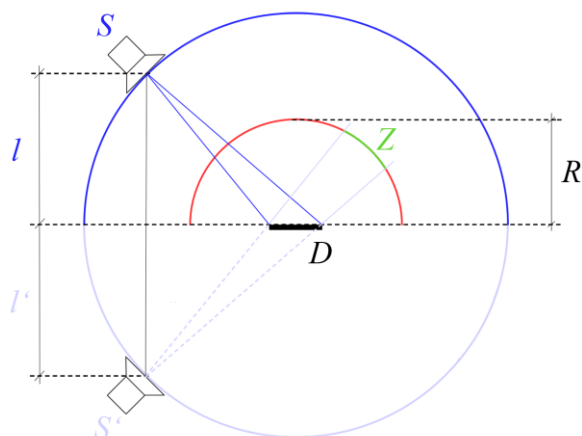
Obr. 3.1: Grafické znázornění vymezení prostoru

Na **Obr. 3.1** S značí umístění zdroje zvuku, M značí umístění mikrofonu a D značí měřený vzorek. Dále je naznačena vzdálenost od mikrofonu k měřenému vzorku l_{MD} , která je rovna požadovanému poloměru mikrofonního pole R a vzdálenost l_{SD} , která je rovna $2R$. X je střed mezi body S a M . Od bodu X jsou naznačeny vzdálenosti A a B , pro které platí $A = 2,5R$ a $B = 2,45R$. Tyto vzdálenosti určují velikost prostoru E , který je nutné ponechat naprosto bez jakýchkoliv překážek.



Obr. 3.2: Polobezodrazová komora na VÚTS v Liberci [15]

Velikost poloměru mikrofonního pole R je nutné zvolit s ohledem na dodržení podmínky přibližně vzdáleného pole. Toho lze dosáhnout, je-li v zrcadlové zóně odrazu maximálně 20% z celkového počtu měřících bodů. Zrcadlová zóna odrazu je přitom definovaná jako oblast vymezená pomyslnými polopřímkami vedenými z obrazu zdroje přes hrany zkoušeného vzorku k polokružnici mikrofonního pole. Toto ilustruje **Obr. 3.3**.



Obr. 3.3: Určení zrcadlové zóny odrazu pomocí obrazu zdroje

D značí měřený vzorek, S' je zrcadlový obraz zdroje S , přičemž platí že $l = l'$, Z značí zrcadlovou zónu odrazu a R je poloměr mikrofonního pole.

3.3.2 Požadavky na měřící techniku

Minimální počet měřících bodů je stanoven úhlovým rozlišením příjmu $\Delta\theta \leq 5^\circ$. To znamená, že je nutné měřit minimálně 37 rovnoměrně rozložených bodů v rozsahu -90° až 90° vzhledem k referenční normále. Referenční normálou se rozumí osa vedená kolmo na střed referenčního plochého povrchu. Měřící mikrofony mají mít stejnou citlivost na všech možných drahách odrazu od difuzoru, a to v rozmezí ± 1 dB přes celý měřený kmitočtový rozsah, který dle normy pokrývá třetinooktávová pásma se středem od 100 Hz do 5000 Hz. Mikrofony by dále měly mít co možná nejmenší rozměry, aby mohly být umístěny co nejblíže k odrazivé ploše podlahy.

Pro změření koeficientu difuze v difuzním poli musí být vybráno více bodů zdroje zvuku. Nejpresnějšího výsledku by bylo dosaženo s velmi malým úhlovým rozlišením bodů zdroje, např. $\Delta\theta = 1^\circ$. Norma však za dostatečné považuje zkrácené měření s body zdrojů umístěnými v úhlech 0° , $\pm 30^\circ$ a $\pm 60^\circ$ vzhledem k referenční normále. Jako zdroj zvuku se volí reproduktor, který má ozařovat celý vzorek, jako by byl zdroj všesměrový. Reproduktor musí vytvářet rozložení akustického tlaku ekvivalentní tomu, které by bylo očekávané od skutečného všesměrového zdroje, a to v rozmezí ± 2 dB přes celý měřený kmitočtový rozsah. Také rozměry reproduktoru by měly být co nejmenší, aby bylo možné zdroj považovat za bodový a mohl být umístěn opět co nejblíže k odrazivé ploše podlahy.

3.4 Postup zkoušky

Výstupem zkoušky jsou polární odezvy hladiny akustického tlaku odraženého od zkoušeného vzorku a kmitočtové závislosti normovaného a nenormovaného činitele směrové difuze i činitele difuze pro všesměrový dopad. Podstatou je změřit impulzovou odezvu takovým způsobem, aby bylo možné oddělit odraz ze zkoušeného vzorku od ostatních odrazů.

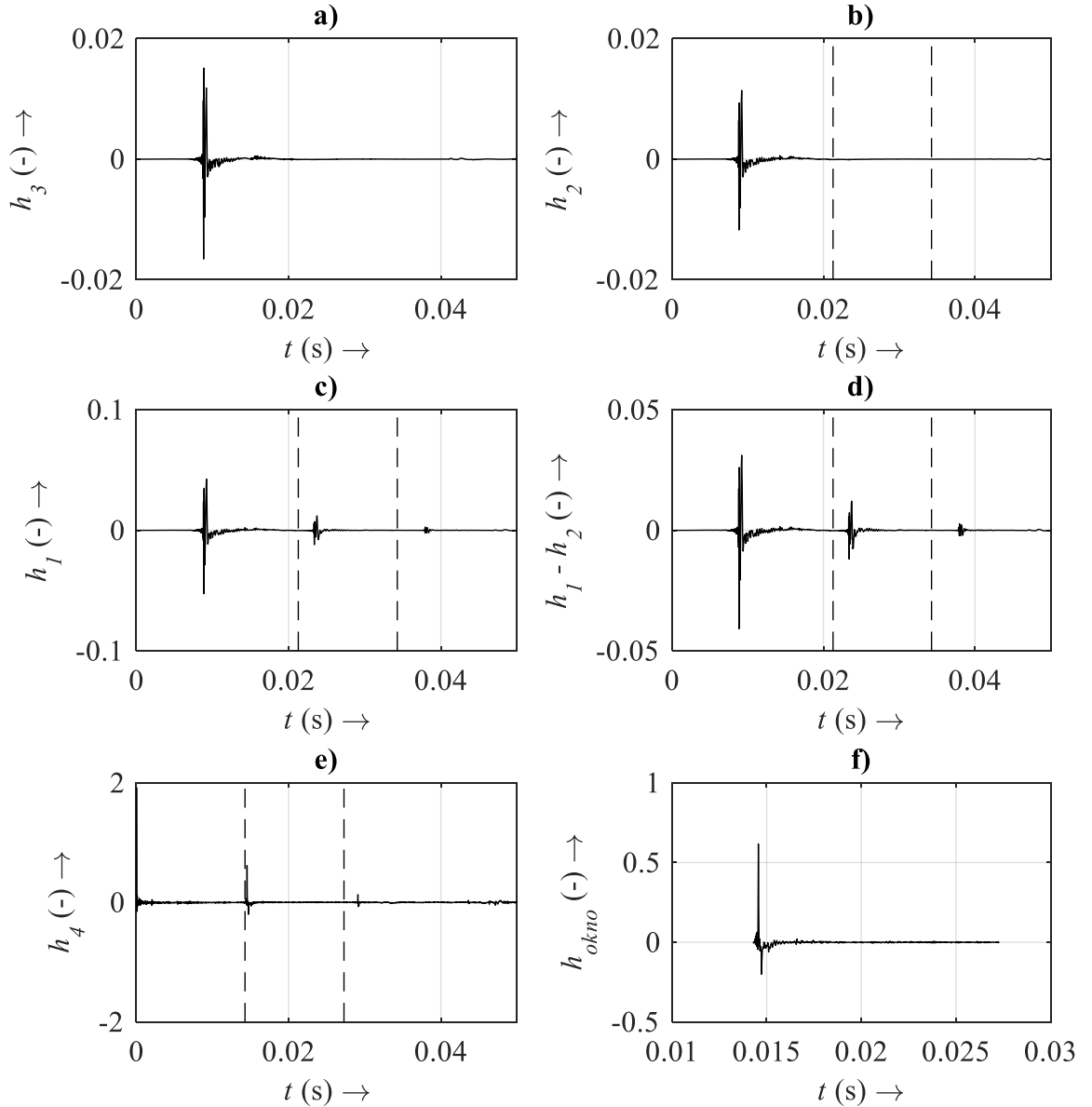
3.4.1 Impulsové odezvy

Pro všechny možné kombinace zdrojů a přijímačů musí být provedeno měření impulzové odezvy se zkoušeným vzorkem ($h_1(t)$), pozadí bez zkoušeného vzorku ($h_2(t)$) a pokud se používá více než jeden mikrofon nebo zdroj, tak se navíc měří impulsová odezva od zdroje k přijímači se zdrojem orientovaným od referenčního bodu směrem k bodu přijímače ($h_3(t)$). Pro vyhodnocení normovaných koeficientů je dále nutné změřit impulzovou odezvu od referenčního plochého povrchu ($h_{1r}(t)$).

Výsledná impulsová odezva $h_4(t)$ je poté získána spektrálním dělením rozdílu odezvy $h_2(t)$ od $h_1(t)$ s odezvou $h_3(t)$, kdy dojde nejprve k odstranění vlivu odrazů pozadí a následně, pokud se využívá systému s více než jedním mikrofonem nebo reproduktorem, ke kompenzaci přenosu od reproduktoru k mikrofonu. Tento výpočet je popsán vztahem (3.5).

$$h_4(t) = \text{IFT} \left\{ \frac{\text{FT}[h_1(t) - h_2(t)]}{\text{FT}[h_3(t)]} \right\} [-], \quad (3.5)$$

kde FT značí dopřednou Fourierovu transformaci a IFT zpětnou Fourierovu transformaci. Přehled očekávaných impulsových odezev je graficky znázorněn na **Obr. 3.4**



Obr. 3.4: Přehled impulsových odezev, a) odezva reproduktor mikrofon $h_3(t)$, b) odezva pozadí bez vzorku $h_2(t)$, c) odezva pozadí se vzorkem $h_1(t)$, d) rozdíl odezvy $h_1(t) - h_2(t)$, e) dekonvoluovaná odezva vzorku $h_4(t)$, f) vyklíčovaná odezva vzorku [9]

3.4.2 Klíčování oknem

Na impulsovou odezvu $h_4(t)$ se v dalším kroku aplikuje pravoúhlé okno, které má jednotkovou váhu tam, kde se nacházejí odrazy od difuzoru, jinde je nulová. Velikost okna se určuje posouzením nejkratší a nejdelší doby odrazů od vzorku. Tyto doby lze podle normy vypočítat podle jednoduché geometrie. Prvotní čas odrazu lze odvodit

z velikosti R . Zvukový signál nejprve urazí dráhu od zdroje ke vzorku, kde se odrazí a pokračuje dál k přijímači. Tato celková vzdálenost je tedy $3R$ a čas odrazu je tak stanoven podle vztahu

$$t_{min} = \frac{3R}{c_0} [s], \quad (3.6)$$

kde R [m] je poloměr mikrofonního pole a c_0 [m/s] rychlost šíření zvuku. Konec časového okna je nutné zvolit tak, aby byly odříznuty nežádoucí odrazy od ostatních objektů v prostoru. V ideálním případě je nejbližší překážkou samotný zdroj zvuku a v takovém případě musí urazit zvuk vzdálenost $5R$. Časový údaj této vzdálenosti lze určit podle vztahu

$$t_{max} = \frac{5R}{c_0} [s], \quad (3.7)$$

kde R [m] je poloměr mikrofonního pole a c_0 [m/s] rychlost šíření zvuku. Tyto časové údaje jsou však platné pouze v ideálním případě a pouze pro kombinaci zdroje a mikrofonu umístěných v poloze 0° od referenční normály. Z toho důvodu je nutné korigovat časové údaje podle prostoru, v němž je reálně měřeno. Norma doporučuje pro umístění a velikost okna vizuální kontrolu impulzové odezvy.

Pro správné vyhodnocení výsledků měření se má dosáhnout odstupu signálu od šumu nejméně 40 dB uvnitř oknem vyklíčovaného úseku impulzové odezvy pro referenční odrazivou plochu $h_{1r}(t)$. Pokud je této hodnoty dosaženo, tak se šum nevztahuje pouze k náhodné chybě měření, ale také k systematickým chybám kvůli nežádoucím odrazům od objektů jiných než je měřený vzorek. Odstup lze vypočítat podle následujícího vztahu

$$SNR_r = 10 \log \left\{ \frac{\int_{t_{min}}^{t_{max}} [h_{1r}(t) - h_2(t)]^2 dt}{\int_{t_{min}}^{t_{max}} h_2^2(t) dt} \right\} [dB], \quad (3.8)$$

kde t_{min} [s] a t_{max} [s] jsou hranice časového okna, $h_{1r}(t)$ je impulzová odezva referenční odrazivé plochy a $h_2(t)$ je impulzová odezva pozadí bez vzorku.

Dekonvoluce podle vztahu (3.5) způsobuje, že poloha přímého zvuku i poloha samotného odrazu od vzorku je v $h_4(t)$ odlišná od $h_1(t)$, resp. $h_{1r}(t)$, a toto je potřeba vzít v úvahu při klíčování.

3.4.3 Třetinooktávová analýza

Tímto způsobem vyklíčovaná odezva od vzorku a referenční odrazivé plochy se následně podrobí Fourierově transformaci a získá se relativní akustický tlak p_i pro každý jednotlivý bod příjmu ve všech třetinooktávových pásmech, ze kterého je možné získat hladinu akustického tlaku L_i [dB]. S těmito hodnotami se dále pracuje při výpočtech difuzních vlastností podle vztahů (3.2) a (3.3).

4 NÁVRH A VÝROBA VZORKŮ

Před samotným návrhem proběhl s vedoucím práce výběr několika typů rozptylových prvků, pro které bude proveden výpočtový návrh a vytvořena výkresová dokumentace. Konkrétně se jedná o difuzory typu MLS, PRD a 2D QRD. Jejich návrh byl proveden s ohledem na jednoduchost výroby, použití vhodných materiálů, cenové náklady a samozřejmě také na pracovní pásma jednotlivých difuzorů. Záměrem bylo volit pracovní pásma difuzorů přibližně ve stejném kmitočtovém rozsahu, aby bylo možné později porovnat změřené výsledky difuzních vlastností. Druhým kritériem při návrhu byly konečné rozměry jednotlivých prvků, ty by se neměly výrazně lišit. S difuzory by mělo být možné jednoduše manipulovat a bez problémů je transportovat osobním automobilem.

Pro výrobu byly vybrány celkem tři typy dřevěných materiálů. Jedná se o desku MDF DDL-L, která na svém povrchu nenese známky skvrn, stop po broušení či jakémkoliv jiném poškození, díky tomu je vhodná téměř k jakémkoliv povrchové úpravě. Zároveň je materiál možné snadno opracovávat a má dostatečnou pevnost. Jeho vlastnosti jsou tedy vhodné pro výrobu akustických prvků. Druhým vybraným materiálem je truhlářská překližovaná deska a posledním použitým typem materiálu jsou smrkové latě. Všechny typy materiálů jsou běžně dostupné a není předpoklad, že bude u prodejců dlouhá doba naskladnění. Kombinace použití všech materiálů je detailně popsána v následujících návrzích. Fotodokumentace z průběhu výroby prvků je obsahem přílohy na DVD (E).

Jednotlivé návrhy byly ověřeny pomocí softwaru AFMG Reflex. Jedná se o speciálně vyvinutý simulační program pro vyhodnocení difuzních vlastností povrchů. V rámci modelu je tvar odrazné plochy zadán jako dvourozměrný průřez. Výstupem jsou grafy polární odezvy a kmitočtové závislosti činitele rozptylu a difuze [16].

4.1 Vlastní návrh difuzoru typu MLS

Prvním krokem je volba návrhového kmitočtu f_0 . Tento kmitočet je zvolen s ohledem na použitý materiál, který je v tomto případě překližovaná deska tl. 10 mm pro výrobu zadní desky prvku a MDF deska tl. 18 mm pro výrobu jednotlivých šachet. Ty jsou navrženy ze dvou k sobě lepených MDF desek a výsledná hloubka d_{MLS} je tedy 0,036 m. Z toho lze odvodit také šířku šachty s_{MLS} , ta je v tomto případě 0,072 m, a návrhový kmitočet f_0 , který podle rozměrů šachty vyjde 2390 Hz.

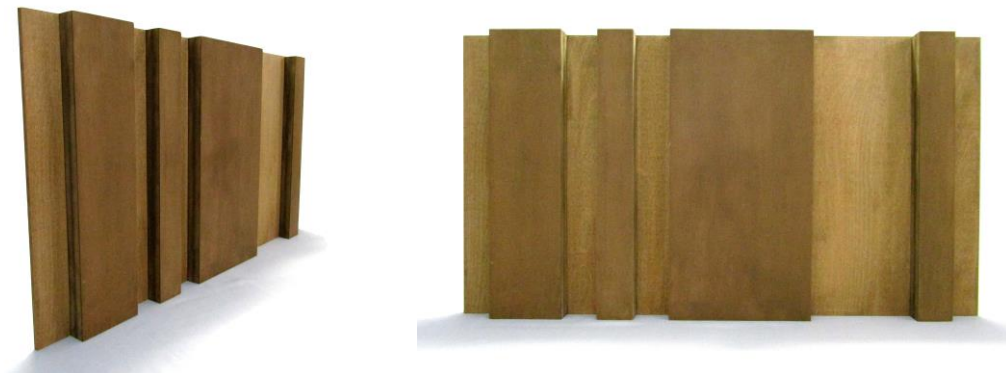
Následujícím krokem je vygenerování samotné posloupnosti MLS. S ohledem na konečnou šířku prvku je zvoleno základní číslo posloupnosti N_{MLS} číslo 4, délka posloupnosti L_{MLS} je poté 15.

Pro výpočet samotné posloupnosti bylo využito tabulkového editoru Microsoft Excel. Soubor s výpočtem je součástí přílohy na DVD (E.1). Vývoj posloupnosti a_{MLS} je zapsán v **Tab. 4.1**.

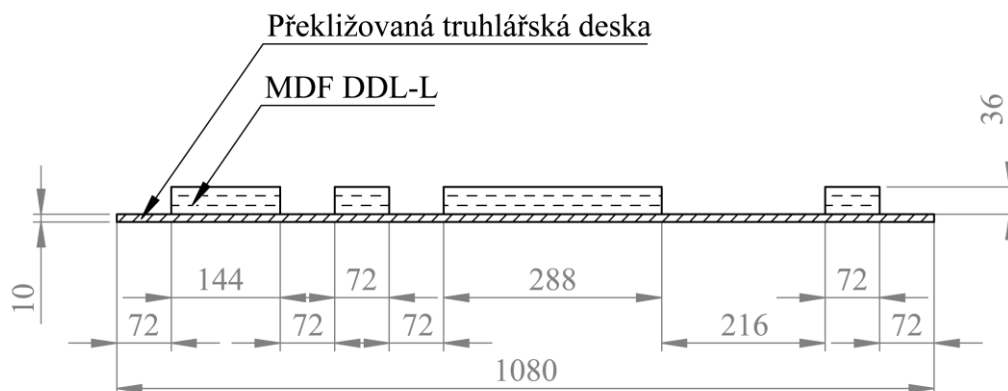
Tab. 4.1: Posloupnost šachet pro navržený difuzor typu MLS

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
a_{MLS<i>i</i>}	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0

Vyrobený vzorek difuzoru je zobrazen na **Obr. 4.1**. Horizontální řez difuzorem je zobrazen na **Obr. 4.2**. Kompletní výkresová dokumentace s detailním popisem rozměrů je součástí přílohy (A.1).



Obr. 4.1: Vyrobený difuzor typu MLS

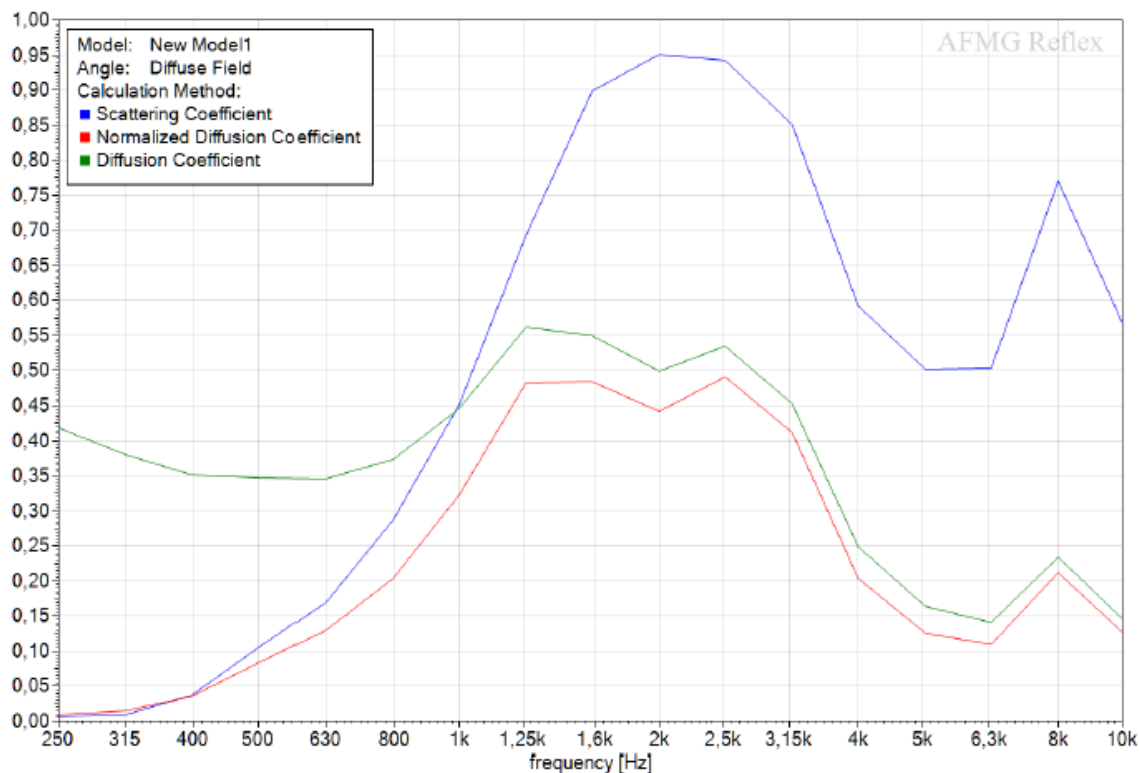


Obr. 4.2: Řez středem difuzoru MLS

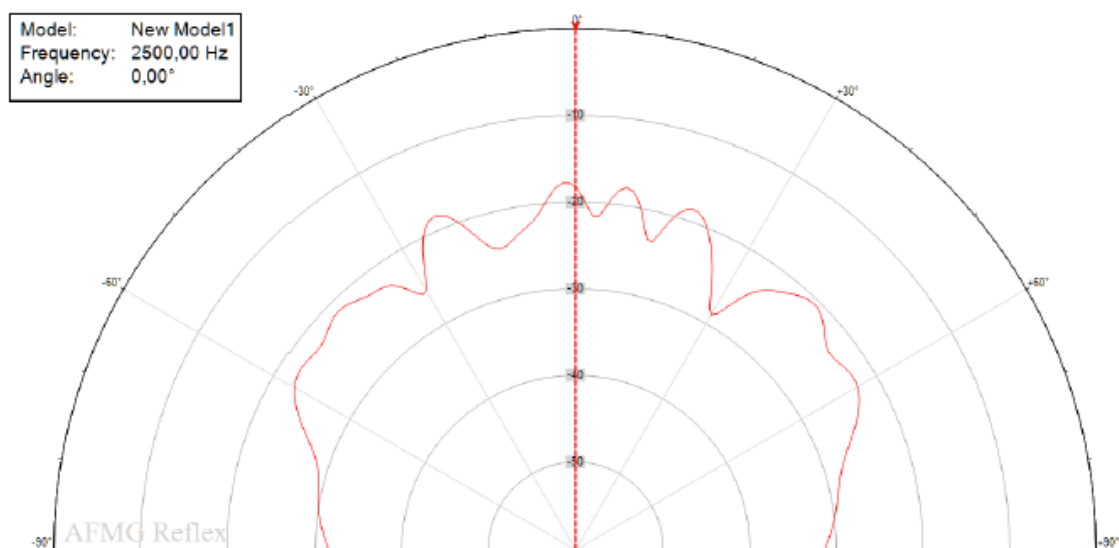
4.1.1 Simulace difuzních vlastností difuzoru typu MLS

Podle tohoto návrhu byl vytvořen model prvku v programu AFMG Reflex. Kmitočtová závislost činitele difuze v difuzním poli a činitele rozptylovosti je zobrazena na **Obr. 4.3**. Polární odezva hladiny odraženého akustického tlaku ze směru 0° je pro třetinooktávové pásmo se středním kmitočtem 2500 Hz zobrazena na **Obr. 4.4**. Z důvodu využití pouze trial verze simulačního programu, nebylo možné jednotlivé modely ukládat a také nebyla možnost exportovat grafy v lepší kvalitě, než jak jsou prezentovány v diplomové práci. Z tohoto důvodu je název modelu pro difuzor typu MLS uveden jako 'New Model1' a grafy jsou vkládány pomocí bitmapové grafiky horší

kvality. Ve zkušební verzi programu je však možné generovat zprávu o vlastnostech vytvořeného modelu, která je součástí přílohy na DVD (E).



Obr. 4.3: Simulace kmitočtových závislostí difuzních vlastností z programu AFMG Reflex difuzoru typu MLS



Obr. 4.4: Simulace polární odezvy z programu AFMG Reflex difuzoru typu MLS pro směr šíření 0° a třetiooktávové frekvenční pásmo 2500 Hz

4.2 Vlastní návrh difuzoru typu PRD

Prvním krokem návrhu tohoto typu difuzoru je určení horního kmitočtu f_h a dolního kmitočtu f_d pracovního pásma. Od těchto kmitočtů jsou dále odvozeny rozměry šachet. Stejně jako u předešlého návrhu je postupováno zpětně. S ohledem na jednoduchost výroby, jsou pro výrobu šachet zvoleny MDF desky tl. 18 mm, vždy ve dvou k sobě přilepených kusech. Šířka šachty s_{PRD} je ve výsledku 0,036 m, a protože není navržena přepážka mezi jednotlivými šachtami, tak odpovídající horní mezní kmitočet f_h je roven 4780 Hz. Hloubka šachet je u tohoto typu difuzoru proměnná a závisí na zvoleném dolním mezním kmitočtu f_d . S ohledem na konečné rozměry prvku je zvolena kmitočtem 870 Hz. Aby bylo dosaženo dobré difuze, je počet směrových laloků n zvolen 5. Z těchto zvolených hodnot je možné dále dopočítat posloupnost určující hloubky jednotlivých šachet. Návrhové prvočíslo N_{PRD} je podle vztahu (2.6) zvoleno 23. Nejmenší primitivní kořen r_N prvočísla 23 je číslo 5 a délka posloupnosti L_{PRD} je 22. Krok, se kterým se bude měnit hloubka jednotlivých šachet d_{PRD} je dán vztahem (2.13) a v tomto případě je hodnota 0,009 m.

Stejně jako u návrhu MLS difuzoru bylo k výpočtům využito tabulkového editoru a soubor s výpočtem je součástí přílohy na CD (E.2). Výsledná posloupnost a_{PRDi} je zapsána v **Tab. 4.2**.

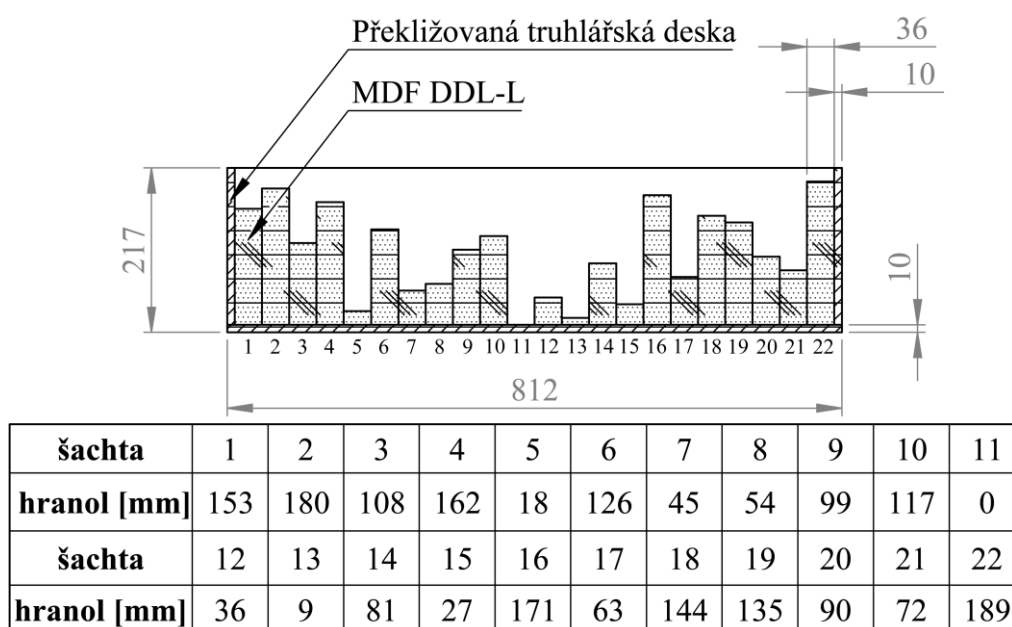
Tab. 4.2: Posloupnost šachet navržený pro difuzor typu PRD

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
a_{PRDi}	5	2	10	4	20	8	17	16	11	9	22
d_{PRDi} [m]	0,045	0,018	0,090	0,036	0,180	0,072	0,153	0,144	0,099	0,081	0,198
i	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
a_{PRDi}	18	21	13	19	3	15	6	7	12	14	1
d_{PRDi} [m]	0,162	0,189	0,117	0,171	0,027	0,135	0,054	0,063	0,108	0,126	0,009

Zadní deska, spodní, horní i boční díly, které dohromady tvoří rám difuzoru, jsou navrženy a vyrobeny z truhlářské překližované desky tloušťky 10 mm. Každý jednotlivý hranol v šachtě je vyroben ze dvou k sobě přilepených MDF desek tl. 18 mm. Díky tomu je možné jednoduše a velmi přesně vyrobit šachtu s jakoukoliv hloubkou. Vyrobený vzorek difuzoru je zobrazen na **Obr. 4.5**. Horizontální řez difuzorem je zobrazen na **Obr. 4.6**. Kompletní výkresová dokumentace s detailním popisem rozměrů je součástí přílohy (A.2).



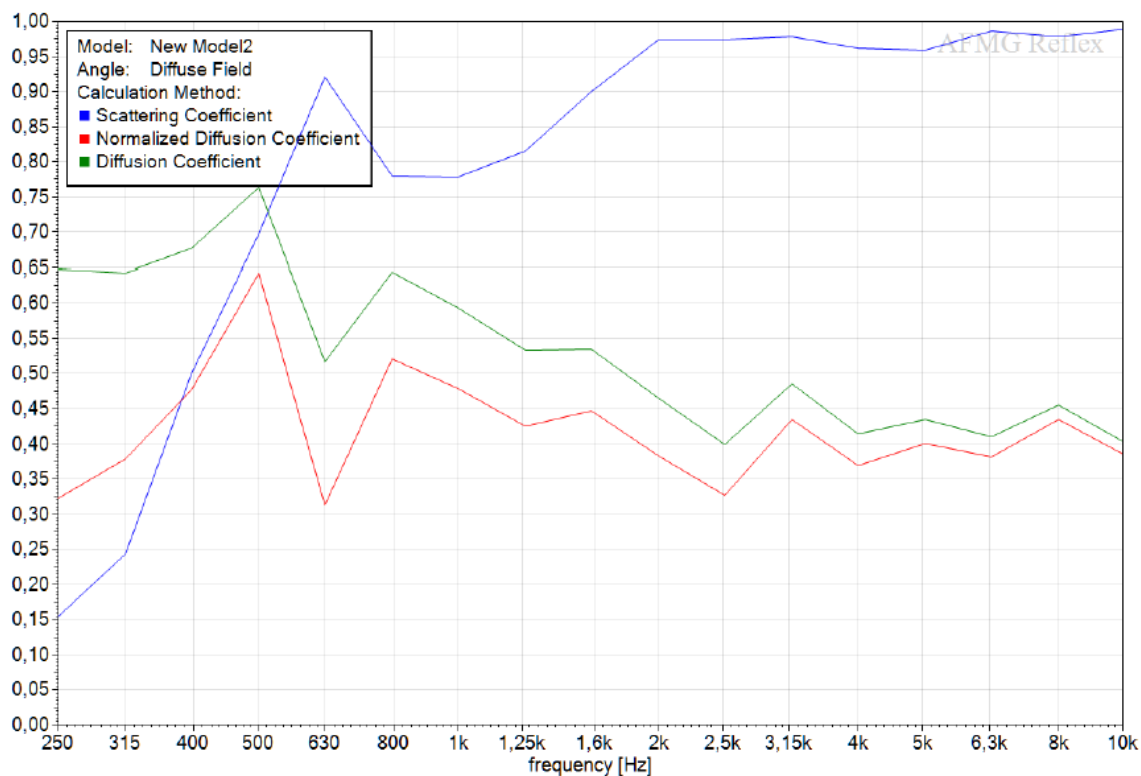
Obr. 4.5: Vyrobený difuzor typu PRD



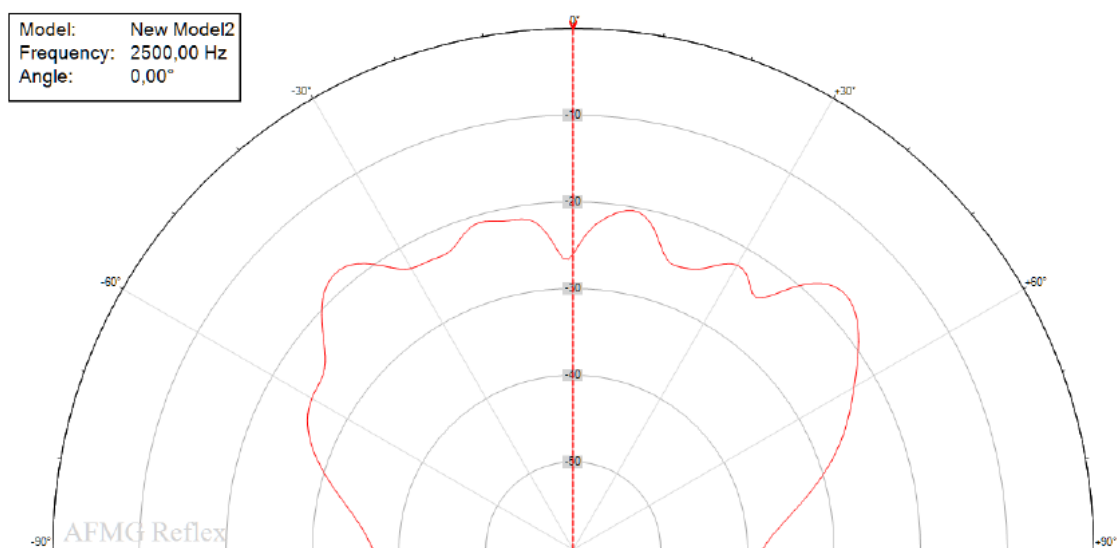
Obr. 4.6: Řez středem difuzoru PRD

4.2.1 Simulace difuzních vlastností difuzoru typu PRD

Také pro navržený difuzor typu PRD byl vytvořen model v programu AFMG Reflex. Z důvodů popsaných výše, je v grafech uváděn s názvem 'New Model2'. Kmitočtová závislost činitele difuze v difuzním poli a činitele rozptylovosti je zobrazena na **Obr. 4.7**. Polární odezva hladiny odraženého akustického tlaku ze směru 0° je pro třetinooktávové pásmo se středním kmitočtem 2500 Hz zobrazena na **Obr. 4.8**. Generovaná zpráva o vlastnostech tohoto difuzoru je součástí přílohy (E).



