

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ 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

**METODA PRO SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ SMĚRU
PŘÍCHÁZEJÍCÍHO ZVUKU PRO SYSTÉMY OBJEKTIVNĚ
ZALOŽENÉHO AUDIA**

METHOD FOR SUBJECTIVE ASSESSMENT OF DIRECTION OF ARRIVAL FOR OBJECT-BASED AUDIO
SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Hořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Pavel Hořák

ID: 152600

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Metoda pro subjektivní hodnocení směru přicházejícího zvuku pro systémy objektově založeného audia

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Ověřte akustické a elektroakustické parametry laboratoře SC1.22, zda vyhovuje kritériím doporučení IEC 60268-13, ITU-R BS.1116-1 a EBU 3267 pro poslechové místnosti. Pokud některé z parametrů nebudou splněny, pokuste se navrhnout a realizovat technická opatření k dosažení požadovaných parametrů. Prostudujte existující metody pro subjektivní hodnocení směru přicházejícího zvuku v otevřených vícekanálových audio systémech a navrhnete modifikace metod určených pro uzavřené zvukové systémy. Realizujte algoritmus vektorově-bázového panoramování pro horizontální konfiguraci reproduktorů a v laboratoři proveďte sadu experimentů, pomocí kterých porovnáte přesnost a náročnost metod hodnocení směru přicházejícího zvuku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BECH, S., ZACHAROV, N. Perceptual Audio Evaluation - Theory, Method and Application, 1st Ed. Wiley, 2006. ISBN 978-0470869239

[2] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R BS.1116-1, Methods for the Subjective Assessment of Small Impairments in Audio Systems Including Multichannel Sound System.

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 1.6.2016

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

Konzultant bakalářské práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o problematice subjektivního hodnocení přicházejícího zvuku. V práci jsou zhodnocena praktická měření akustických a elektroakustických parametrů místnosti a reproduktorů a řešeny jejich úpravy. Hlavním výstupem práce je aplikace algoritmu vektorově bazového panorámování na praktických experimentech a zhodnocení dílčích výsledků.

KLÍČOVÁ SLOVA

VBAP, vektorově bazové panorámování, směr přicházejícího zvuku, lokalizace, subjektivní hodnocení, akustika, elektroakustické kritéria, akustické kritéria

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with issues concerning subjective assessment of direction of arrival. Measuring of electroacoustics and acoustics parameters are evaluated and described in this thesis; the treatment of these parameters is required. Main output of this work is the vector based panning and its practical usage and evaluation.

KEYWORDS

VBAP, vector based amplitude panning, direction of arrival, localization, acoustics, electroacoustics criterion, acoustics criterion.

HOŘÁK, Pavel *Metoda pro subjektivní hodnocení směru přicházejícího zvuku pro systémy objektově založeného audia*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 76 s. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Metoda pro subjektivní hodnocení směru přicházejícího zvuku pro systémy objektově založeného audia“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

podpis autora

OBSAH

1	Teoretický úvod	12
1.1	Zvukové pole	12
1.1.1	Difuzní pole	12
1.1.2	Módy místnosti	12
1.2	Doba dozvuku	13
1.3	Prvotní odrazy	13
1.4	Hluk pozadí	13
1.5	Frekvenční charakteristika	14
1.6	Směrová charakteristika	14
2	Akustická kritéria poslechových místností	16
2.1	Rozměry místnosti	16
2.2	Hluk pozadí	18
2.3	Doba dozvuku	19
2.4	Prvotní odrazy	21
3	Elektroakustická kritéria	22
3.1	Frekvenční charakteristika reproduktorů	22
3.1.1	Frekvenční charakteristika v bezodrazové komoře	23
3.1.2	Frekvenční charakteristika v laboratoři SC1.22	23
3.2	Směrová charakteristika reproduktorů	26
3.2.1	Frekvenční/směrová odezva	27
3.3	Transient fidelity	29
3.4	Nelineární zkreslení	30
3.5	Dynamický rozsah	30
3.6	Souhrnné výsledky ITU-R BS.1116-1	32
3.7	Souhrnné výsledky EBU 3276	33
3.8	Závěrečné shrnutí výsledků a jejich řešení	33
4	Psychoakustické zákonitosti	35
4.1	Lokalizace zdroje zvuku	35
4.2	Přenosová funkce hlavy	36
4.3	Jev priority - Haasův jev	37
4.4	Van de Boerova závislost směrové lokalizace	37
4.5	Vektorově amplitudové polohování	38
4.6	VBAP panorámování v Matlabu	39

5	Metodika psychoakustických experimentů	40
5.1	Psychoakustický experiment a jeho vyhodnocení posluchačem	40
5.1.1	Nominální škála	41
5.1.2	Pořadová škála	41
5.1.3	Intervalová škála	41
5.1.4	Poměrová škála	42
5.2	Metody měření psychoakustických experimentů	42
5.2.1	Seřazování zvukových podnětů do pořadí	42
5.2.2	Posuzování zvukových podnětů na subjektivních posuzovacích škálách	43
5.2.3	Nastavování zvukových podnětů	45
6	Zhodnocení experimentu VBAP panorámování	46
6.1	Použitý elektroakustický řetězec	46
6.2	Testování	46
7	Úprava elektroakustických kritérií	49
7.1	Úprava frekvenční charakteristiky	49
7.2	Úprava rozmístění reproduktorů	51
8	Vyhodnocení experimentů	52
8.1	Metoda 1	52
8.2	Metoda 2	55
8.3	Metoda 3	57
8.4	Metoda 4	59
8.5	Shrnutí a porovnání výsledků metod	59
8.5.1	Statistické zpracování měření	61
8.5.2	Zhodnocení experimentů	63
9	Závěr	64
	Literatura	65
	Seznam příloh	66
	A prvotní odrazy	67
	B Směrová charakteristika	69
	C Naměřené hodnoty všech respondentů	71
	D Obsah přiloženého CD	76

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Pudorys místnosti a pozice reproduktorů společně s posluchačem. . .	17
2.2	Křivky NR10 a NR15 a naměřené hodnoty v laboratoři SC1.22	18
2.3	Kritéria doby dozvuku podle ITU-R BS.1116-1. Hodnoty v prvním grafu měřeny pomocí MLS, spodní pomocí růžového šumu.	19
2.4	Kritéria doby dozvuku podle IEC 60268-13. Měřeno pomocí MLS. Tato kritéria nesplňuje žádná z naměřených hodnot.	20
2.5	Barevně odlišené průběhy, které vyjadřují časovou souslednost odrazů v místnosti od stěn. Graficky jsme záměrně volili tohle zobrazení do stejného grafu. V našem konkrétním případě totiž potřebujeme pouze sledovat, zda se některý z prvotních odrazů dostane nad hranici -10 dB. Lze si povšimnout, že první odraz přichází cca 3-4ms po přímém zvuku, což znamená rozdíl v dráze přímé a odražené vlny 1-1,4m. Lze odhadnout, že se jedná o odraz od podlahy(pomocí rovnostranného trojúhelníku s výškou 1,2m). Další odraz přichází po 7-8 ms - lze předpokládat, že se jedná o odraz od stropu (opět pomocí rovnostranného trojúhelníku, tentokrát o výšce 2m).	21
3.1	Frekvenční charakteristika Genelec1032A v bezodrazové komoře. Vykresleno v relativních hodnotách vůči L_m každého monitoru - tedy hodnota 0 dB je v absolutním měřítku L_m každého reproduktoru. . .	22
3.2	Frekvenční charakteristika v bezodrazové komoře - tentokrát měřena pomocí softwaru APx500.	23
3.3	Frekvenční charakteristika v laboratoři SC1.22 podle normy BS.1116-1.	24
3.4	Frekvenční charakteristika v laboratoři SC1.22 podle normy EBU 3276.	24
3.5	Rozdíl hladin akustického tlaku ΔL vybuzeného v ose reproduktoru a při odklonu 30°. Frekvenční rozmezí je 500Hz - 10kHz.	26
3.6	Rozdíl hladin akustického tlaku ΔL vybuzeného v ose reproduktoru a při odklonu 30°. Frekvenční rozmezí je 500Hz - 10kHz.	27
3.7	Rozdíl hladin akustického tlaku ΔL vybuzeného v ose reproduktoru a při odklonu 10°. Frekvenční rozmezí je 500Hz - 10kHz.	27
3.8	Graf ukazuje překročení hodnoty 1/e z maximální amplitudy - k překročení došlo v čase cca 1,1ms, což splňuje podmínky obou norem.	29
3.9	Naměřené hodnoty nelineárního zkreslení(THD ratio) pro reproduktor č.6. K měření jsme použili software APx500.	30
3.10	Grafické znázornění vlastního šumu reproduktorů. Všechny reproduktory splňují kritérium $L_{noise} < 10\text{dBA}$	31

4.1	Různé pozice zdroje a hlavy, které vytváří při odklonu zdroje od mediální roviny o úhel α délkový rozdíl ΔL	36
4.2	Součet vektorů definujících umístění reproduktorů. Vektor p je vektorem virtuálního zdroje.	38
5.1	Návrh grafického škálování pro lokalizační experiment pomocí úsečky.	44
5.2	Návrh grafického škálování pro lokalizační experiment pomocí kruhového grafického rozhraní. Stupnice rozdělena po 5° částech.	45
6.1	Experimentální pozice reproduktorů pro zkušební experiment.	47
7.1	EQ křivka z.	49
7.2	Frekvenční charakteristika v laboratoři SC1.22 podle normy BS.1116-1.	50
7.3	Frekvenční charakteristika v laboratoři SC1.22 podle normy EBU 3276.	50
7.4	Rozmístění reproduktorů při závěrečném experimentu.	51
8.1	Naměřené hodnoty úhlů v závislosti na vstupní hodnotě úhlu γ	53
8.2	Absolutní odchylky od vstupní hodnoty úhlu γ	54
8.3	Průměr a medián odchylek vztažených ke vstupní hodnotě úhlu γ	54
8.4	Naměřené hodnoty úhlů v závislosti na vstupní hodnotě úhlu γ	55
8.5	Absolutních odchylky od vstupní hodnoty úhlu γ	56
8.6	Průměr a medián odchylek vztažených ke vstupní hodnotě úhlu γ	56
8.7	Naměřené hodnoty úhlů v závislosti na vstupní hodnotě úhlu γ	57
8.8	Rozdíl absolutních odchylek od vstupní hodnoty úhlu γ	58
8.9	Průměr a medián odchylek vztažených ke vstupní hodnotě úhlu γ	58
8.10	Procentuální vyjádření úhlů nad hodnotou vstupního úhlu γ	59
8.11	Naměřené hodnoty úhlů v závislosti na vstupní hodnotě úhlu γ	60
8.12	Průměr a medián odchylek vztažených ke vstupní hodnotě úhlu γ	61
8.13	Směrodatné odchylky jednotlivých metod.	62
8.14	Procentuální vyjádření počtu respondentů nad hodnotou vstupního úhlu γ	62
A.1	Prvotní odrazy monitorů 1, 2 a 3 (řazeno chronologicky).	67
A.2	Prvotní odrazy monitorů 4, 5 a 6 (řazeno chronologicky).	68
B.1	Polární graf směrové charakteristiky reproduktoru č.4 pro pásma 500 - 2500 Hz.	69
B.2	Polární graf směrové charakteristiky reproduktoru č.4 pro pásma 3150 - 10000 Hz.	70
C.1	Hodnoty — respondent č.1.	71
C.2	Hodnoty — respondent č.2.	71
C.3	Hodnoty — respondent č.3.	72
C.4	Hodnoty — respondent č.4.	72
C.5	Hodnoty — respondent č.5.	73

C.6	Hodnoty — respondent č.6.	73
C.7	Hodnoty — respondent č.7.	74
C.8	Hodnoty — respondent č.8.	74
C.9	Hodnoty — respondent č.9.	75
C.10	Hodnoty — respondent č.10.	75

SEZNAM TABULEK

2.1	Důležité vzdálenosti v místnosti.	17
3.1	Shrnující tabulka splnění akustických a elektroakustických kritérií podle ITU-R BS.1116-1.	32
3.2	Shrnující tabulka splnění akustických a elektroakustických kritérií podle EBU 3276.	33
5.1	Tabulka hodnot pro numerické vyhodnocení - hodnoty 0 180. Hodnoty jsou kvůli názornosti pouze ilustrační - při měření bude použit menší krok ve stupních.	43
5.2	Tabulka hodnot pro numerické vyhodnocení. Hodnoty jsou kvůli názornosti pouze ilustrační - při měření bude použit menší krok ve stupních	44

ÚVOD

Akustické parametry poslechových prostor jsou důležitou součástí elektroakustického řetězce reprodukce. Předmětem závěrečné práce je tyto parametry změřit a vyhodnotit – tedy vyhodnotit akustická a elektroakustická kritéria daná normou ITU BS.1116-1. Následným úkolem bude provést detailní analýzu naměřených dat, přičemž při zjištění nedostatků se musí navrhnout patřičné řešení.