Obr. 4.7: Simulace kmitočtových závislostí difuzních vlastností z programu AFMG Reflex difuzoru typu PRD



Obr. 4.8: Simulace polární odezvy z programu AFMG Reflex difuzoru typu PRD pro směr šíření 0° a třetiooktávové frekvenční pásmo 2500 Hz

4.3 Vlastní návrh difuzoru typu 2D QRD

Prvním krokem návrhu je opět určení horního kmitočtu f_h a dolního kmitočtu f_d . Od vlnových délek těchto kmitočtů se odvíjejí rozměry jednotlivých šachet. V případě vícerovinového difuzoru jako je tento, jsou šachty rovnoměrně rozděleny v rámci čtvercové sítě a šířka jedné šachty je v takovém případě také výška šachty. Tento rozměr je dán použitým materiálem, kterým jsou smrkové latě tl. 40 x 50 mm upravené na tl. 36 x 36 mm. Šířka šachty s_{2D_QRD} je tedy 0,036 m a z toho odvozený horní mezní kmitočet f_h je 4780 Hz. Hloubka jednotlivých šachet je znovu proměnná a opět závisí na zvoleném dolním mezním kmitočtu f_d . S ohledem na šířku pracovního pásma a celkovou hloubku difuzoru je stanoven na 1010 Hz. Pro dobré difuzní vlastnosti je počet směrových laloků n_l znovu zvolen 5. Z takto zvolených parametrů se podle vztahu (2.6) určí návrhové prvočíslo N_{QRD} . Pro tento případ je určeno prvočíslo 19. Krok, se kterým se mění hloubka šachet d_{QRD} je určena vztahem (2.8) jako hodnota 0,009 m.

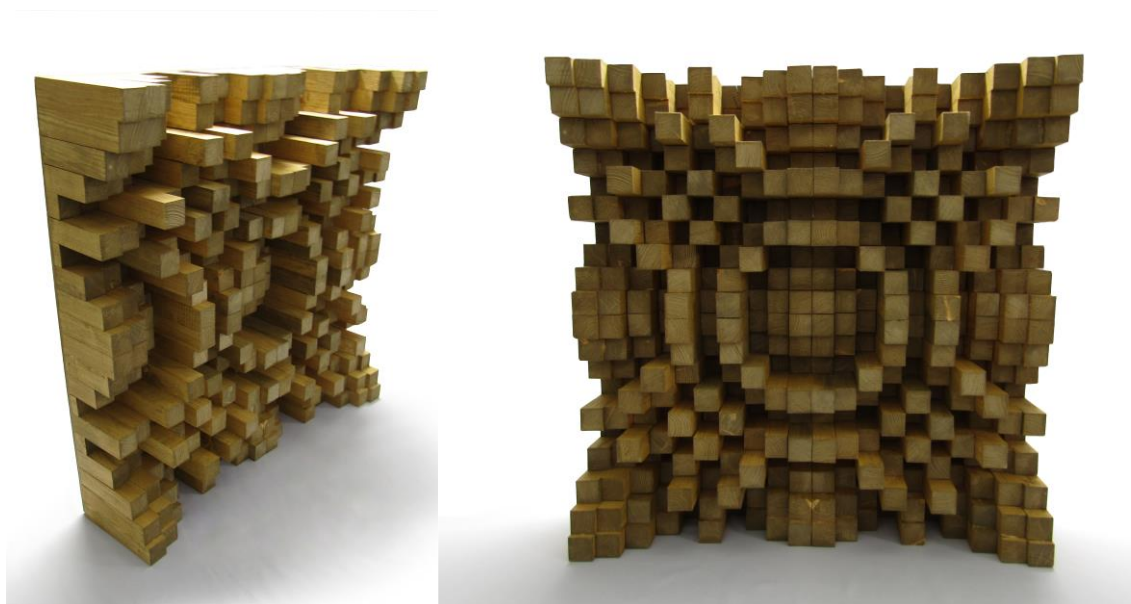
Tab. 4.3: Posloupnost šachet pro navržený difuzor typu 2D QRD

n/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	0	1	4	9	16	6	17	11	7	5	5	7	11	17	6	16	9	4	1	0
1	1	2	5	10	17	7	18	12	8	6	6	8	12	18	7	17	10	5	2	1
2	4	5	8	13	1	10	2	15	11	9	9	11	15	2	10	1	13	8	5	4
3	9	10	13	18	6	15	7	1	16	14	14	16	1	7	15	6	18	13	10	9
4	16	17	1	6	13	3	14	8	4	2	2	4	8	14	3	13	6	1	17	16
5	6	7	10	15	3	12	4	17	13	11	11	13	17	4	12	3	15	10	7	6
6	17	18	2	7	14	4	15	9	5	3	3	5	9	15	4	14	7	2	18	17
7	11	12	15	1	8	17	9	3	18	16	16	18	3	9	17	8	1	15	12	11
8	7	8	11	16	4	13	5	18	14	12	12	14	18	5	13	4	16	11	8	7
9	5	6	9	14	2	11	3	16	12	10	10	12	16	3	11	2	14	9	6	5
10	5	6	9	14	2	11	3	16	12	10	10	12	16	3	11	2	14	9	6	5
11	7	8	11	16	4	13	5	18	14	12	12	14	18	5	13	4	16	11	8	7
12	11	12	15	1	8	17	9	3	18	16	16	18	3	9	17	8	1	15	12	11
13	17	18	2	7	14	4	15	9	5	3	3	5	9	15	4	14	7	2	18	17
14	6	7	10	15	3	12	4	17	13	11	11	13	17	4	12	3	15	10	7	6
15	16	17	1	6	13	3	14	8	4	2	2	4	8	14	3	13	6	1	17	16
16	9	10	13	18	6	15	7	1	16	14	14	16	1	7	15	6	18	13	10	9
17	4	5	8	13	1	10	2	15	11	9	9	11	15	2	10	1	13	8	5	4
18	1	2	5	10	17	7	18	12	8	6	6	8	12	18	7	17	10	5	2	1
19	0	1	4	9	16	6	17	11	7	5	5	7	11	17	6	16	9	4	1	0

Délka jedné periody posloupnosti L_{QRD} by v tomto případě byla správně 19, začíná indexem 0 a končí indexem 18. Toto by v případě plošného obložení muselo být pro správnou funkci obkladu dodrženo. Pokud je prvek realizovaný pouze v jednom kuse, jako je tomu v tomto případě, je možné přistoupit k rozšíření o jeden index posloupnosti směrem do obou rovin, Tím se docílí symetrie prvku. Celkový počet šachet je tedy 400, s počtem 20 sloupců a 20 řádků.

Pro výpočet hloubky šachet bylo použito tabulkového editoru, soubor je součástí přílohy na DVD (E.3). Rozmístění jednotlivých hranolů je přehledně zobrazeno v **Tab. 4.3**.

Záda difuzoru jsou navržena a vyrobena stejně jako u předešlých prvků z překližované desky tloušťky 10 mm. Jednotlivé šachty jsou poté realizovány z opracovaných smrkových latí tl. 36 x 36 mm. Latě byly pro opracování na požadovanou sílu kráceny na délku 1 m a po opracování nařezány už na konečné rozměry jednotlivých hranolů. Díky použití takového materiálu je možné jednoduše a přesně vyrobit hranol o jakékoliv hloubce. Vyrobený vzorek difuzoru je na **Obr. 4.9**. Horizontální řez difuzorem je zobrazen na **Obr. 4.10**. Výkresová dokumentace s detailním popisem rozměrů je součástí přílohy (A.3).



Obr. 4.9: Vyrobený difuzor typu 2D QRD



Obr. 4.10: Řez středem difuzoru 2D QRD

4.3.1 Simulace difuzních vlastností difuzoru typu 2D QRD

Protože využitý software v dostupné verzi neumožňuje simulaci vícerovinných prvků, nebylo možné simulovat jeho difuzní vlastnosti. Bylo by možné provést vyhodnocení pro jednotlivé řady tohoto prvku, výsledky by však neodpovídaly vlastnostem kompletního prvku.

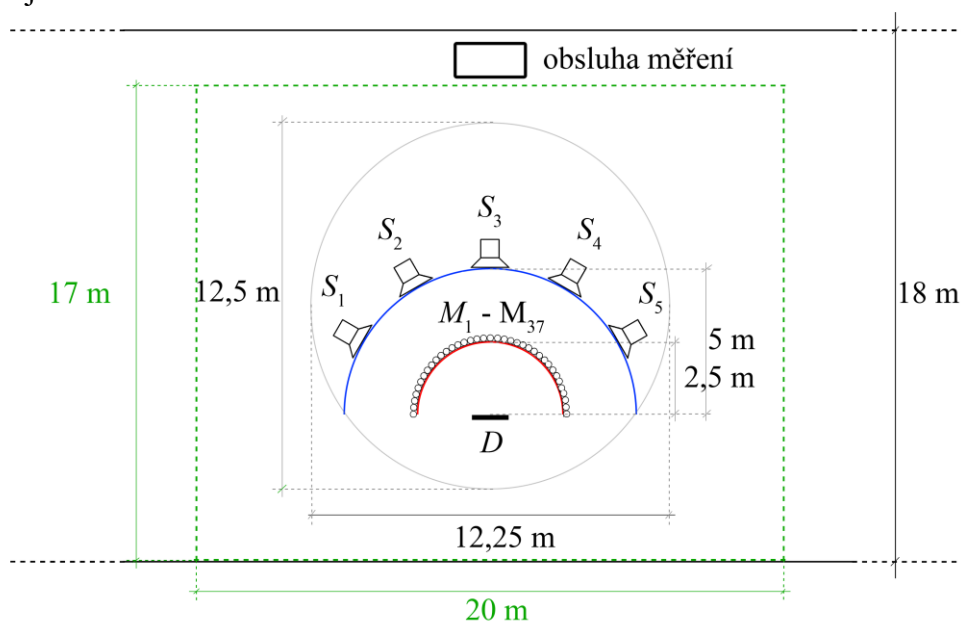
5 MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT

5.1 Měření

Podle požadavků uvedených v podkapitole 3.3.1 byla nejprve zjištěna požadovaná velikost poloměru mikrofonního pole R . Vyhodnocení zrcadlové zóny odrazu bylo provedeno za pomoci grafického nákresu v programu Google SketchUp. V nákresu byl zahrnut nejširší měřený difuzor a zvolený počet měřících bodů. Nejširším měřeným difuzorem je typ MLS s šířkou 1,08 m. Celkový počet měřících bodů byl stanoven podle požadavků normy na 37, tento počet na půlkruhovém poli odpovídá úhlovému rozlišení 5° . S těmito výchozími parametry byl zvolen poloměr mikrofonního pole 2,5 m. Vzdálenost zdrojů od vzorku je tedy 5 m. V zóně zrcadlového odrazu v takovém případě leží 7 měřících bodů a je tím splněna podmínka, že v této zóně smí ležet maximálně 20 % z celkového počtu měřících bodů. V případě měření zbylých typů difuzorů se počet měřících bodů uvnitř zrcadlové zóny odrazu vlivem odlišné šířky prvku ještě snižuje na počet 5.

Ze stanovené velikosti R je možné dále odvodit celkovou velikost požadované bezodrazové zóny E . Vzdálenosti A a B vedené od středu E jsou v tomto případě, podle pravidel uvedených v podkapitole 3.3.1, 6,25 m a 6,125 m. Celkový požadovaný volný prostor má tedy velikost 12,5 m x 12,25 m.

Pro účely tohoto specifického měření je dalším kritériem vysoká odrazivost podlahové plochy a dostatečně nízký hluk pozadí. Z těchto důvodů byla k měření využita sportovní hala v Nové Bystřici. Vnitřní rozměry haly jsou 36 m x 18 m x 15 m a podlaha je realizovaná z lakovaných dřevěných parket. Náčrtek s rozměry a rozmístěním měřícího aparátu je na **Obr. 5.1**.

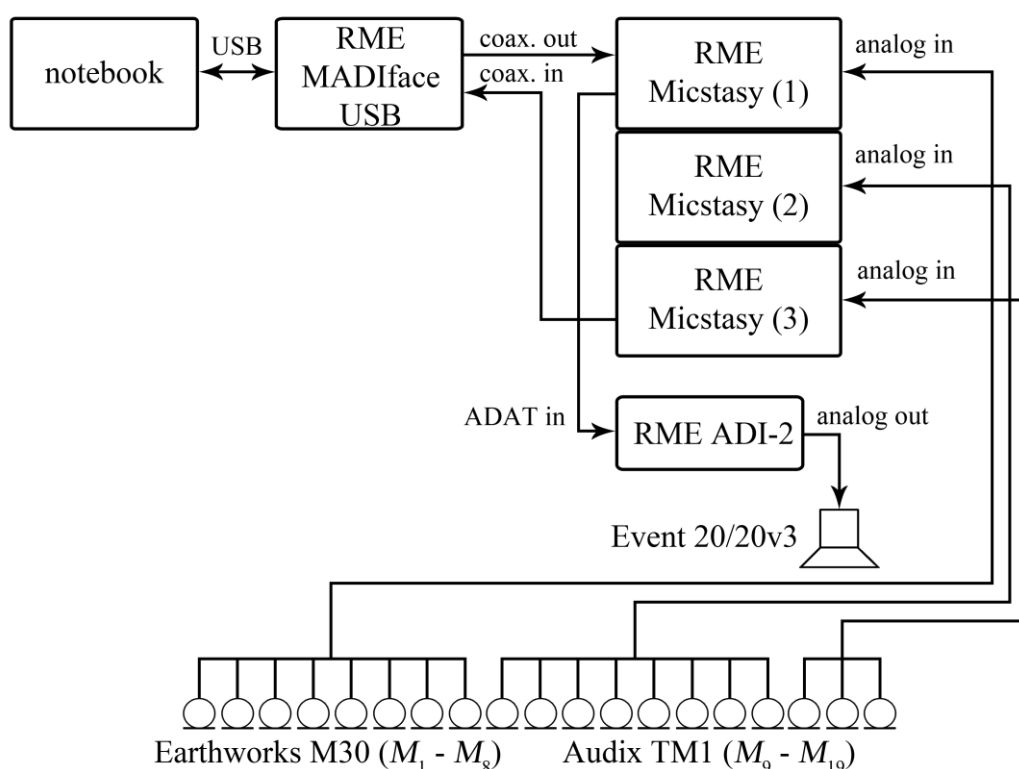


Obr. 5.1: Skutečné rozmístění měřícího aparátu s nákresem bezodrazové zóny

Jak je patrné z přecházejícího **Obr. 5.1**, velikost bezodrazové zóny byla zvětšena na rozměry 17 m x 20 m, přičemž vzdálenost za měřeným vzorkem byla více než 5 m. Všechny další objekty v hale, včetně obsluhy měření byly umístěny mimo zeleně vyznačenou bezodrazovou zónu.

5.1.1 Měřicí aparát

K měření bylo využito celkem 19 kusů měřících mikrofónů, z toho 11 kusů mikrofónů Audix TM1 a 8 kusů mikrofónů Earthworks M30. Všechny mikrofóny byly připojeny do tří předzesilovačů RME Micstasy. Předzesilovače byly mezi sebou propojeny optickými kabely pomocí rozhraní ADAT a časově synchronizovány přes World Clock. Hromadný výstup z předzesilovačů byl veden koaxiálním kabelem pomocí rozhraní MADi na vstup převodníku RME MADiFace USB. Převodník byl poté připojen k notebooku se softwarem StudioOne 2, do kterého byly hromadně zaznamenávány nahrané signály s měřících mikrofónů. Měřicí signál byl z výstupu převodníku veden koaxiálním kabelem na vstup prvního předzesilovače a následně pomocí optického kabelu přes rozhraní ADAT připojen do zvukové karty RME ADI-2, ke které už byl připojen aktivní reproduktor Event 20/20v3. Specifikace všech článků měřícího řetězce udávané výrobcí jsou součástí přílohy na DVD (E.4). Zapojení měřícího aparátu je přehledně zobrazeno na **Obr. 5.2**.



Obr. 5.2: Zapojení měřícího řetězce

5.1.2 Postup měření

Samotný proces měření měl následující postup:

- 1) rozměření pozice vzorku, mikrofonního pole, zdrojů zvuku a bezodrazové zóny
- 2) rozmístění mikrofónů na pozice M_1 až M_{19} a zdroje zvuku na pozici S_3 , nastavení úrovně budícího signálu a citlivosti mikrofónů
- 3) umístění zdroje zvuku na pozici vzorku a postupné změření odezvy h_3 od reproduktoru k mikrofónu s pootáčením zdroje maximem vyzařování vždy k jednotlivému mikrofónu
- 4) umístění zdroje na pozici S_1 a změření odezvy pozadí bez vzorku h_2 , odezvy pozadí se vzorkem h_1 a odezvy pozadí s referenční odrazivou plochou h_{1r} , odezvy od vzorku a referenční plochy byly měřeny pro každý jednotlivý difuzor, jako referenční plocha byla použita zadní stěna difuzoru
- 5) přesunutí zdroje zvuku postupně na pozice S_2 až S_5 a opakování měření bodu 4)
- 6) přesunutí mikrofónů na pozice M_{20} až M_{37} a opakování bodů 3) až 5)

Jako budící signál byl použit logaritmicky přeladovaný sinus od kmitočtu 100 Hz do kmitočtu 20 kHz, časový interval přeladování byl nastaven na 3 sekundy a přehrávána byla vždy jedna period signálu. K vygenerování měřícího signálu byl vytvořen skript v programu Matlab, který je součástí přílohy na DVD (E.5). Soupis veškerého použitého vybavení je obsahem přílohy (D).

5.2 Zpracování naměřených dat

Proces zpracování a vyhodnocení naměřených dat sestává z následujících dílčích úkonů:

- Export naměřených signálů z programu Presonus StudioOne 2 a přehledné rozřazení do jednotlivých složek.
- Načtení signálů do vícerozměrných matic
- Výpočet impulsových odezev
- Výpočet dekonvoluce signálů a aplikace časového okna
- Třetinooktávová analýza a výpočet hladin akustického tlaku
- Výpočet koeficientů difuzity
- Vykreslení polárních odezev a kmitočtově závislých koeficientů difuzity

Jednotlivé kroky zpracování jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.

5.2.1 Záznam a export signálů

Jak bylo již zmíněno, k zaznamenání signálů bylo využito programu Presonus StudioOne 2. Tento software neslouží k vyhodnocení impulsové odezvy prostoru, ale jedná se o DAW primárně určené pro vícekanálové nahrávání a následný postprocessing nahraných stop. Nevýhodou je tedy nutnost provést výpočet impulsových odezev ze zaznamenaných signálů. Naopak velkou výhodou je možnost záznamu více kanálů naráz, což vede k výrazné úspoře času, která je při takto časově náročném měření

vítána. V prvním kroku byly zaznamenávány signály z měřících bodů M_1 až M_{19} , v druhém pak měřící body M_{20} až M_{37} . Pouze impulsové odezvy h_3 byly zaznamenávány jednotlivě. Všechny signály byly nahrávány se vzorkovacím kmitočtem 48 kHz a bitovou hloubkou 24 bitů. Všechny zaznamenané signály byly exportovány se stejnou délkou jako použitý měřící signál a přehledně rozřazeny do složek podle následujícího uspořádání:

- složka SPTM obsahuje signály od reproduktoru k mikrofonu s názvem:
SPTM_S000_M0xy
kde xy je číselné označení měřícího bodu od 01 do 37
- složka 0000 obsahuje signály pozadí bez vzorku s názvem:
0000_S00z_M0xy
kde xy je číselné označení měřícího bodu od 01 do 37 a z je číselné označení zdroje od 1 do 5
- složka MLSF obsahuje signály pozadí s difuzorem typu MLS s názvem:
MLSF_S00z_M0xy
kde xy je číselné označení měřícího bodu od 01 do 37 a z je číselné označení zdroje od 1 do 5
- složka MLSR obsahuje signály pozadí s referenční odrazivou plochou difuzoru typu MLS s názvem:
MLSR_S00z_M0xy
kde xy je číselné označení měřícího bodu od 01 do 37 a z je číselné označení zdroje od 1 do 5
- složka PRDF obsahuje signály pozadí s difuzorem typu PRD s názvem:
PRDF_S00z_M0xy
kde xy je číselné označení měřícího bodu od 01 do 37 a z je číselné označení zdroje od 1 do 5
- složka PRDR obsahuje signály pozadí s referenční odrazivou plochou difuzoru typu PRD s názvem:
PRDR_S00z_M0xy
kde xy je číselné označení měřícího bodu od 01 do 37 a z je číselné označení zdroje od 1 do 5
- složka QRDF obsahuje signály pozadí s difuzorem typu 2D QRD s názvem:
QRDF_S00z_M0xy
kde xy je číselné označení měřícího bodu od 01 do 37 a z je číselné označení zdroje od 1 do 5
- složka QRDR obsahuje signály pozadí s referenční odrazivou plochou difuzoru typu 2D QRD s názvem:
QRDR_S00z_M0xy
kde xy je číselné označení měřícího bodu od 01 do 37 a z je číselné označení zdroje od 1 do 5

Všechny uvedené složky jsou součástí adresáře ExportMeasData (příloha E.5).

5.2.2 Načtení signálu

Pro zpracování naměřených a vyexportovaných signálů je vytvořen skript s názvem *DataProcessing*, který je rozdělen do několika částí, ve kterých je převážně pracováno s třírozměrnými maticemi. Pro přehlednost jsou názvy matic vždy odvozeny od názvů jednotlivých složek v adresáři s exportovanými signály.

Prvním krokem je načtení kompletních dat do jednotlivých matic. Matice dat mají rozměry 37x5x168000, kde index řádku značí číslo měřicího bodu, index sloupce značí číslo zdroje zvuku a třetí index značí délku signálu. Pro úspěšný import je nutné zvolit cestu k jednotlivým souborům. Tyto matice dat jsou pojmenovány *data_####*, kde křížky odpovídají názvům podle výše popsaného uspořádání. Důležitou součástí importu je také výběr použitého měřicího signálu, který je součástí adresáře s daty a je uložen do proměnné *ref*. Část kódu pro načtení signálů odezvy pozadí bez vzorku je na následujícím výpisu:

```
% Načtení záznamů odezvy pozadí bez vzorku
data_0000 = zeros(mics, speakers, samples);
files = dir(fullfile(ZERO_pName, '*.wav'));
for i=1:length(files)
    mic = mod(i,mics);
    if mic == 0;
        mic = mics;
    end
    speaker = ceil(i/mics);
    [data] = audioread(fullfile(ZERO_pName, files(i).name));
    data_0000(mic, speaker, 1:length(data)) = data(:,1);
end
```

Všechny matice určené k uložení importovaných dat jsou předem alokovány. Proměnná *mics* v celém kódu prezentuje počet měřicích bodů, proměnná *speakers* reprezentuje počet zdrojů a *samples* udává počet vzorků signálu, který odpovídá délce použitého měřicího signálu s jeho vzorkovacím kmitočtem. Struktura *files* obsahuje vlastnosti souborů typu WAV ze zadané složky s cestou *ZERO_pName*. Na tuto strukturu je dále odkazováno při procházení cyklu, kdy jsou do matice *data_0000* postupně ukládány jednotlivé signály. Proměnné *mic* a *speaker* slouží ke správnému rozřazení signálů do matice. Tím je zajištěn systematický import dat pro jednotlivé polohy zdrojů a mikrofonů.

5.2.3 Výpočet impulsových odezev

Následuje výpočet impulsových odezev. Tento výpočet je realizován spektrálním dělením nahraného signálu se vstupním měřicím signálem. Výpočet prochází ve smyčce postupně všechny kombinace mikrofonů a zdrojů ve všech maticích nahraných dat. Výstupem jsou opět třírozměrné matice s rozměry 37x5x168000, které už obsahují data samotných odezev. Matice impulsových odezev jsou pojmenovány *IR_####*, kde křížky odpovídají názvům podle popsaného uspořádání. Příklad výpočtu pro odezvy pozadí bez vzorku je na následujícím výpisu kódu:

```
% Výpočet impulsových odezev jednotlivých záznamů pozadí bez vzorku - 0000
IR_0000 = zeros(mics, speakers, samples);
for mic = 1:mics
    for speaker = 1:speakers
        signal(:) = data_0000(mic, speaker, :);
        IR_0000(mic, speaker, :) = real(ifft(fft(signal)./fft(ref)));
    end
end
end
```

Pro urychlení zpracování cyklu je před výpočtem alokována třírozměrná matice nul se stejnými rozměry jako v předešlém kroku. Do pomocné proměnné *signal* jsou postupně načteny signály ze všech mikrofónů pro jednotlivé polohy zdroje.

5.2.4 Dekonvoluce signálů a aplikace časového okna

Dalším krokem zpracování je výpočet dekonvoluce signálů a aplikace časového okna podle postupu popsáném v podkapitole 3.4.1 a 3.4.2. Nejprve jsou vypočítány délky časových oken. Protože pro jednotlivé kombinace zdroje a mikrofónu existuje různá délka odrazu od měřeného vzorku, jsou délky oken vypočítány pro všechny tyto kombinace a všechny měřené vzorky. Vliv na délku dráhy má šířka měřeného vzorku, kterou nelze zanedbat vzhledem ke vzdálenosti mikrofonního pole a zdrojů. Z toho důvodu je výpočet délky okna proveden následovně:

- výpočet souřadnic umístění jednotlivých zdrojů a mikrofónů, přičemž počátek souřadnicového systému je zvolen na střed měřeného vzorku
- rozdělení délky difuzoru na 101 bodů rovnoměrně rozložených po celé délce difuzoru a výpočet souřadnic těchto bodů
- výpočet délky dráhy pro všechny kombinace mikrofónů, zdrojů a bodů na šířce difuzoru
- zjištění minima z vypočtených vzdáleností pro jednotlivé kombinace mikrofónů a zdrojů
- převedení délky dráhy na časový údaj a index vzorku signálu
- korekce okna ve smyslu posunutí začátku o 0,5 ms zpět, aby zajištěno vyklíčování celého odrazu
- volba délky okna, stanovená na $1,8R$ (odpovídá časovému údaji 13 ms), která byla určena podle vizuální kontroly impulsové odezvy, tímto byla zajištěna rezerva před nejbližšími následujícími odrazy a zároveň zaručena dostatečná délka pro třetinooktávovou analýzu

Výpočet samotné dekonvoluce je proveden podle vztahu (3.5), dekonvoluované impulsové odezvy a vyklíčované odezvy jsou uloženy do matic s názvy *IR_####_deconv* s velikostí 37x5x168000, resp. *IR_####_deconv_win* s velikostí 37x5x624, kde křížky odpovídají názvům podle popsání uspořádání. Zápis takového výpočtu v programu Matlab je uveden v následujícím výpisu části kódu:

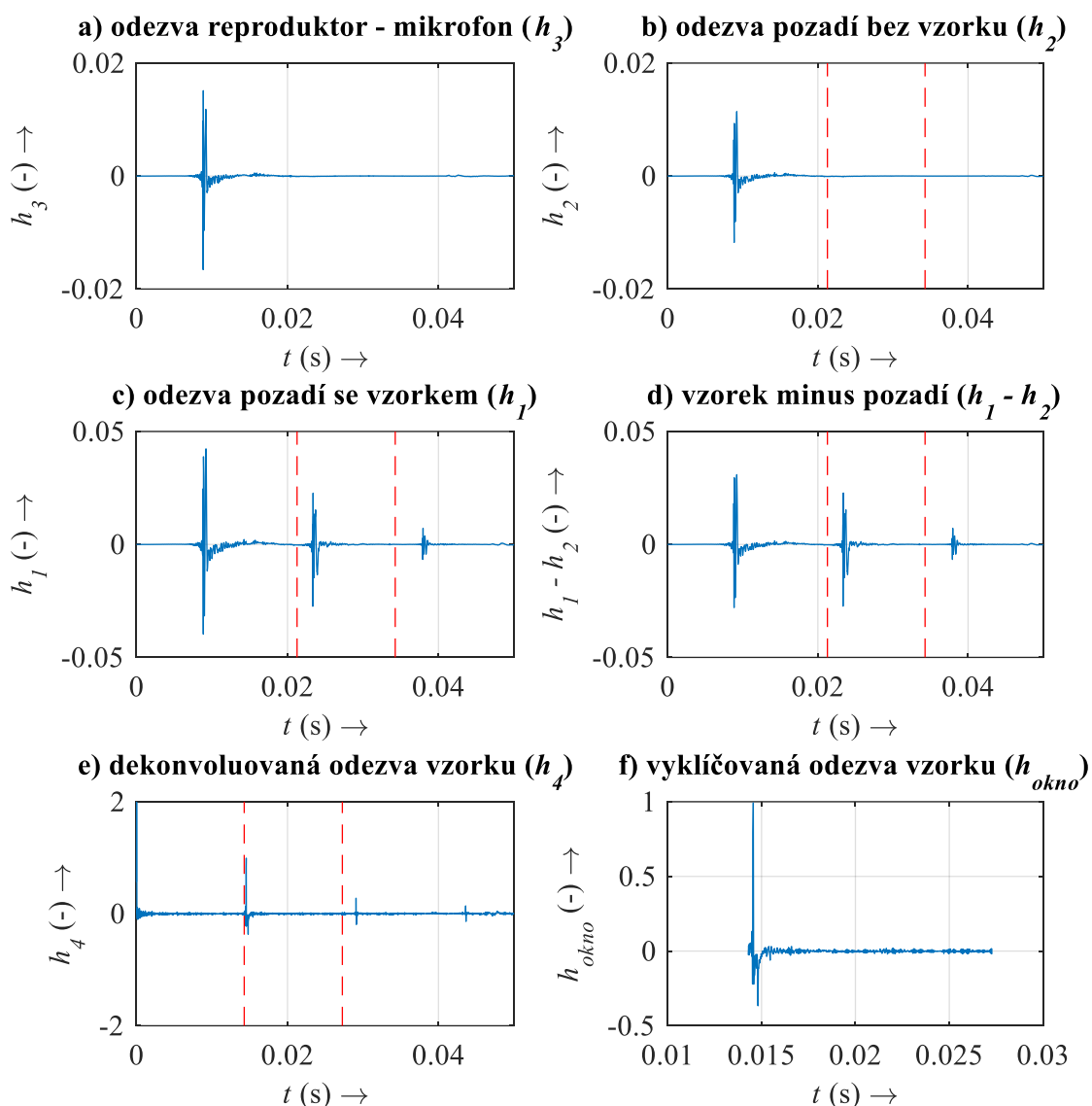
```

% Výpočet dekonvoluované odezvy vzorku + vyklíčování oknem - MLS
IR_MLSF_deconv = zeros(mics, speakers, samples);
IR_MLSF_deconv_win = zeros(mics, speakers, win_length);
for mic = 1:mics
    for speaker = 1:speakers
        IR_MLSF_deconv(mic, speaker,:) = real(ifft(fft(IR_MLSF(mic,
            speaker,:)-IR_0000(mic, speaker,:))./fft(IR_SPTM(mic, 1,:))));
        IR_MLSF_deconv_win(mic, speaker,:) = IR_MLSF_deconv(mic, speaker,
            win_start(1, mic, speaker)-win_shift:win_end(1, mic, speaker)-
            win_shift-1);
    end
end
end

```

Pro urychlení cyklu jsou znovu předem alokovány prázdné matice o požadovaných rozměrech. Proměnná *win_length* značí délku vyklíčované odezvy, která je dána zvolenou délkou okna. Proměnné *win_start* a *win_end* odpovídají indexům začátku a konce časového okna. Do matice *IR_MLSF_deconv_win* je v tomto případě uložená vyklíčovaná odezva pozadí měřeného s difuzorem typu MLS. Zde je důležité vzít v úvahu posunutí odrazu vlivem dekonvoluce signálů. Odraz je posunutý o časové zpoždění odpovídající vzdálenosti R , tedy o vzdálenost mezi zdrojem umístěným na pozici vzorku a mikrofonom. Tento údaj ve výpočtu reprezentuje proměnná *win_shift*, jejíž hodnota je přepočítaná na vzorky odpovídající právě velikosti časového zpoždění.

Pro změřené impulsové odezvy referenční odrazivé plochy difuzoru typu MLS a kombinaci polohy zdroje S_3 s mikrofonom v bodě M_{19} byl proveden výpočet odstupu signálu od šumu podle vztahu (3.8). Velikost odstupu odraženého signálu od šumu v časovém okně je 38,4 dB. Nižší odstup užitečného signálu může být způsoben několika faktory. Zejména povrchem podlahy, který není ve sportovní hale zcela odrazivý, jak požaduje norma. Dále pak hlukem pozadí haly nebo také použitými měřicími mikrofony Audix TM1, jejichž vlastní šum pro tento typ měření také není zanedbatelný.



Obr. 5.3: Jednotlivé impulsové odezvy difuzoru MLS pro kombinaci zdroje S_3 a mikrofonu M_{19}

5.2.5 Výpočet hladin akustického tlaku pro jednotlivá pásma

Vyklíčovány impulsové odezvy jsou následně podrobeny Fourierově transformaci pro získání kmitočtového spektra. Spektrum je rozděleno na úseky podle třetinooktávových pásem se středními kmitočty od 250 Hz do 8 kHz. V jednotlivých úsecích jsou poté zjišťovány hodnoty akustického tlaku a ukládány do matic $p_{####}$, kde křížky odpovídají názvům podle popsaného uspořádání. Z těchto hodnot jsou v následujícím kroku vypočítány hladiny akustického tlaku potřebné k výpočtu difuzních koeficientů. Hladiny jsou pro jednotlivé kombinace mikrofonu a zdroje uloženy do matic $L_{####}$, kde křížky odpovídají názvům podle popsaného uspořádání. Část kódu pro toto zpracování je v následujícím výpisu:


```

% Výpočet hladin akustického tlaku pro jednotlivá pásma
p_MLSF = zeros(mics, speakers, nFc);
L_MLSF = zeros(mics, speakers, nFc);
for mic = 1:mics
    for speaker = 1:speakers
        for k = 1:nFc
            Fd = Fc(1,k) / (2^(1/6)); % dolní mezní kmitočet pásma
            Fh = Fc(1,k) * (2^(1/6)); % horní mezní kmitočet pásma

            n_d = ceil(Fd/delta_f); % nejbližší vyšší index
            n_h = floor(Fh/delta_f); % nejbližší nižší index

            n_hd = n_h - n_d + 1;

            p_MLSF(mic, speaker, k) = sqrt(1/n_hd * sum(abs(
                FFT_IR_MLSF_deconv_win(mic, speaker, n_d:n_h)).^2));
            L_MLSF(mic, speaker, k) = 20*log10(p_MLSF(mic, speaker, k));
        end
    end
end
end

```

Stejně jako u všech předešlých výpočtů jsou nejprve alokovány prázdné matice potřebných rozměrů. Proměnná nFc značí počet zkoumaných třetinooktávových pásem, Fc obsahuje hodnoty středních kmitočtů. V proměnných Fd a Fh jsou pro každé pásmo vypočítány jeho hranice a v proměnných n_d a n_h jsou přepočítány na indexy spektra.

5.2.6 Výpočet koeficientů difuzity

Posledním krokem procesu zpracování dat už jsou výpočty samotných difuzních koeficientů. Prvním koeficientem je činitel směrové difuze vypočítaný podle vztahu (3.3). Tento činitel je dále normován podle vztahu (3.4) a jeho kmitočtová závislost pro jednotlivé polohy zdroje je součástí přílohy (C). Nejsledovanějším koeficientem je však činitel difuze v difuzním poli. Tento kmitočtově závislý koeficient nejvíce vypovídá o vlastnostech difuzoru při použití v reálných podmínkách. Výpočet je proveden podle nařízení normy – pomocí průměrování, s váhou 1 pro místo zdroje S_3 a váhou 3 pro místa zdroje S_1 , S_2 , S_4 a S_5 .

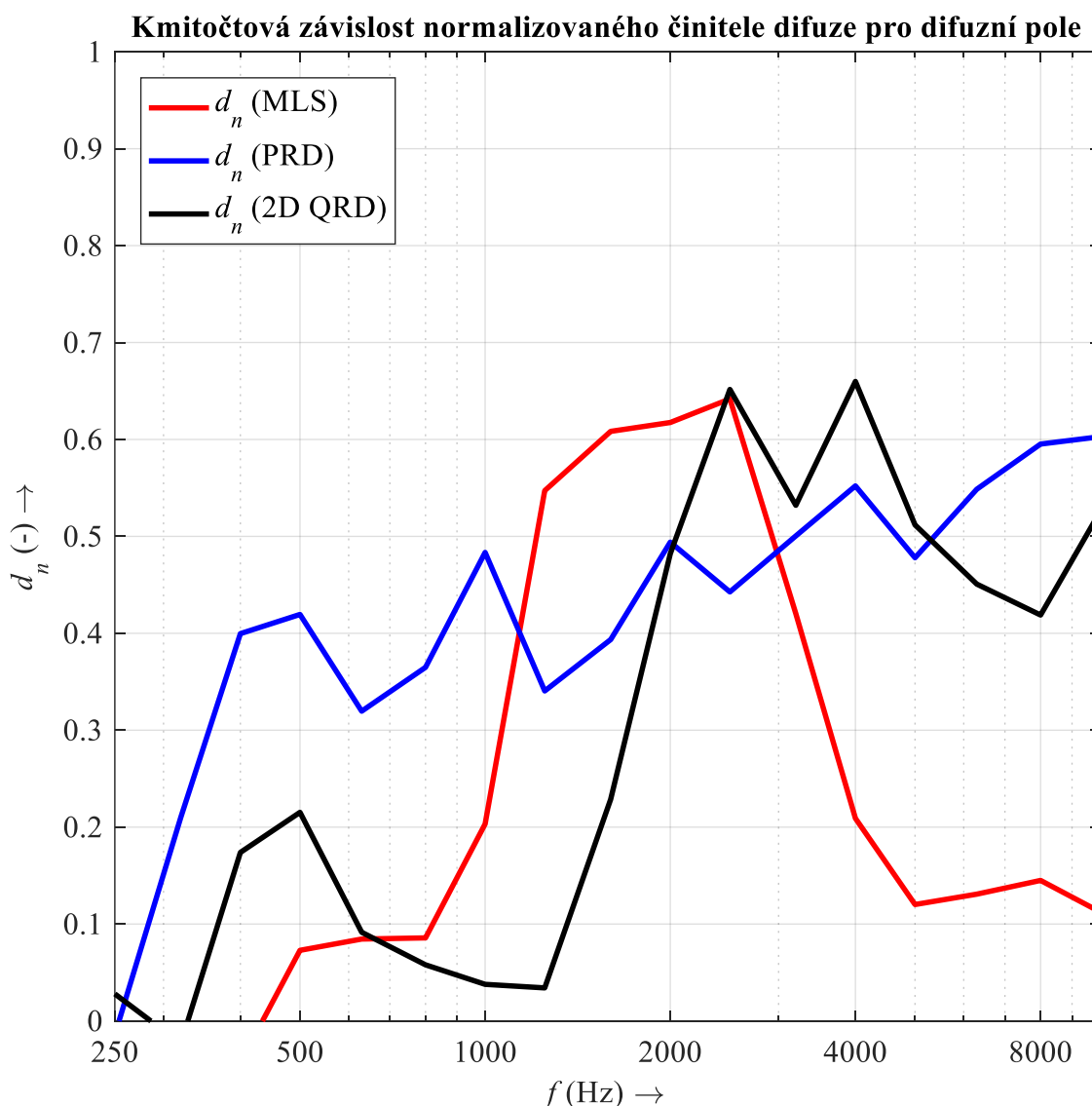
Po zpracování jsou všechna potřebná data uložena do souboru *DrawGraph_Workspace*, aby mohla být následně dle požadavků vykreslena.

5.2.7 Vykreslení polárních odezev a koeficientů difuzity

Pro vykreslování je vytvořen samostatný skript s názvem *DrawGraph.V*. V polárních odezvách jsou vynášeny hladiny akustického tlaku v souladu s rozmístěním měřících bodů na polokruhovém mikrofonním poli. Dle požadavků normy se prezentují výsledky pro všechny polohy zdroje a všechna zkoumaná třetinooktávová pásma. Tyto výsledky jsou pro všechny měřené difuzory obsahem přílohy (B).

5.3 Výsledky měření

Porovnání všech typů vyrobených difuzorů je z pohledu normalizovaného činitele difuze pro všesměrový dopad zobrazeno na **Obr. 5.4**. Naměřené hodnoty v tomto obrázku je možné porovnat s výsledky simulací provedených v programu AFMG Reflex. Z grafů je možné pozorovat velkou shodu výsledků pro difuzor typu MLS, hodnoty v pracovním pásmu difuzoru jsou oproti simulaci nad očekáváním. Také výsledky pro difuzor typu PRD jsou velmi uspokojivé a to zejména na vyšších frekvencích, naopak v pásmu okolo 500 Hz jsou změřené hodnoty mírně pod výsledky simulace. Pro difuzor typu 2D QRD není možné výsledky měření porovnat se simulací. Změřené hodnoty jsou pro vyšší kmitočty velmi dobré a očekávané, naopak pro nižší kmitočty okolo pásma 1000 Hz jsou vzhledem k návrhovým frekvencím velmi nízké a není zde dosaženo požadované difuzity prvku.



Obr. 5.4: Porovnání kmitočtové závislosti koeficientu d_n všech realizovaných vzorků

6 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl návrh difuzních prvků a ověření jejich difuzních vlastností. Předmětem úvodních kapitol je teoretický přehled o problematice této diplomové práce. Je popsáno šíření zvuku v prostoru a chování zvukového vlnění při dopadu na překážku. V druhé kapitole jsou popsány základní typy difuzních prvků a metody jejich návrhu. Podrobně jsou popsány pseudonáhodné matematické posloupnosti, jejich generování a použití při návrhu difuzorů. Třetí kapitola uzavírá teoretický přehled popisem difuzních vlastností a popisuje také proces měření činitele směrové difuze ve volném poli, kterým se zabývá česká norma ČSN ISO 17497-2.

Na základě získaných teoretických znalostí byly vytvořeny návrhy několika typů difuzorů, konkrétně jde o difuzoru typu MLS, PRD a vícerovinový difuzor typu QRD. Při návrhu byla zohledněna pracovní kmitočtová pásma, výběr vhodného a dostupného materiálu pro výrobu, složitost výroby a v neposlední řadě také cenové náklady. Podle návrhu byly vytvořeny modely prvků a simulovány jejich difuzní vlastnosti v programu AFMG Reflex. Pro všechny navržené difuzory byla vytvořena výkresová dokumentace, podle které byly realizovány jednotlivé vzorky.

Proces měření a vyhodnocení difuzních vlastností byl proveden dle požadavků výše zmíněné normy. Pro vyhodnocení velkého počtu změřených impulsových odezev byl vytvořen skript v programu Matlab. Vzhledem k vlastnostem dostupného prostoru pro měření a specifikacím měřících mikrofónů Audix TM1 nebylo dosaženo některých, nutno poznamenat velmi přísných, požadavků normy. Odstup užitečného signálu od šumu byl o několik decibelů nižší. Z tohoto důvodu nebylo v polárních odezvách dosaženo očekávaného rozdílu mezi minimální a maximální hodnotou změřené hladiny akustického tlaku jako je uvedeno v teoretických simulacích. Důvodem může být také rozdílné úhlové rozlišení mikrofonního pole při měření a při simulaci. Zatímco v simulaci je $\Delta\theta = 1^\circ$, při měření bylo vzhledem k časové náročnosti zvoleno $\Delta\theta = 5^\circ$. Při měření tak mohlo dojít k nezachycení extrémních hodnot. I přes tuto skutečnost je však ve výsledných polárních odezvách možné pozorovat očekávaný vliv prvků na akustické pole.

Diplomová práce byla splněna ve všech bodech zadání. Navržené a realizované vzorky difuzorů splňují očekávané difuzní vlastnosti a celý proces lze hodnotit jako zdařilý. Nad rámec zadání byly provedeny simulace difuzních vlastností a tím ověřena správnost návrhu u jednorovinných difuzních prvků. Díky tomu je možné porovnat výsledky simulace s výsledky měření a zhodnotit přínos simulačního programu AFMG Reflex. Tato práce tak přispívá k rozšíření využití difuzních prvků. Projektantům prostorové akustiky předkládá další možnost úprav, ať už akusticky náročných prostor jakými jsou koncertní sály, divadla či nahrávací studia, ale také prostor s důrazem na srozumitelnost řeči jakými mohou být konferenční sály, posluchárny ve školách, nádraží, letištní, sportovní haly a jiné.

LITERATURA

- [1] F. ALTON EVEREST a KEN C. POHLMANN. *Master handbook of acoustics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2009, 510 p. ISBN 9780071603331.
- [2] COX, Trevor J a Peter D'ANTONIO. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2009, xvii, 476 p. ISBN 0203893050.
- [3] VAVERKA, Jiří. *Stavební fyzika*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 1998, 343 s. ISBN 80-214-1283-6.
- [4] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980, 242 s.
- [5] SMETANA, Ctirad a kol. *Praktická elektroakustika*. Praha: STNL, 1981, 696 s.
- [6] VIGRAN, Tor Erik. *Building acoustics*. New York: Taylor & Francis, 2008, 362 p. ISBN 0-203-93131-9.
- [7] SCHROEDER, Manfred. *Number theory in science and communication with applications in cryptography, physics, digital information, computing, and self-similarity*. 5th ed. Berlin: Springer, 2009. ISBN 9783540852988.
- [8] ČSN ISO 17497-1. *Akustika - Rozptyl zvuku povrchy: Část 1: Měření činitele rozptylovosti pro všesměrový dopad zvuku v dozvukové místnosti*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2006, 16 s.
- [9] ČSN ISO 17497-2. *Akustika - Rozptylové vlastnosti povrchů: Část 2: Měření činitele směrové difuze ve volném poli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii státní zkušebnictví, 2013, 20 s.
- [10] DIY Sound Diffuser QD-17. *Acoustic Fields* [online]. [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <https://www.acousticfields.com/product/diy-sound-diffuser-qd-17/>
- [11] Optimized Stepped Diffusers and Fractal Diffusers. *Arqen* [online]. [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://arqen.com/sound-diffusers/>
- [12] PRD Diffuser – Skyline diffuser. *Sound-shift Acoustics* [online]. [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://soundshift.nl/akoestiek-studio-diffuser-galm-echo/>
- [13] SKYLINE DIFFUSER. *LA Sound Panels* [online]. [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://lasoundpanels.com/products/>
- [14] Generating an MLS sequence. *KEMP ACOUSTICS* [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.kempacoustics.com/thesis/node83.html>
- [15] Polobezodrazová komora. *VÚTS Liberec* [online]. Liberec: VÚTS, ©2013 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.vuts.cz/polobezodrazova-komora.html>
- [16] Software. *AFMG Reflex* [online]. Berlin: Ahnert Feistel Media Group, ©2011-2016 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://reflex.afmg.eu/>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a	posloupnost
b	šířka prvku
d	činitel difuze v difuzním poli
d_n	normovaný činitel difuze v difuzním poli
d_i	hloubka prvku
d_θ	činitel směrové difuze
$d_{\theta n}$	normovaný činitel směrové difuze
$d_{\theta r}$	činitel směrové difuze pro referenční plochý povrch
DAW	Digital Audio Workstation,
f	kmitočet
FT	Fourierova transformace
h_i	impulsová odezva
IFT	zpětná Fourierova transformace
k	vlnové číslo
L	délka periody
L_i	hladina akustického tlaku
l_{MD}	vzdálenost od vzorku k měřicímu bodu
l_{SD}	vzdálenost od vzorku ke zdroji zvuku
M	měřicí bod
MDF	Medium Density Fibreboard, středně zhuštěná dřevovláknitá deska
MLS	Maximum Length Sequence
N	návrhové číslo posloupnosti
n_l	počet směrových laloků
p	akustický tlak
PRD	Primitive Root Diffuser
QRD	Quadratic Residue Diffuser
R	poloměr mikrofonního pole
r_b	poloměr blízkého pole
r_d	dozvuková vzdálenost

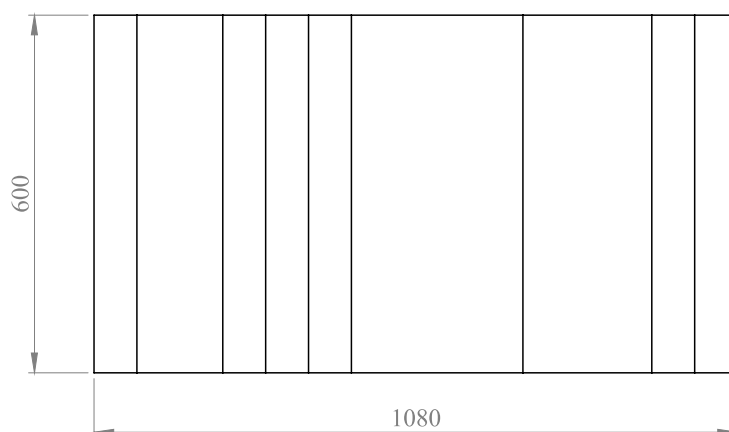
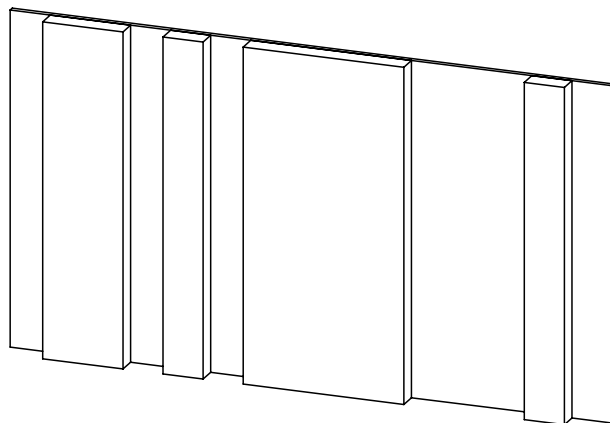
r_N	nejmenší primitivní kořen návrhové prvočísla N_{PRD}
s	činitel rozptylovosti
s_c	korelační činitel rozptylovosti
s_i	šířka šachty
S	zdroj zvuku
SNR	Signal Noise Ratio, odstup signálu od šumu
T	doba dozvuku
t_{max}	konec časového okna
t_{min}	začátek časového okna
t_d	síla přepážky mezi šachtami
V	objem
α	činitel zvukové pohltivosti
θ	úhel
$\Delta\theta$	úhlové rozlišení
λ	vlnová délka

SEZNAM PŘÍLOH

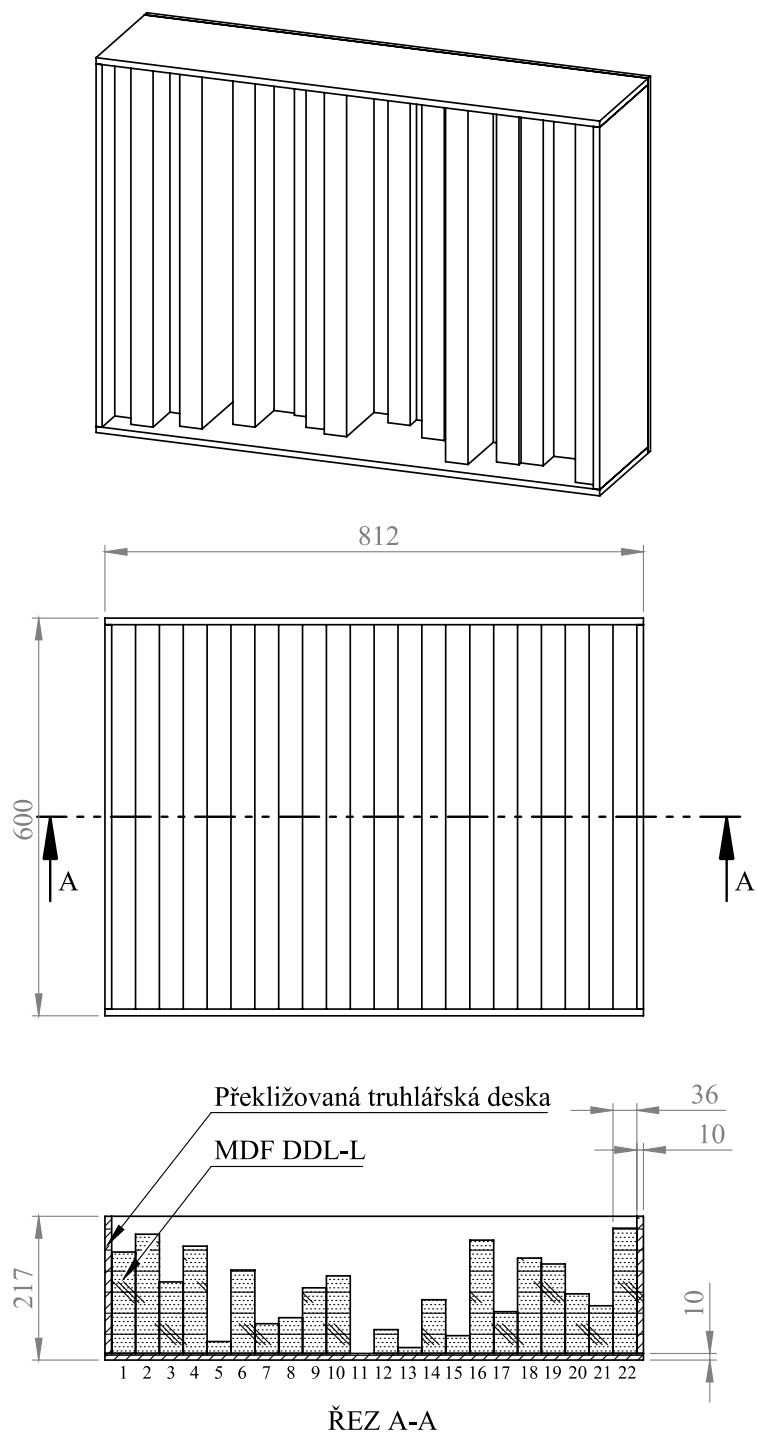
A	Výkresová dokumentace	47
A.1	Výkres difuzoru MLS.....	47
A.2	Výkres difuzoru PRD	48
A.3	Výkres difuzoru 2D QRD.....	49
B	Polární odezvy	53
B.1	MLS -60°	53
B.2	MLS -30°	55
B.3	MLS 0°	57
B.4	MLS 30°	59
B.5	MLS 60°	61
B.6	PRD -60°.....	63
B.7	PRD -30°.....	65
B.8	PRD 0°.....	67
B.9	PRD 30°.....	69
B.10	PRD 60°.....	71
B.11	2D QRD -60°	73
B.12	2D QRD -30°	75
B.13	2D QRD 0°	77
B.14	2D QRD 30°	79
B.15	2D QRD 60°	81
C	Kmitočtová závislost činitele směrové difuze	83
C.1	MLS.....	83
C.2	PRD	86
C.3	2D QRD.....	89
D	Měření	92
E	Přílohy na DVD	93
E.1	Výpočet a návrh difuzoru MLS	93
E.2	Výpočet a návrh difuzoru PRD.....	93
E.3	Výpočet a návrh difuzoru 2D QRD	93
E.4	Specifikace měřicího aparátu.....	93
E.5	Matlab.....	93

A VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

A.1 Výkres difuzoru MLS

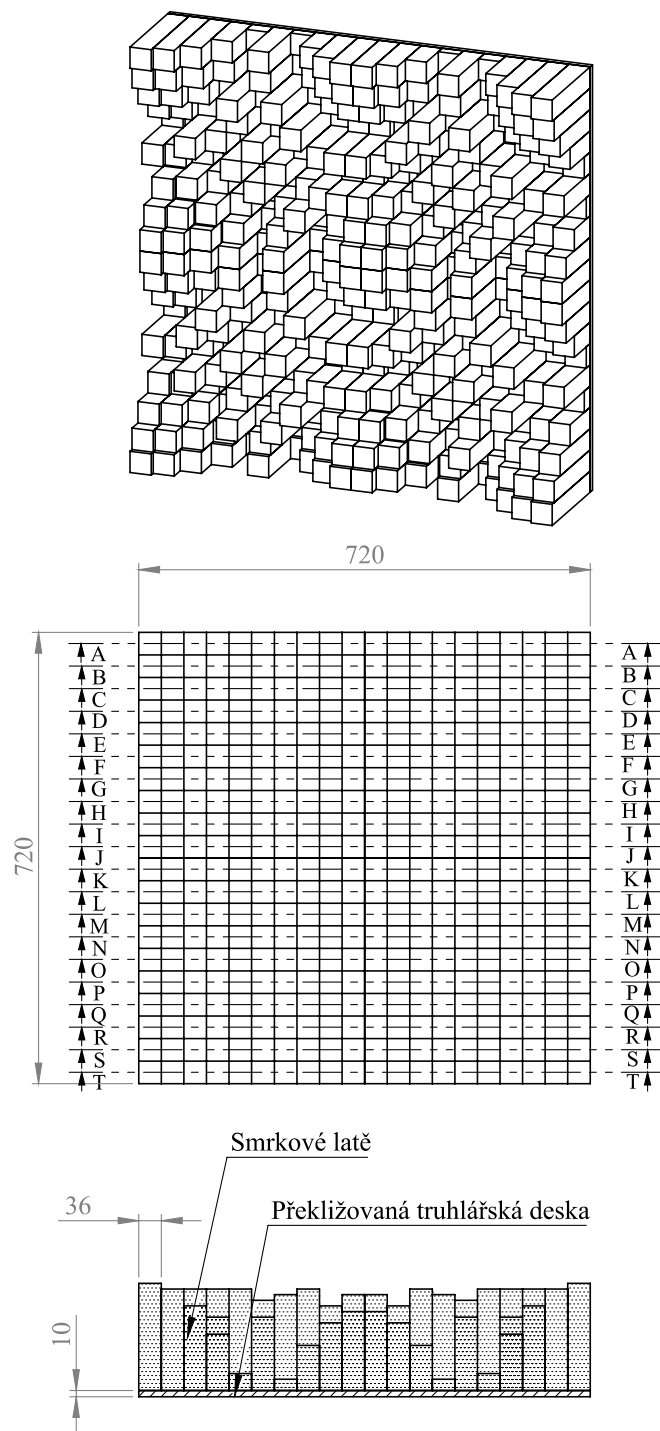


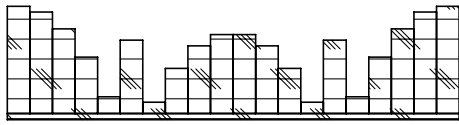
A.2 Výkres difuzoru PRD



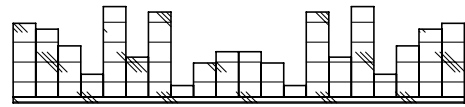
šachta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
hranol [mm]	153	180	108	162	18	126	45	54	99	117	0
šachta	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
hranol [mm]	36	9	81	27	171	63	144	135	90	72	189

A.3 Výkres difuzoru 2D QRD

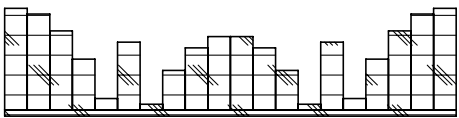




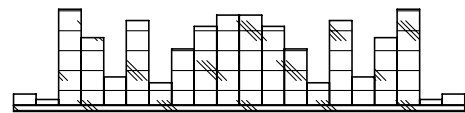
ŘEZ A-A



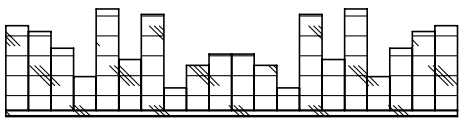
ŘEZ F-F



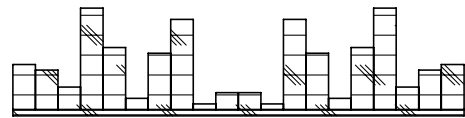
ŘEZ B-B



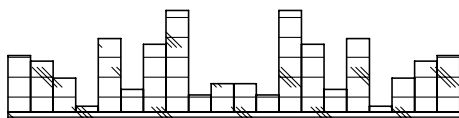
ŘEZ G-G



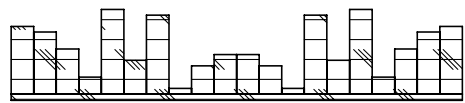
ŘEZ C-C



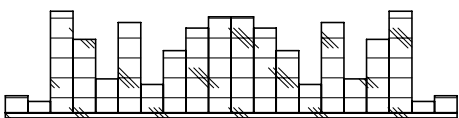
ŘEZ H-H



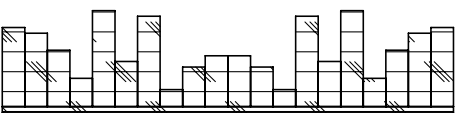
ŘEZ D-D



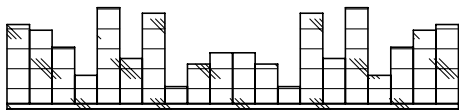
ŘEZ I-I



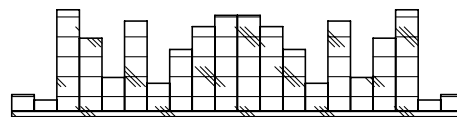
ŘEZ E-E



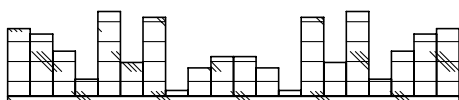
ŘEZ J-J



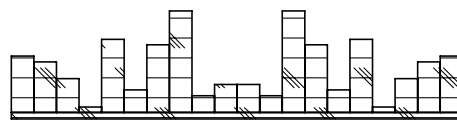
ŘEZ K-K



ŘEZ P-P



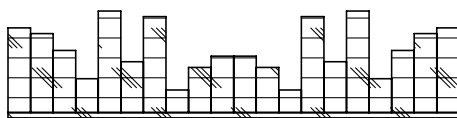
ŘEZ L-L



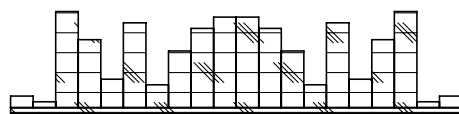
ŘEZ Q-Q



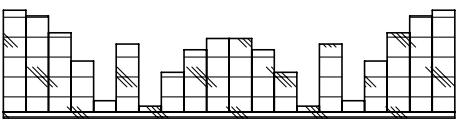
ŘEZ M-M



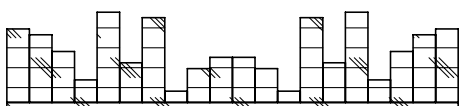
ŘEZ R-R



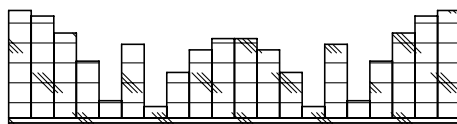
ŘEZ N-N



ŘEZ S-S



ŘEZ O-O



ŘEZ T-T

Uspořádání hranolů

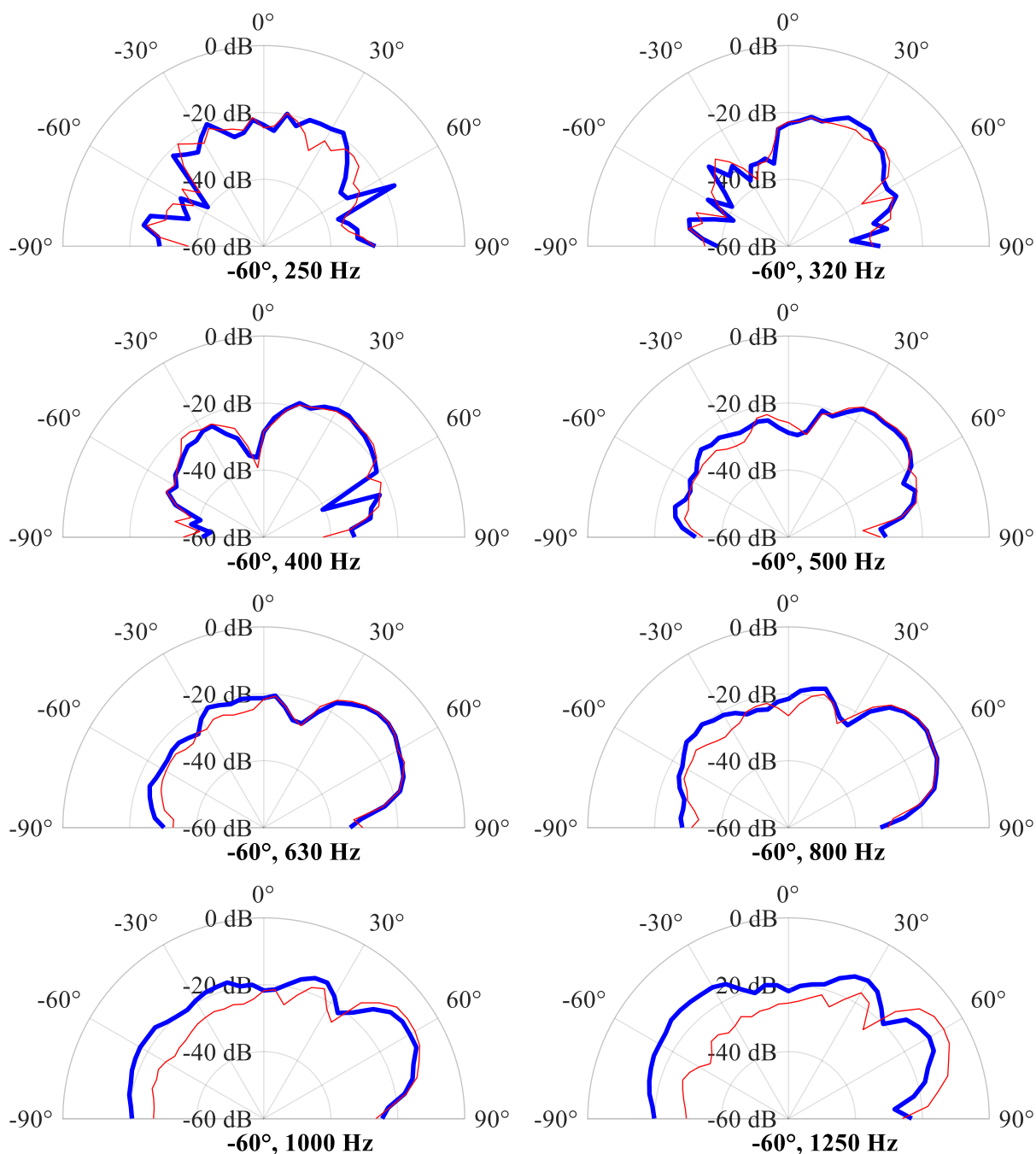
A	0	1	4	9	16	6	17	11	7	5	5	7	11	17	6	16	9	4	1	0
B	1	2	5	10	17	7	18	12	8	6	6	8	12	18	7	17	10	5	2	1
C	4	5	8	13	1	10	2	15	11	9	9	11	15	2	10	1	13	8	5	4
D	9	10	13	18	6	15	7	1	16	14	14	16	1	7	15	6	18	13	10	9
E	16	17	1	6	13	3	14	8	4	2	2	4	8	14	3	13	6	1	17	16
F	6	7	10	15	3	12	4	17	13	11	11	13	17	4	12	3	15	10	7	6
G	17	18	2	7	14	4	15	9	5	3	3	5	9	15	4	14	7	2	18	17
H	11	12	15	1	8	17	9	3	18	16	16	18	3	9	17	8	1	15	12	11
I	7	8	11	16	4	13	5	18	14	12	12	14	18	5	13	4	16	11	8	7
J	5	6	9	14	2	11	3	16	12	10	10	12	16	3	11	2	14	9	6	5
K	5	6	9	14	2	11	3	16	12	10	10	12	16	3	11	2	14	9	6	5
L	7	8	11	16	4	13	5	18	14	12	12	14	18	5	13	4	16	11	8	7
M	11	12	15	1	8	17	9	3	18	16	16	18	3	9	17	8	1	15	12	11
N	17	18	2	7	14	4	15	9	5	3	3	5	9	15	4	14	7	2	18	17
O	6	7	10	15	3	12	4	17	13	11	11	13	17	4	12	3	15	10	7	6
P	16	17	1	6	13	3	14	8	4	2	2	4	8	14	3	13	6	1	17	16
Q	9	10	13	18	6	15	7	1	16	14	14	16	1	7	15	6	18	13	10	9
R	4	5	8	13	1	10	2	15	11	9	9	11	15	2	10	1	13	8	5	4
S	1	2	5	10	17	7	18	12	8	6	6	8	12	18	7	17	10	5	2	1
T	0	1	4	9	16	6	17	11	7	5	5	7	11	17	6	16	9	4	1	0

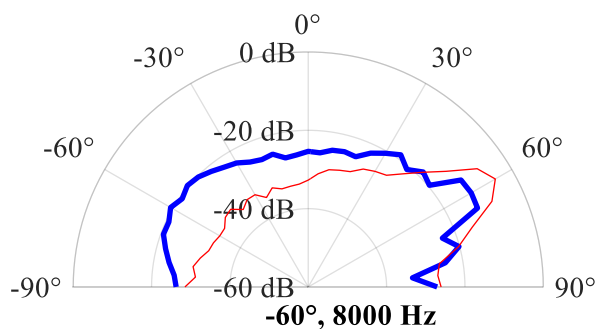
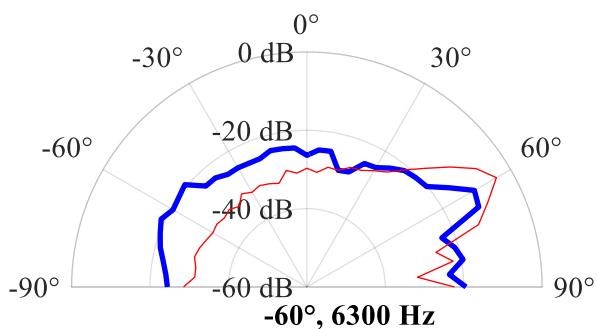
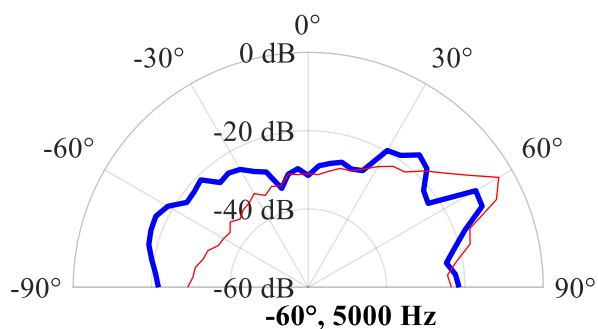
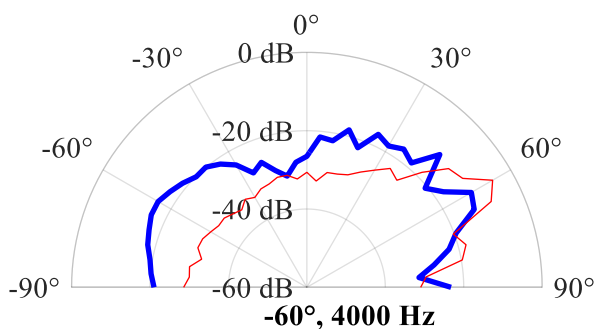
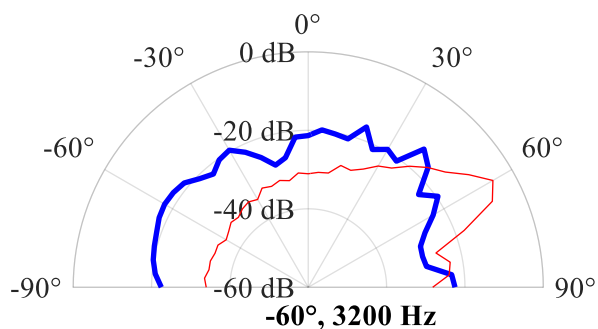
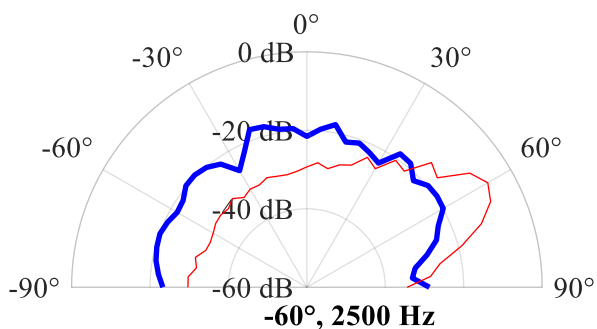
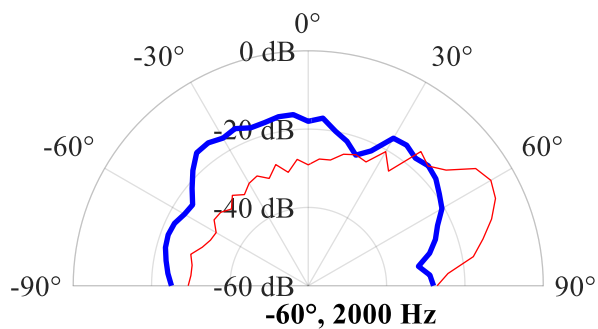
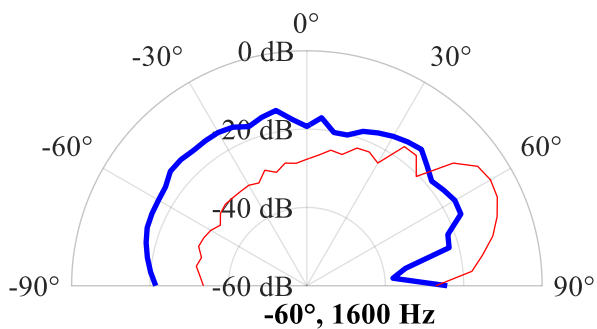
šachta	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
hloubka hranolu [mm]	171	162	153	144	135	126	117	108	99	90
šachta	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
hloubka hranolu [mm]	90	81	72	63	54	45	36	27	18	9