V této práci je dále zkoumáno subjektivní vnímání směru přicházejícího zvuku, k čemuž předchází analýza kritérií podle norem. Ke zkoumání směru přicházejícího zvuku je neprve třeba navrhnout program pomocí vhodného panorámování. Navržený program je v prostředí Matlab, který vytváří WAV soubory pro 6ti kanálovou reprodukci. Vytvořené audio stopy jsou výsledkem panorámování pomocí VBAP (vector based amplitude panning). Testování samotných vzorků by mělo probíhat v laboratoři SC1.22 za pomoci reproduktorů Genelec1032A. Cílem práce je tuto metodu prozkoumat na větším počtu respondentů a celý experiment zanalyzovat.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 Zvukové pole

Existují 2 typy zvukového pole - volné a uzavřené. Naše experimenty budou probíhat v uzavřeném poli, proto se soustředíme na problematiku zvukového pole v uzavřeném prostoru.

Hlavním jevem, který probíhá v uzavřeném prostoru buzeném zdrojem zvuku, je odraz od stěn. Charakter odrazů závisí na různých faktorech - např. tvar a velikost místnosti, materiál stěn a podobně. Odrazy v podobě zvukových vln přichází z různých směrů v různé intenzitě. V teoreticky ideálním zvukovém poli - difúzním poli - přichází odrazy ze všech směrů ve stejné intenzitě. [7]

1.1.1 Difúzní pole

Difúzní pole je definováno následovně: [7]

- hustota zvukové energie je stejná ve všech místech prostoru
- četnost zvukových vln přicházejících z různých směrů je stejně pravděpodobná
- zvukové vlny mají náhodnou fázi

1.1.2 Módy místnosti

S difúzitou zvukového pole souvisí také rozložení módů v místnosti. Módy vznikají na základě vlastních kmitů, které jsou závislé na akustických vlastnostech prostoru. Modální hustota, neboli hustota zvukové energie zapříčiněná módy, určuje rozložení zvukové energie. Počet módů závisí na frekvenci, což určuje následující rovnice

$$N = \frac{4}{3} \frac{\pi V}{c^3} f^3 + \frac{\pi S}{4c^2} f^2 + \frac{L}{8c} f \quad (1.1)$$

kde V je objem místnosti, S je obsah stěn a L je délka hran. [7]

Tato rovnice udává, kolik vlastních módů v prostoru se vytvoří od frekvence 0 Hz po určitou frekvenci f . Ze vztahu se dá lehce odvodit, že s přibývajícím frekvencí bude narůstat počet módů exponenciálně.

V praxi je důležitým poznatkem to, že při nízkých kmitočtech a malých místnostech je počet módů velmi malý. Pokud dosadíme parametry místnosti do rovnice 1.1 vyjdou nám následující závislosti — v rozsahu frekvencí 20-50Hz máme pouze 5 módů místnosti a v rozsahu 20-100Hz je to 30 módů. Pro frekvenci 16kHz máme $6,6 \cdot 10^7$ módů. Tyto hodnoty demonstrují, jak je zvukové pole z hlediska difúzity nestálé při nízkých kmitočtech.

1.2 Doba dozvuku

Doba dozvuku je definována jako doba, za kterou poklesne zvuková hladina o 60dB poté co je zdroj zvuku vypnut. V praxi se vyhodnocovací interval volí kratší — nejčastěji od -5 dB po -25 dB nebo od -5 dB do -35dB. Poté se doba dozvuku vypočítá [8]

$$T = 60dB \frac{(t_{-25}) - (t_{-5})}{(-5dB) - (-25dB)} \quad (1.2)$$

V některých případech, zejména v hudební reprodukci, se zavádí prvotní doba dozvuku - "early decay time(EDT)", která se určuje z poklesu o -10 dB.

1.3 Prvotní odrazy

Šíření zvukových vln v prostoru můžeme z hlediska posluchače rozdělit na 2 případy - přímý zvuk a odražený zvuk. Odražený zvuk musí zákonitě urazit delší vzdálenost, nežli přímý. Proto také přichází k posluchači vždy se zpožděním. Obvykle jsou tyto odrazy slabější z důvodu redukce intenzity vlivem tření vzduchu a dále také z důvodu absorpce části energie při nárazu na pohltivý povrch stěn. [8]

Počet těchto odrazů je časově závislý. V praxi nás většinou zajímají ty odrazy, které přichází bezprostředně po přímém zvuku. Množství odrazů závisí na objemu místnosti V a na časovém úseku, který je pro nás podstatný [7]:

$$\Delta N \approx \frac{4\pi c^3 t^3}{3V} \quad (1.3)$$

Pro místnost SC1.22 s rozměry 7,47m x 6,37m x 3,2m je počet odrazů v prvních 15ms po přímém zvuku

$$\Delta N_{15ms} \approx 3,6 \quad (1.4)$$

což nám i potvrdilo praktické měření - viz. graf 2.5.

1.4 Hluk pozadí

Ideálním případem je místnost, kde nemáme žádné nežádoucí zvuky z okolního prostředí. Tento případ nemůže z fyzikálního hlediska nikdy nastat, nicméně konstrukcí místností a budov jsme okolní hluk schopni snížit na hodnoty blízké se prahu slyšitelnosti našeho sluchu. Citlivost lidského ucha je frekvenčně závislá - od toho se odvíjí toleranční pásmo hluku pozadí.

Existuje několik typů křivek, které určují toleranci hluku pozadí - norma ITU-R BS.1116-1 pracuje s NR křivkami - "noise rating curves", neboli také známé jako

NC křivky (noise criterion). Leo Beranek definuje například NCB křivky nebo RC křivky, které jsou použity speciálně v akustice koncertních sálů. [7]

1.5 Frekvenční charakteristika

Významnou vlastností reproduktoru je frekvenční závislost hodnoty akustického tlaku v ose reproduktoru. Pokud provádíme experimenty s reproduktorem, je nezbytně nutné mít frekvenční závislost co nejvíce konstatní. Z hlediska konstrukčního však nemůžeme nikdy docílit tzv. rovné charakteristiky — důležitým faktorem, který frekvenční charakteristiku ovlivňuje, je totiž akustická vlastnost místnosti, ve které reprodukuje zvuk.

Norma, která se k reproduktorům vyjadřuje, uvádí tzv. "operation room response curve". Ve volném překladu můžeme říct, že je to frekvenční charakteristika reproduktoru umístěného v prostoru. Pro tento případ je uvedeno tolerační pásmo, které je uvedeno v grafech našeho měření - viz. graf 3.3.

Dále se norma vyjadřuje k charakteru reproduktoru v bezodrazové komoře, kdy uvádí konstantní tolerační pásmo 4dB - opět můžeme vidět v grafu 3.2.

1.6 Směrová charakteristika

Směrová charakteristika udává frekvenční vlastnosti ve všech vertikálně orientovaných směrech v okolí reproduktoru. Z fyzikální postaty zvukových vln vyplývá, že na nízkých frekvencích bude reproduktor téměř všesměrový, tedy hodnota akustického tlaku na kružnici o poloměru 1m od horizontální osy reproduktoru bude téměř konstantní. Tento konstantní charakter se mění se zvyšující se frekvencí a reproduktor se stává více směrový.

K tomuto chování se opět vyjadřuje norma BS. 1116-1, která neudává toleranční hodnoty akustického tlaku, ale udává tzv. index směrovosti. Index směrovosti je definován jako poměr mezi hodnotou akustického tlaku v akustické ose p_{axis} reproduktoru a průměrnou hodnotou akustického tlaku p_{avg} vyzářeného ve všech směrech. [6]

$$C = 10 \log \frac{p_{axis}^2}{p_{avg}^2} \quad (1.5)$$

Pokud předchozí rovnici výjádříme pomocí hladin akustického tlaku, můžeme index směrovosti spočítat jednoduše z naměřených hodnot jako

$$C = L_{axis} - L_{avg} \quad (1.6)$$

Index směrovosti je vyjádřen v decibelech a podle BS. 1116-1 má splňovat následující kritéria v rozmezí frekvencí 500 Hz až 10 kHz:

$$6dB \leq C \leq 12dB \quad (1.7)$$

2 AKUSTICKÁ KRITÉRIA POSLECHOVÝCH MÍSTNOSTÍ

Klíčovou záležitostí pro naši další práci a výzkum jsou akustické parametry. Zkoumané parametry, které budou sledovány, jsou určeny v normách IEC 60268-13, ITU-R BS.1116-1 a EBU 3267. Normy uvádějí kritéria akustických parametrů - časové, hlasitostní kritéria a pod. Hlavním cílem těchto kritérií je docílit stabilního poslechového prostředí. Konkrétní požadavky akustických prostor budou popsány v následujících podkapitolách.

V naší práci bude primárním zdrojem norma ITU-R BS.1116-1, která taktéž obsahuje některé části z norem EBU 3267 a IEC 60268-13. Tyto normy se výrazně neliší v kritériích, maximálně upravují rozsah, nebo některé hodnoty kritérií. Tam, kde se budou lišit normy výrazným způsobem uvedeme vždy požadavky obou typů norem, graficky oddělené a popsané. Pokud se výrazně lišit nebudou, v sumačních tabulkách na konci kapitoly 3 bude uvedeno případné splnění či nesplnění daného parametru normy.

2.1 Rozměry místnosti

Samotné rozměry místnosti mají vliv na obsah plochy podlahy a dále pak musíme dbát i na doporučené poměry stran. Doporučená plocha podlahy místnosti je pro vícekanálovou reprodukci 30-70 m². Poměry mezi délkou(*l*), šířkou(*w*) a výškou(*h*) se volí za účelem dosažení rovnoměrného šíření stojatých vln v místnosti [3]:

$$1,1(w/h) \leq (l/h) \leq (4,5(w/h) - 4) \quad (2.1)$$

navíc musí být splněny podmínky

$$(w/h) < 3; (l/h) < 3. \quad (2.2)$$

Při rozměrech laboratoře SC1.22 7,47m x 6,37m x 3,2m jsou tedy splněny poměry

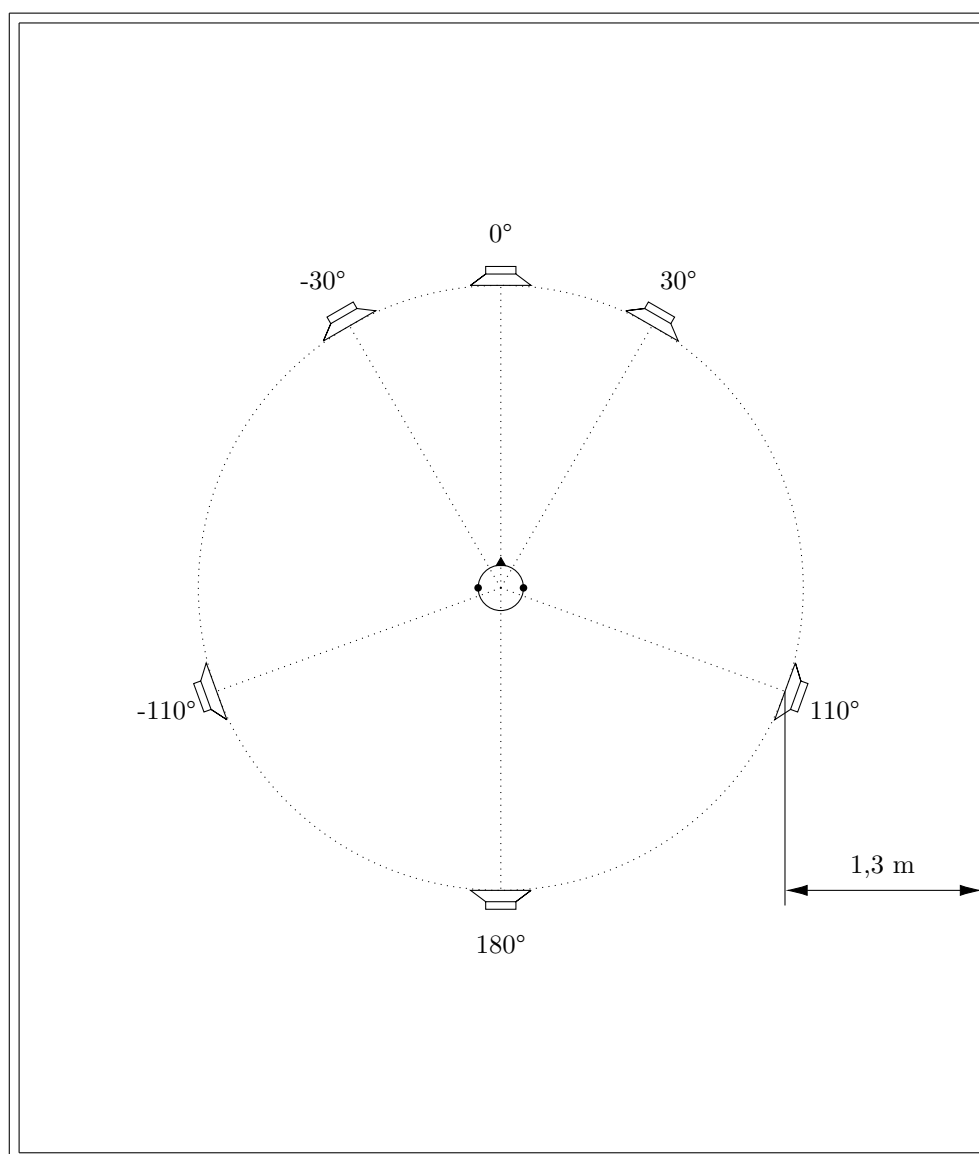
$$2,19 \leq 2,33 \leq 4,95 \quad (2.3)$$

$$1,99 < 3; 2,33 < 3. \quad (2.4)$$

Další rozměry, které musíme v místnosti ohlídat jsou: základní šířka *B*, poslechová vzdálenost *D* a minimální vzdálenost od stěny.