B POLÁRNÍ ODEZVY

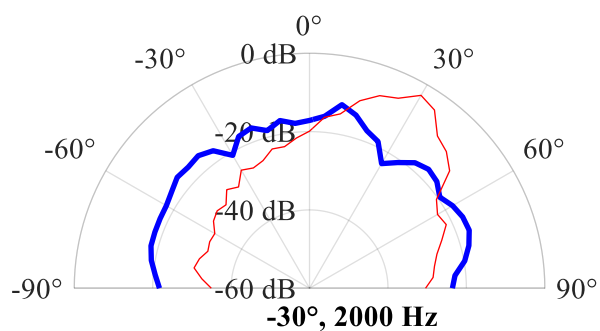
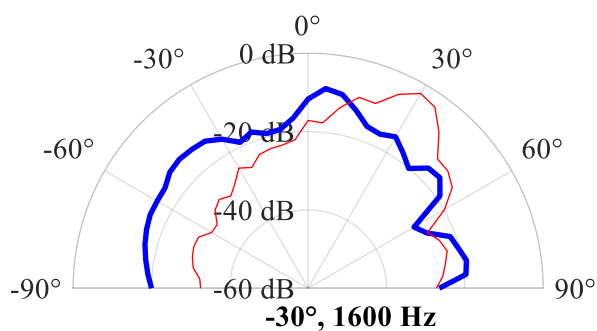
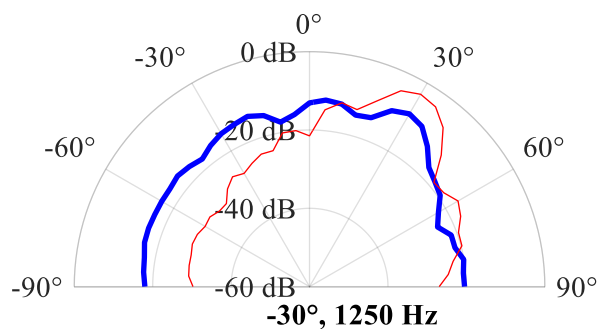
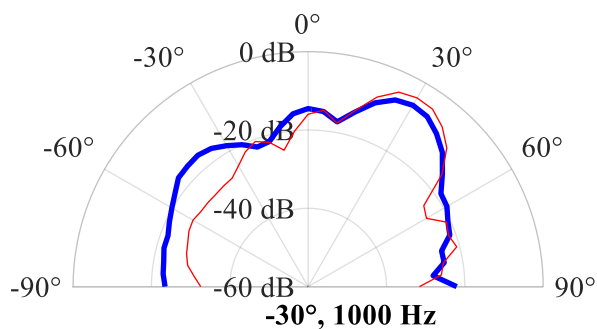
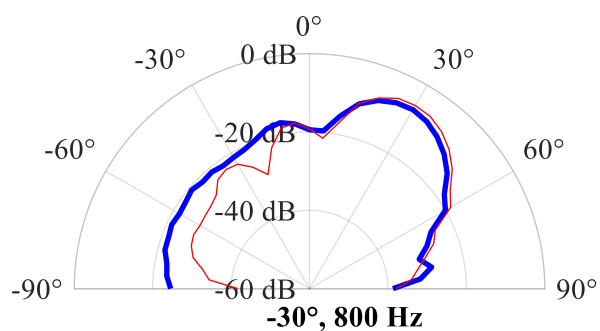
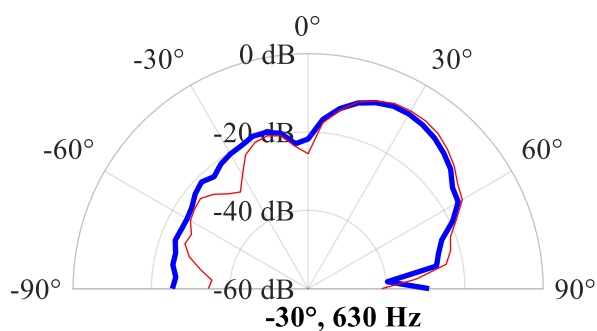
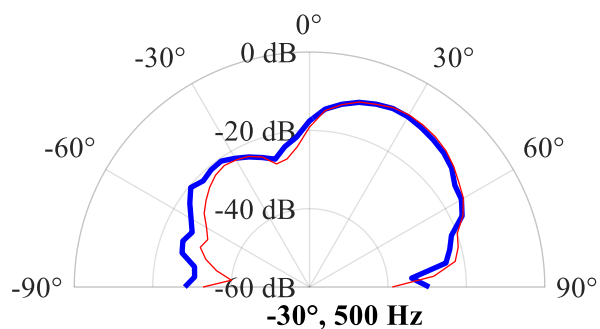
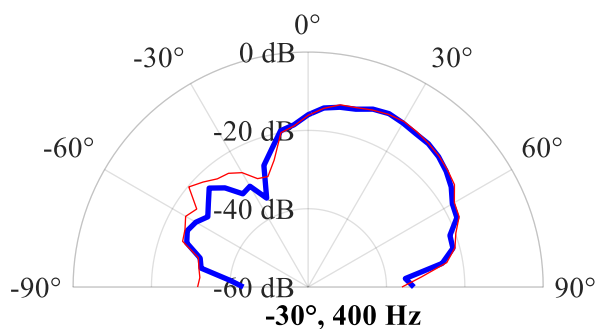
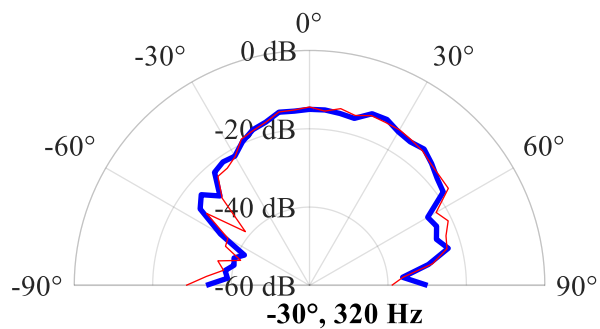
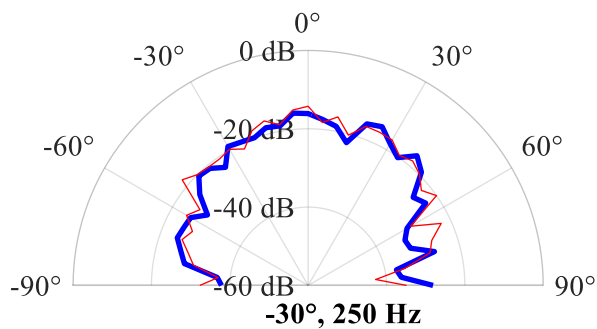
Obsahem této části přílohy jsou změřené polární odezvy jednotlivých realizovaných vzorků pro všechny polohy zdroje. Na následujících polárních grafech je červeně vyznačeno chování referenční odrazivé plochy a modře je vyznačeno chování vzorku. Díky tomu je možné zhodnotit vliv navržených difuzorů na akustické pole a posoudit správnost návrhu.

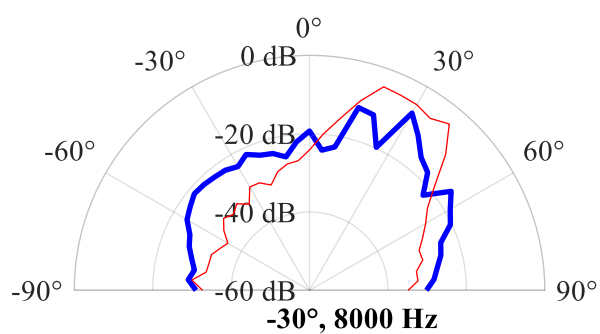
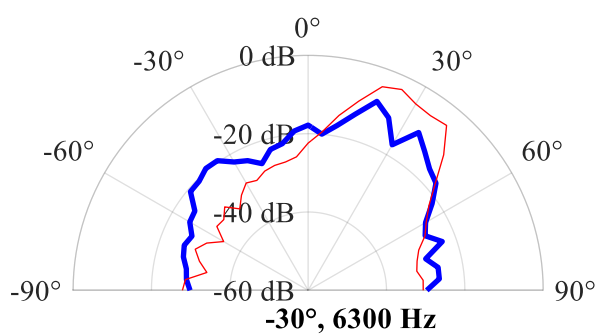
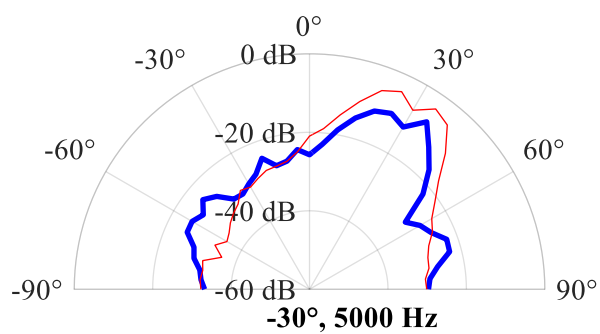
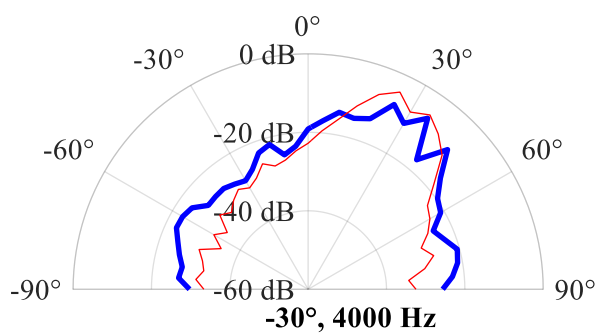
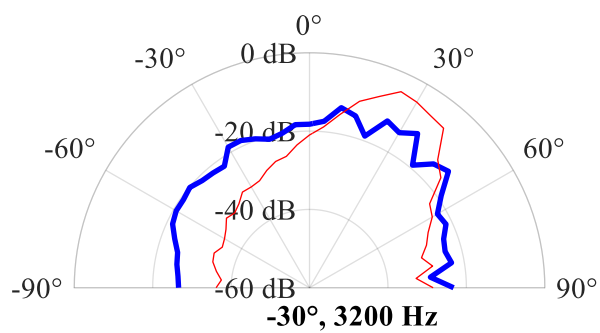
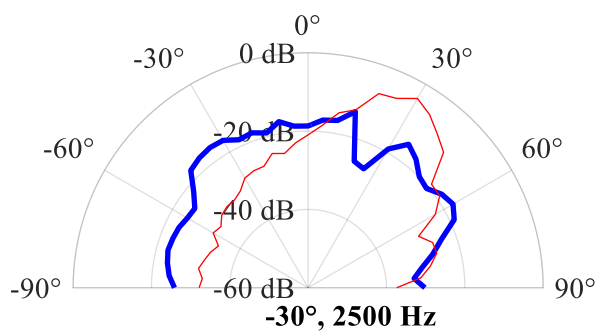
B.1 MLS -60°



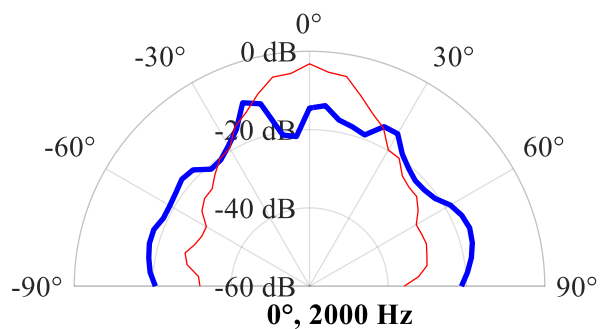
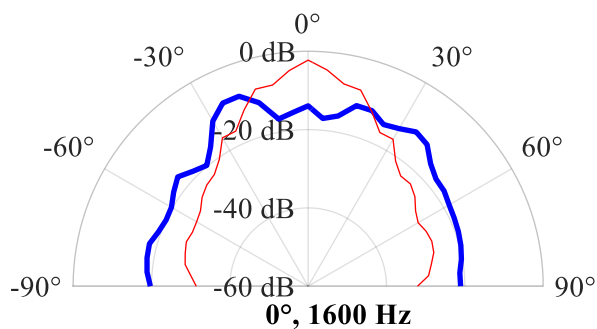
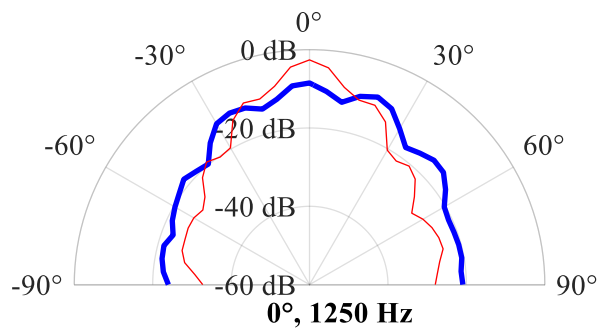
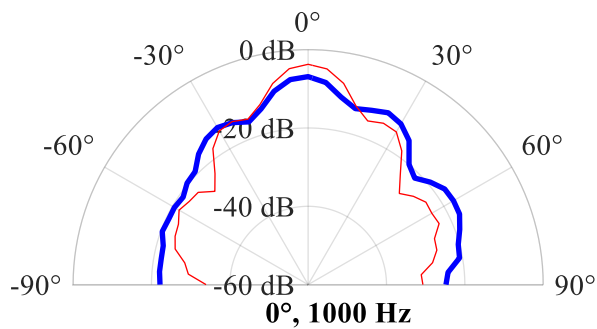
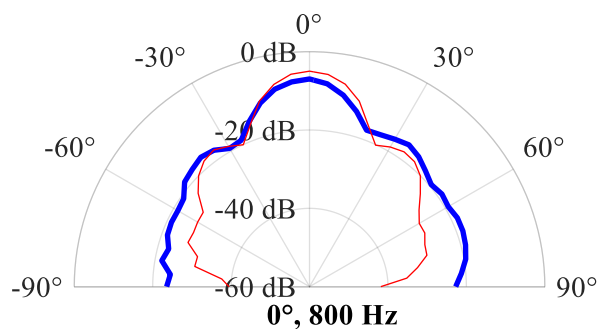
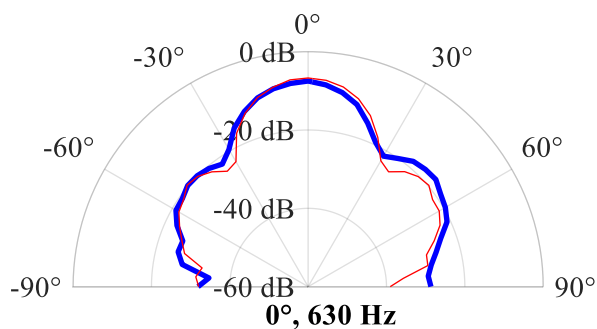
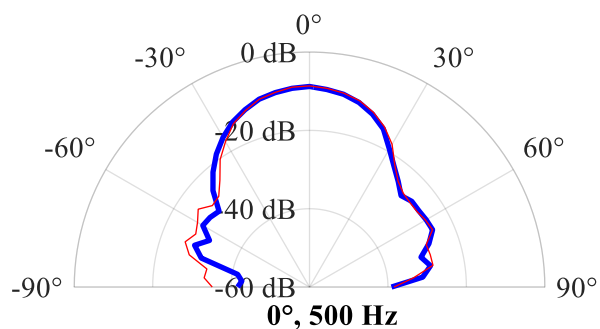
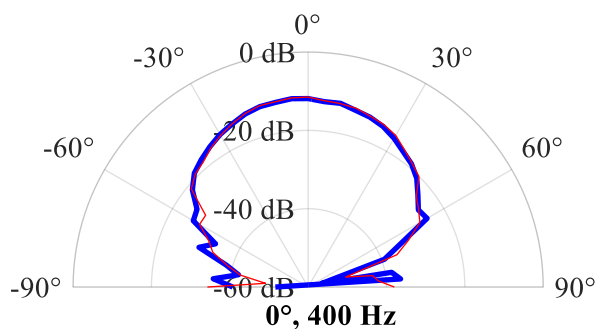
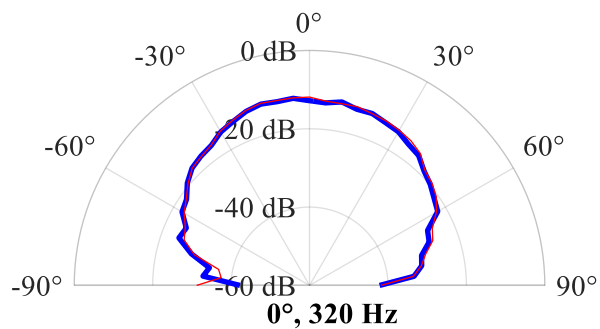
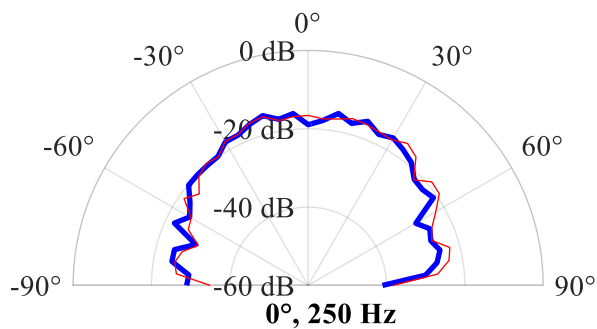


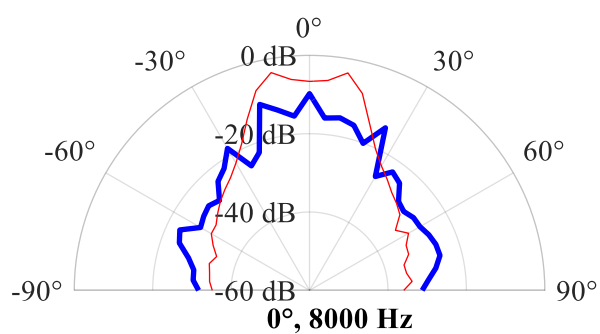
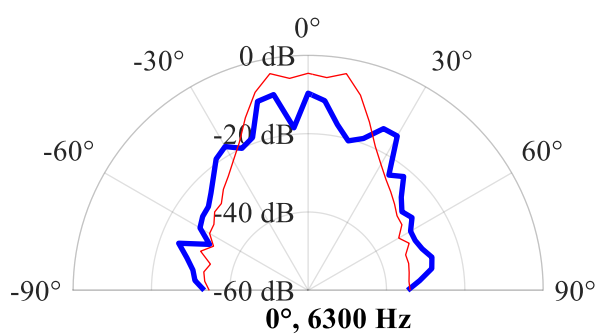
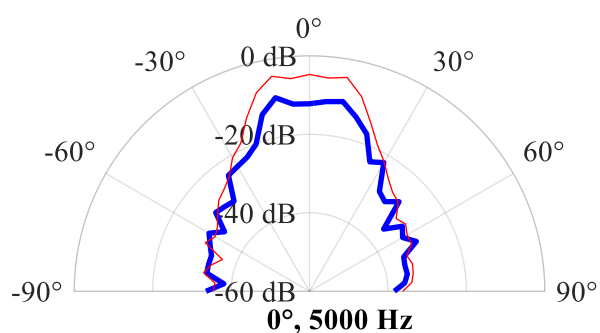
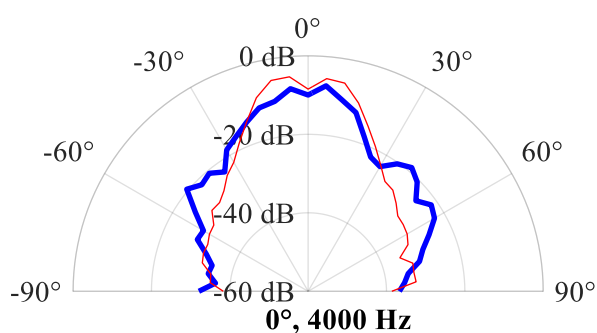
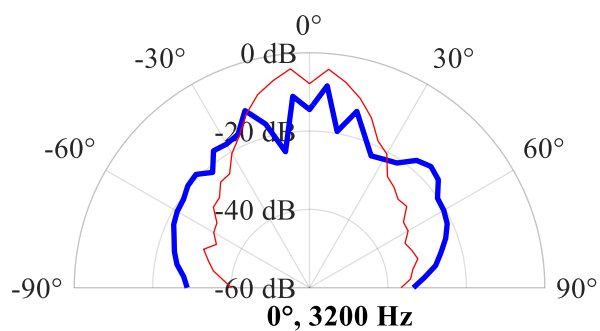
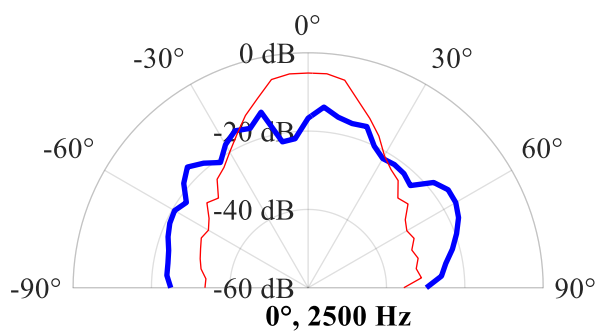
B.2 MLS -30°



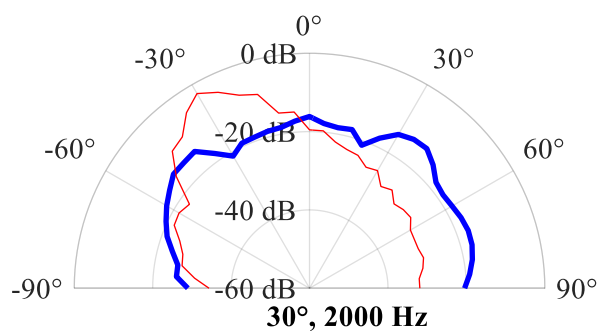
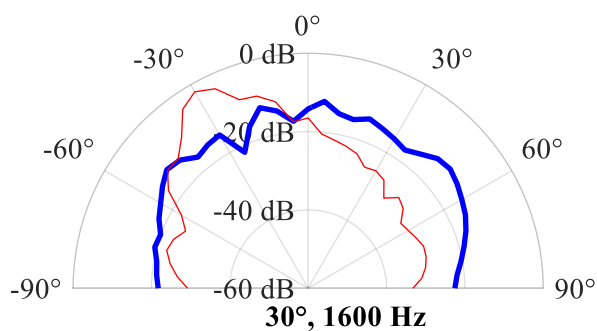
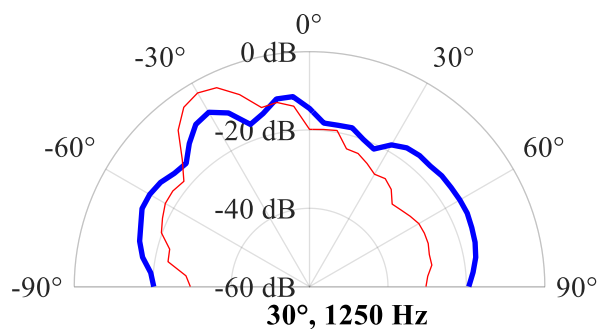
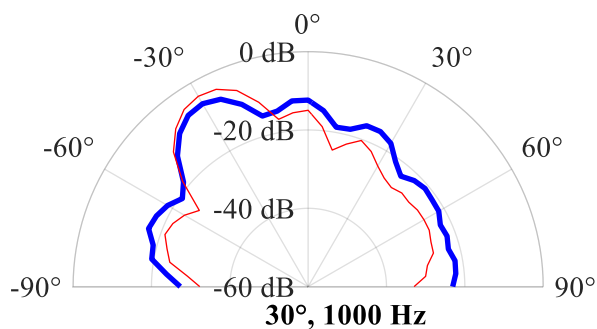
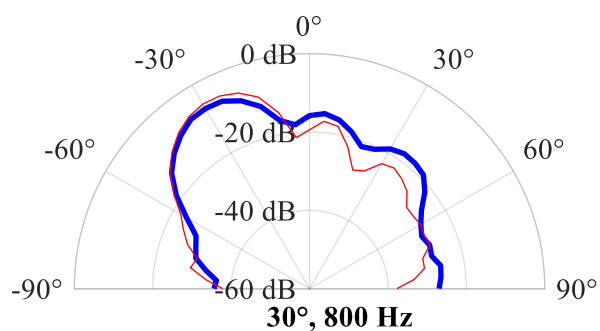
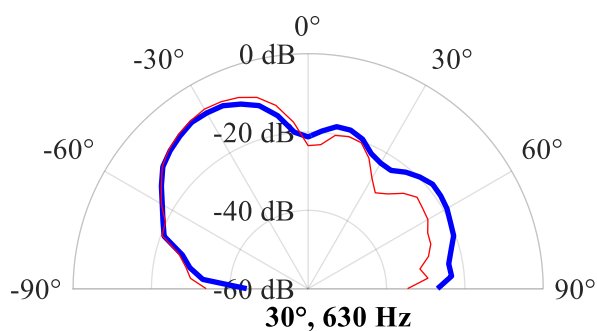
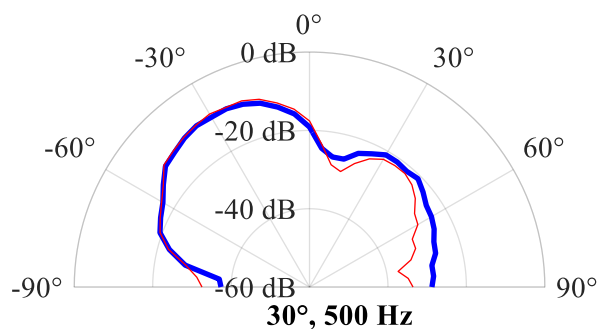
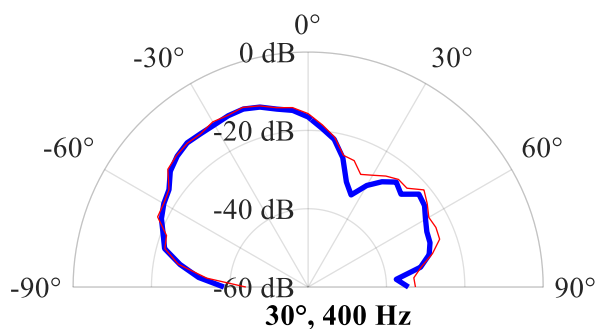
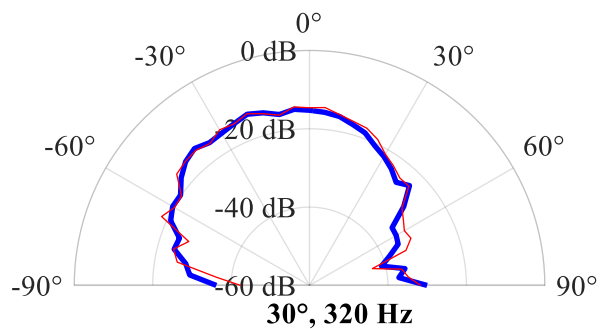
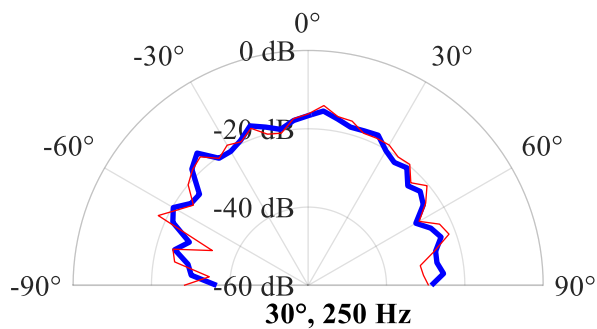


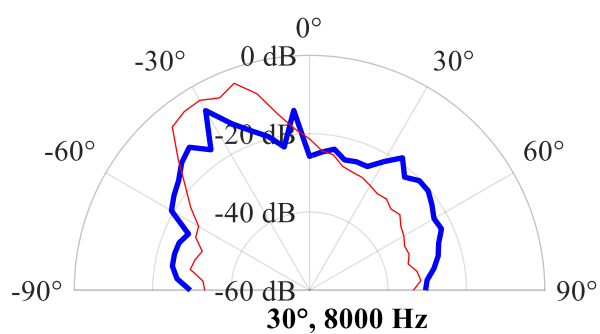
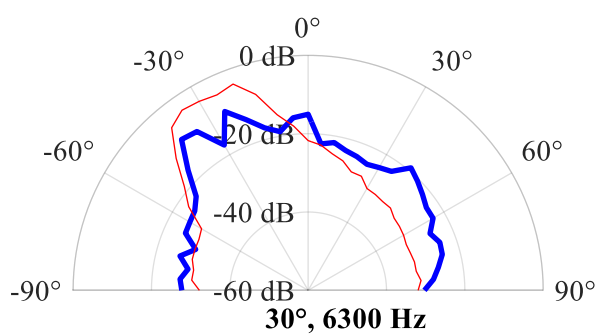
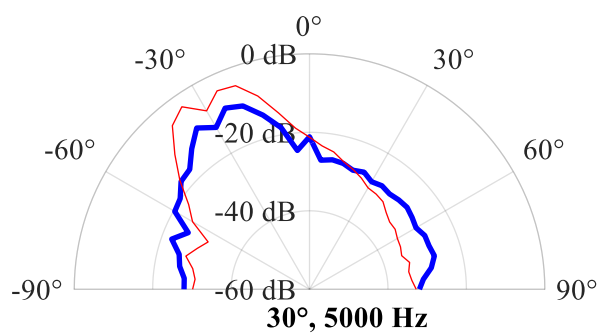
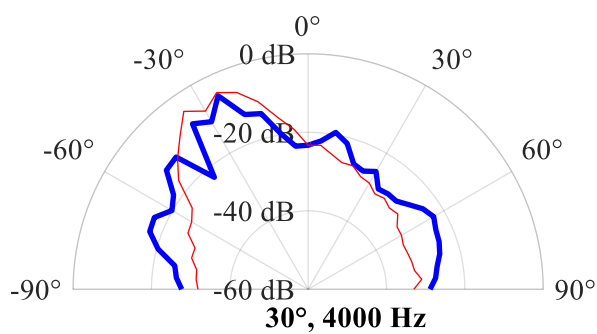
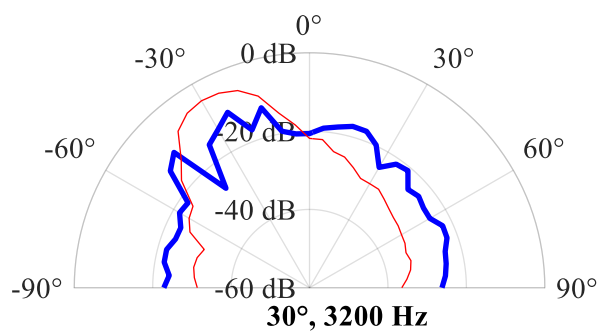
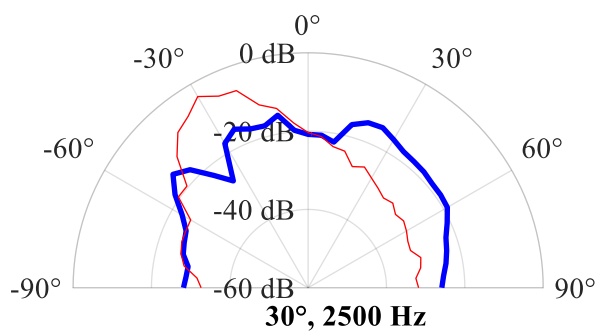
B.3 MLS 0°



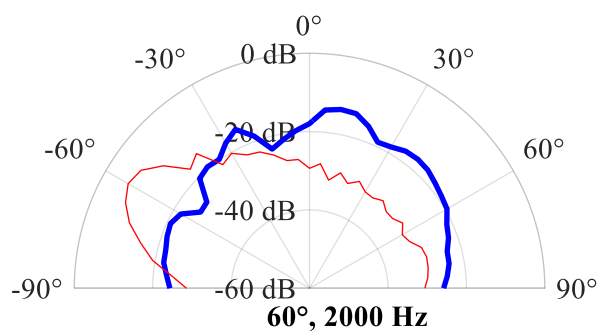
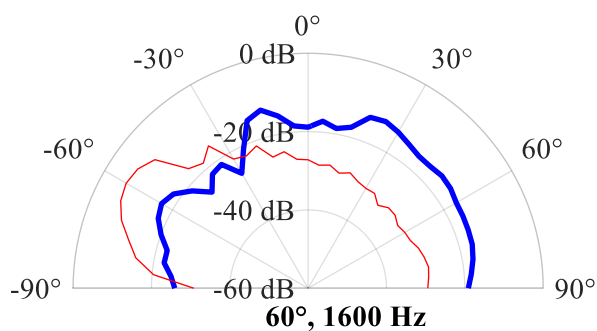
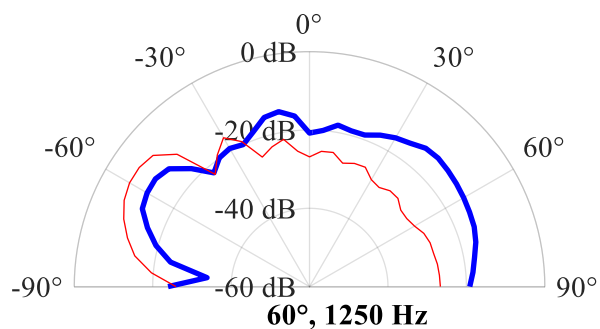
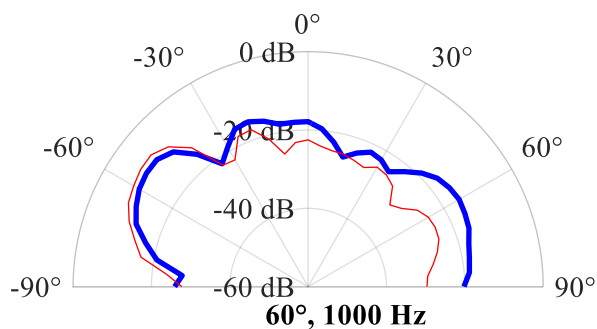
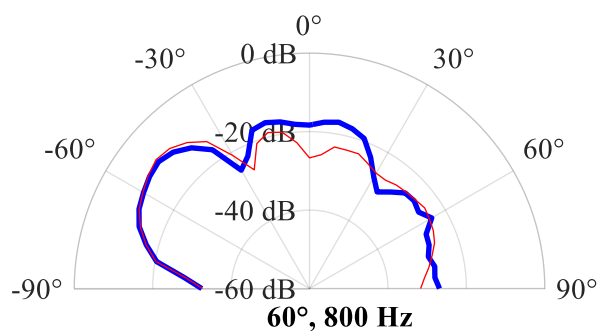
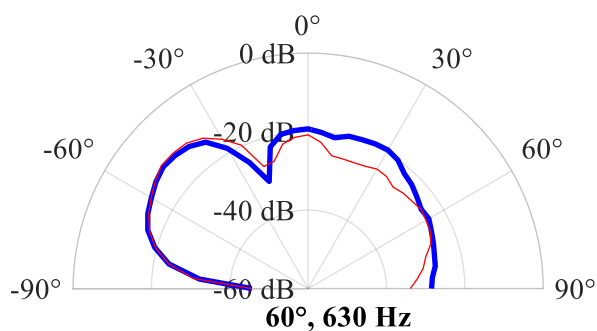
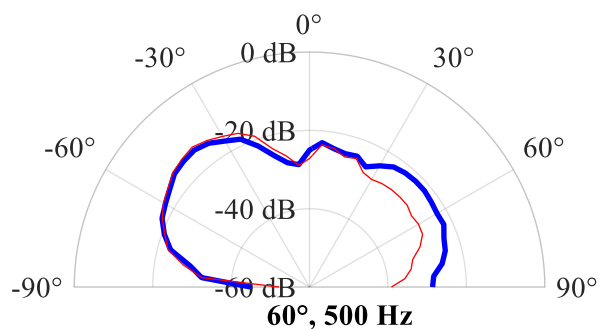
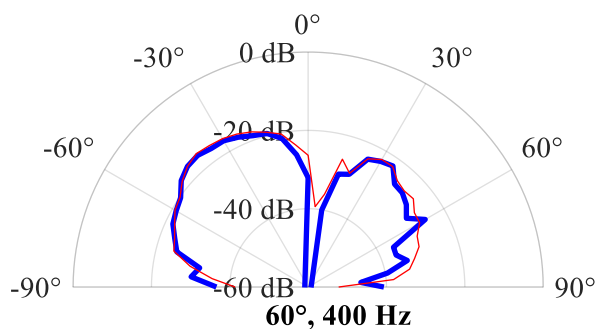
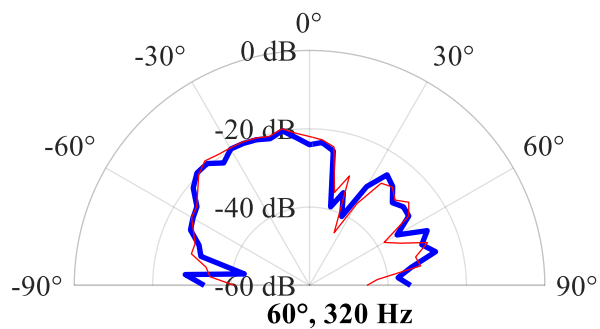
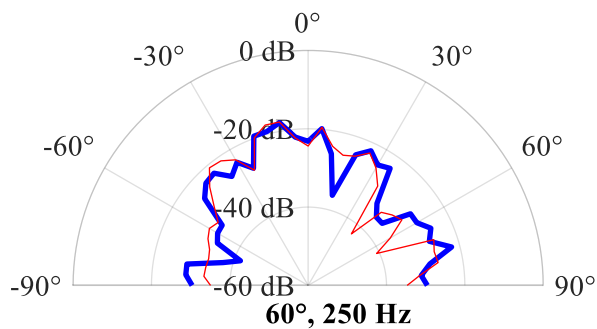


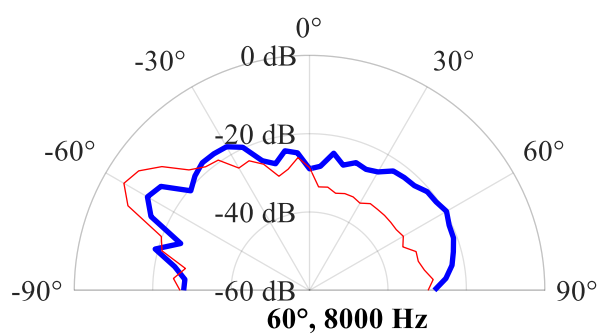
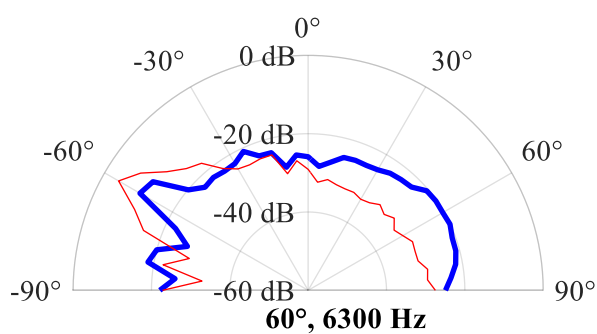
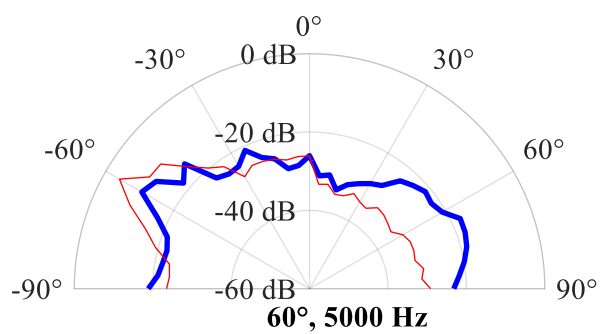
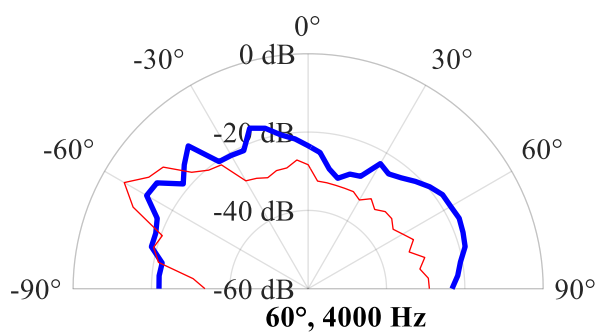
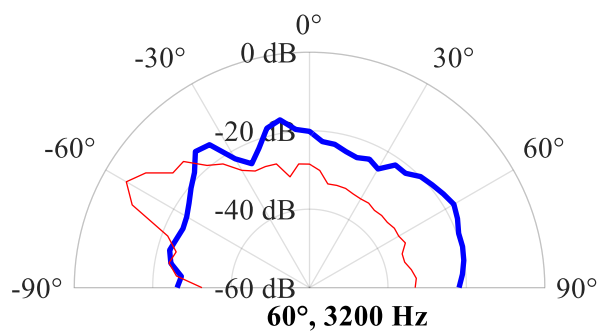
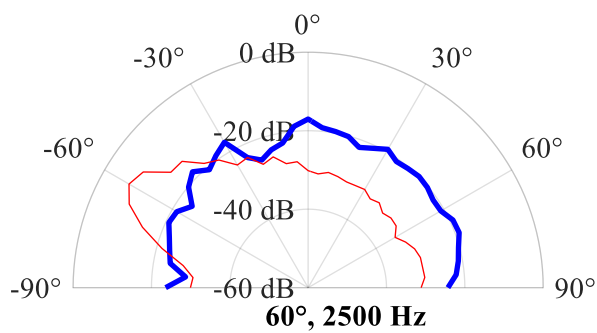
B.4 MLS 30°



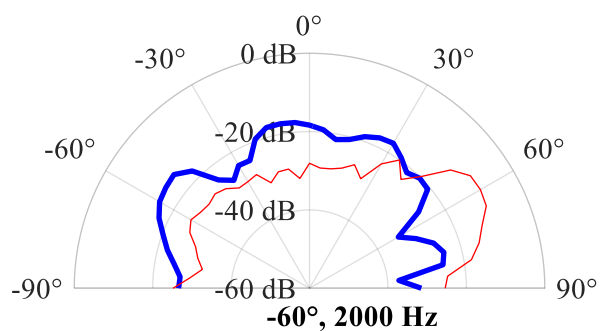
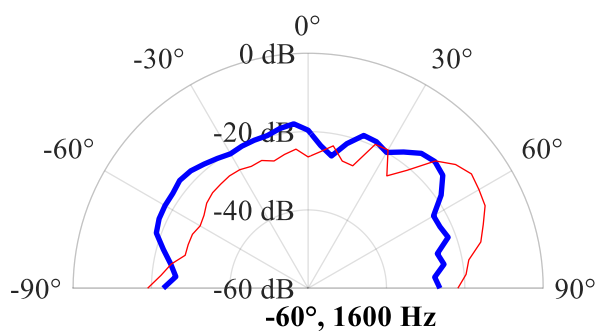
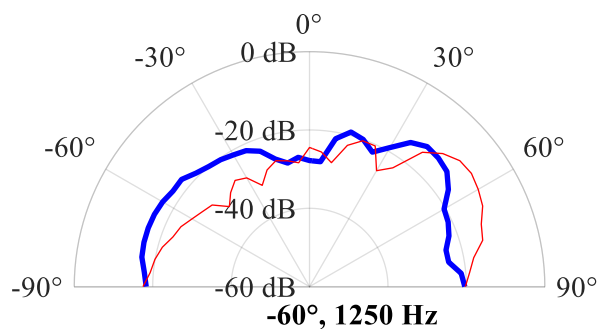
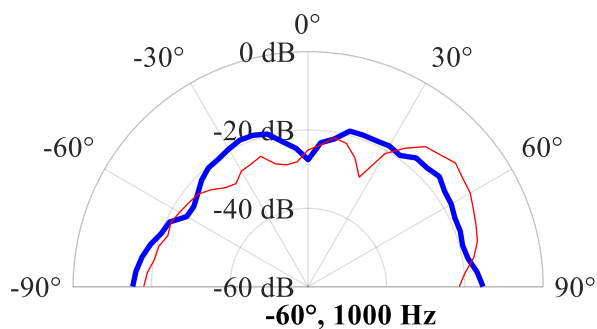
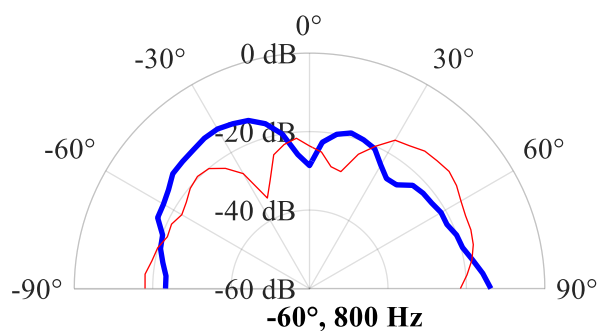
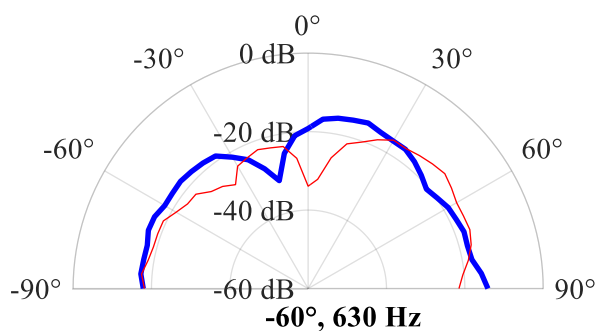
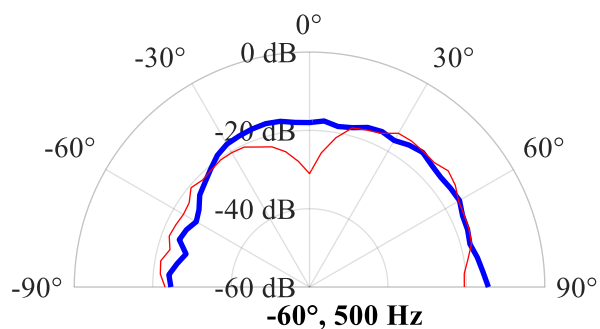
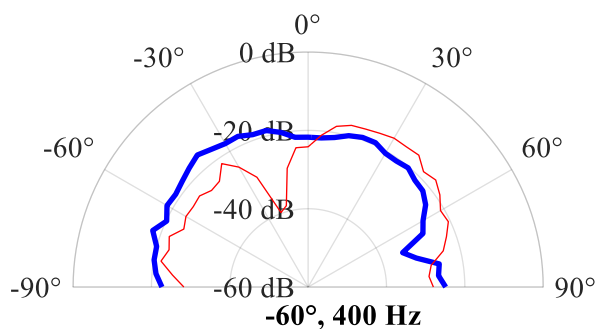
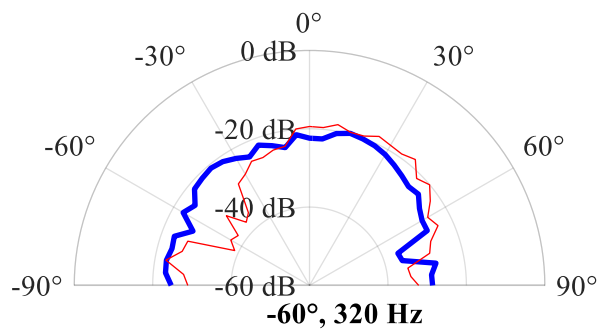
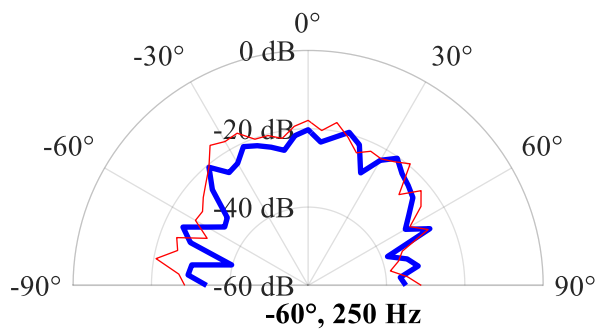


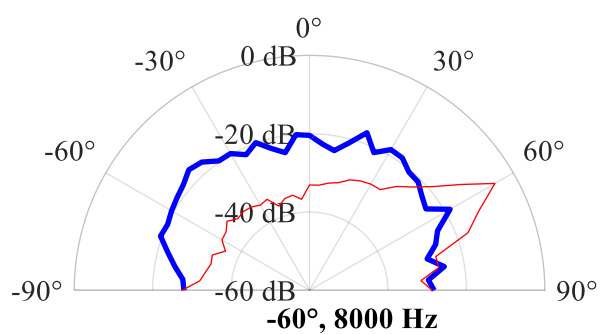
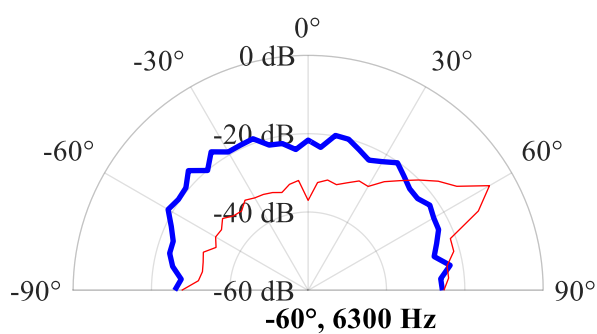
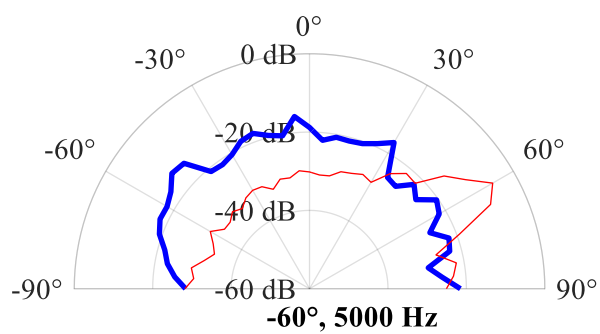
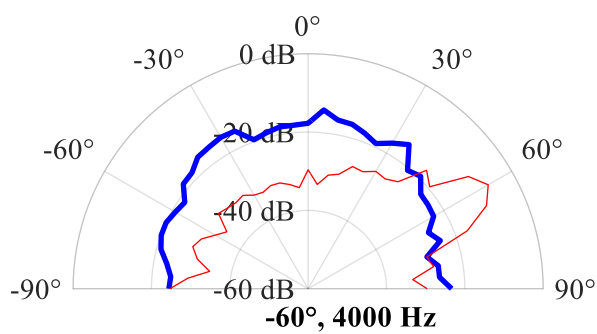
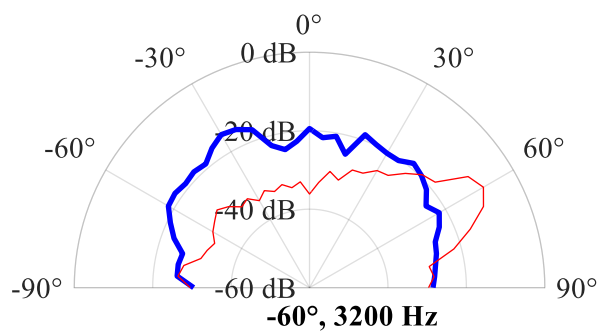
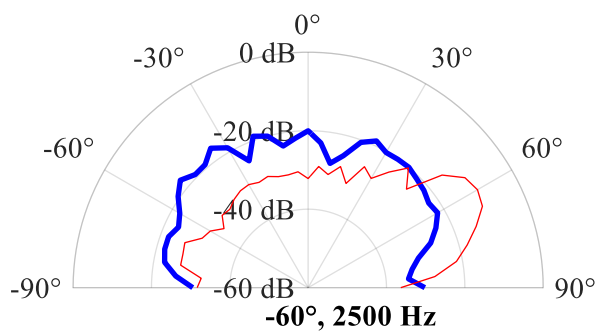
B.5 MLS 60°



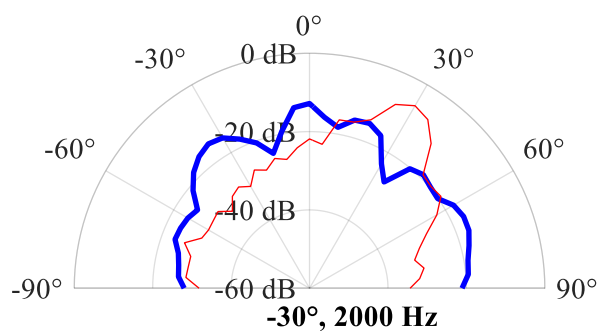
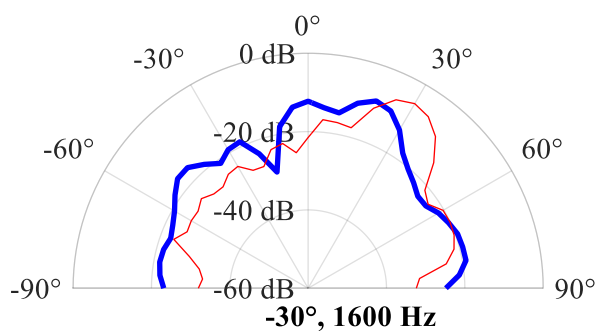
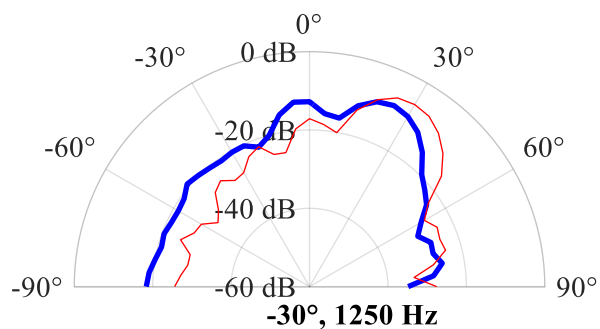
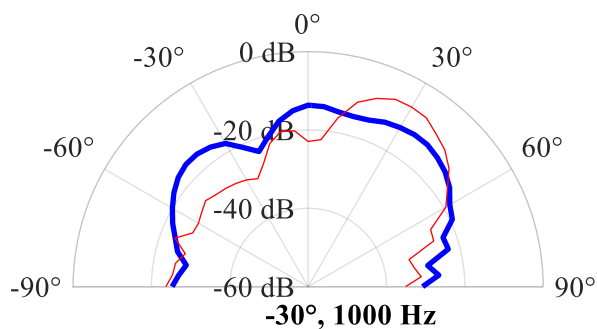
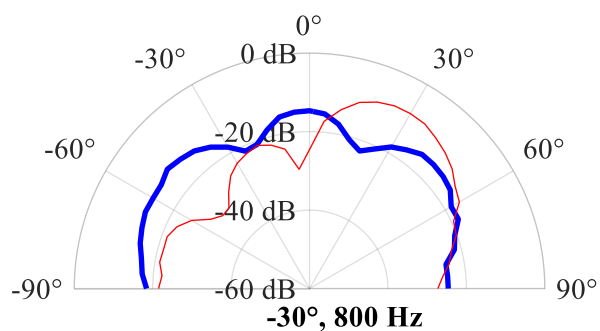
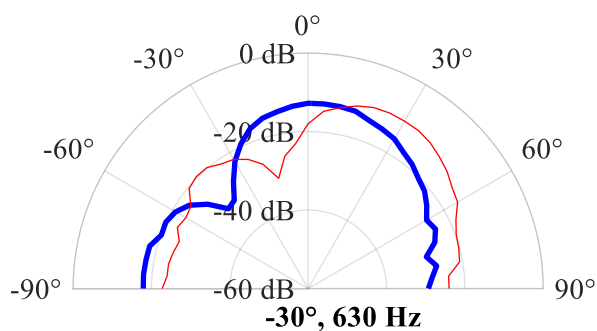
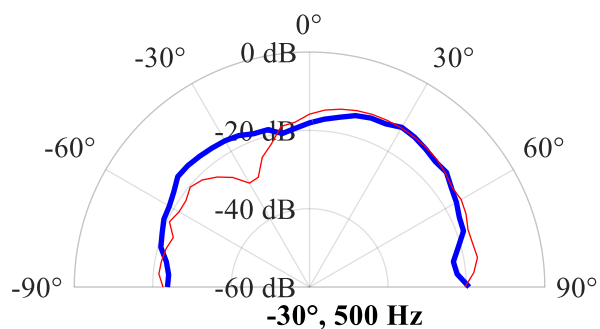
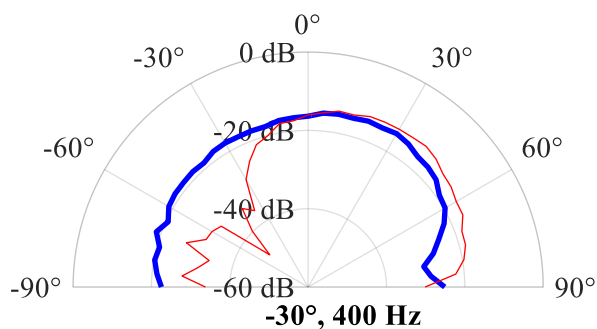
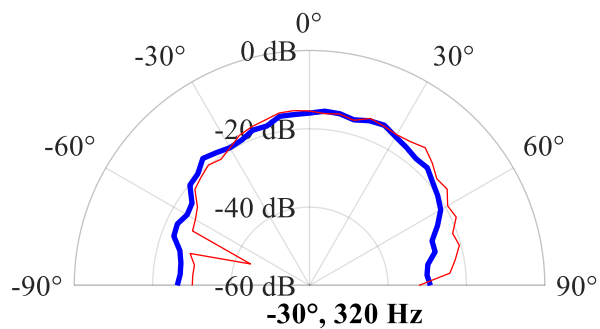
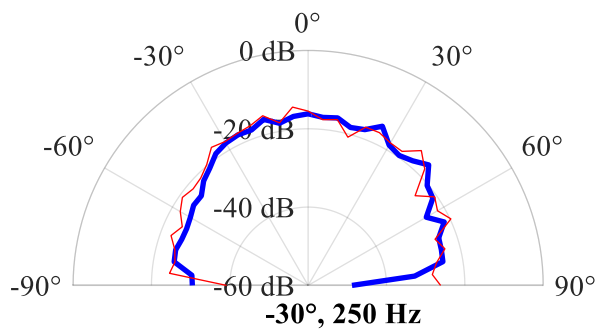


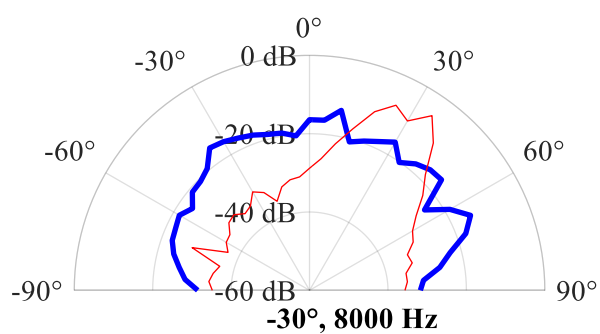
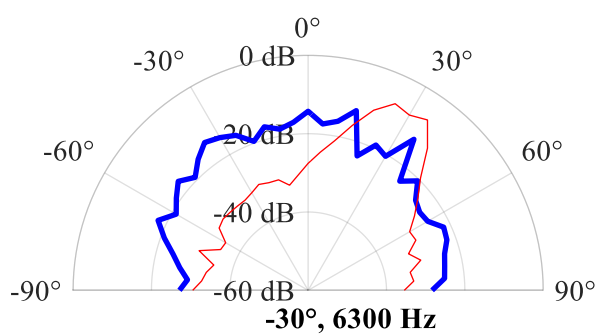
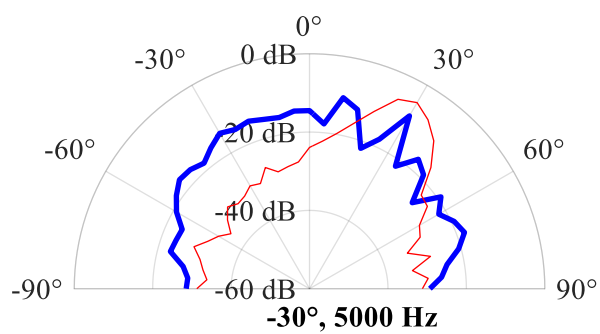
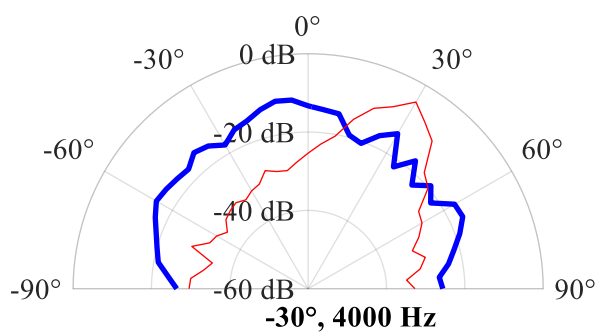
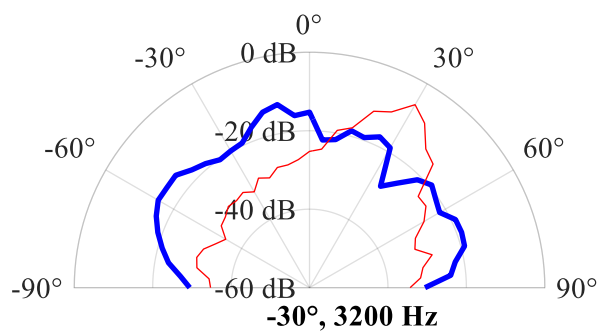
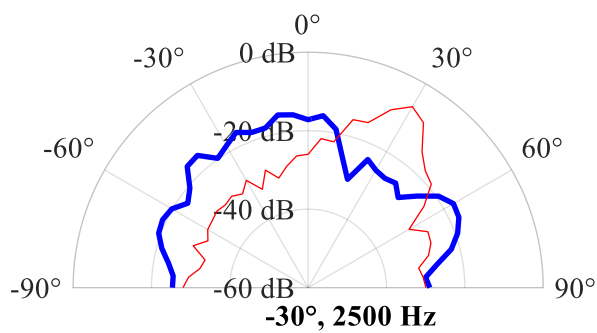
B.6 PRD -60°



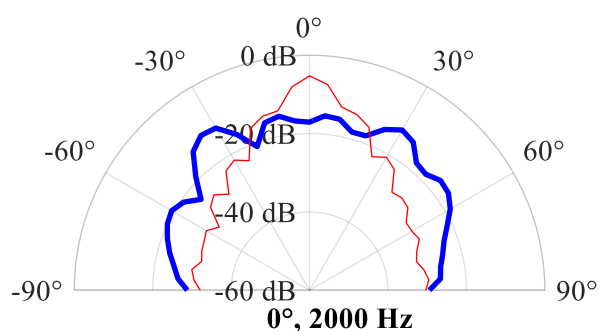
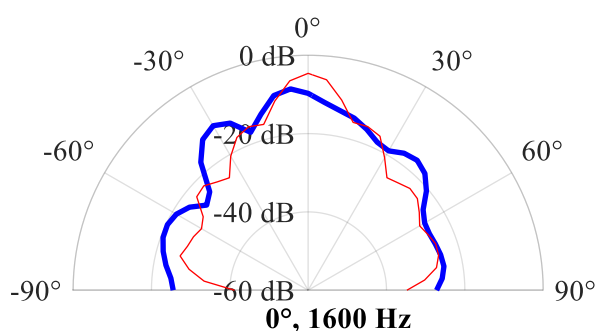
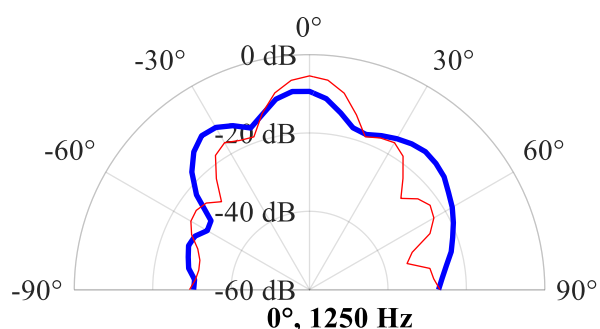
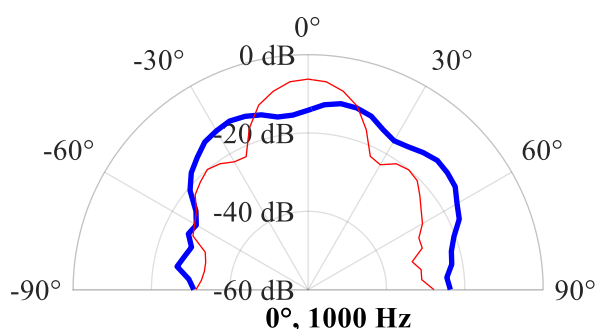
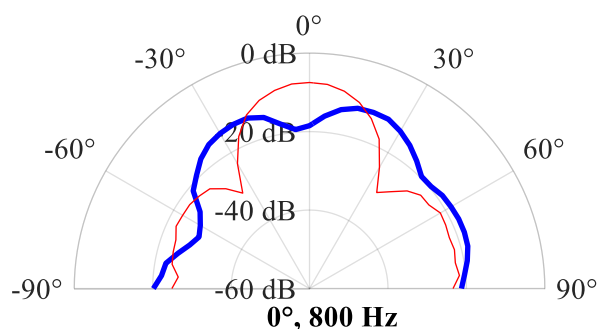
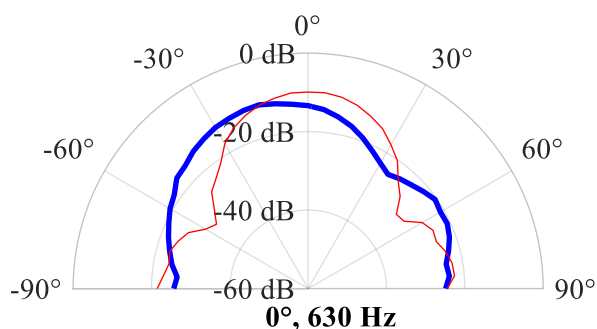
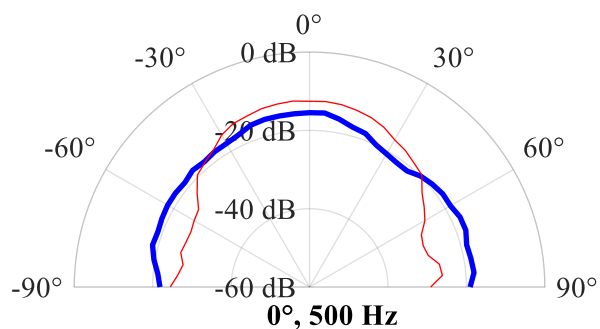
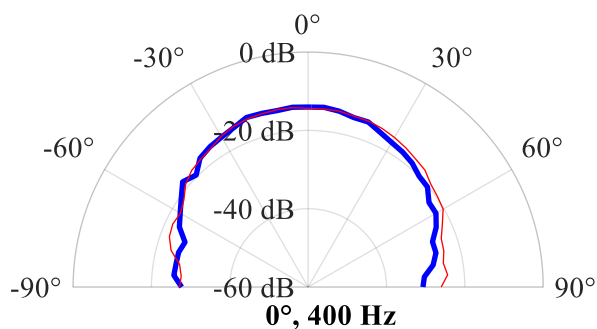
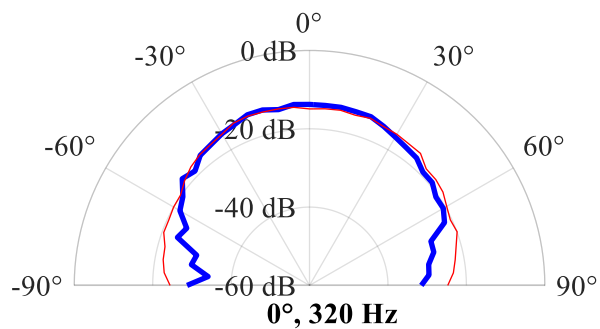
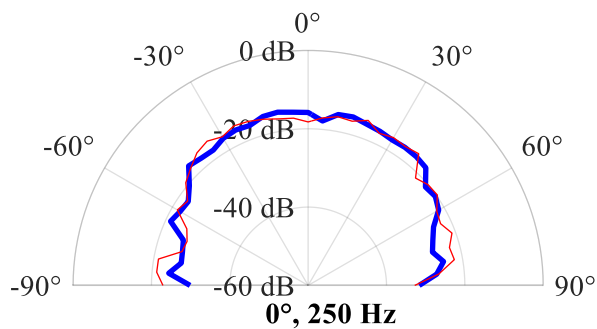


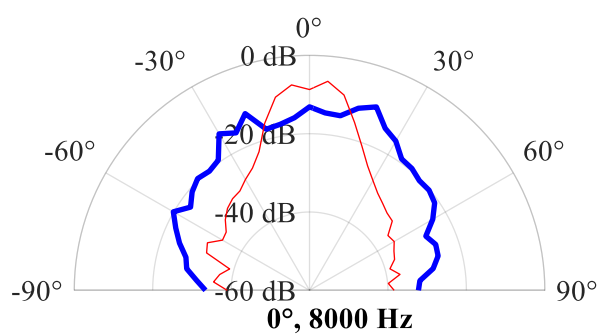
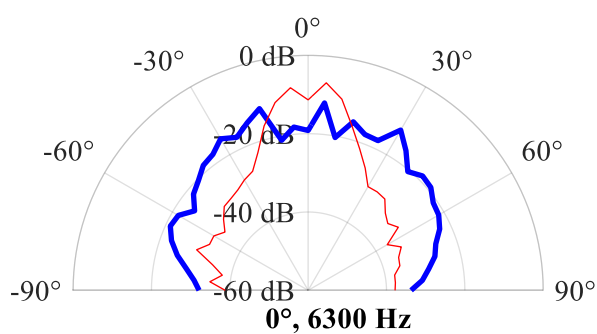
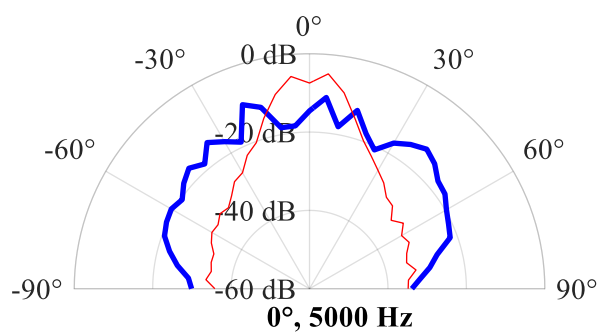
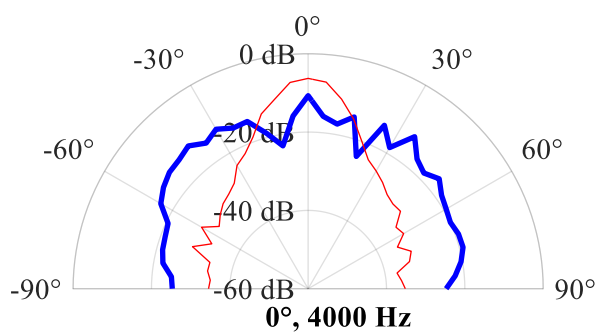
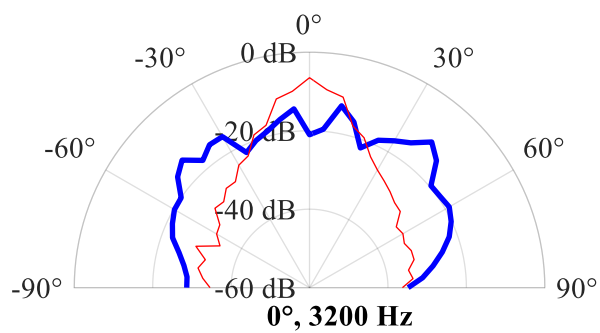
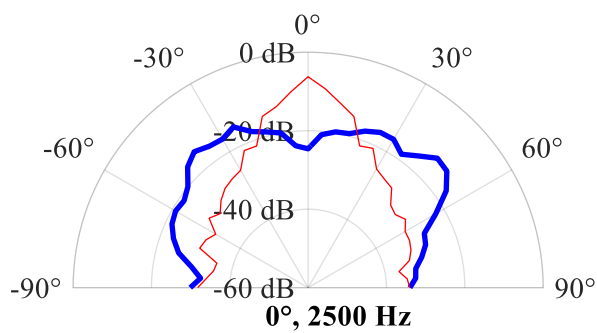
B.7 PRD -30°