	Požadavek	Volba rozměru
Základní šířka B	2- 3 m	2 m
poslechová vzdálenost D	max. 2 - 1,7 B	$1B=2$ m
minimální vzdálenost od stěny	min. 1 m	1,3 m

Tab. 2.1: Důležité vzdálenosti v místnosti.

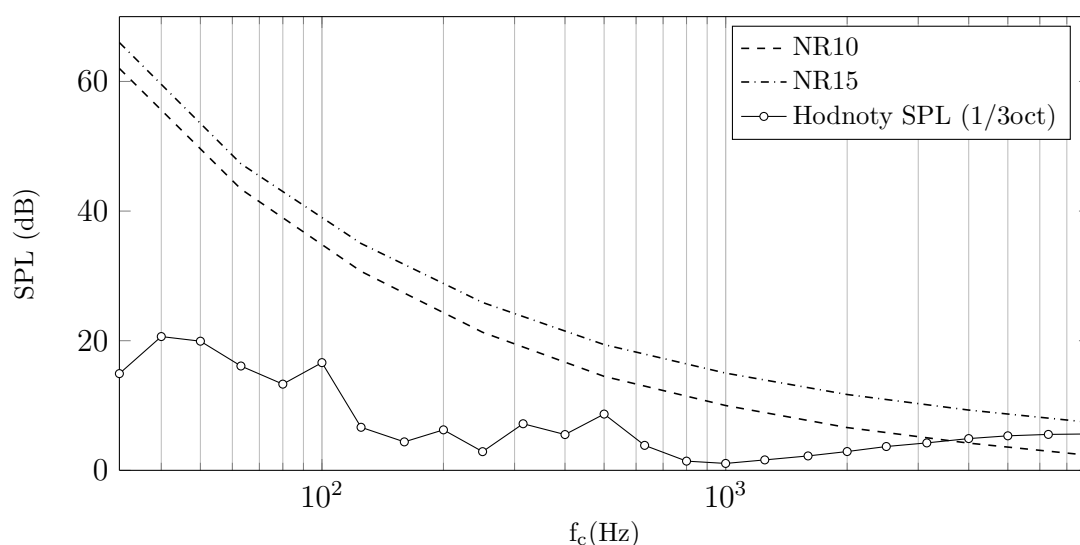


Obr. 2.1: Pudorys místnosti a pozice reproduktorů společně s posluchačem.

2.2 Hluk pozadí

Jedním z nejdůležitějších požadavků je hladina akustického tlaku pozadí zapříčiněná okolními akustickými vlivy. Poslechová místnost musí být akusticky izolována od okolního prostředí - např. od hluku z okolních místností či od vibrací z klimatizačního zařízení, dálnice a pod. [1]

V souvislosti s hlukem pozadí norma uvádí maximální hluk pozadí podle tzv. NR¹ křivek. V našem případě jsou to konkrétně křivky NR10 a NR15, které jsou definovány ve frekvenčním rozmezí 31,5 – 8000 Hz. Hodnoty by optimálně neměly přesáhnout hranici NR10, nicméně za žádných okolností nemůže hluk pozadí přesáhnout NR15.[3]



Obr. 2.2: Křivky NR10 a NR15 a naměřené hodnoty v laboratoři SC1.22

V našem případě máme splněnou podmínku NR 15 i NR10 pro hodnoty do 3150 Hz a pro vyšší střední frekvence je splněna podmínka NR15. Zvýšení hladiny akustického tlaku na vyšších frekvencích je poměrně nezvyklá věc, jelikož obecně hladina hluku klesá s přibývajícím frekvencí. V místnosti SC1.22 se vyskytuje nějaká anomálie, která tuto obecnou vlastnost nesplňuje. Tohle zvýšení hluku pozadí může být způsobeno ventilačním systémem.

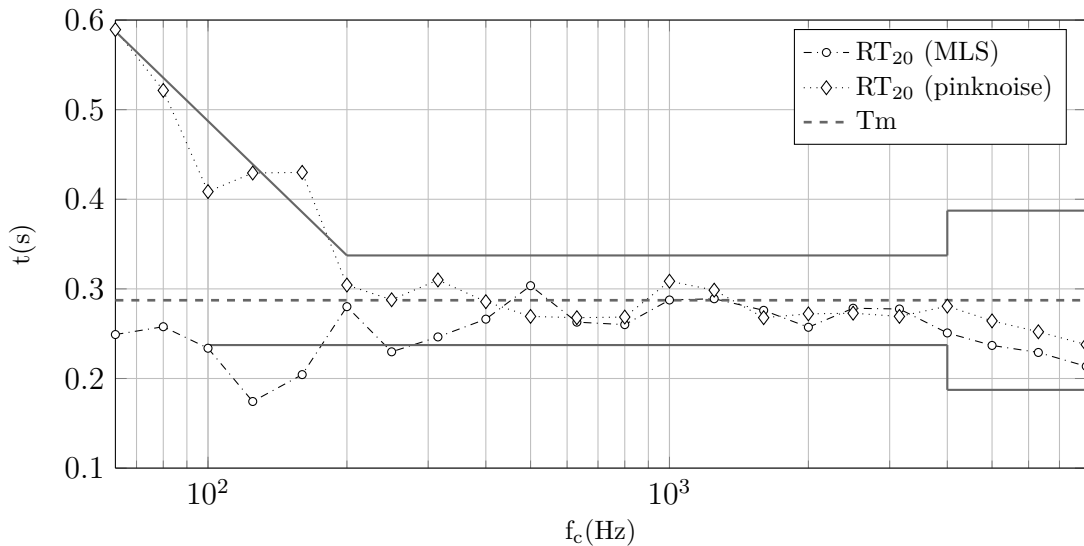
¹noise rating

2.3 Doba dozvuku

Doba dozvuku je podstatným parametrem při určení vhodnosti prostoru pro reprodukci. Ve vztahu k objemu místnosti je v normě ITU-R BS.1116-1 definována průměrná doba dozvuku

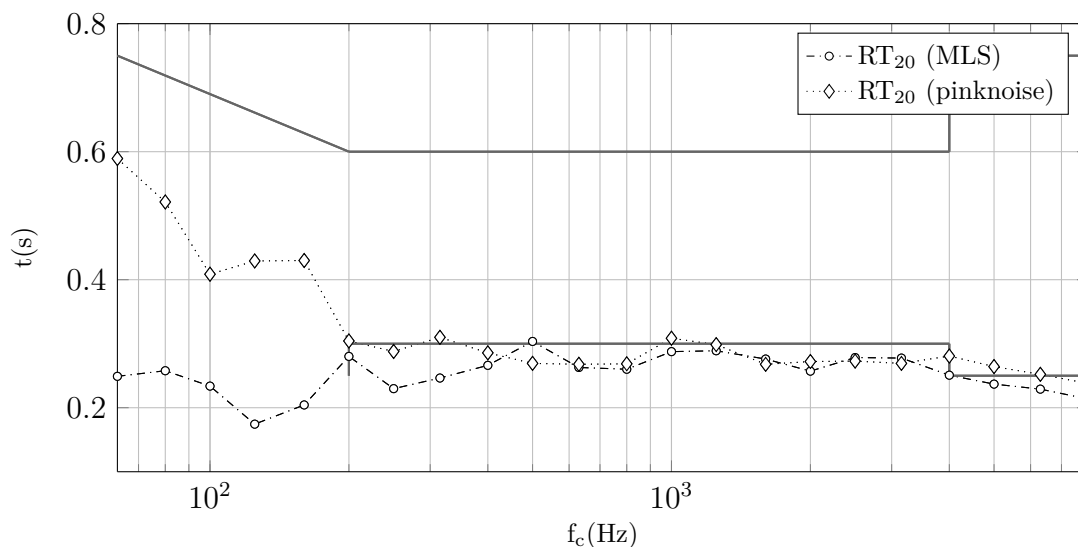
$$T_m = 0,25(V/V_0)^{1/3} \quad (2.5)$$

kde V je objem místnosti 152 m^3 a V_0 je referenční objem 100 m^3 . Průměrná hodnota pro naši místnost je $0,287 \text{ s}$ od níž se odvíjí mezní hodnoty doby dozvuku. Tato hodnota určuje meze, v kterých se musí skutečná hodnota nacházet. Doporučení se vztahuje k frekvenčnímu rozsahu $63 - 8000 \text{ Hz}$.



Obr. 2.3: Kritéria doby dozvuku podle ITU-R BS.1116-1. Hodnoty v prvním grafu měřeny pomocí MLS, spodní pomocí růžového šumu.

Doba dozvuku byla změřena dvěma metodami. První z nich pomocí MLS v třetinooktávových pásmech. Další byla metoda přerušovaného šumu. V obou případech šlo o měření s třemi místy zdroje a šesti místy umístění mikrofону. Výsledky jsou zaznamenány v grafech výše. Norma se nevyjadřuje k použité metodě měření doby dozvuku a ani nespecifikuje vyhodnocení poklesové křivky. Proto jsme jako nejobektivnější kritérium zvolili vyhodnocení pomocí RT20.



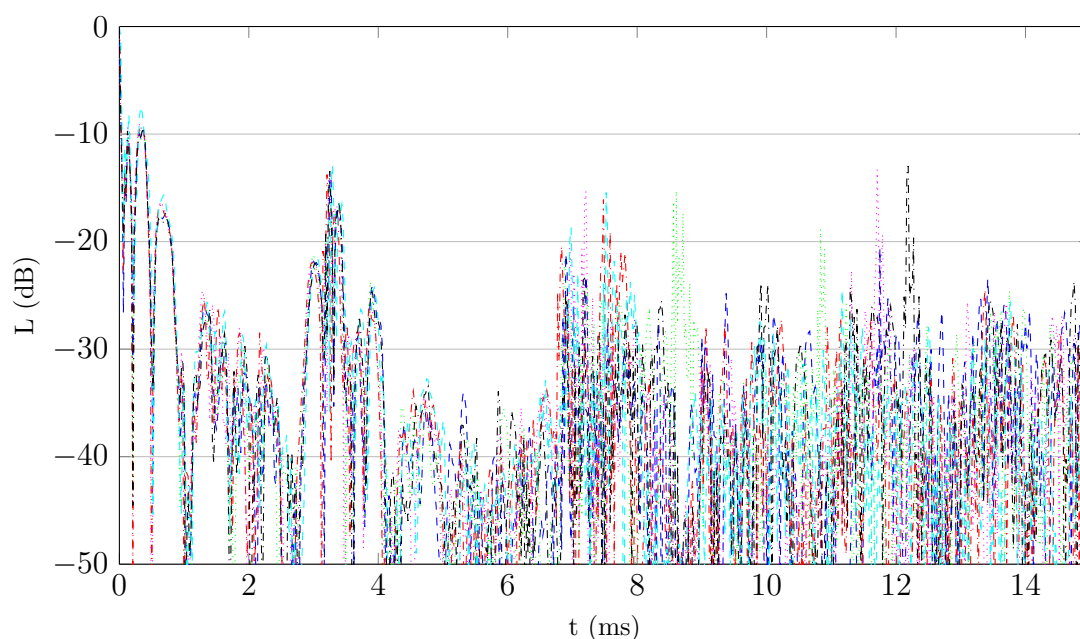
Obr. 2.4: Kritéria doby dozvuku podle IEC 60268-13. Měřeno pomocí MLS. Tato kritéria nesplňuje žádná z naměřených hodnot.

Doba dozvuku nám splňuje kritéria nad pásmem o střední frekvenci 200 Hz. Výsledky pomocí MLS a pomocí metody přerušovaného šumu se mezi sebou kromě nízkých frekvencí liší na úrovni statistické chyby. Nízké kmitočty lze považovat obecně za obtížně vyhodnotitelné – tomu odpovídá i rozdíl mezi zvolenými metodami. Doba dozvuku pomocí růžového šumu až na pásmo 160 Hz splňuje kritéria normy ITU-R BS.1116-1. Chyba na pásmu 160 Hz vypovídá o módech v místnosti, které jsou velmi nevyrovnané - o čemž svědčí i výsledky frekvenční charakteristiky měřené v této místnosti.

2.4 Prvotní odrazy

Prvotní odrazy zvukových vln v prostoru, které přicházejí v intervalu 15ms po přímém zvuku, by měly mít o 10 dB menší energii než je tomu u přímých vln.

Měření jsme provedli pomocí postupně přeladovaného signálu - "swept sine". Norma se nevyjadřuje k metodě měření, nicméně podle publikace [1] jsme zvolili měření pomocí každého reproduktoru zvlášť. V našem případě máme 6-ti kanálovou reprodukci. Měřeno bylo postupně všech 6 reproduktorů ve stejném místě - tzv. "sweet spot". Tento bod v prostoru je místo, kde se bude nacházet posluchačova hlava při poslechu.



Obr. 2.5: Barevně odlišené průběhy, které vyjadřují časovou souslednost odrazů v místnosti od stěn. Graficky jsme záměrně volili tohle zobrazení do stejného grafu. V našem konkrétním případě totiž potřebujeme pouze sledovat, zda se některý z prvotních odrazů dostane nad hranici -10 dB. Lze si povšimnout, že první odraz přichází cca 3-4ms po přímém zvuku, což znamená rozdíl v dráze přímé a odražené vlny 1-1,4m. Lze odhadnout, že se jedná o odraz od podlahy (pomocí rovnostranného trojúhelníku s výškou 1,2m). Další odraz přichází po 7-8 ms - lze předpokládat, že se jedná o odraz od stropu (opět pomocí rovnostranného trojúhelníku, tentokrát o výšce 2m).

Výsledky pro prvotní odrazy překvapivě kritéria splnily pro všech šest reproduktorů. I navzdory velmi nevyrovnaným módům na nízkých frekvencích se prvotní odrazy do poslechového místa vrací s rozdílem větším než 10 dB.

3 ELEKTROAKUSTICKÁ KRITÉRIA

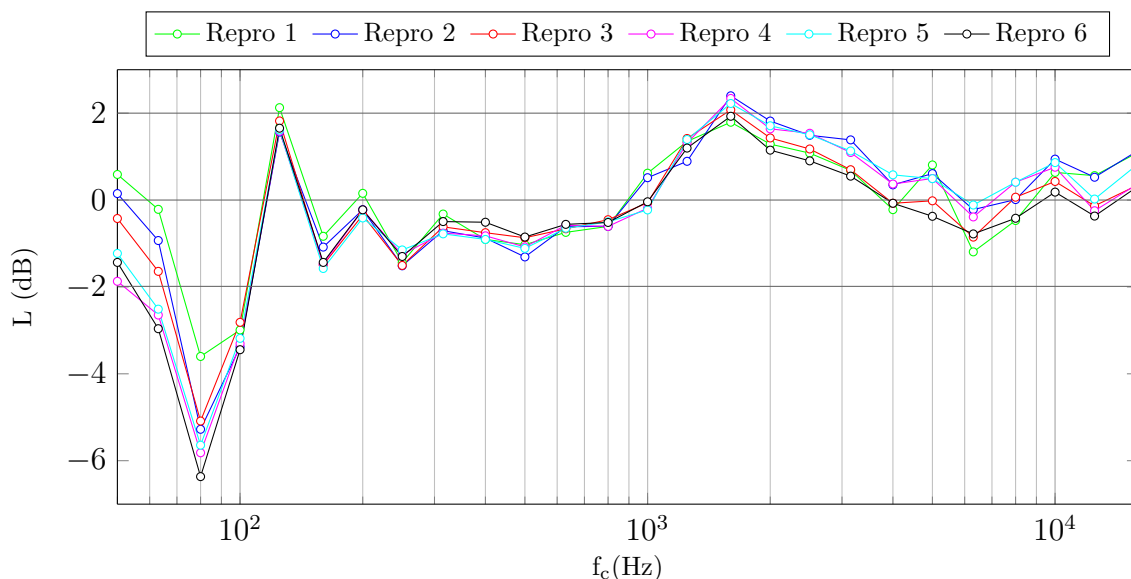
Akustická kritéria se vztahují na místnost a vypovídají o jejím návrhu a celkovém řešení. Kritéria stanovené pro reproduktory jsou stanovována z důvodu vhodnosti použití. Zdroj zvuku je vždy nejpodstatnějším článkem řetězce, alespoň co se reprodukce týče. Existuje proto několik kritérií, které musí vyhovovat.

Monitory, na kterých bude prováděn experiment jsou Genelec1032A. Technická specifikace je uvedena v [11].

3.1 Frekvenční charakteristika reproduktorů

Podstatnou vlastností monitorů je frekvenční charakteristika. Ta se měří v akustické ose reproduktoru ve vzdálenosti 1m. Pokud se monitor skládá z výškového driveru a středobasového wooferu, měří se v akustické ose driveru.

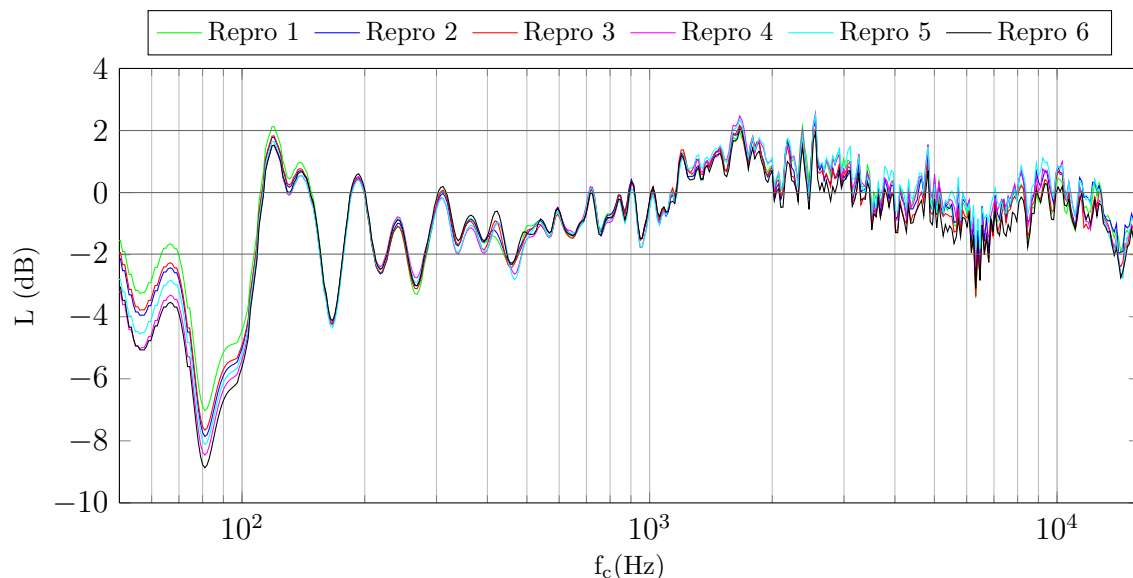
Frekvenční charakteristiku jsme změřili dvěma způsoby - v bezodrazové komoře a v poslechové místnosti. V poslechové místnosti se kromě elektroakustických vlastností monitoru projeví i vlastnost místnosti.



Obr. 3.1: Frekvenční charakteristika Genelec1032A v bezodrazové komoře. Vykresleno v relativních hodnotách vůči L_m každého monitoru - tedy hodnota 0 dB je v absolutním měřítku L_m každého reproduktoru.

3.1.1 Frekvenční charakteristika v bezodrazové komoře

V bezodrazové komoře by se hodnoty frekvenční charakteristiky měly nacházet v pásmu 4dB na celém frekvenčním rozsahu - tedy 40 Hz - 16 kHz. V grafu 3.2 a následujícím grafu je patrné nesplnění této podmínky, především na kmitočtech pod 125 Hz.

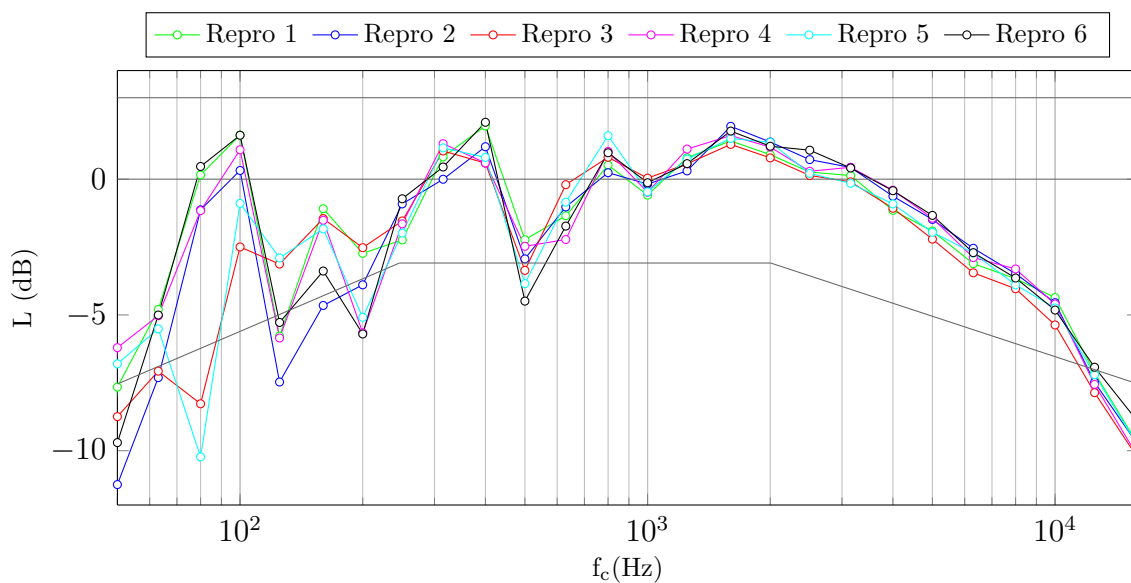


Obr. 3.2: Frekvenční charakteristika v bezodrazové komoře - tentokrát měřena pomocí softwaru APx500.

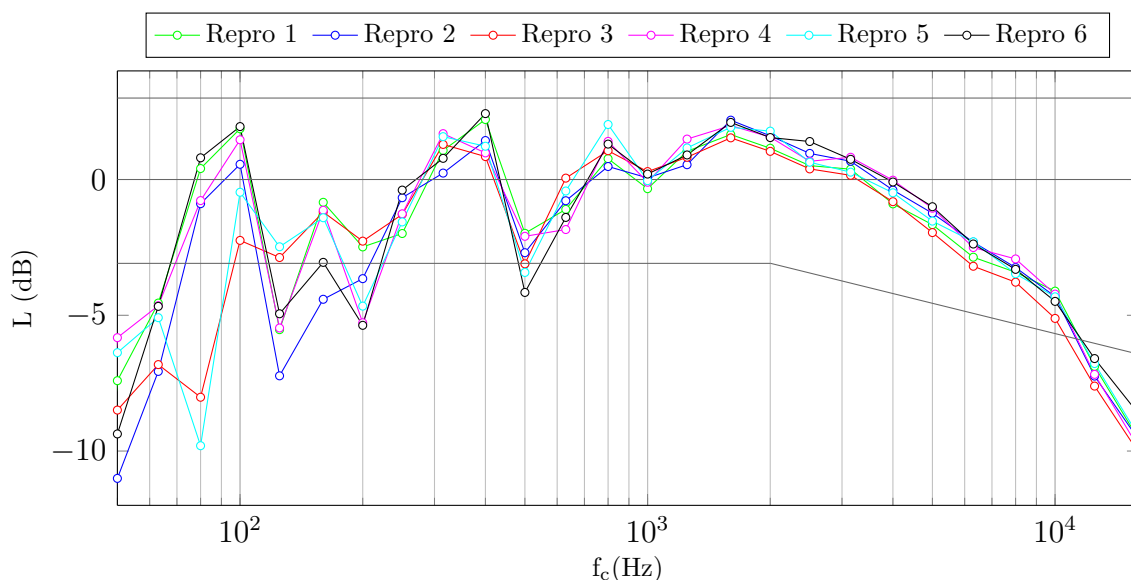
3.1.2 Frekvenční charakteristika v laboratoři SC1.22

V ITU i EBU normě definují tzv. "operational room response", čímž myslí frekvenční charakteristiku měřenou za reálného provozu reproduktoru - tedy v místnosti. Charakter místnosti se pochopitelně projeví v měření, jelikož se měření provádí v poslouchovém místě - v našem případě je to 2m od reproduktoru. Při takové vzdálenosti už nemají bedny tak vyrovnaný průběh jako v bezodrazové komoře a vytváří se větší odchylky - proto jsou v limitních křivkách větší tolerance a na spodních a vysokých kmitočtech (viz. 3.3 ,3.4). Hodnota L_m je v ITU definována na rozsahu 250 - 2000Hz. Norma EBU 3276, která je znázorněna v grafu 3.4 tuto hodnotu definuje např. na rozmezí 200-4000Hz.

Oba grafy vykresleny v relativních hodnotách vůči L_m každého monitoru - tedy hodnota 0 dB je v absolutním měřítku L_m každého reproduktoru.



Obr. 3.3: Frekvenční charakteristika v laboratoři SC1.22 podle normy BS.1116-1.