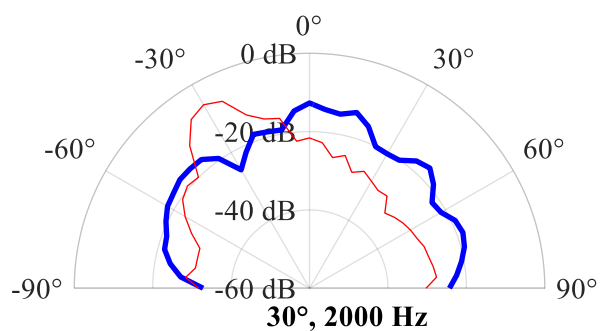
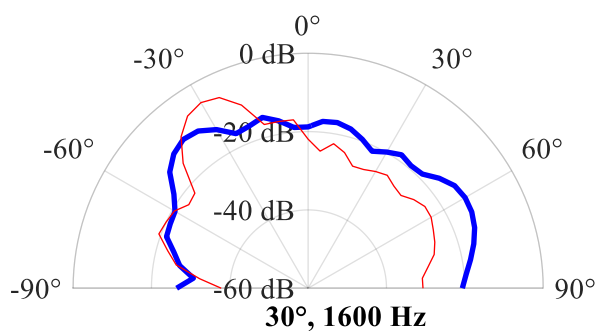
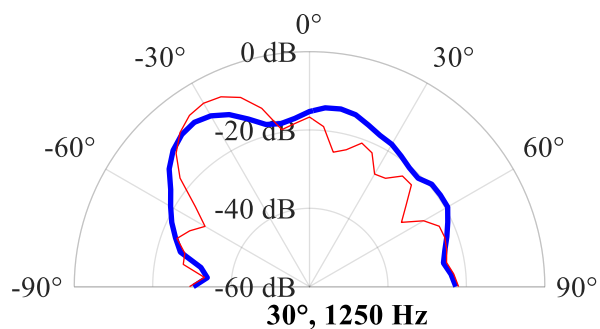
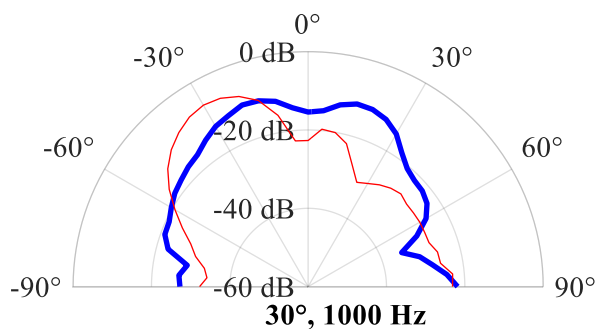
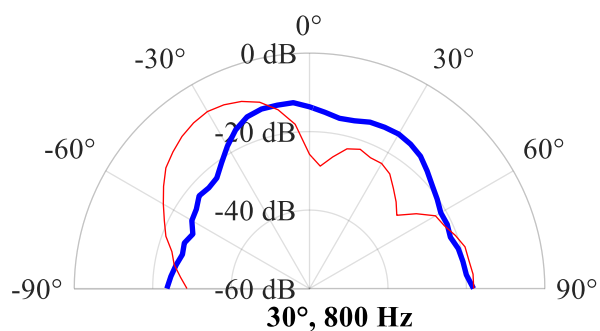
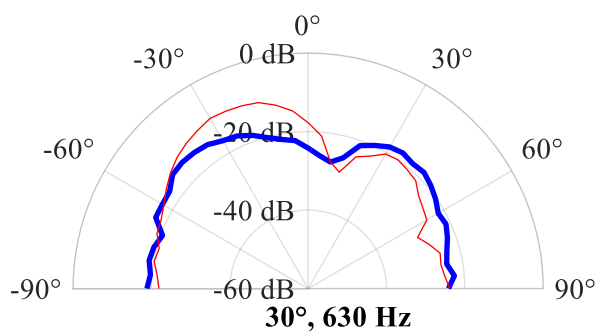
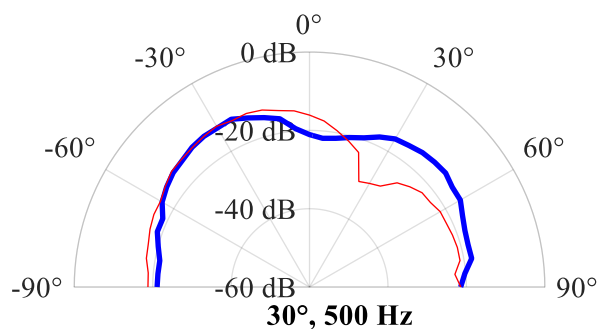
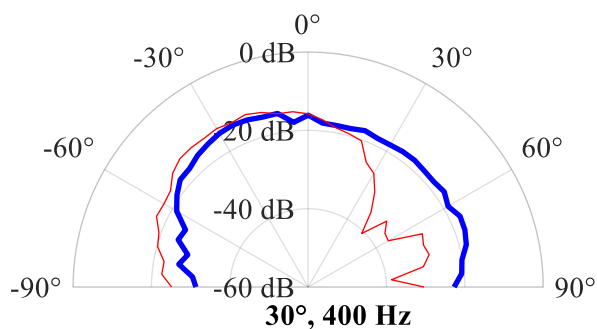
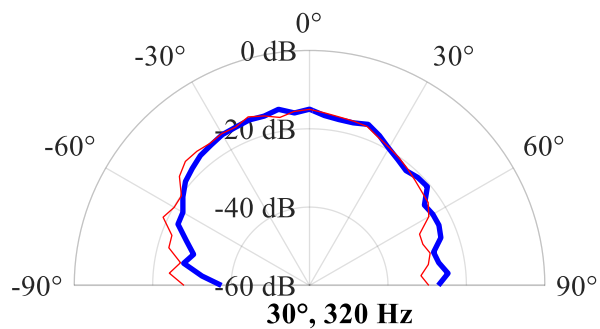
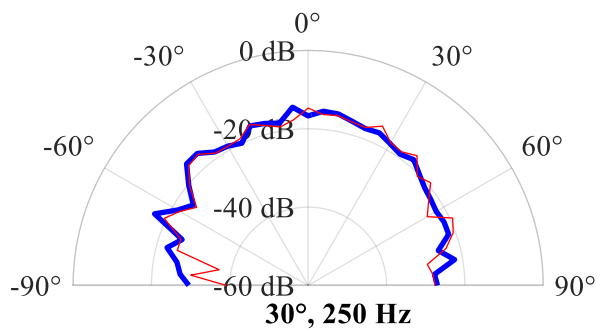


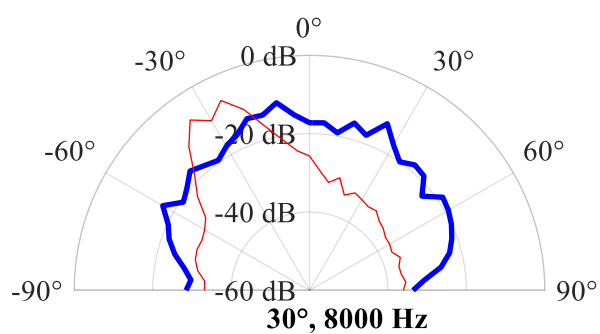
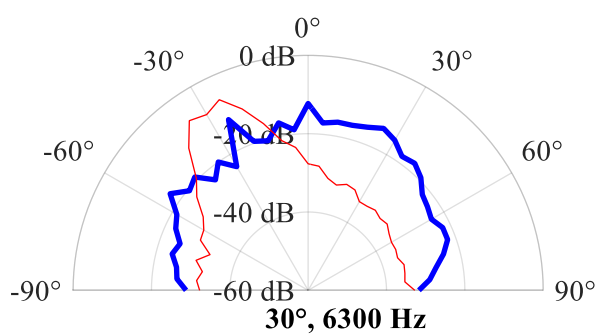
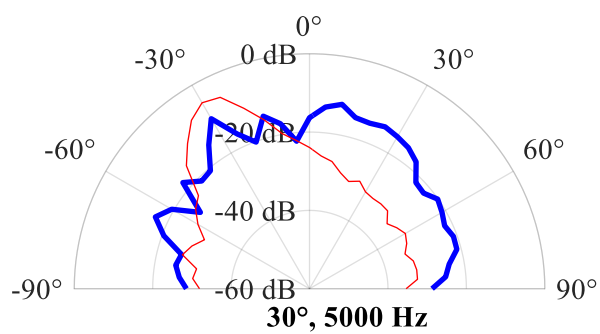
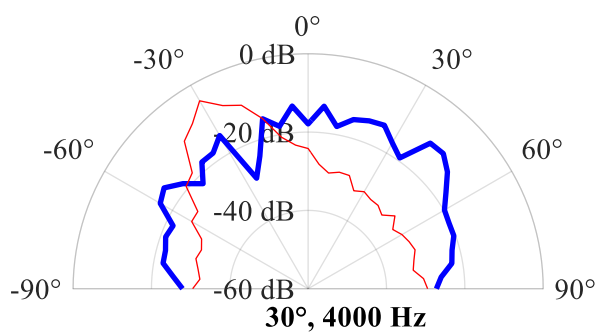
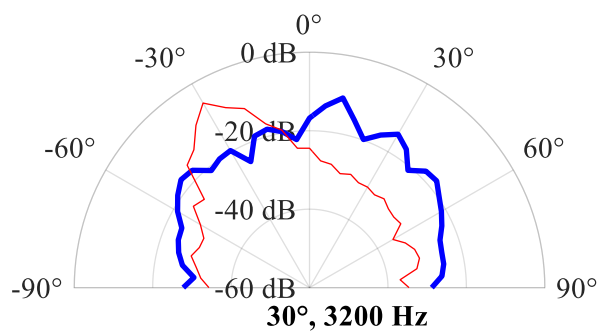
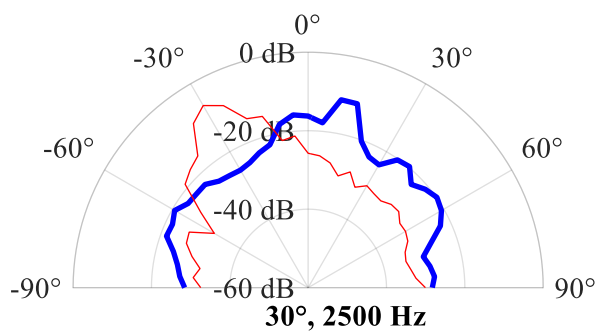
B.8 PRD 0°



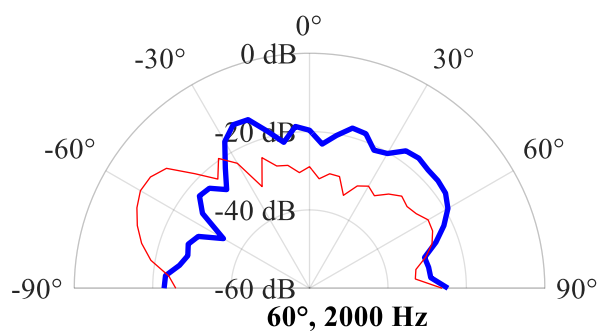
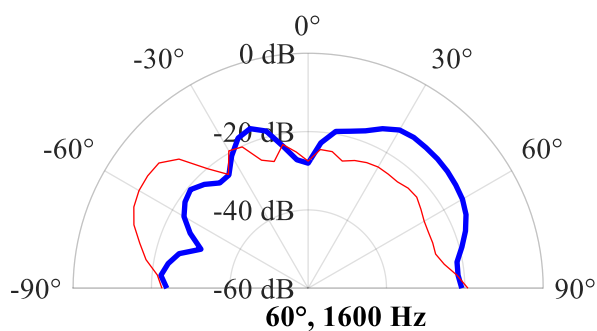
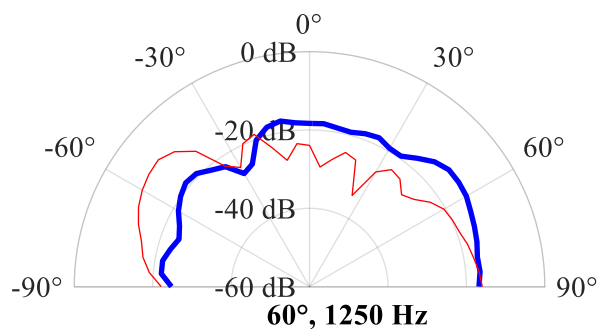
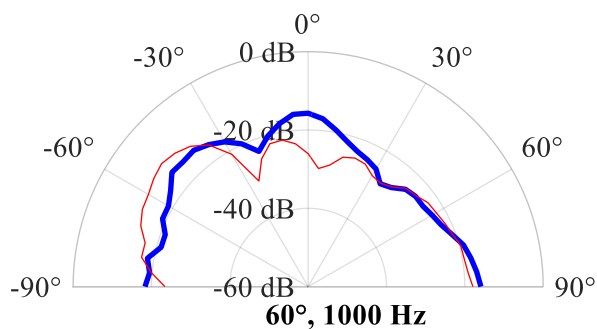
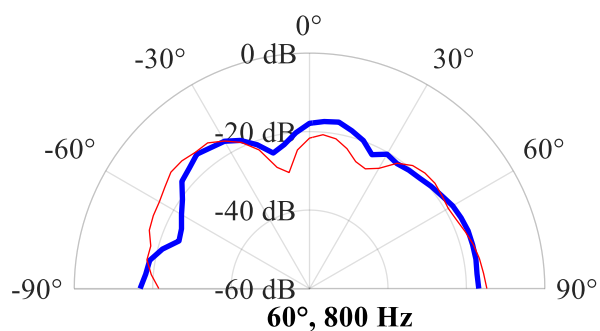
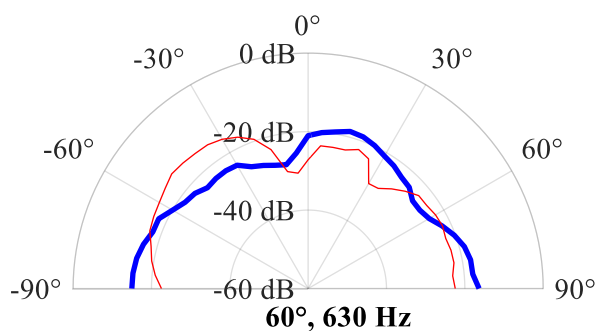
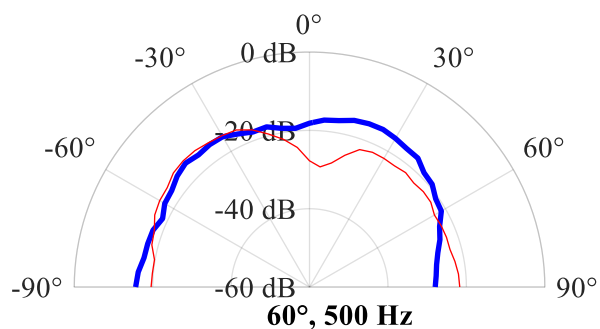
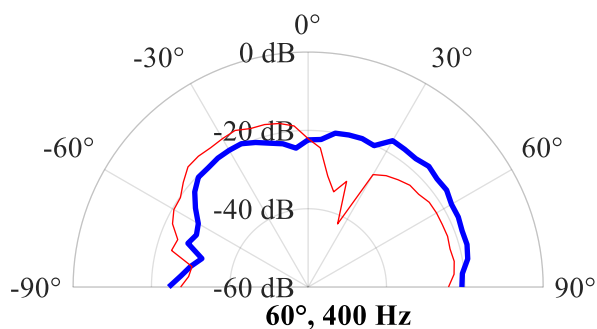
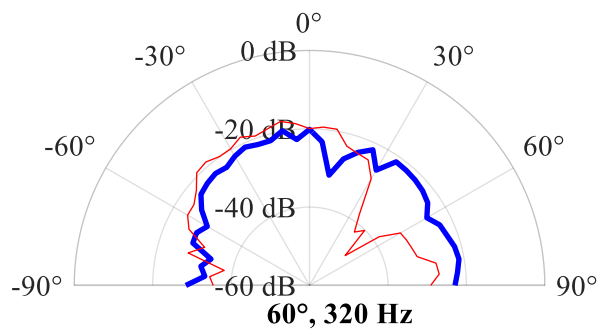
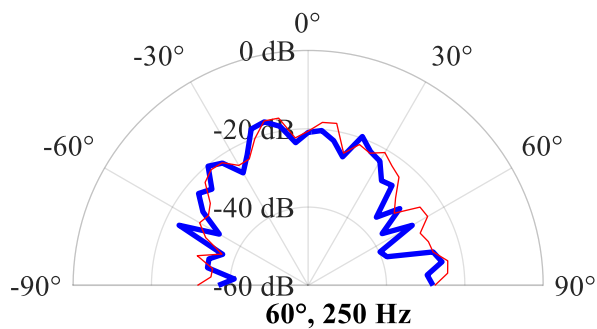


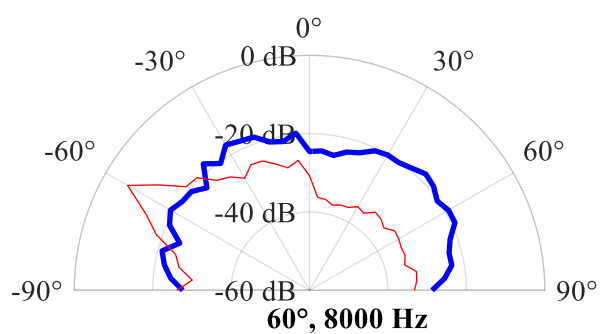
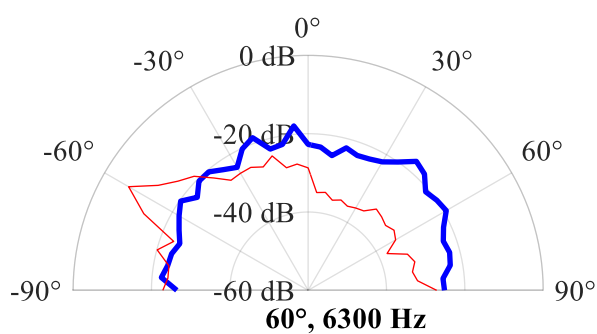
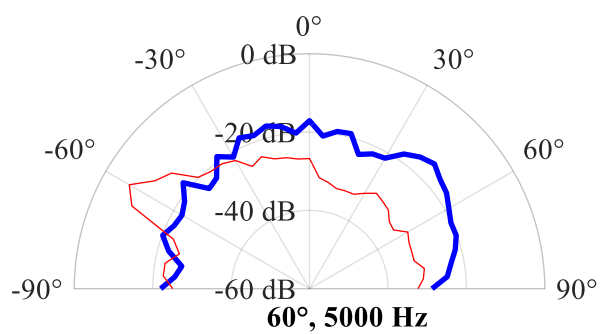
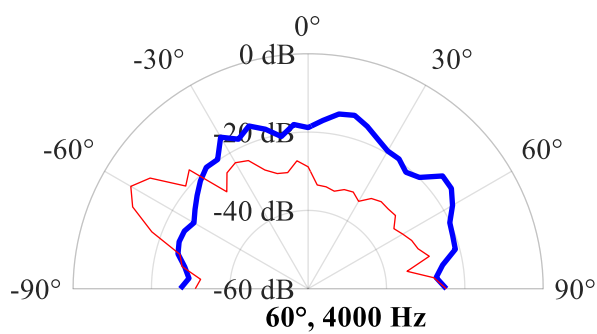
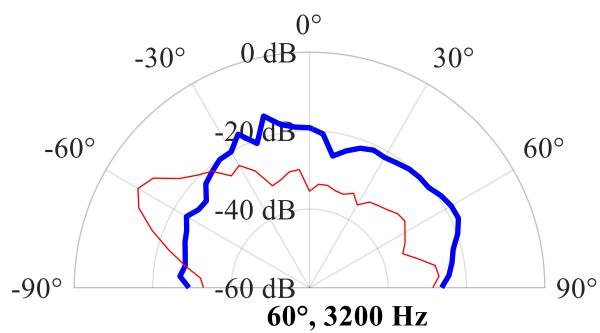
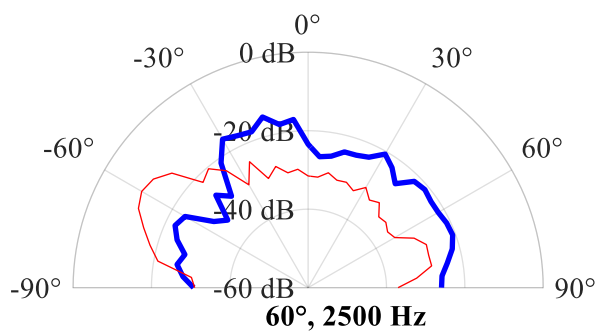
B.9 PRD 30°



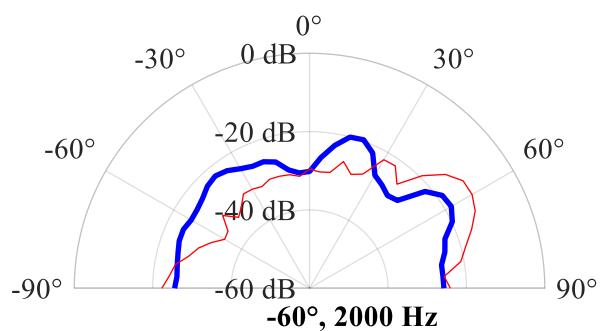
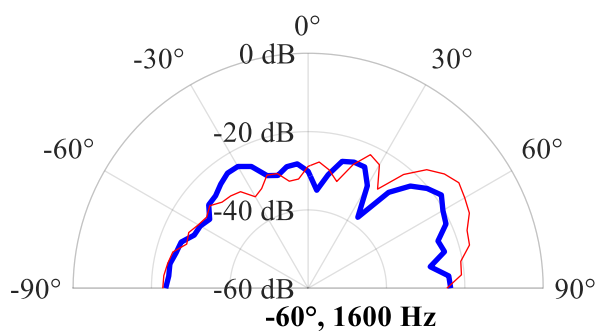
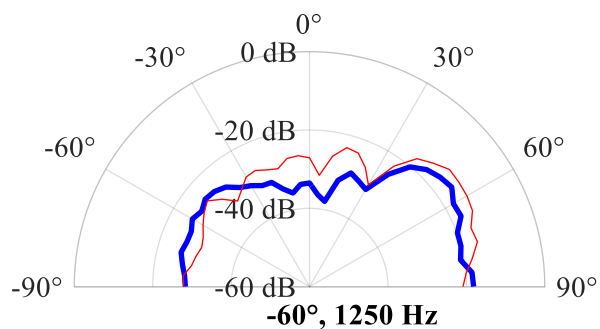
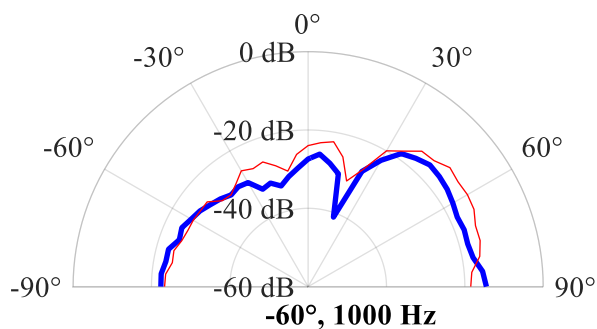
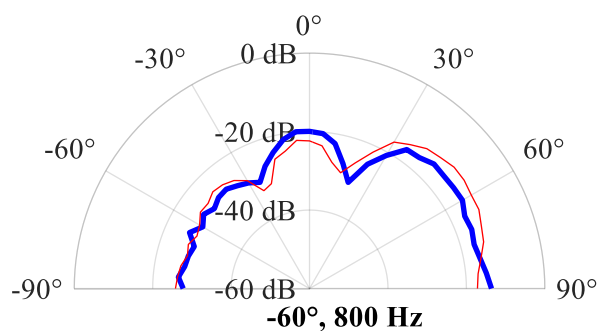
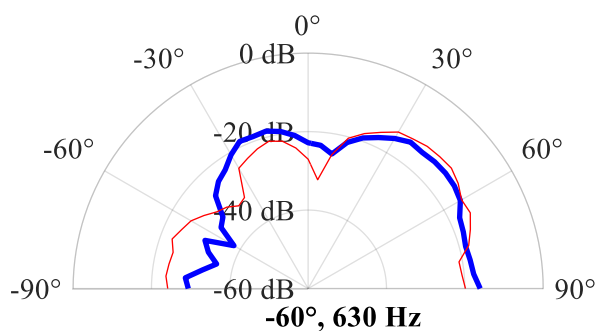
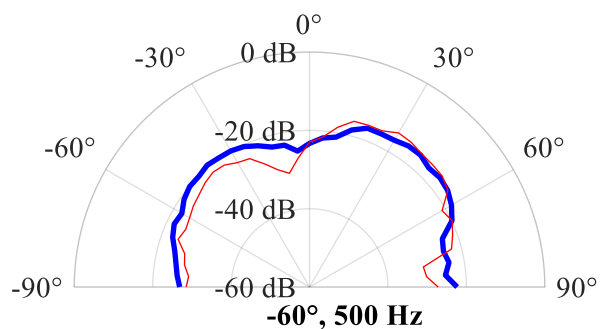
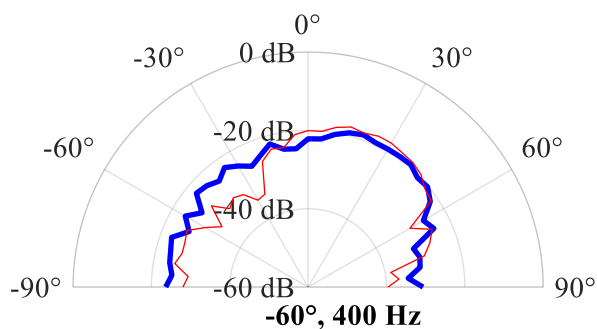
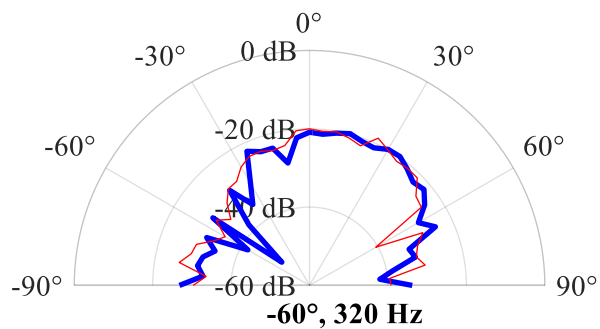
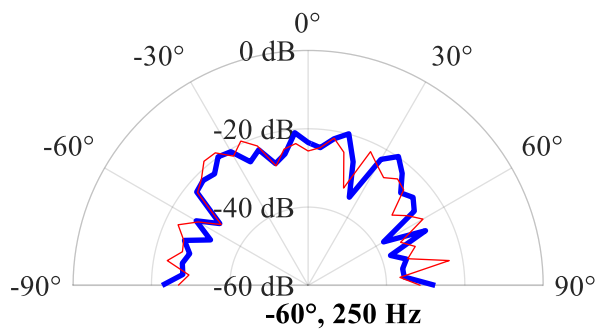


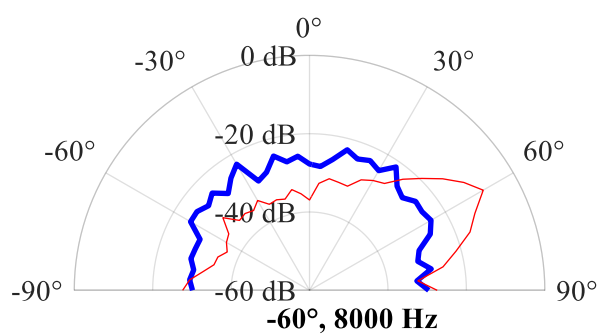
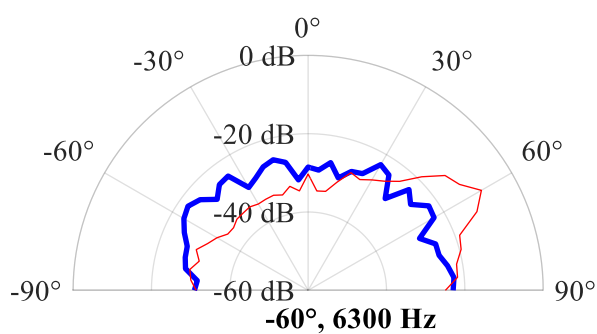
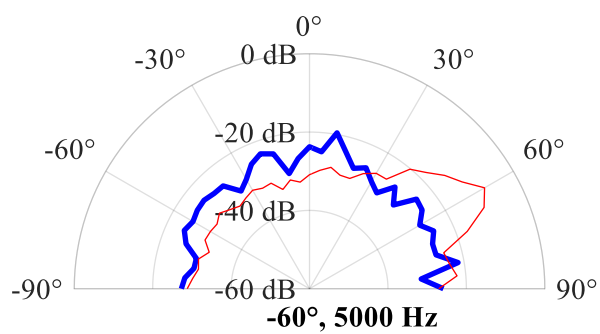
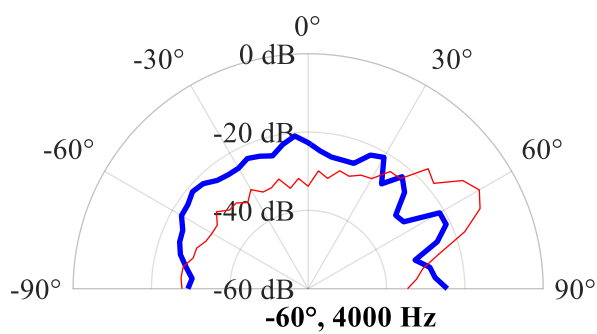
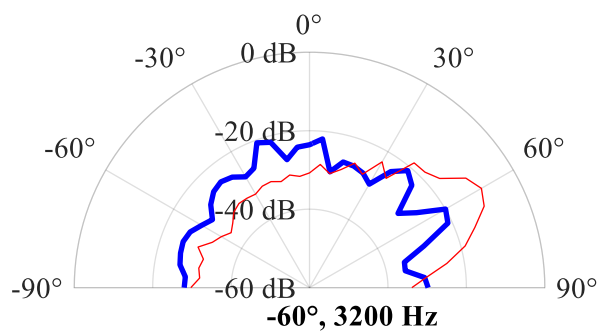
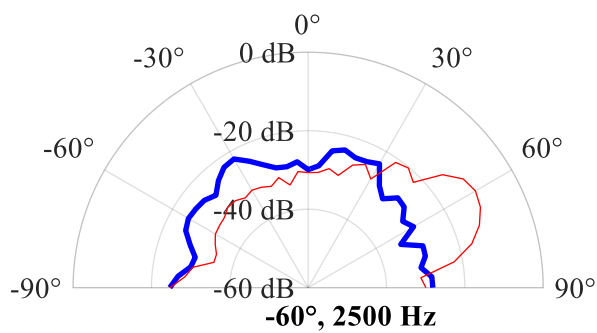
B.10 PRD 60°



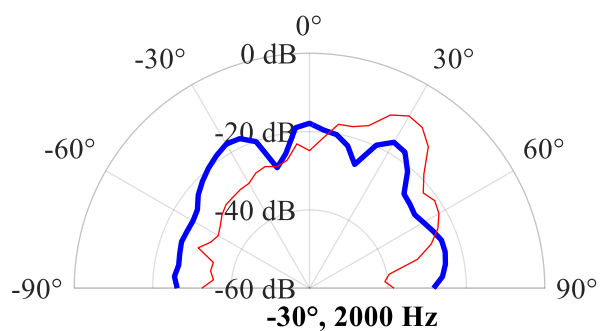
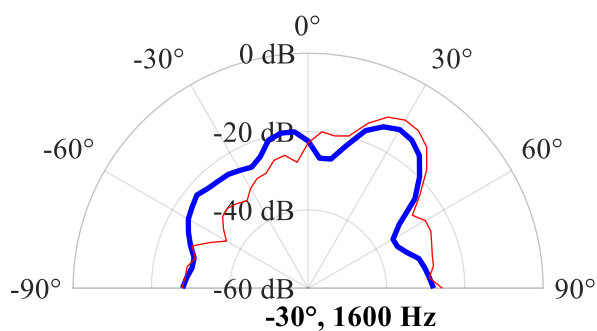
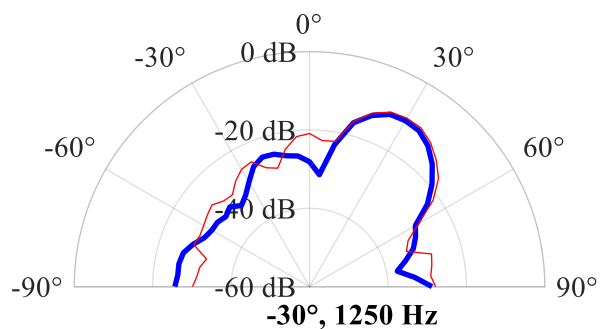
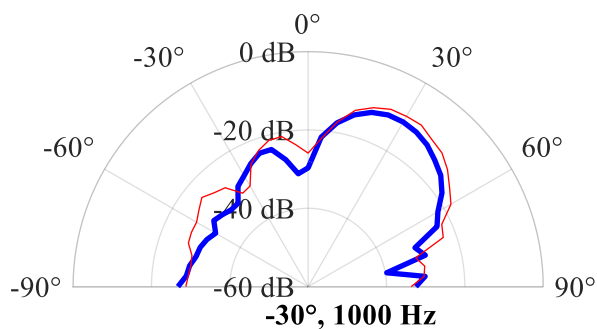
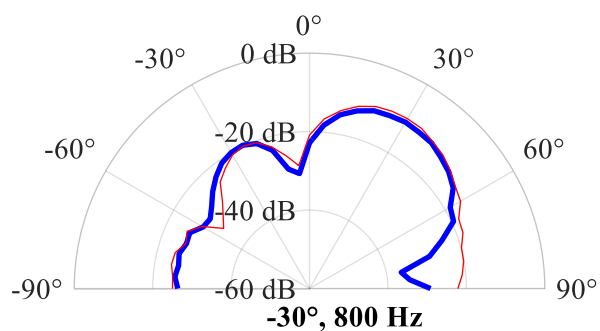
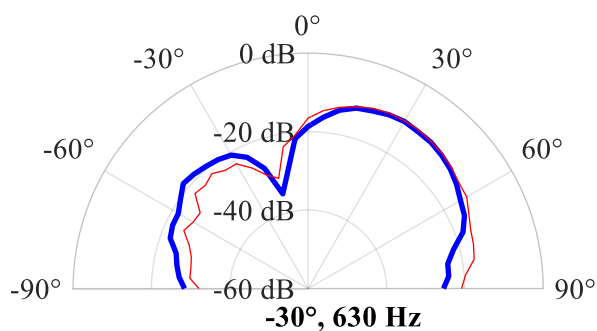
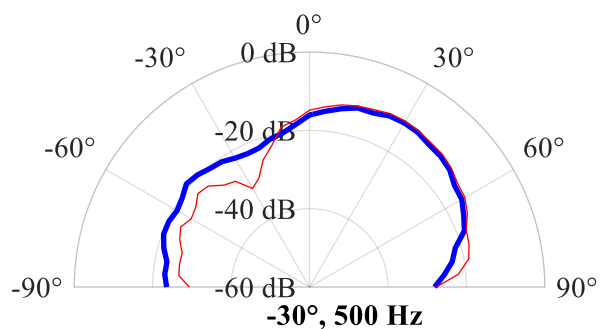
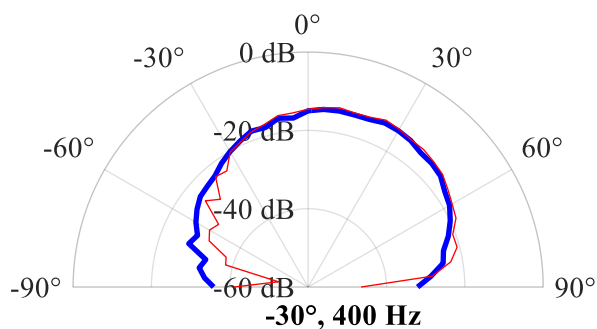
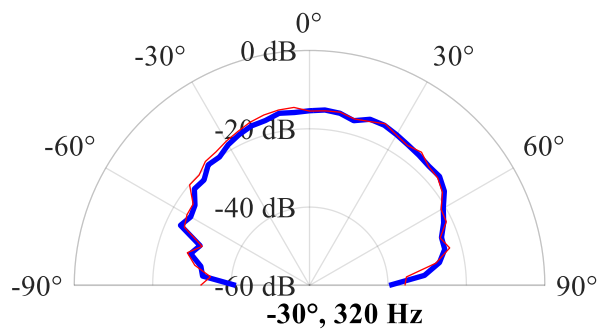
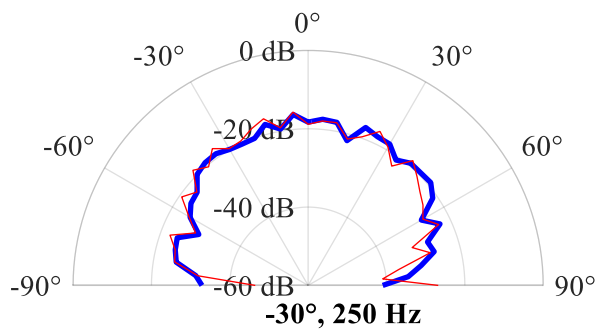