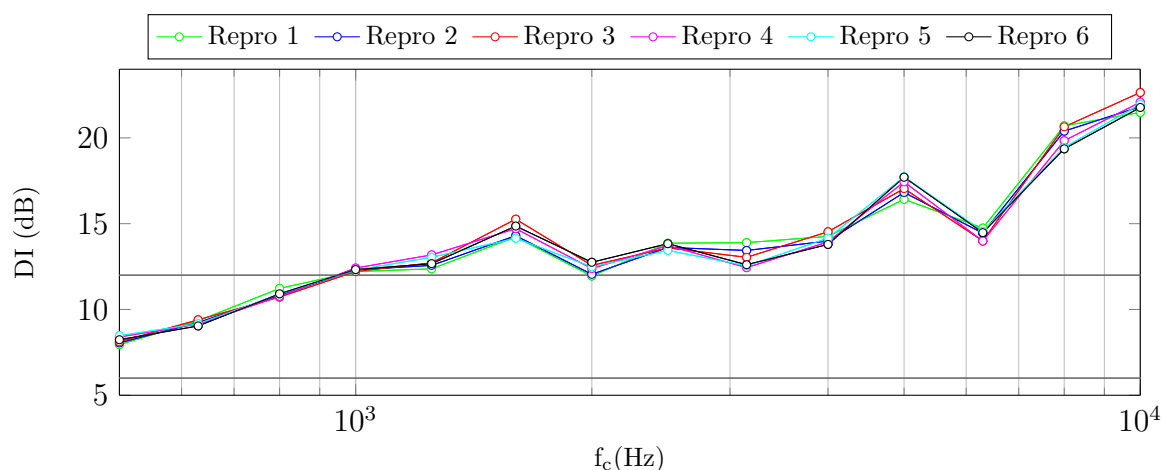
Obr. 3.4: Frekvenční charakteristika v laboratoři SC1.22 podle normy EBU 3276.

Ve frekvenční charakteristice měřené v beozodrazové komoře jsme docílili téměř splnění tolerančního pásma na frekvencích od třetinooktávového pásma o frekvenci 125 Hz. Některé reproduktory v tomto rozsahu splňují toleranční pásmo 4 dB. Nízké frekvence jsou reprodukovány velmi špatně, s odchylkami i 6 dB. Nicméně 85% frekvenčního rozsahu splňuje kritéria až na odchylky v řádech desetin dB. Ve frekvenční charakteristice lze také sledovat nárůst hladiny na frekvenci crossoveru (1,8 kHz) - nárůst 1–2 dB. Z konstrukčního hlediska je dělič frekvencí problematický, hlavně v oblasti fázové koherence. Proto je poměrně těžké zkonstruovat vyrovnanou frekvenční charakteristiku.

Charakteristika v místnosti nám splňuje požadavky ještě obtížněji, jelikož se v místnosti objevují módy, které nám ovlivňují výsledné data. Data jsou nevyhovující jak pro normu BS.1116-1 tak pro EBU 3276. V místnosti jsme při měření navíc museli nastavit zesílení na vysokých kmitočtech - tzv. treble tilt - jelikož se nám nedařilo vůbec docílit vybuzení prostoru vysokými frekvencemi. Tento jev je důsledkem nevhodně řešeného prostoru, který trpí na nerovnoměrně rozložené a nerovnoměrně hlasité módy a dále také trpí velkým útlumem na vysokých frekvencích - dobu dozvuku norma řešila pouze do frekvence 8kHz, ale z měření pomocí MLS jsme dostali hodnoty pro dobu dozvuku až do 20 kHz. Rozdíl mezi dobou dozvuku na frekvenčním pásmu 8kHz a 12,5 kHz je 0,1 s, což nám vysvětluje silný úbytek vysokých frekvencí v místnosti. Na 16kHz je to dvojnásobek, tedy 0,2 s.

3.2 Směrová charakteristika reproduktorů

Směrová charakteristika byla naměřena v bezdrazové komoře. Jelikož je tato vlastnost frekvenčně závislá, bylo zvoleno měření v třetinooktávových pásmech pomocí růžového šumu. Norma udává tzv. index směrovosti. Ten je definován v teoretickém úvodu, viz. 1.6. Ze změřených dat směrových charakteristiky jsme vypočítali index směrovosti, jehož hodnoty jsou v následujícím grafu.



Obr. 3.5: Rozdíl hladin akustického tlaku ΔL vybuzeného v ose reproduktoru a při odklonu 30° . Frekvenční rozmezí je 500Hz - 10kHz.

Podle podmínky 1.7 se hodnoty mají vyskytovat v tolerančním pásmu 6 – 12 dB. Směrovost C roste spolu se rostoucí frekvencí, což je typickou vlastností reproduktorových soustav. Konstrukce monitoru může do jisté míry ovlivnit tuto vlastnost, nicméně obecně platí, že na vysokých frekvencích je reproduktor více směrový. Výrobci se snaží tuto vlastnost co nejvíce eliminovat konstrukcí vhodné "horny", která docílí poměrně širokého pokrytí i na vyšších frekvencích - tedy snížení indexu.

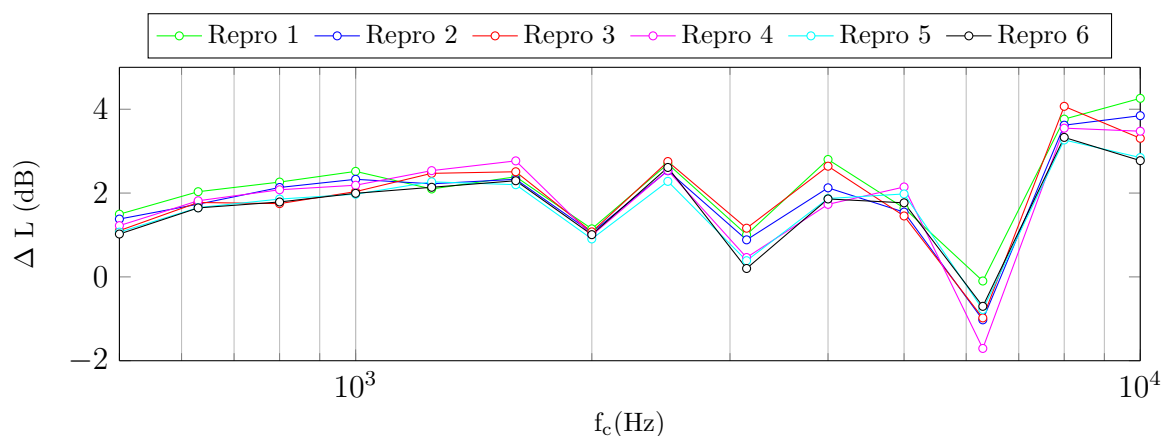
Norma požaduje poměrně malou směrovost beden, což použité Genelec 1032A nesplňují. Do kritéria 6-12 dB spadají pouze pásma o středních frekvencích do 800Hz. Od 1000 Hz je použitý monitor příliš směrový. Pro psychoakustické experimenty, které se zabývají lokalizací zvuku je směrovost velmi podstatný údaj. Tyto výsledky tedy budeme brát na zřetel při vyhodnocování experimentů. Pokud se zaměříme nicméně na pozitivní vliv na akustiku, zcela jistě docílíme vyššího podílu přímého zvuku při experimentech. Zákonitě se musí s přibývajícím směrovostí C zvyšovat poměr přímého/odraženého zvuku.

3.2.1 Frekvenční/směrová odezva

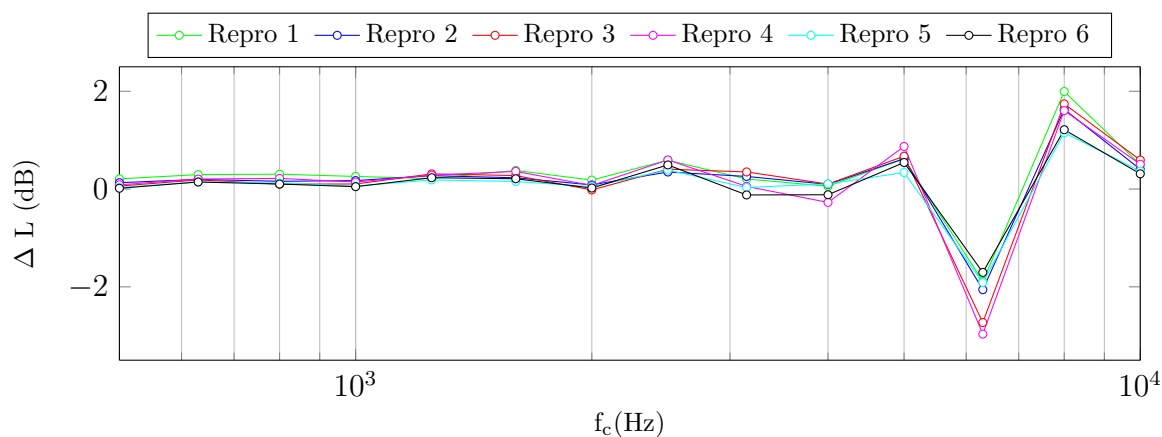
Norma se mimo jiné také zabývá frekvenční odezvou vyvolanou reproduktorem v místě mimo osu. Definuje však pouze kritéria pro rozdíl mezi hladinou v ose reproduktoru a při odklonu $\pm 10^\circ$ a $\pm 30^\circ$. Rozdíl by neměl přesáhnout hodnot:

$$\Delta L < 3 \text{ dB} \quad \text{pro odklon } 10^\circ \quad (3.1)$$

$$\Delta L < 4 \text{ dB} \quad \text{pro odklon } 30^\circ \quad (3.2)$$



Obr. 3.6: Rozdíl hladin akustického tlaku ΔL vybuzeého v ose reproduktoru a při odklonu 30° . Frekvenční rozmezí je 500Hz - 10kHz.



Obr. 3.7: Rozdíl hladin akustického tlaku ΔL vybuzeého v ose reproduktoru a při odklonu 10° . Frekvenční rozmezí je 500Hz - 10kHz.

Směrová charakteristika monitorů v tomto ohledu splňuje kritéria v rozsahu $0 \pm 30^\circ$. Problém nastává s celkovou směrovostí, kdy nám na rozsahu $0 \pm 180^\circ$ index směrovosti překračuje horní kritérium 12 dB. V tomhle případě norma očekává větší vyzařování od $\pm 30^\circ$ do 180° . Z mého pohledu je to poměrně nepochopitelné pojetí normy, kterou studiové monitory nejsou schopny splnit. Obecně si ani nejsem vědom toho, že by existoval na trhu dostupný monitor, který by splňoval nižší směrovost na frekvencích, které crossover odděluje pro výškový driver. Naše bedna má crossover na 1,8 kHz - ja zajímavé sledovat vývoj indexu směrovosti, který v pásmu 2000Hz poklesne oproti předchozímu rostoucímu vývoji-zde je totiž ovlivněn přechodem mezi středobasovým woofrem a výškovým driverem. Genelec použitím crossoveru na frekvenci 1,8kHz nejspíš kompenzuje ztrátu směrovosti wooferu na vyšších frekvencích – proto použili přechod do driveru, který se speciálně tvarovaným zvukovodem je schopen směrovost udržet konstantní i na vyšších kmitočtech (tzv. constant Q). To můžeme pozorovat na dalším vývoji indexu směrovosti - od 2kHz se výrazně neliší až do 6,3kHz - poté se bedna stává více směrovou, kdy je absolutní rozdíl mezi nultým a 180. stupněm 40 dB.

3.3 Transient fidelity

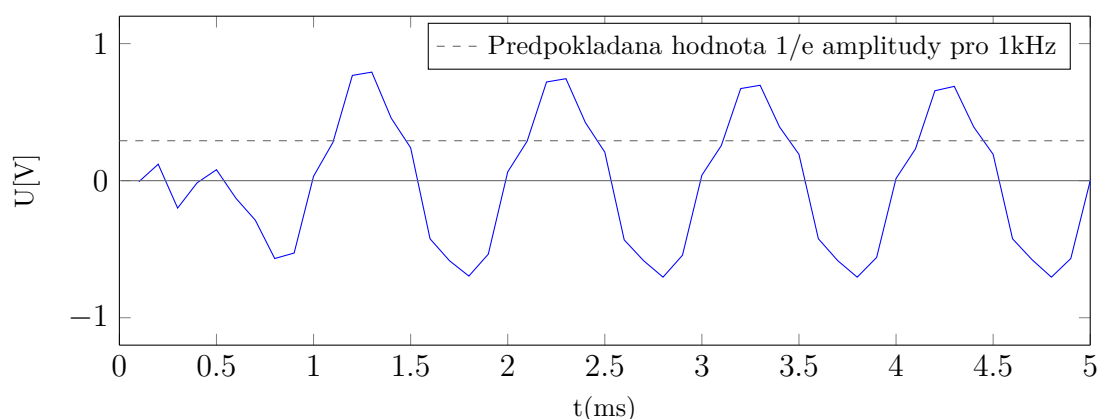
Volně přeloženo "věrnost transientů" je elektromechanická vlastnost reproduktoru. Je definována jako časová hodnota, závislá na reprodukované frekvenci. Časový rozdíl mezi příchodem signálu do reproduktoru, tedy počátkem kmitu, a $1/e$ z reálné hodnoty signálu je definován jako doba t_s . První rovnice je kritérium z normy ITU-R BS.1116-1, druhá z EBU 3267.

$$t_s < 5/f \quad (3.3)$$

$$t_s < 2,5/f \quad (3.4)$$

t_s je závislá na frekvenci f vstupního signálu. Pomocí osciloskopu jsme pro frekvenci 1kHz naměřili průběh napětí na mikrofonu. Časová podmínka je

$$t_s < 5\text{ms resp. } t_s < 2,5\text{ms} \quad (3.5)$$



Obr. 3.8: Graf ukazuje překročení hodnoty $1/e$ z maximální amplitudy - k překročení došlo v čase cca 1,1ms, což splňuje podmínky obou norem.

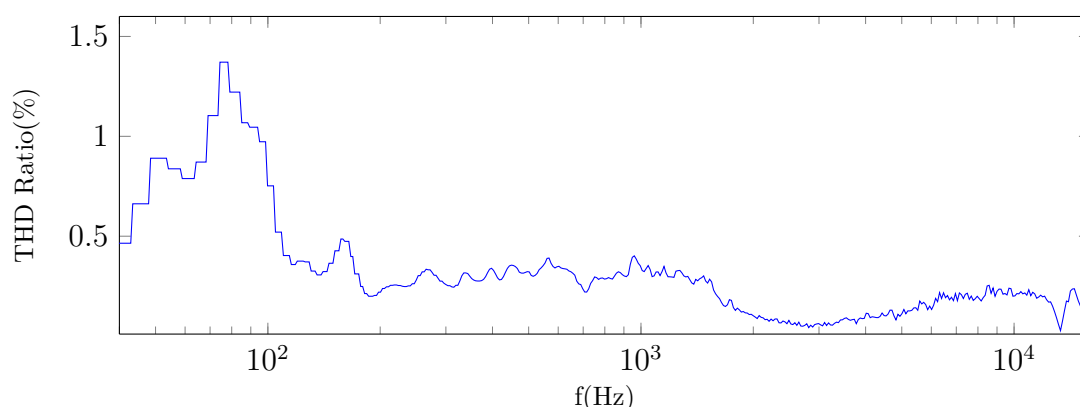
Podle výše uvedeného grafu nám reproduktor splňuje podmínky pro frekvenci 1kHz. Měření bylo provedeno na celém spektru a vždy byla splněna podmínka $t_s < 5/f$ s poměrně velkou časovou rezervou. Pro demonstraci jsme zvolili frekvenci 1kHz, která nabývá požadované hodnoty $1/e$ (cca 37%) z maximální amplitudy v čase 1,1 ms.

3.4 Nelineární zkreslení

Žádné harmonické zkreslení v rozmezí 40 Hz až 16 kHz by nemělo přesáhnout hodnoty:

$$- 30 \text{ dB (3\%)} \quad f < 250 \text{ Hz} \quad (3.6)$$

$$- 40 \text{ dB (1\%)} \quad f \geq 250 \text{ Hz} \quad (3.7)$$



Obr. 3.9: Naměřené hodnoty nelineárního zkreslení(THD ratio) pro reproduktor č.6. K měření jsme použili software APx500.

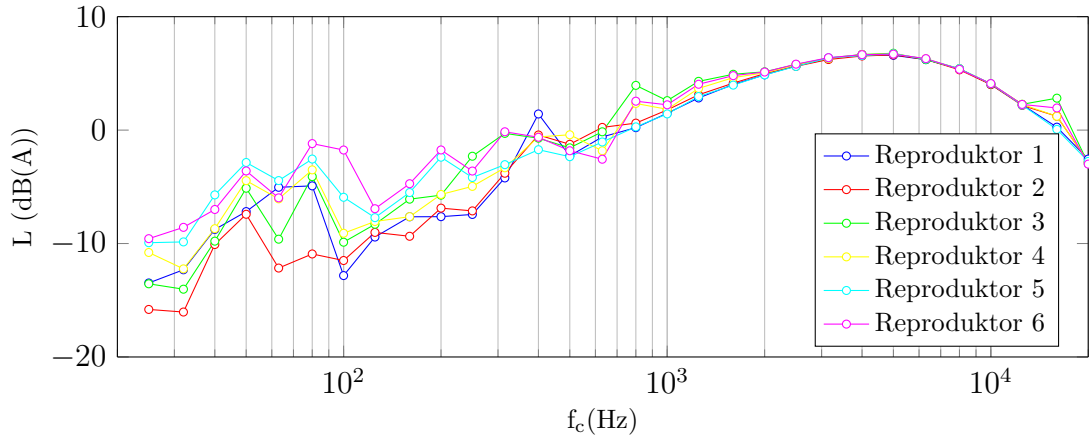
Výsledek měření splňuje předpoklady 3.6 a 3.4 a také normu EBU 3267 - viz. [4]. Hodnoty zkreslení dalších reproduktorů jsou uvedeny v příloze.

3.5 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah byl změřen v bezodrazové komoře. První měřenou hodnotou byl vlastní šum reproduktoru - "equivalent acoustic noise". Zde norma uvádí doporučení, kdy hladina akustického tlaku za použití váhového filtru A nesmí přesáhnout hodnotu 10 dBA, tedy:

$$L_{noise} < 10 \text{ dBA} \quad (3.8)$$

což nám interpretuje následující graf. Na nižších frekvencích můžeme sledovat velké odchylky, které souvisí s hlukem pozadí v bezodrazové komoře a tím nám zabraňují správné interpretaci výsledků na nižších frekvencích.



Obr. 3.10: Grafické znázornění vlastního šumu reproduktorů. Všechny reproduktory splňují kritérium $L_{noise} < 10\text{dB(A)}$.

Maximální hodnota reprodukovatelného akustického tlaku je hodnota, kterou je schopen reproduktor vyzařovat po dobu 10 minut bez teplotního a mechanického poškození .

$$L_{eff\ max} > 108\ \text{dB} \quad (3.9)$$

$L_{eff\ max}$ má být měřena pomocí pomalého průměrování bez váhového filtru. Měření jsme neprováděli z důvodu velkého rizika poškození reproduktoru a výsledky jsme převzali z uváděných informací od výrobce, které jsou dostupné v [11]. Podle dostupných informací je maximální RMS v 1m od monitoru podle IEC 268-1c:

$$L_{eff\ max} \geq 103\ \text{dB} \quad (3.10)$$

což nesplňuje normativní podmínku o 5dB.

Pokud tyto hodnoty aplikujeme na rozložení reproduktorů a poslechového místa, maximální akustický tlak reprodukovatelný v poslechovém místě bude při vzdálenosti 2m od reproduktoru ještě o 6 dB menší - tedy $L_{eff\ max} \approx 94,6\text{dB}$.

3.6 Souhrnné výsledky ITU-R BS.1116-1

	ITU-R BS.1116-1	Splněno/nesplněno
Rozměry místnosti		✓
Hluk pozadí	NR 10	✗
	NR15	✓
RT20 (MLS)	pro 63 - 200 Hz	✗
	pro 250 - 4000 Hz	✓
	pro 5000 - 8000 Hz	✓
RT20 (Růžový šum)	pro 63 - 200 Hz	✗
	pro 250 - 4000 Hz	✓
	pro 5000 - 8000 Hz	✓
Early reflections		✓
Frekv. char. v poslechové místnosti	pro 63 - 250 Hz	✗
	pro 250 - 2000 Hz	✗
	pro 2500 - 10000 Hz	✓
Frekv. char. v bezodrazové kom.	pro 63 - 10000 Hz	✗
Frekveční v 30°	pro 500 - 6150 Hz	✓
	pro 8000 - 10000 Hz	✗/✓
Frekveční v 10°	pro 500 - 10000 Hz	✓
Index směrovosti	pro 500 - 800 Hz	✓
	pro 1000 - 10000 Hz	✗
Transient fidelity	pro 20 - 20000 Hz	✓
Nelineární zkreslení	pro $f < 250$ Hz	✓
	pro $f \geq 250$ Hz	✓
Dynamický rozsah	$L_{effmax} > 108\text{dB}$	✗
	$L_{noise} < 10\text{dBA}$	✓

Tab. 3.1: Shrnující tabulka splnění akustických a elektroakustických kritérií podle ITU-R BS.1116-1.

3.7 Souhrnné výsledky EBU 3276

	EBU 3276	Splněno/nesplněno
Index směrovosti	pro 500 - 800 Hz	✓
	pro 1000 - 10000 Hz	✗
Frekv. char. v poslechové místnosti	pro 63 - 2000 Hz	✗
	pro 2000 - 10000 Hz	✓
Transient fidelity	pro 20 - 20000 Hz	✓
Nelineární zkreslení	pro 40 Hz < f < 250 Hz	✓
	pro 250 Hz < f < 16 kHz	✓

Tab. 3.2: Shrnující tabulka splnění akustických a elektroakustických kritérií podle EBU 3276.

3.8 Závěrečné shrnutí výsledků a jejich řešení

Výsledky akustických parametrů místnosti vyšly poměrně uspokojivě. Kromě nesplněné normy EBU 3276 pro dobu dozvuku nám zbylé parametry souhlasí s kritérii norem. Tyto parametry jsou navíc téměř neměnné. Místnost je ale poměrně špatně řešená akusticky ve vztahu k módům v místnosti. To je jednak dáno tím, že z architektonického hlediska nejsou poměry ani tvary stěn nijak upraveny – je to tedy kvádr, kde výrazným módům na nízkých frekvencích nelze předejít.

Elektroakustické vlastnosti, tedy vlastnosti reproduktorů jsou ve své podstatě také neměnné. Reproductory nesplňují kritéria norem ve frekvenčních charakteristikách jak v místnosti, tak v bezodrazové komoře. Tyto parametry však lze jednoduše upravit - výrobce totiž nabízí ekvalizaci beden pomocí různých presetů. Jelikož budeme mít monitory v místnosti, můžeme se pokusit frekvenční charakteristiku monitorů upravit na přesných pozicích, na kterých budou při experimentu. Co se týče směrového charakteru beden, ten je neměnný. Směrovou charakteristiku v oblasti $\pm 30^\circ$ monitory plní. Index směrovosti však nesplňují, což dle mého uvážení vůbec není problém, který by výrazným způsobem ovlivňoval průběh a výsledky experimentu. Jelikož všechny reproduktory míří do stejného bodu v místnosti, je pro nás primárním parametrem frekvenční charakteristika v ose, nikoliv mimo osu. Navíc norma pro poslechové místnosti je navrhována i s ohledem na hudební produkci, kde svým způsobem směrovost beden hraje významější roli. Pro náš psychoakustický experiment s posluchačem v pevném bodě však není problém úžší směrovost

na vysokých frekvencích.

4 PSYCHOAKUSTICKÉ ZÁKONITOSTI

Podstatná část práce je psychoakustickým experimentem, kdy je zkoumáno subjektivní vnímání přicházejícího zvuku. K tomuto účelu jsme provedli detailní analýzu celého elektroakustického řetězce, která je rozebrána v předchozích kapitolách. V této kapitole se budeme zabývat především psychoakustickými zákonitostmi a praktickým experimentem založeným na VBAB panorámování.

4.1 Lokalizace zdroje zvuku

Hlavními činiteli, na jejichž základě je vyhodnocován směr přicházejícího zvuku je intenzita fáze - přesněji jejich difference v každém uchu. Tyto difference jsou označovány jako interaurální, jelikož souvisí s vyhodnocováním zvuku uvnitř sluchového ústrojí.

Rozlišujeme 2 roviny, které jsou důležité pro správné uchopení orientace posluchače v prostoru. Mediální rovina, ta prochází hlavou vertikálně a každý její bod má od obou uší shodnou vzdálenost. Horizontální rovina prochází horizontálně pomyslnou osou obou uší a předpokládá se, že je rovnoběžná s obecně vodorovnou rovinou.

Interaurální intenzitní difference IID (Interaural Intensity Difference)

Pokud se nachází zdroj zvuku v mediální rovině, dopadá do obou uší stejná intenzita zvukového vlnění. Při odchýlení zdroje od této roviny dochází ke změně intenzity v obou uších, přičemž tento jev je vyvolán rozdílnou vzdáleností, kterou musí zvuk urazit k oboum uším. [6]

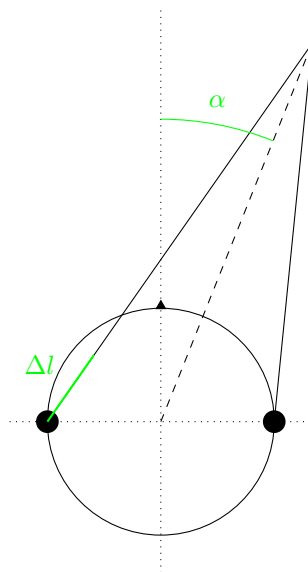
Rozdíl intenzity je poté dán podílem vzdáleností zdroje zvuku od každého ucha [9]:

$$\Delta L = 20 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (4.1)$$

Tohle pravidlo ale neplatí pro celé frekvenční spektrum. Důvodem je stín hlavy, který se okolo frekvence 2 – 3 kHz začíná projevovat na vnímání zvuku mimo mediální rovinu. Frekvence vyšší nežli 3 kHz však nejsou hlavou úplně odstíněny, avšak dochází ke skokovému útlumu v desítkách dB.

Interaurální časová difference ITD (Interaural Time Difference)

Časová difference má stejný mechanismus jako je tomu u intenzitní, s tím rozdílem, že nevnímáme intenzitní rozdíl nýbrž časový rozdíl. Ten je způsoben rozdílnými vzdálenostmi, které zvuk musí urazit do pravého a levého ucha. Časová difference je



Obr. 4.1: Různé pozice zdroje a hlavy, které vytváří při odklonu zdroje od mediální roviny o úhel α délkový rozdíl ΔL .

v podstatě fázová difference. Pokud tedy bude časová difference mezi vstupními signály v pravém a levém uchu Δt , vytvoří fázovou difference $\Delta\varphi$, která je frekvenčně závislá - tedy rozdíl fází je funkcí frekvence - $\Delta\varphi(f)$.