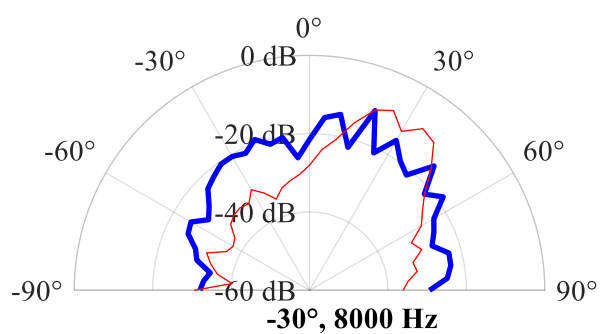
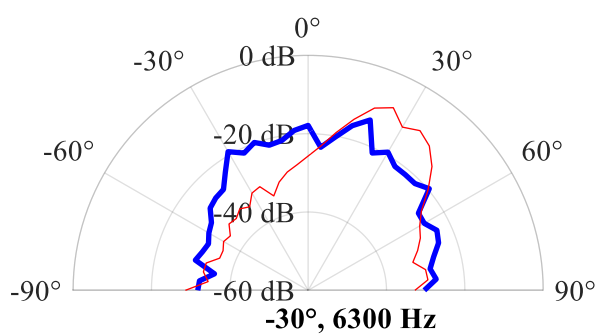
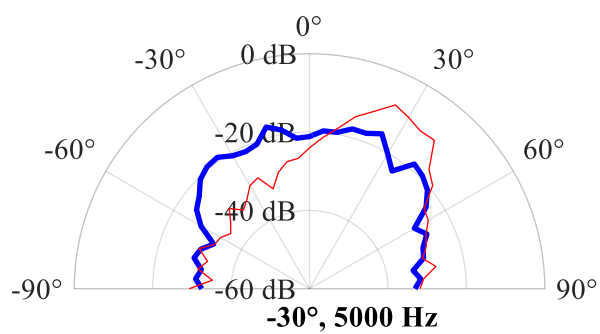
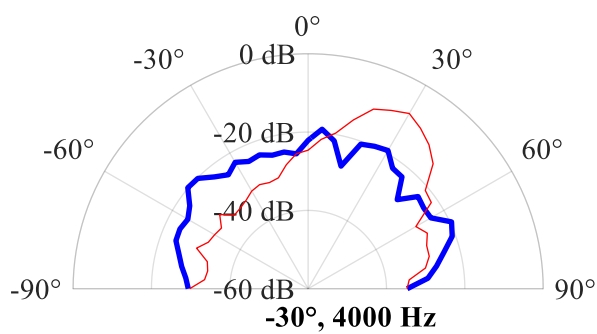
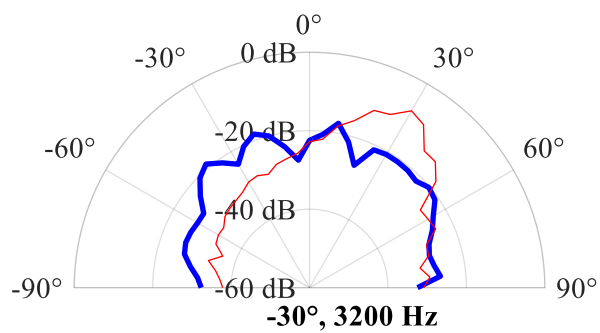
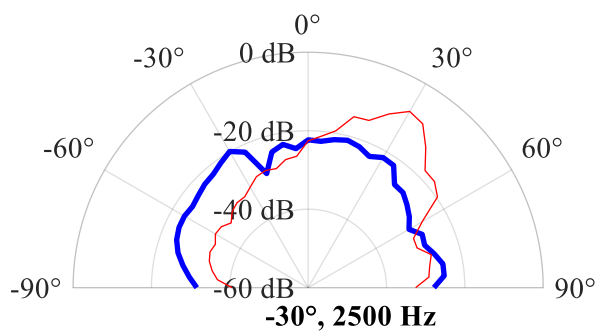
B.11 2D QRD -60°



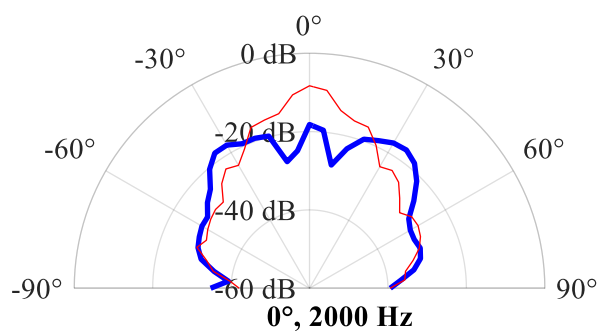
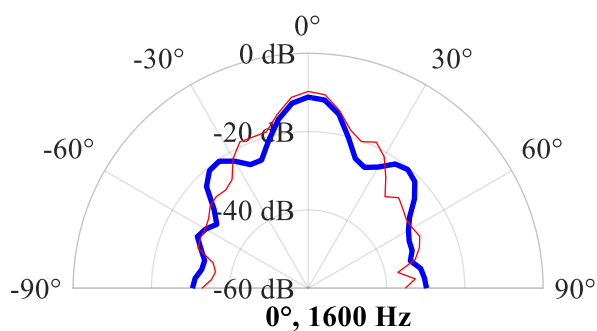
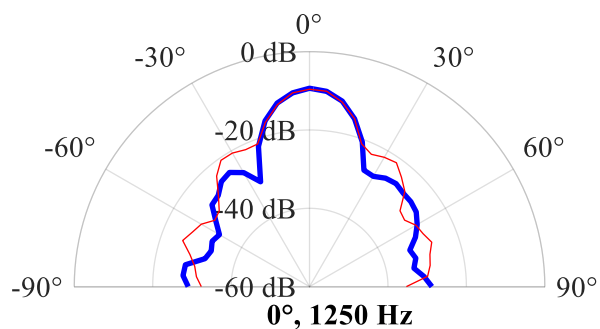
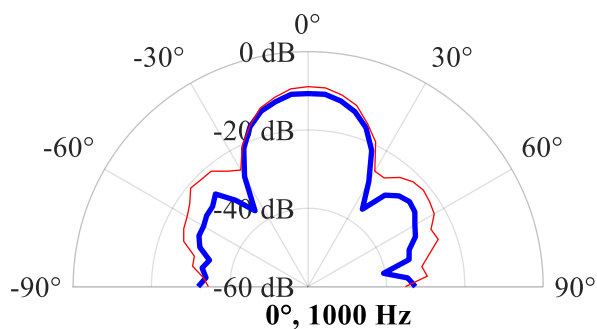
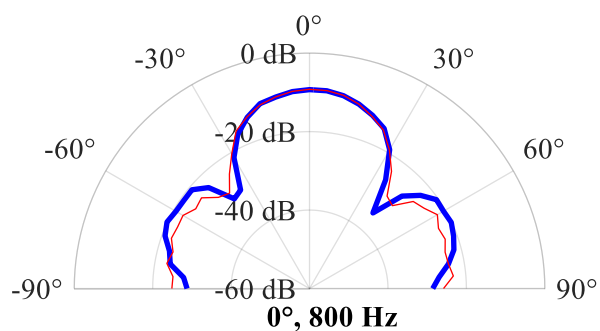
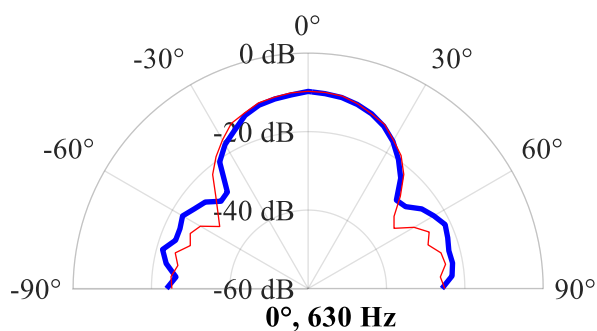
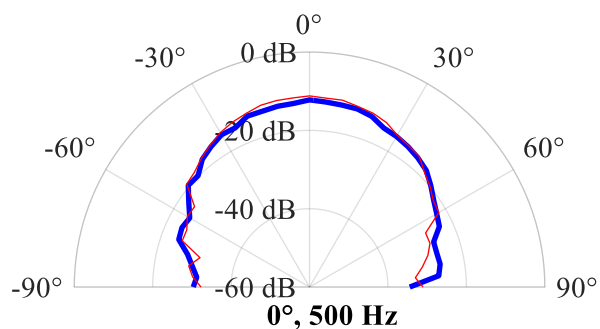
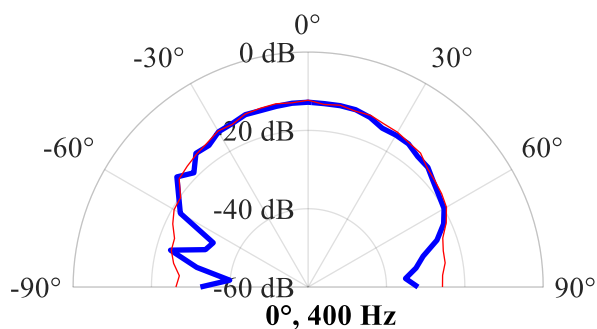
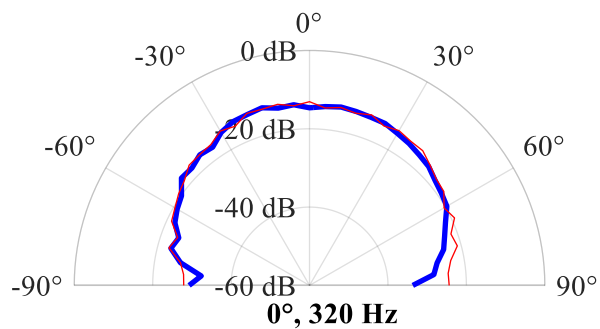
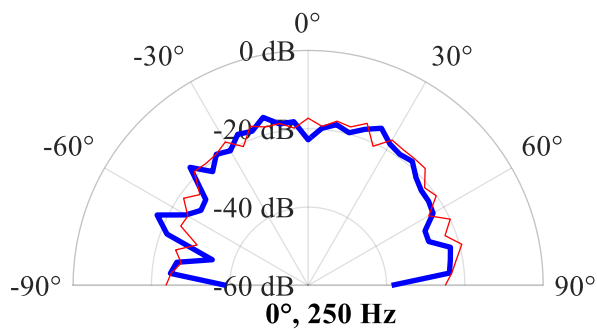


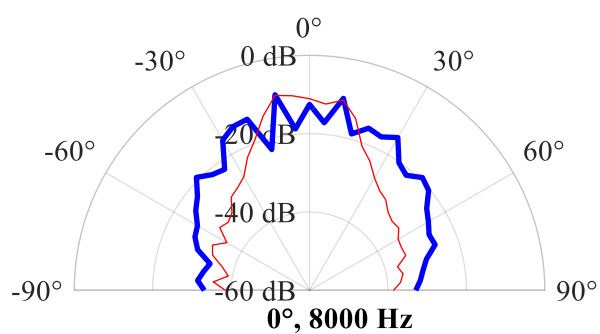
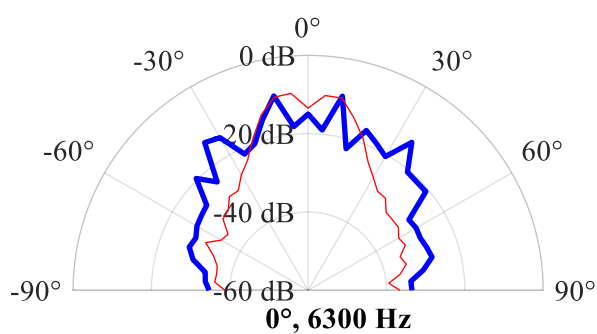
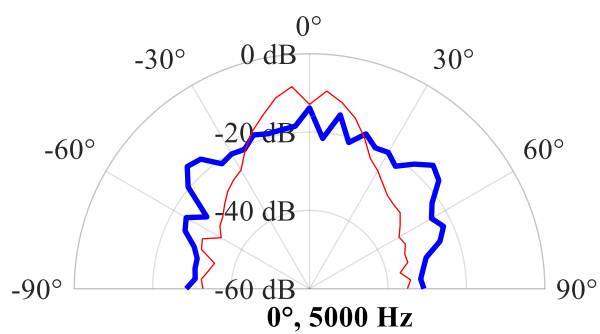
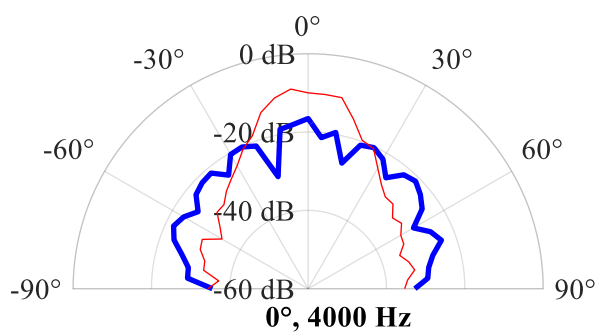
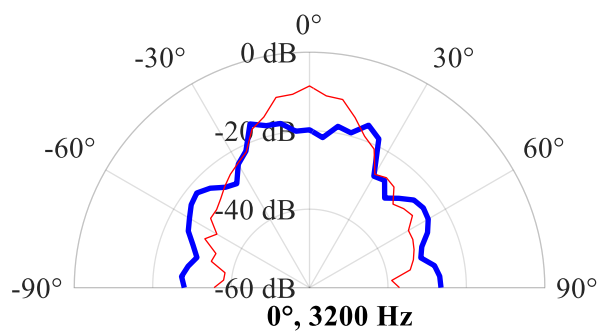
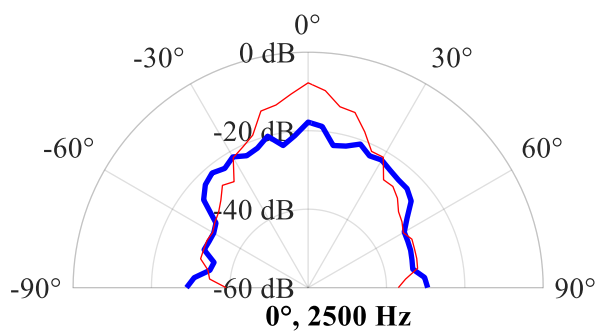
B.12 2D QRD -30°



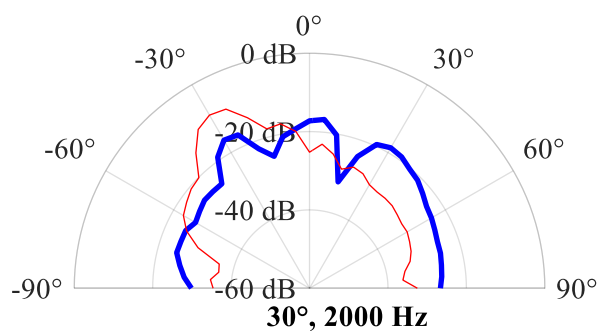
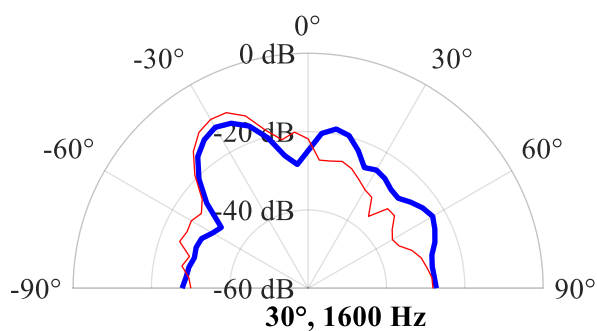
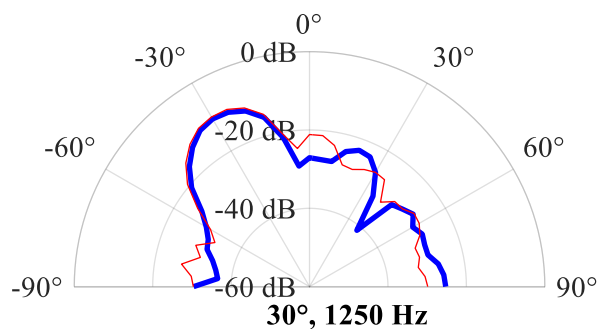
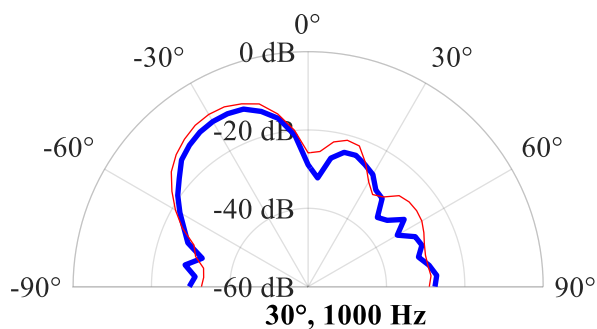
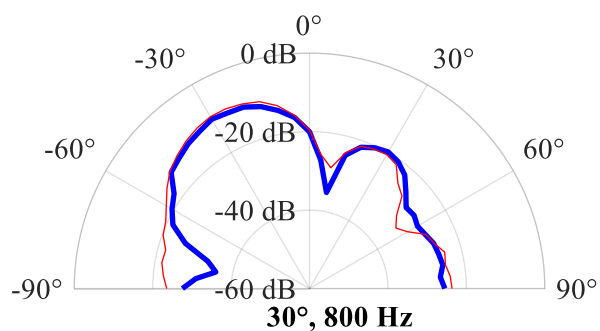
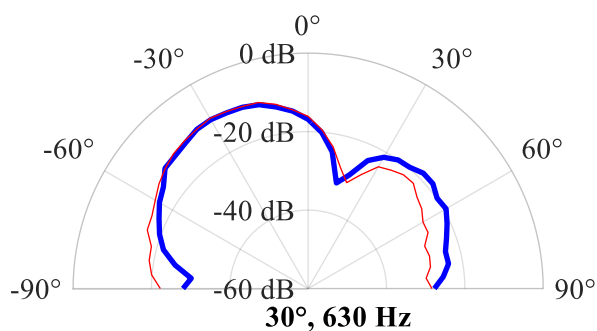
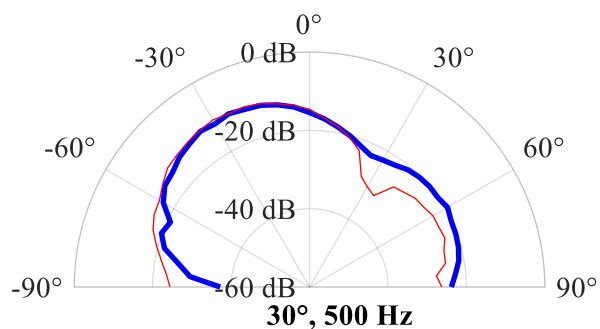
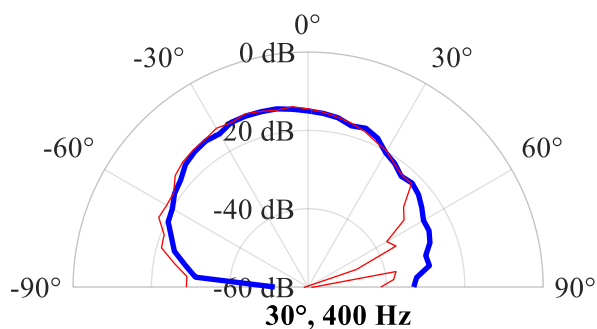
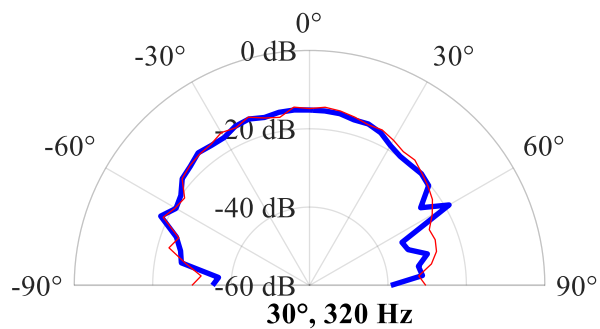
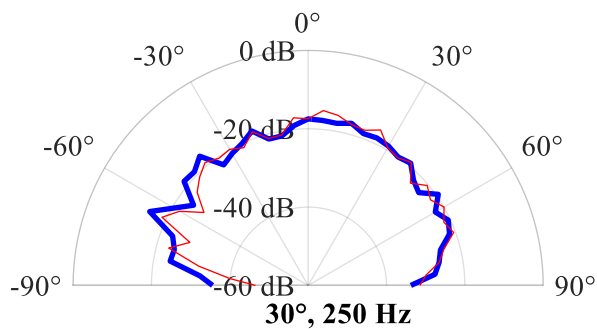


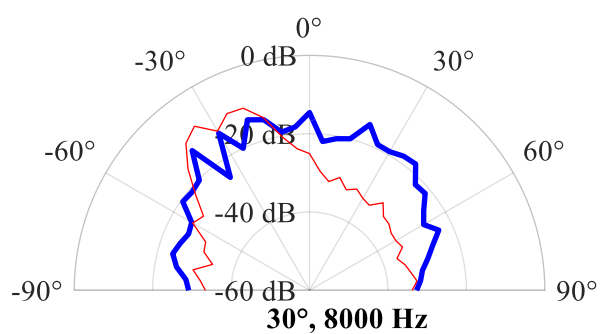
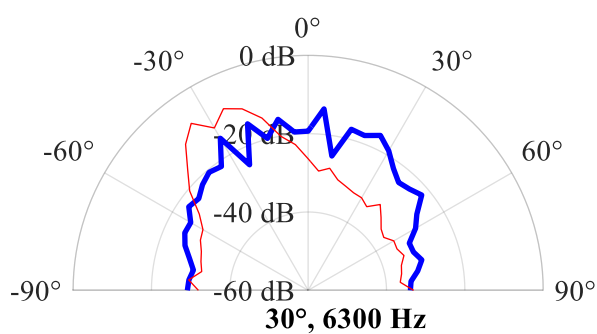
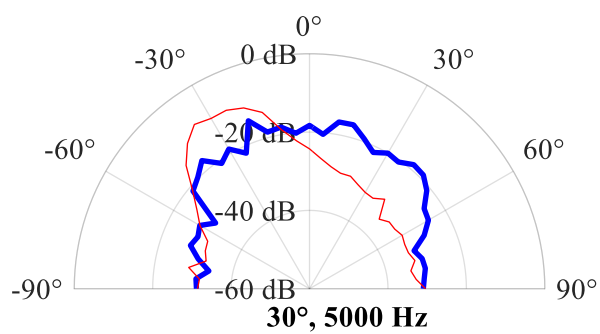
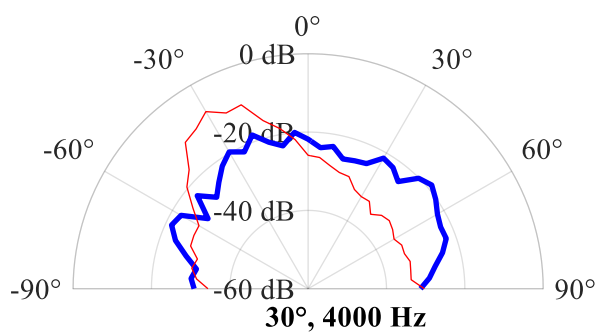
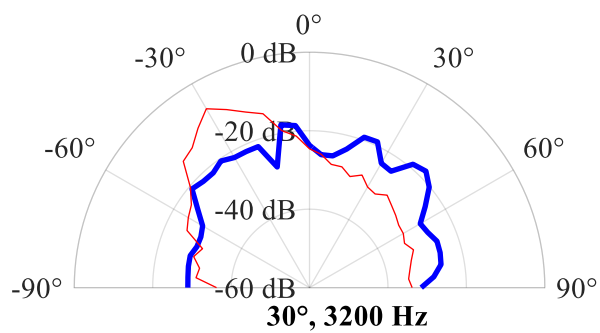
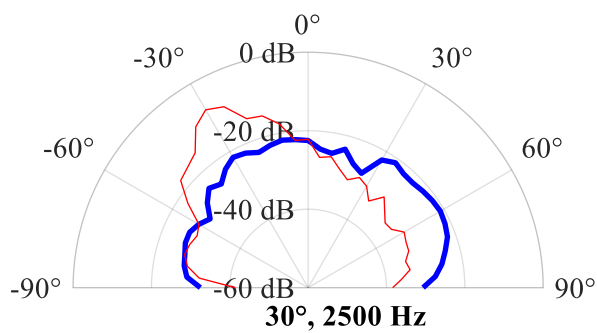
B.13 2D QRD 0°



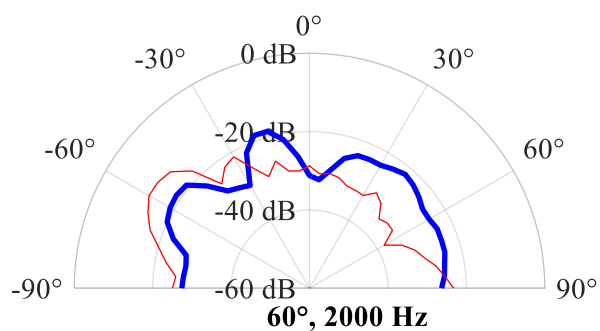
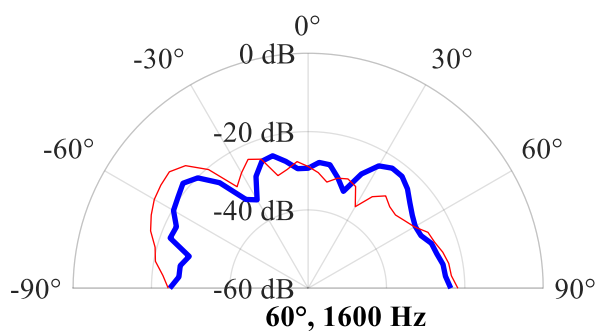
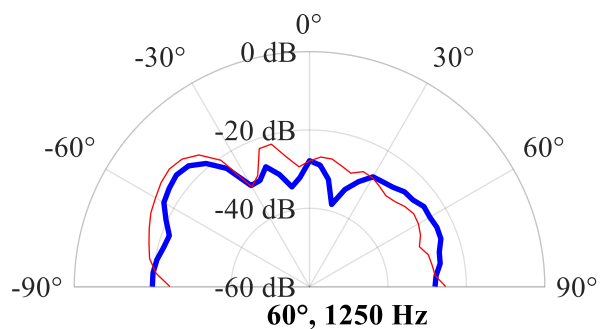
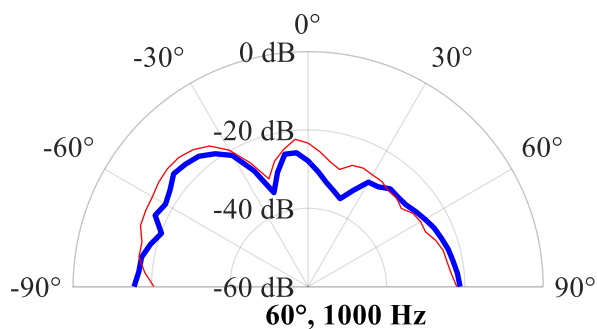
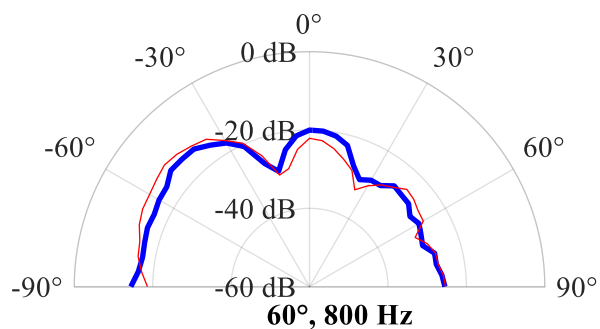
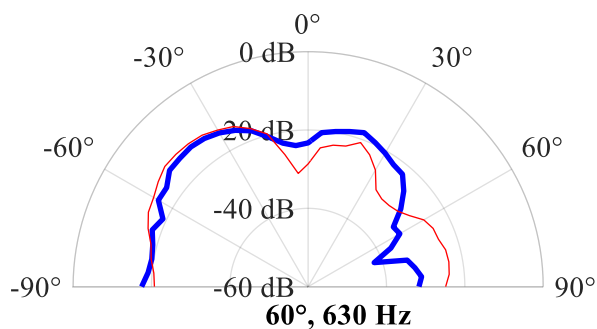
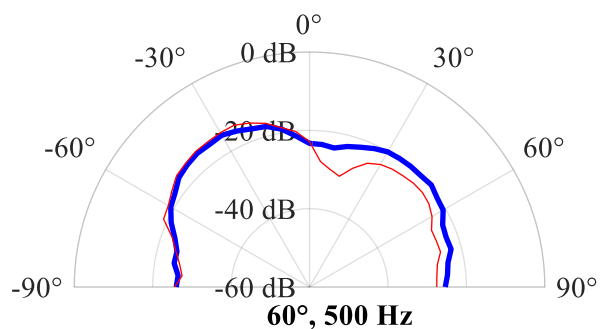
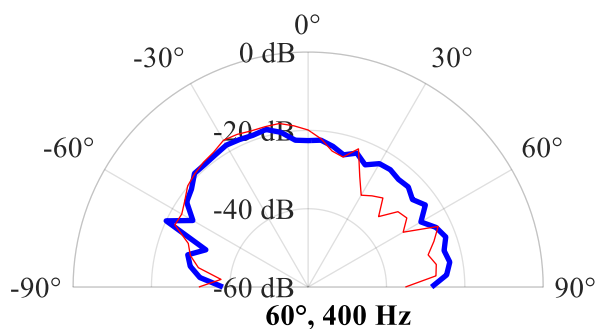
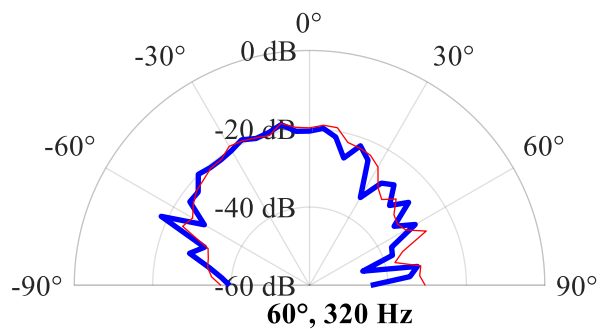
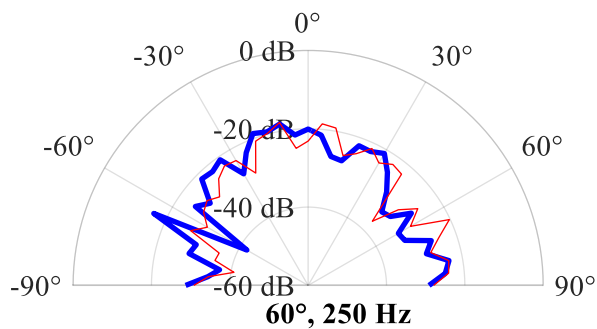


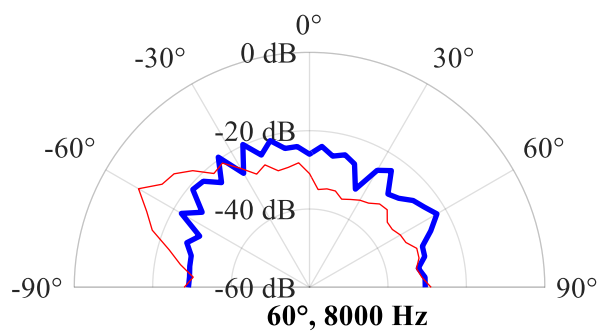
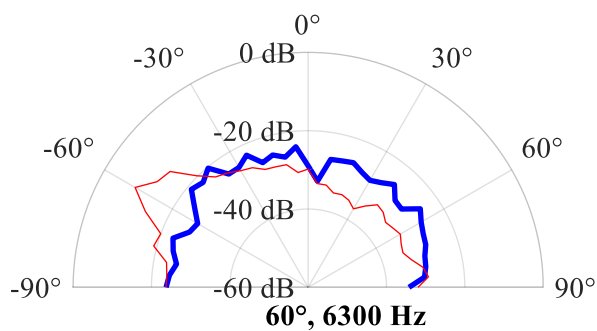
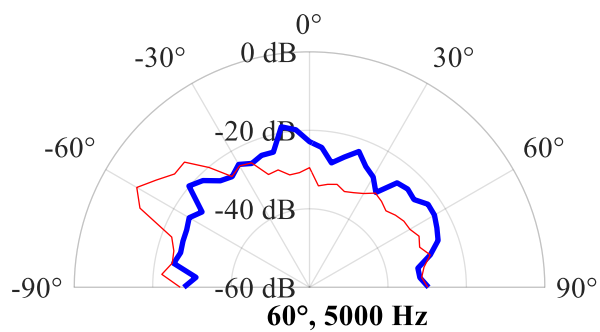
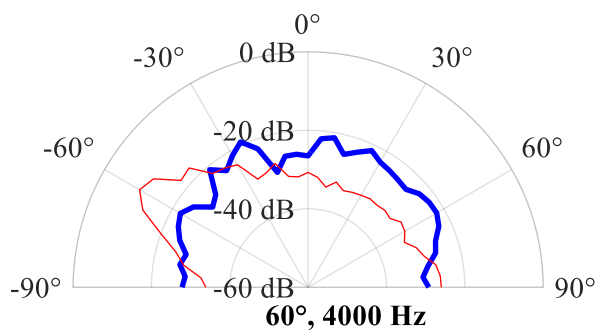
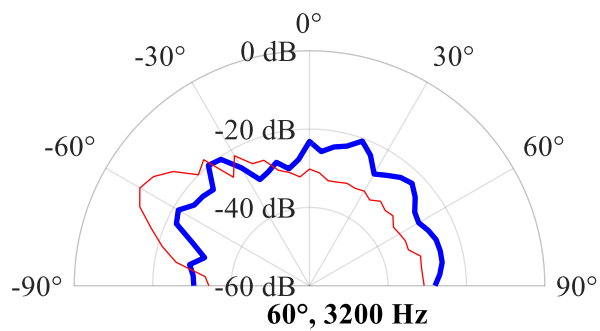
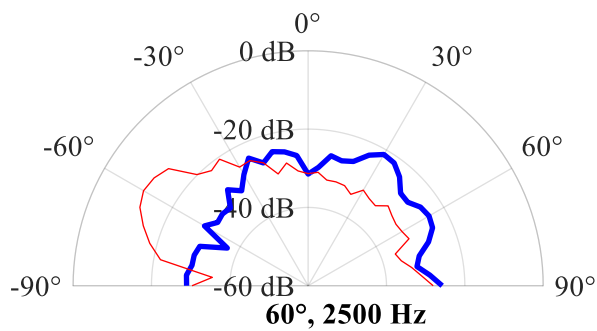
B.14 2D QRD 30°