Pokud je $\Delta\varphi < \pi/2$ vyhodnocujeme směr přicházejícího zvuku z místa, kde je skutečně zdroj. Pokud $\Delta\varphi > \pi/2$ dochází už k opačnému vnímání a vjem přichází ze směru opačného. Tento jev se dostavuje pouze do 800 Hz, při kratších vlnách je totiž polovina vlnové délky vlny menší nežli vzdálenost uší a mozek není schopen vyhodnotit správný směr.

4.2 Přenosová funkce hlavy

Head-related transfer function (HRTF), nebo-li přenosová funkce hlavy, je definována jako komplexní přenosová funkce mezi zvukovým polem v uchu p_{ear} a zvukovým polem ve stejném místě p_{abs} , které je v místě pozice hlavy akorát bez jejího vlivu:

$$\text{HRTF} = H(\omega) = \frac{p_{ear}(\omega)}{p_{abs}(\omega)} \quad (4.2)$$

HRTF je ovlivněna především odrazy od torza těla - jmenovitě ramen a hlavy. Závisí také na úhlu přicházejících zvukových vln vztaheného k pozici hlavy, což . Každý pár uší má svou originální přenosovou funkci, která je závislá na fyzických vlastnostech člověka. [7]

HRTF je tvořena také ušními boltci, akustickým stínem hlavy a dalšími fyzickými faktory, které ovlivňují propagaci zvukových vln k ušnímu bubnínku. [6]

Vztaženo k vlivu přenosové funkce na lokalizaci zvuku, nesouvisí přenosová funkce s dobrou či špatnou lokalizací zvuku. Lokalizace zvuku se během života jedince vyvíjí zkušenostmi, tedy jakýmsi spojováním sluchových a vizuálních vjemů. Tím si utváříme vlastní "algoritmus" vyhodnocování směru, který je vztažen právě k naší přenosové funkci hlavy. Pokud bychom tento "algoritmus" použili na jinou přenosovou funkci hlavy, vyhodnocení zvuku bude nepřesné.

4.3 Jev priority - Haasův jev

Náš sluchový orgán vnímá odražený zvuk od překážek, ale je potlačen zvukem přímým. Proto lokalizujeme pozici zdroje podle přímého zvuku. Experimentem bylo ověřeno, že pokud přichází odražený zvuk do 35ms po prvním zvuku, vyhodnocujeme směr zvuku podle přímého zvuku. Je-li odražený zvuk o 10dB silnější než přímý a přichází se zpožděním do 35ms – i za těchto okolností lokalizujeme podle přímého zvuku. [8]

4.4 Van de Boerova závislost směrové lokalizace

Van de Boer určil závislosti časových a hlasitostních rozdílů, které jsou definovány následovně:

- rozdíl časových doběhů signálů $\Delta t = t_a - t_b$ [ms]
- rozdíl hlasitostních rozdílů signálů $\Delta L = L_a - L_b$ [dB]
- uplatní se i vzdálenost mezi reproduktory, tzv. reprodukční báze b [m]

Kombinace těchto veličin vytváří odlišné situace, které mají následující výsledky:

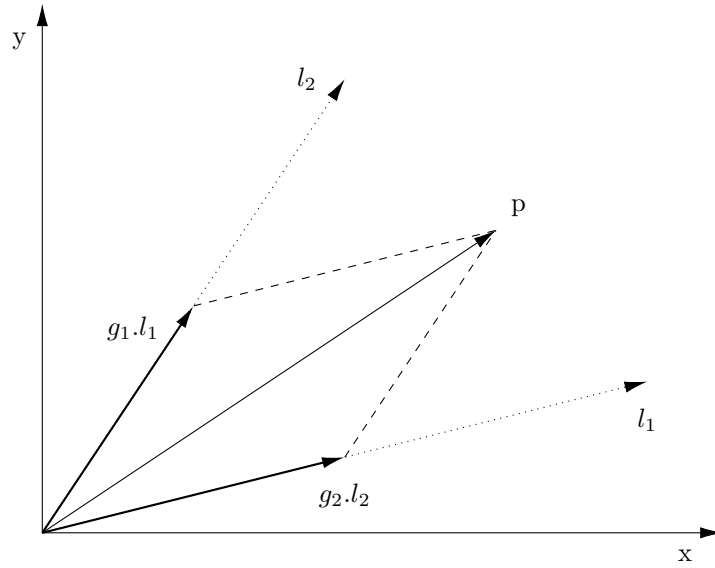
1. $\Delta t < \text{asi } 4\text{ms}$, $\Delta L < \text{asi } 20 \text{ dB}$ – lokalizační vjem určován rozdílem hlasitostí
2. $\Delta t < \text{asi } 4\text{ms}$, $\Delta L > \text{asi } 20 \text{ dB}$ – lokalizační směr určen hlasitějším reproduktorem
3. $4\text{ms} < \Delta t < \text{asi } 30 \text{ ms}$, $\Delta L < \text{asi } 6 \text{ dB}$ – lokalizační směr určen dřívejším signálem – uplatňuje se Haasův jev
4. $4\text{ms} < \Delta t < \text{asi } 30 \text{ ms}$, $\Delta L > \text{asi } 6 \text{ dB}$ – na lokalizační směr se podílí jak časový úsek, tak i hlasitostní rozdíl – změna směru lokalizace není lineárně závislá na rozdílu hlasitostí a při intenzitní stereofonii vzniká dojem pohybujícího se středu zvukového obrazu. Systém je náchylný na vytvoření pinpongové stereofonie – zvukový obraz přeskakuje v rozsahu reprodukční báze.
5. $\Delta t > \text{asi } 40 \text{ ms}$ – mezi dopadajícími signály nastává tzv. směšování – tzn. že signály od jednotlivých reproduktorů již nevnímáme jako jeden signál, ale nejsme je schopni vnímat ani jako signály samostatné. Lokalizace se stává neurčitou.

4.5 Vektorově amplitudové polohování

Polohování pomocí VBAP je zajištěno dvojicí reproduktorů, jejíž intenzitní rozdíly vytváří iluzi virtuálního zdroje. Virtuální zdroj je určen konkrétně dvěma vektory, jejichž výslednice je právě vektorem virtuálního zdroje. Tento jednotkový vektor $\mathbf{p}$ si vyjádříme jako součet vektorů reproduktorů

$$\mathbf{p} = g_1 \mathbf{l}_1 + g_2 \mathbf{l}_2 \quad (4.3)$$

kde g_1 a g_2 jsou zesílení jednotlivých reproduktorů.



Obr. 4.2: Součet vektorů definujících umístění reproduktorů. Vektor $\mathbf{p}$ je vektorem virtuálního zdroje.

Vyjádříme-li naopak zesílení $\mathbf{g} = [g_1 \ g_2]^T$ pomocí $L_{12} = [\mathbf{l}_1 \ \mathbf{l}_2]$ dostaneme vyjádření rovnice, kterou můžeme maticově zapsat

$$\mathbf{g} = \mathbf{p}^T L_{12}^{-1} = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Vypočítané faktory se označují jako faktory zesílení. Pokud se nám reálný zdroj kryje s virtuálním, tedy signál je reprodukován pouze jedním reproduktorem, je velikost faktoru zesílení pro tento reproduktor roven $\|\mathbf{g}_1\| = 1$. [5]. Pro sousední reproduktor je velikost faktoru $\|\mathbf{g}_2\| = 0$. Jejich vektorový součet je vždy roven 1, což vychází z vektorové podstaty metody.

Pokud však používáme inverzních matic při výpočtu, musí se faktory zesílení normalizovat právě tak, aby jejich vektorový součet byl roven 1. Tato normalizace

se provádí podle vztahu uvedeného v [10]:

$$g_{norm} = \frac{\sqrt{C}g}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}} \quad (4.5)$$

4.6 VBAP panorámování v Matlabu

Pokud teoretické vztahy z předchozí podkapitoly 4.5 aplikujeme na výpočet v Matlabu, řešení bude díky sofistikovanému algoritmu matlabu pro práci s maticemi velmi rychlé a efektivní. Okomentovaný kód můžeme sledovat na grafu níže. Vstupem funkce je naše požadované umístění virtuálního zdroje ve stupních. Stupně jsou vztaženy k čelnímu reproduktoru vzhledem k posluchači a hodnoty narůstají po směru hodinových ručiček. Výstupem funkce je 6 faktorů zesílení - pro každý ze šesti reproduktorů 1 hodnota - opět posloupnost faktorů zesílení je ve směru hodinových ručiček. Zákonitě 4 z 6 hodnot jsou vždy rovny 0.

```
1 function [g_faktor] = VBAP(panorama)
2
3 %Rozmístění pozic reproduktoru
4 pozice_rep=[0 30 110 180 -110 -30];
5 pocet_repr=length(pozice_rep);
6 pozice_rep=[pozice_rep pozice_rep(1)]/180*pi; %radiany
7
8 %Směr vektoru p reproduktoru v kartézských souřadnicích
9 p_virt=[cos(panorama/180*pi) sin(panorama/180*pi)];
10
11 for i=1:pocet_repr
12 % Vypocet inverzni matice
13 L_inv=inv([[cos(pozice_rep(i)) sin(pozice_rep(i))];...
14 [cos(pozice_rep(i+1)) sin(pozice_rep(i+1))]]);
15 % Vypocet faktoru zesileni(nenormalizovane)
16 tempg=p_virt*L_inv;
17
18
19 % Vypocet normalizovanych faktoru zesileni
20 if min(tempg) > -0.001
21     g=zeros(1,pocet_repr);
22     g([i mod(i,pocet_repr)+1])=tempg;
23     g_faktor=g/sqrt(sum(g.^2));
24     return
25 end
26 end
```

5 METODIKA PSYCHOAKUSTICKÝCH EXPERIMENTŮ

Psychoakustický experiment se vyznačuje mezioborovým charakterem, v němž se pojí psychologie a akustika. Předmětem zájmu psychoakustiky jsou nejrůznější otázky, které vyplývají z jednoho - působení akustického vjemu na člověka. Naše práce je zaměřena na působení akustického jevu v horizontální rovině kolem člověka - tedy obecně známo jako směr přicházejícího zvuku, nicméně vztaženého pouze na horizontální rovinu. V následující kapitole si objasníme pojmy, které úzce souvisí s prováděním akustického experimentu a jeho vyhodnocováním.

5.1 Psychoakustický experiment a jeho vyhodnocení posluchačem

Psychoakustický experiment má společné rysy s experimentem psychologickým - zaměřuje se však výhradně na zvukový podnět. Mohli bychom ho popsat jako *prostředek pro zjišťování kauzálních vztahů mezi proměnnými*. [2] Můžeme ho také definovat základními rysy [2]:

- záměrnost
- možnost opakování se změnou experimentálních podmínek
- možnost měřit závisle proměnnou
- ověřitelnost

Kromě těchto obecných rysů můžeme rozlišovat některé specifické znaky, které tvoří jakýsi charakter experimentu. Jsou jimi **úroveň a kvalita měření**. Kvalita měřicí metody se definuje pomocí *reliability* (spolehlivosti), *validity* (platnosti) a *objektivity* měření. Tyto pojmy jsou podrobně objasněny v Melkově knize [2] v kapitole 2.3. My se jimi podrobně zabývat nebudeme, jelikož předmětem zájmu této práce z psychologického pohledu jsou primárně úrovně měření. Kvalita měřicí metody je souběžně s naší prací vypracovávána v další bakalářské práci - její dílčí výsledky poslouží později k vyhodnocení našich experimentů.

Pro nás podstatné **úrovně měření** jsou charakteristické škálami, jejichž úkolem je objektizovat měření. Škálu můžeme charakterizovat buďto klasifikačně - přiřazování jevů do kategorií podle kritérií - nebo kvantifikačně - tedy přiřazení vjemu určitou hodnotu či pořadí. [2]

5.1.1 Nominální škála

Jedná se o klasifikační škálu, která třídí data podle navzájem se vylučujících kategorií.[2] Jestliže tuto škálu převedeme na náš lokalizační experiment, mohli bychom data třídit podle kategorií - vpravo, vlevo nebo také vpředu, vzadu. Tohle pojetí je však pro nás příliš neuchopitelné, jelikož nás vede k obecné kategorizaci, která je pro experiment fyzikálního rozměru poněkud nevyhovující.

5.1.2 Pořadová škála

Pořadová škála je velmi jednoduchou formou kvantifikace. Jedná se o nemetrickou škálu, jelikož nedisponuje žádnou jednotkou. Předpokládá se, že jevy či objekty budou umístěny na pořadové škále u které máme definován vzájemný pořadový vztah - tento vztah však není definován rozdíly mezi body stupnice. Jak píše Melka: „*Nic nás neopravňuje k předpokladu, že intervaly mezi sousedními body na pořadové škále jsou stejně velké.*“ [2]

Opět vztaženo na náš experiment - pořadovou škálu bychom mohli použít při vyhodnocování souslednosti rozdílných pozic. Například pokud bychom chtěli průběh po sobě jdoucích signálů z dvou různých virtuálních zdrojů, které jsou blízko u sebe, mohli bychom použít vyhodnocení typu, jestli byl průběh zprava doleva, nebo zleva doprava. Tohle vyhodnocení posluchač bez rozdílu na vzdálenost virtuálních zdrojů může určit pomocí pořadové škály, kdy vnímá pouze vzájemný pořadový vztah dvou jevů.