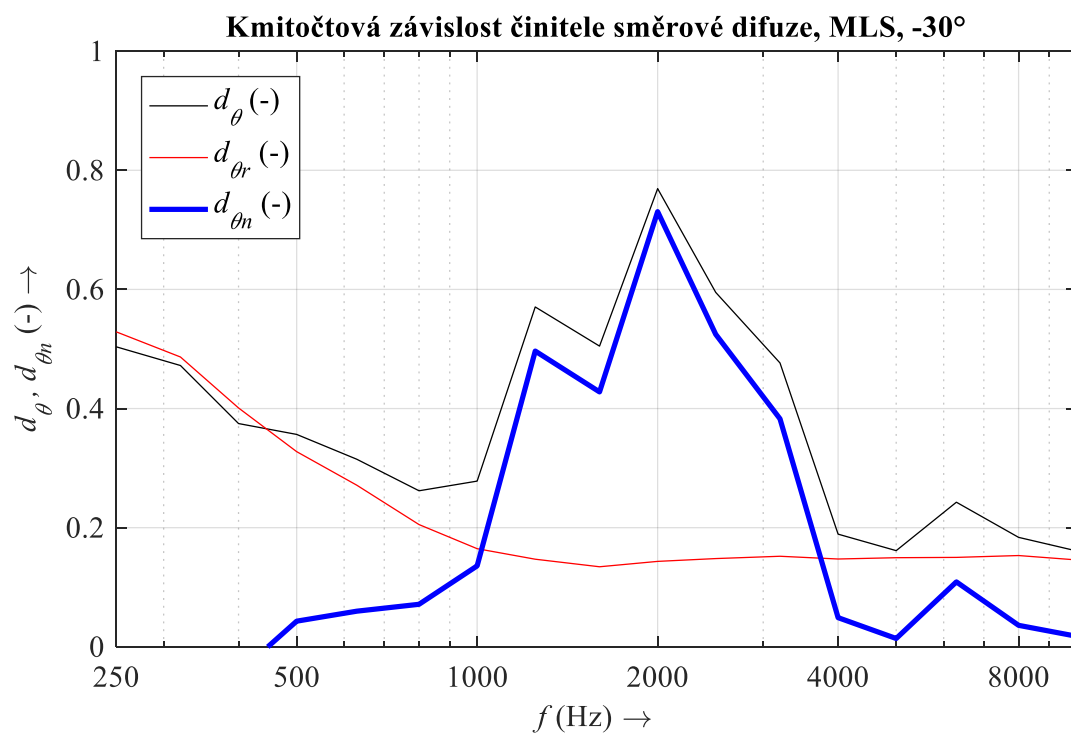
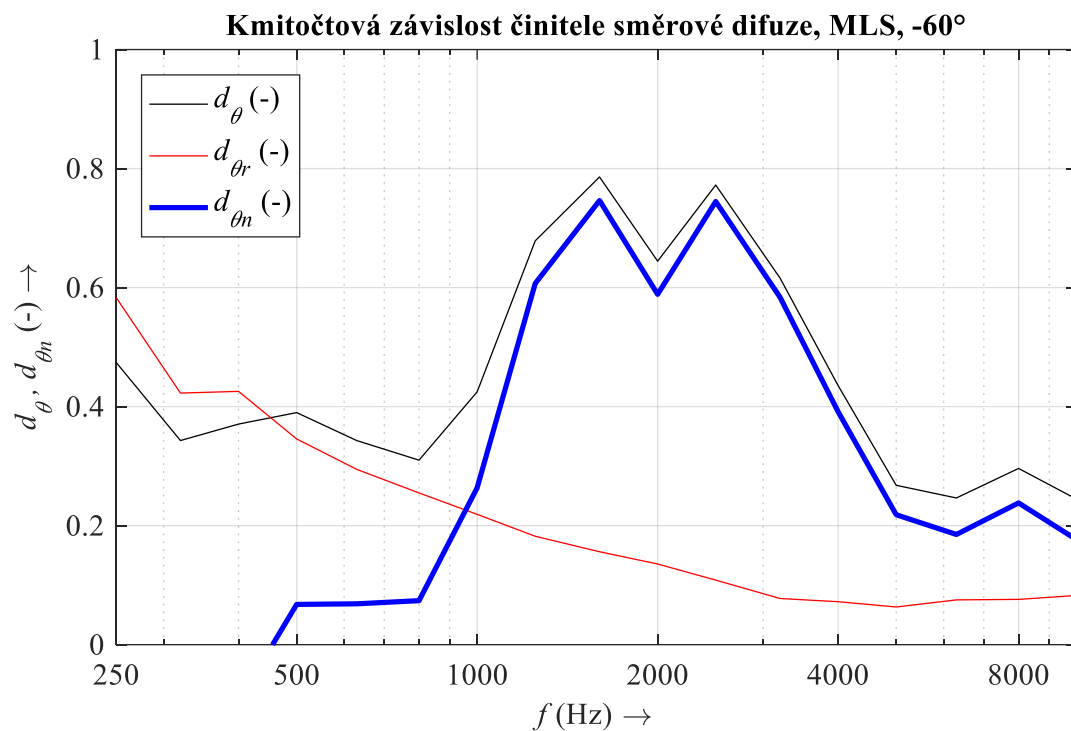
B.15 2D QRD 60°

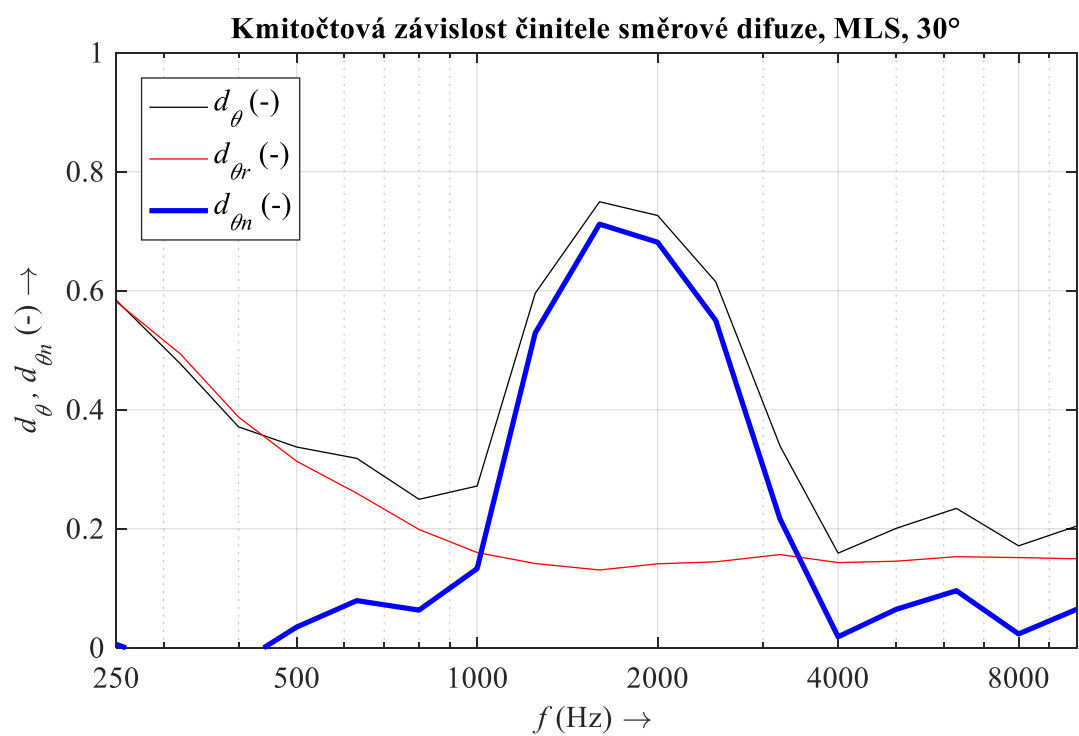
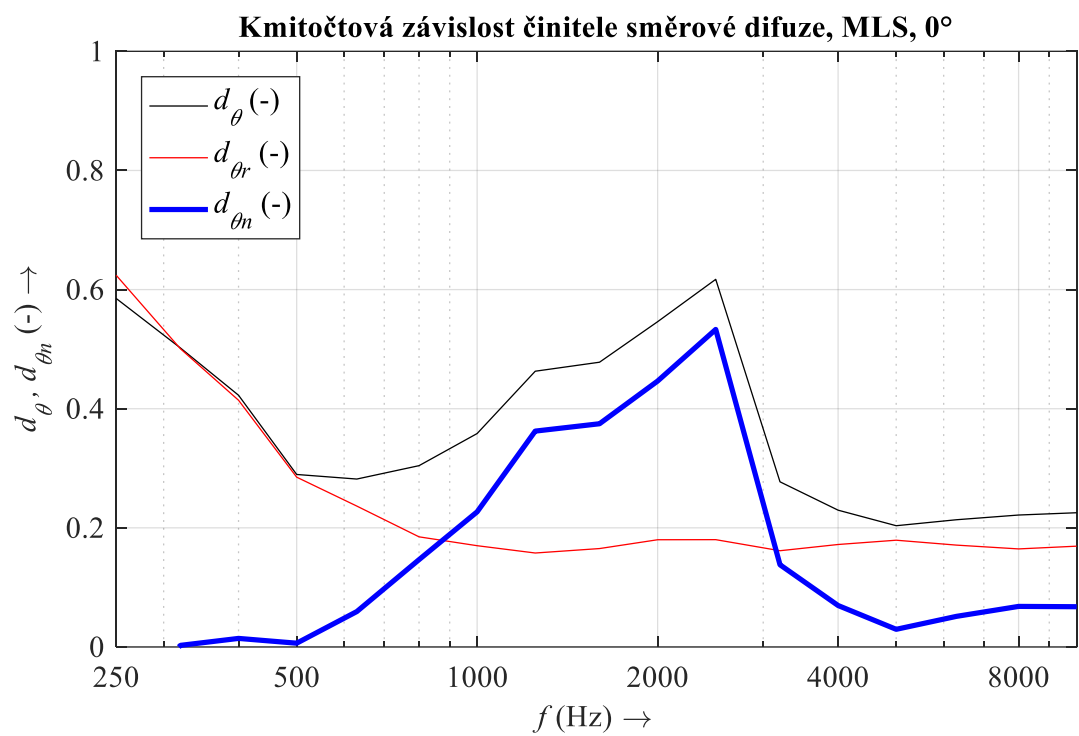


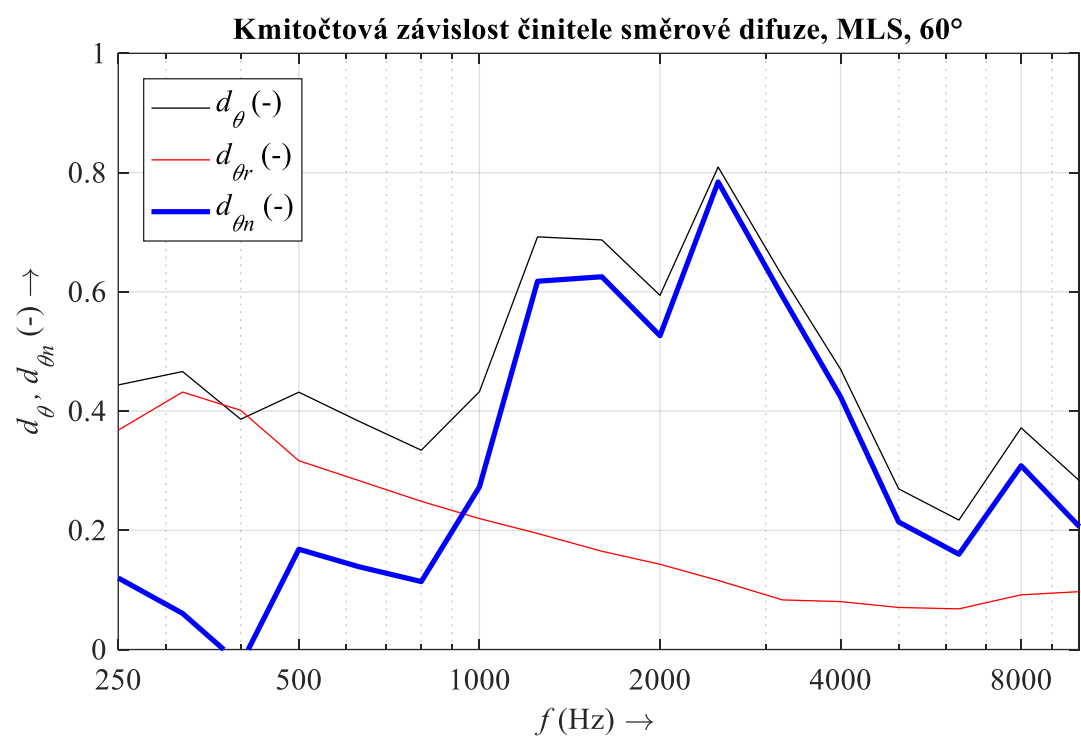


C KMITOČTOVÁ ZÁVISLOST ČINITELE SMĚROVÉ DIFUZE

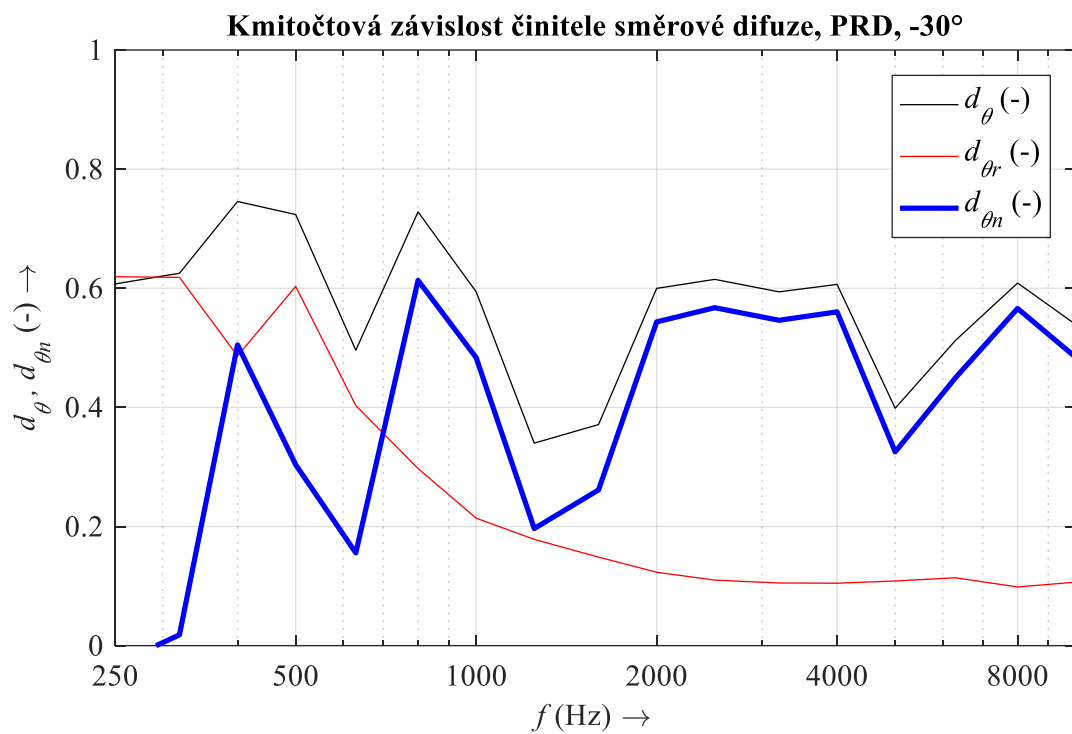
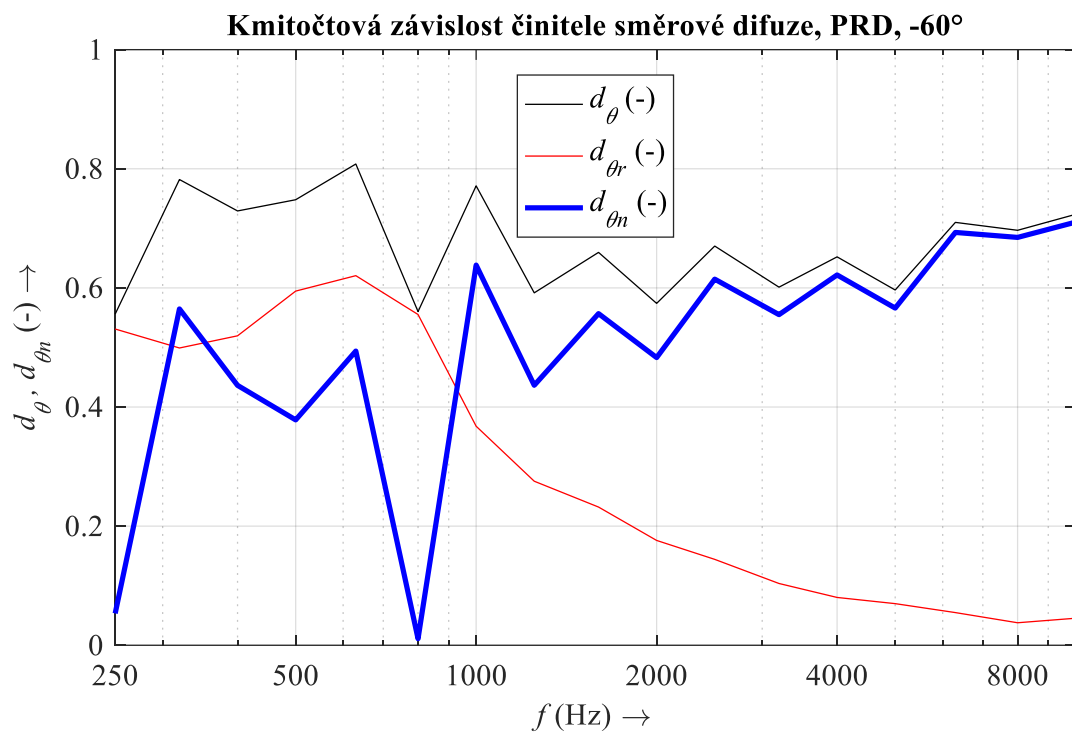
C.1 MLS

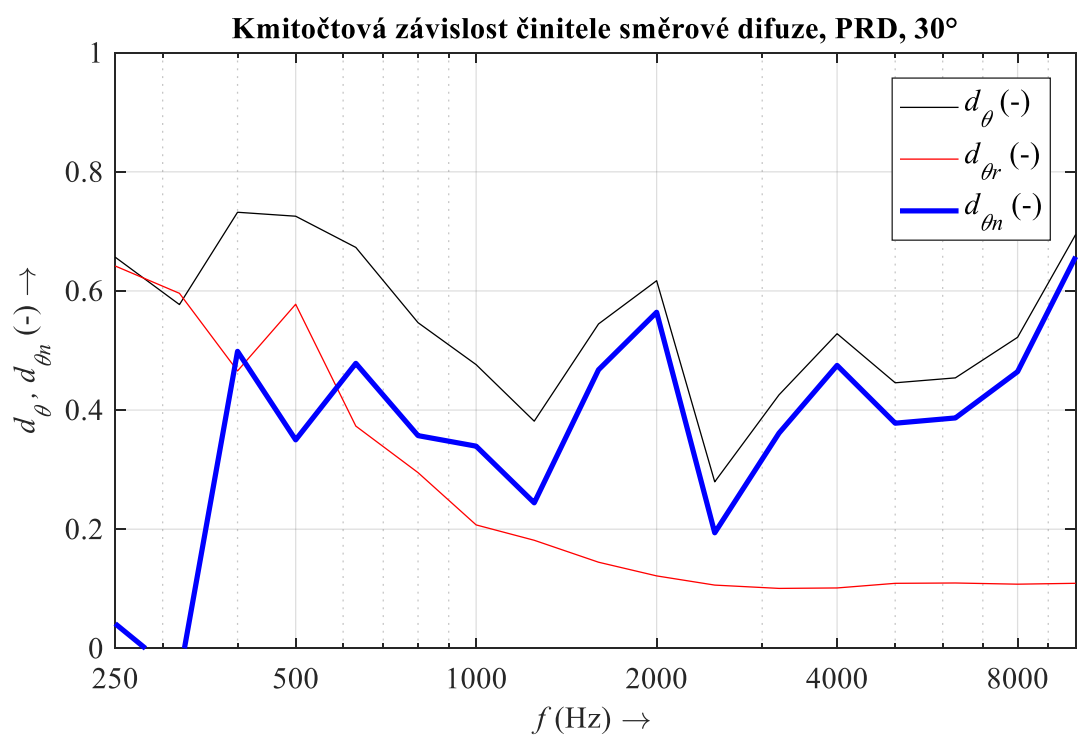
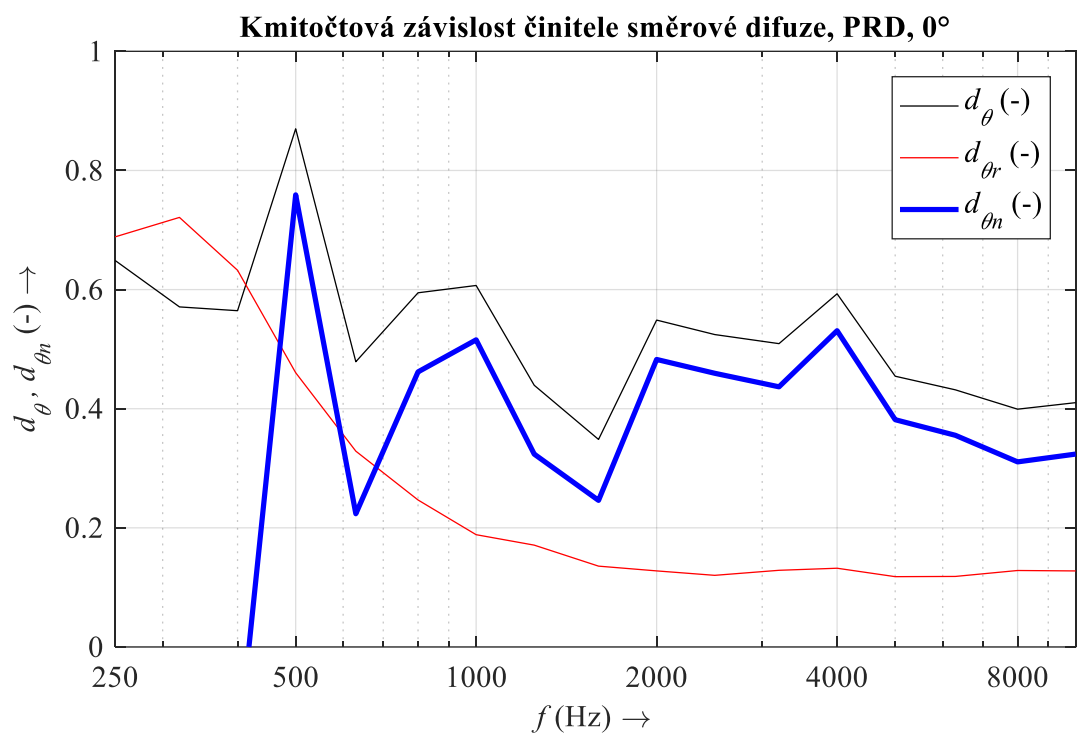


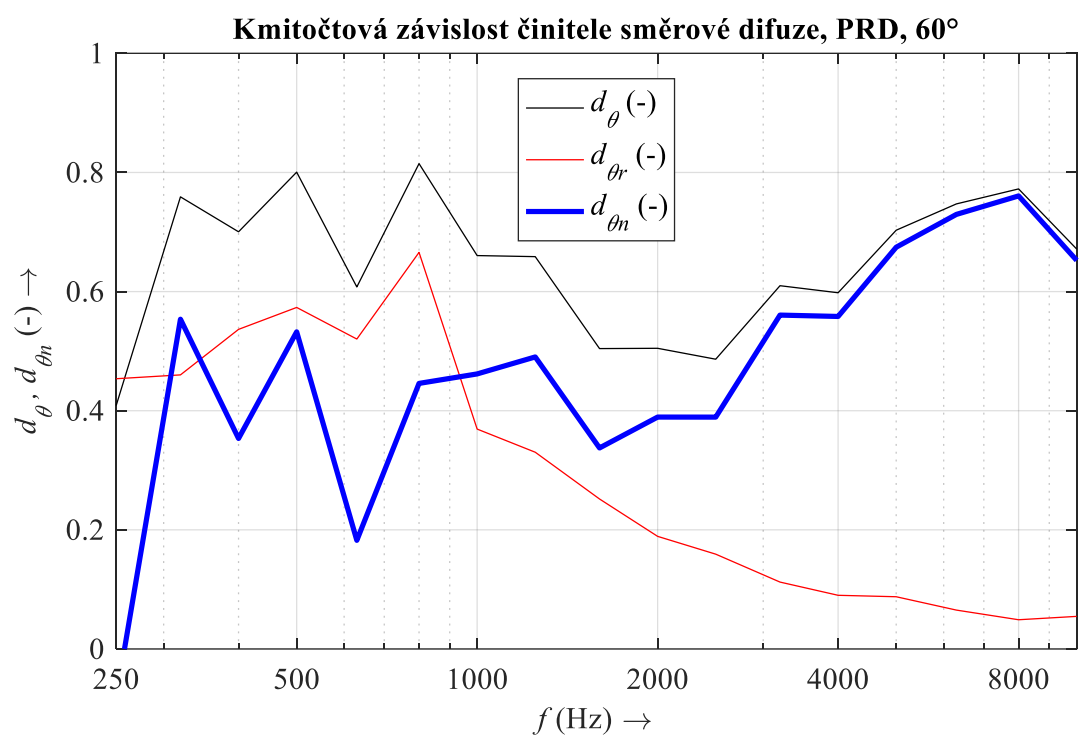




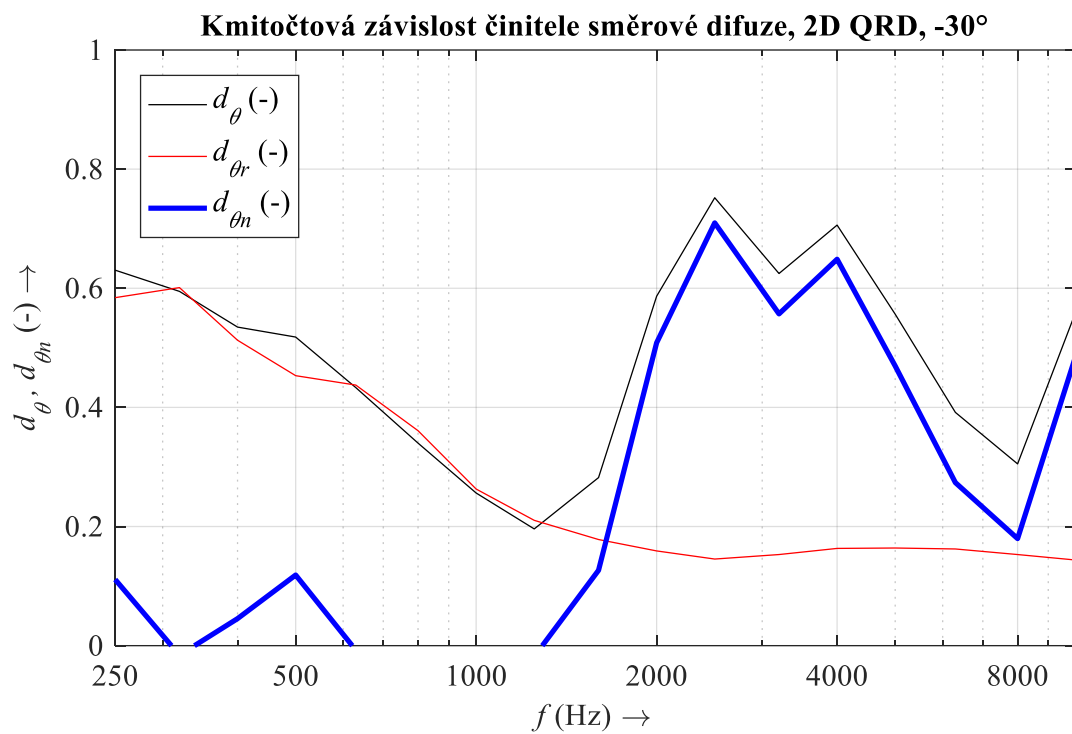
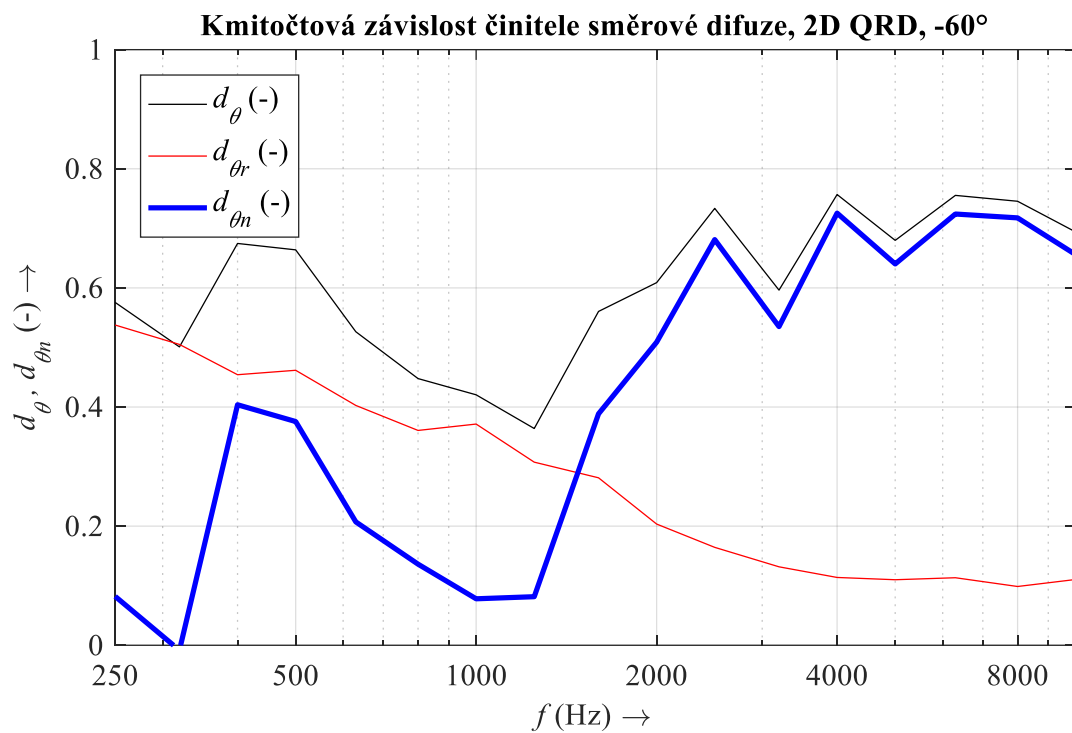
C.2 PRD

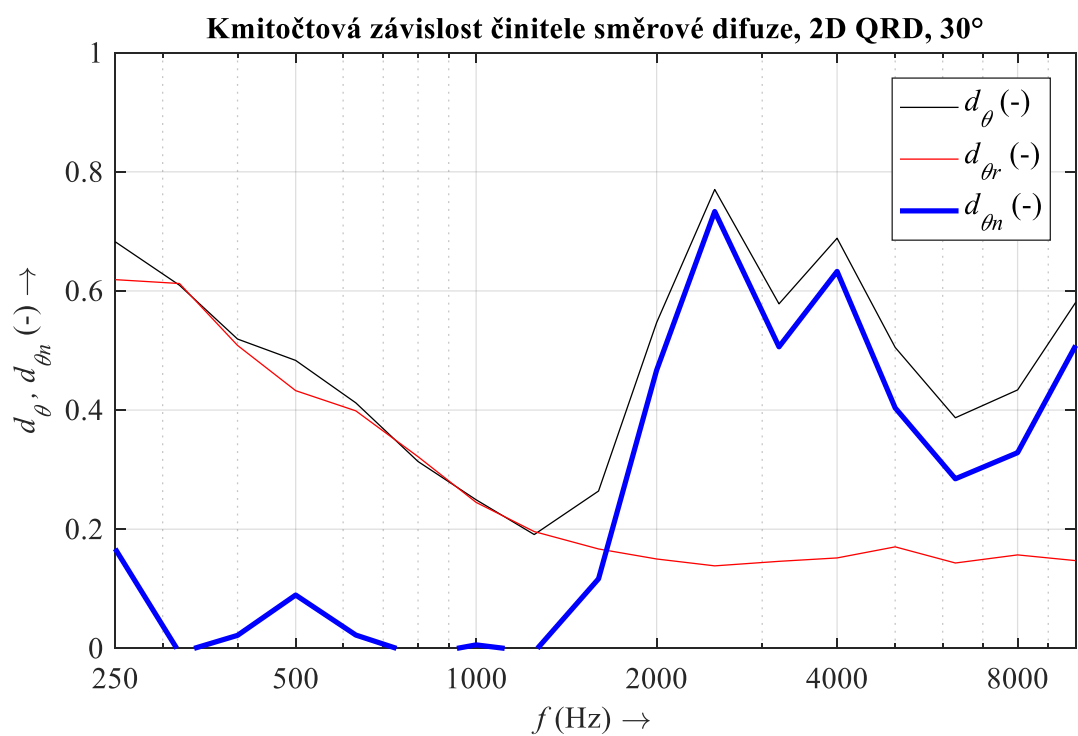
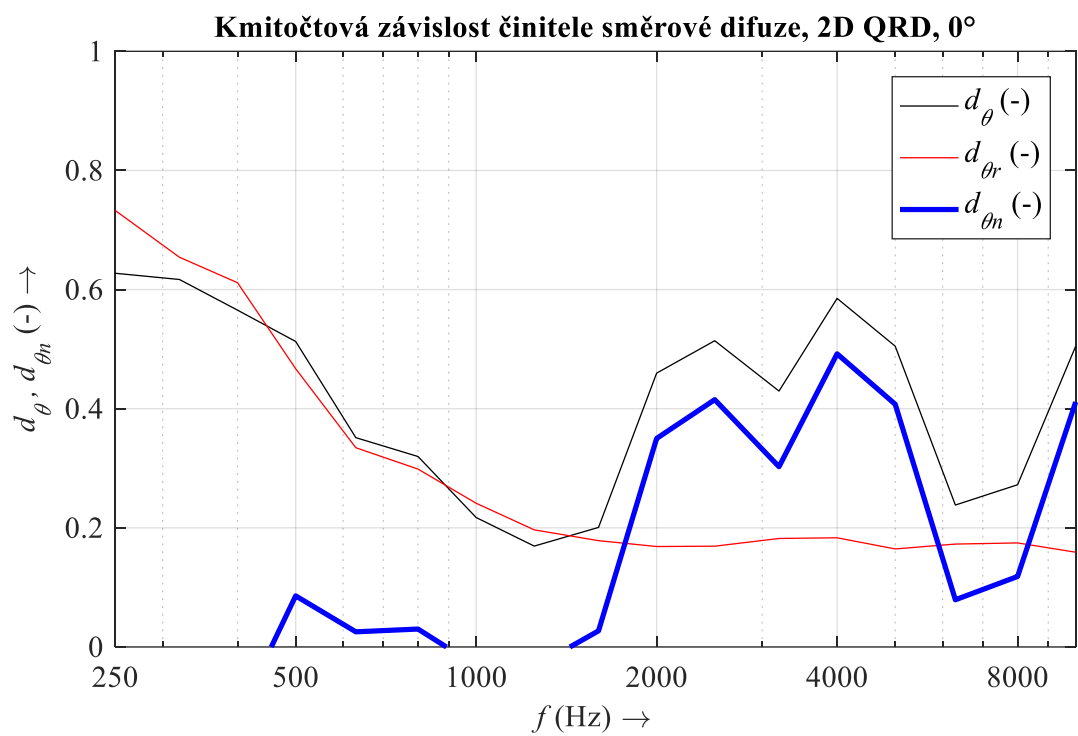


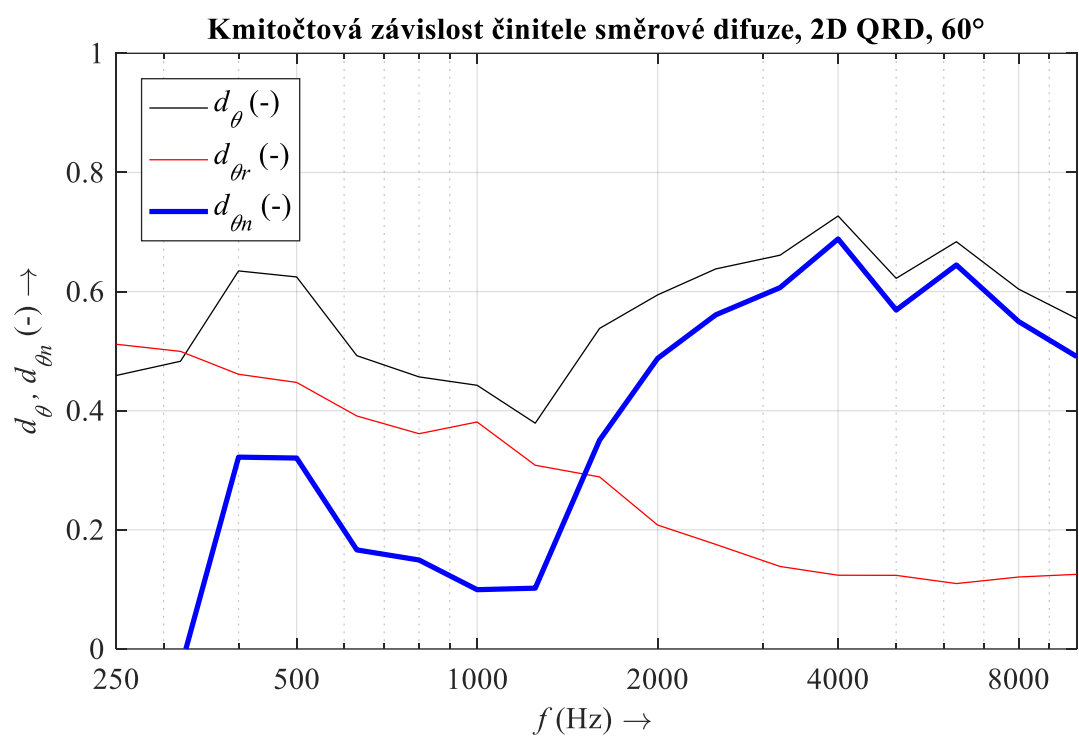




C.3 2D QRD







D MĚŘENÍ

Soupis všech zařízení a nástrojů potřebných k měření:

- Měřicí aparatura:
 - 11x mikrofon Audix TM1
 - 8x mikrofon Earthworks M30
 - 3x RME Micstasy
 - RME ADI-2
 - RME MADIface USB
 - Aktivní reproduktor Event 20/20v3
 - Kabele (mikrofony, reproduktor)
 - Prodlužovací kabel 25m
 - Notebook
- Metr (10m)
- Úhloměr – tisk 2 x A3
- Nivelační laser
- Maskovací páska
- Lat' (3m) pro přesné vykreslení mikrofonního pole
- Úhelník

E PŘÍLOHY NA DVD

E.1 Výpočet a návrh difuzoru MLS

E.2 Výpočet a návrh difuzoru PRD

E.3 Výpočet a návrh difuzoru 2D QRD

E.4 Specifikace měřícího aparátu

E.5 Matlab