5.1.3 Intervalová škála

Tato škála využívá metrického škálování. Tady už je existence intervalu definována určitou jednotkou volenou tak, aby kterékoli části stupnice odpovídal stejný rozdíl měřené subjektivní proměnné. Jednotky musí být většinou vztaženy k určitému nulovému bodu(počátku), který si sami definujeme. Dále je požadováno znám velikost jednotky a směr. [2]

Kruhové rozestavění reproduktorů nám aplikovat intervalovou škálu snadno. Určíme počátek jako 0° - tedy směr zepředu - a velikost jednotky např. 1° . Také bude vhodné si určit konec škály - $\pm 180^\circ$ - tedy pozice vzadu. U intervalové škály je povoleno navzájem porovnávat velikost různých intervalů - tedy rozdíly mezi body stupnice. To se může hodit například, pokud nebudeme chtít určit absolutní hodnotu vztaženou k nulovému bodu, ale pouze rozdíl mezi dvěma body - tedy například rozdíl mezi dvěma místy virtuálních zdrojů.

5.1.4 Poměrová škála

Poměrovou škálu definuje: možnost určovat stejné poměry a možnost stanovit absolutní nulový bod. Melka to popisuje jako: „*Přiřazení na škále číselné hodnoty tak, aby stejně velkým subjektivním poměrům jejich velikostí odpovídaly na stupnici stejně velké číselné poměry příslušných hodnot.*“ Příkladem v psychoakustice jsou Steve-sovy škály pro měření hlasitosti v sonech a výšky v melech. [2]

Směr přicházejícího zvuku bychom taky mohli zkoumat poměrově - například pustit dvě dvojice signálů těsně za sebou (s tím že každá dvojice bude mít definovanou vzdálenost pomyslných virtuálních zdrojů) a budou v různém úhlu vůči posluchači. Cílem bude určit v jakém poměru jsou mezi sebou vzdálenosti virtuálních zdrojů v těchto dvojicích. Tohle by mohlo být použito při zkoumání rozdílného vnímání vzdáleností virtuálních zdrojů v závislosti na stupních, přičemž by nebylo nutné určit přesný poměr, ale zda je například poměr stejný či nikoliv.

5.2 Metody měření psychoakustických experimentů

Tato podkapitola poukazuje na několik zásadních psychoakustických metod, které jsou proloženy praxí a v praxi se nejvíce používají. Teoretický základ těchto měření je převzat z publikace [2]. K tomu jsem doplnil vlastní komentář o možné aplikaci metody na náš experiment. Metod je celá řada, avšak při studování těchto metod jsem dospěl k závěru, že na náš experiment můžeme aplikovat maximálně následující 3.

5.2.1 Seřazování zvukových podnětů do pořadí

Pokusná osoba má podle určitého kritéria seřadit měřené podněty do pořadí. Co se týče tvorby pořadí, rozlišují se dva termíny - pořadí a pořadová hodnota. Pořadí se vztahuje k obvyklým zkušenostem z běžného života - objekt s největší mírou hledané vlastnosti je na prvním místě. Naopak pořadová hodnota nám umožňuje aplikovat opačný postup, kdy hodnota vyhodnocení roste s rostoucí hodnotou vlastnosti zkoumaného objektu. [2]

Tato metoda by byla realizovatelná poměrně obtížně na naše proměnné. Pokud bychom však stupnici pojali jako zvuk přicházející zepředu a zvuk přicházející zezadu, mohli bychom tohle seřazování použít také. Poté bychom mohli zvolit pro 0° , tedy pro zvuk přicházející zepředu, hodnotu 1 (resp. 100 %) a pro 180° (zezadu) hodnotu 0 (resp. 0 %). Poté bychom mohli tedy řadit hodnoty od 1 po 0 podle vyvolaného vjemu s tím, že bychom museli specifikovat zda se jedná o pravou či levou polovinu roviny.

5.2.2 Posuzování zvukových podnětů na subjektivních posuzovacích škálách

Při vyhodnocování metody je úkolem posuzovatele umístit podnět na spojitém psychologickém kontinuu nebo jej zařadit do některé z kategorií, na něž je toto kontinuum rozděleno. Rozlišujeme u ní několik posuzovacích škál, z nichž pro zvukové podněty používáme standartně 2 škály - grafickou a numerickou.

U numerické škály je k vyhodnocení využíváno celočíselných posloupností, které jsou uspořádány na několikastupňové škále. Některé stupně jsou slovně definovány a cílem je, aby posuzovatel přiřadil vjem některému číslu ze stupnice. Klasický příklad je škála, kterou známe ze školy - tzn. stupnice od 1 do 5. Aplikace této škály na zvukové podněty je například při posuzování míry poškození audiosignálu. U této metody také můžeme charakterizovat krajní body - tedy definovat posluchači krajní hranici stupnice. Typickým příkladem je zkoumání kvality reprosoustav, kdy je posluchači přehráán ideální a nejhorší vzorek testu. [2]

Je pochopitelné, že tato vyhodnocování můžou mít pro náš případ poměrně velký přínos. Aplikace numerické škály na náš experiment je velmi jednoduchá. Posluchač dostane tabulku s hodnotami -180 až 180 (viz. tabulka 5.1), přičemž bude seznámen s geometrickou podstatou kruhu a něm příslušných úhlových zákonitostí. Jeho úkolem bude poté z předem definovaných bodů vyhodnotit další hodnoty. Nejlépe bude posluchači definovat krajní bod - nabízí se úhel 0° a poté $\pm 180^\circ$. Pro posluchače bude vhodnější všechny stupně psát v kladných hodnotách, jelikož z podstaty metody vypývá, že levá a pravá strana tabulky odpovídá reálnému modelu lokalizace zvuku zleva a zprava.

Tab. 5.1: Tabulka hodnot pro numerické vyhodnocení - hodnoty 0 180. Hodnoty jsou kvůli názornosti pouze ilustrační - při měření bude použit menší krok ve stupních.

180	150	120	90	60	30	0	30	60	90	120	150	180
------------	-----	-----	----	----	----	----------	----	----	----	-----	-----	------------

Další varianta by mohla být rozšířena o více definovaných krajních bodů stupnice - viz. tabulka 5.2. I když je na první pohled tabulka pro posluchače poměrně matoucí oproti přechozí variantě, mohla by tato varianta dosáhnout lepších výsledků z toho důvodu, že posluchač bude mít pomyslnou rovinu rozdělenou na 4 kvadranty. V každém z nich by poté vyhodnocoval pouze podle měřítka od 0 po 90° .

Tento typ metody nicméně omezuje elementární krok stupnice. Pokud bychom polorovinu rozdělili na 180 dílů po 1° , znamenalo by to 361 hodnot na papíře, což je poněkud nereálná představa z hlediska velikosti papíru ale i z hlediska orientování

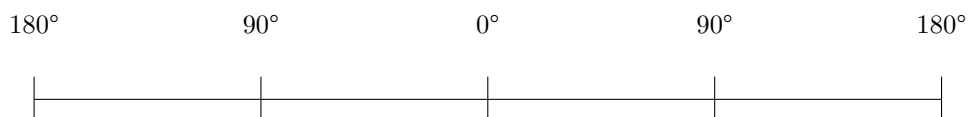
Tab. 5.2: Tabulka hodnot pro numerické vyhodnocení. Hodnoty jsou kvůli názornosti pouze ilustrační - při měření bude použit menší krok ve stupních .

0	30	60	90	60	30	0	30	60	90	60	30	0
----------	----	----	-----------	----	----	----------	----	----	-----------	----	----	----------

se v hodnotách. Proto se musíme omezit na větší úseky, např. 10 či 20°, tím pádem dostaneme menší přesnost lokalizace.

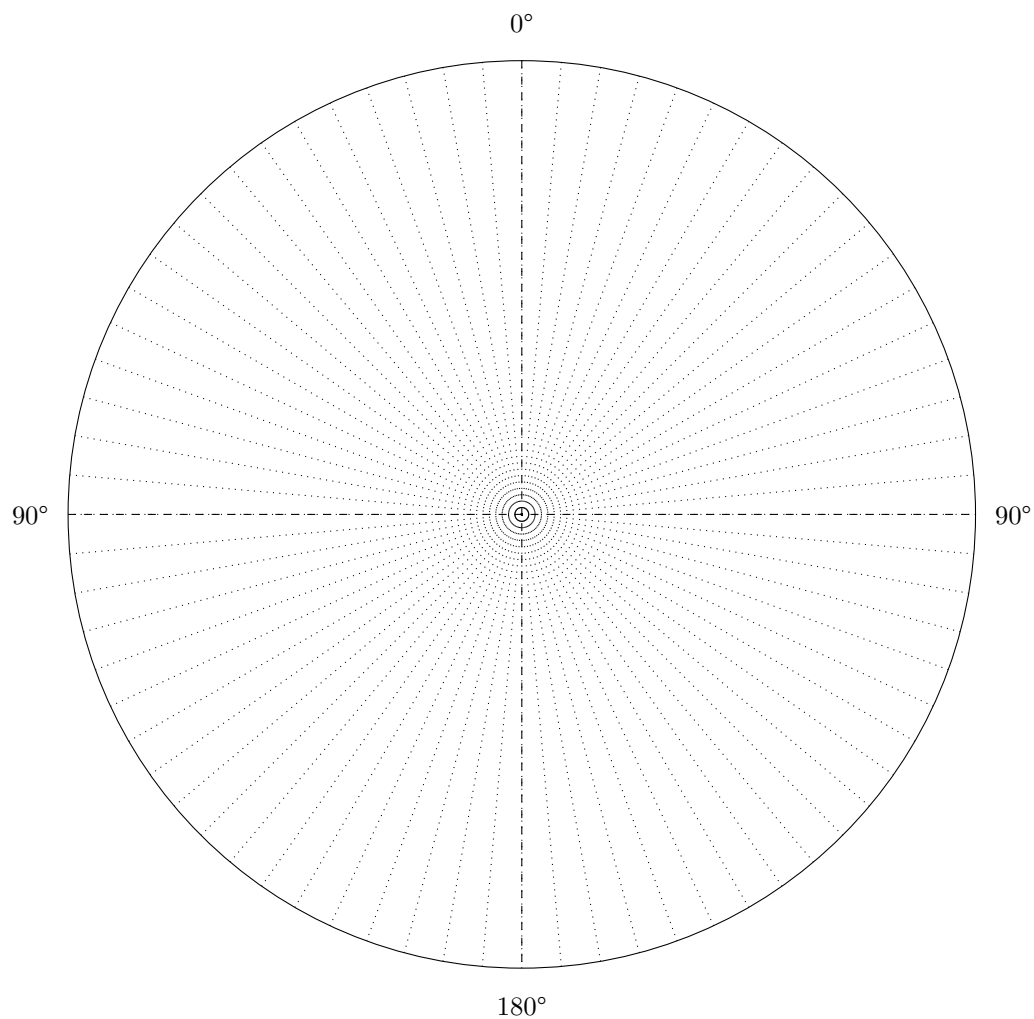
Druhým typem škály je **grafická**. Ta je bezesporu lepší východisko pro náš experiment, jelikož nám nabízí hlavně větší rozlišení stupnice. Pro posluchače je navíc tato škála mnohem méně náročná na numerické hodnocení, práce s ní je rychlá a také zajímavá.

Zde se nabízí dvě varianty - buďto grafické znázornění pomocí úsečky, nebo kruhu.



Obr. 5.1: Návrh grafického škálování pro lokalizační experiment pomocí úsečky.

K této metodě je obecně doporučeno volit stupnici 0–10 maximálně 20. O našem experimentu se však Melka nezmiňuje, proto nevidím důvod, proč stupnici nerozšířit na 37 hodnot. Obecně je tato metoda spíše užívána k vyšetřování kvality, kdy je pochopitelné, že příliš velké rozlišení bude vytvářet chybné hodnoty a nepřinese žádný užitek. Nám to naopak přinese užitek, jelikož zkoumáme pouze směr, který sluchový orgán umí rozlišit ve vícero stupních než-li zmiňovanou zvukovou kvalitu - proto si můžeme dovolit velké rozlišení stupnice.



Obr. 5.2: Návrh grafického škálování pro lokalizační experiment pomocí kruhového grafického rozhraní. Stupnice rozdělena po 5° částech.

5.2.3 Nastavování zvukových podnětů

Tuto metodu jen zmíníme okrajově, ač se zdá být pro náš účel poněkud zajímavá. Metoda nastavování je ve své podstatě přesným opakem výše uvedených metod. Zde je pokusné osobě předkládána hodnota, kterou pomocí nastavování reprodukuje. Osoba si tím tedy vytváří vjem, který si pod hodnotou představuje.

Náš experiment by musel mít poněkud sofistikovaný řídicí program, který by umožňoval v reálném čase měnit panorama pomocí VBAP.

6 ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU VBAP PANORÁMOVÁNÍ

Na základě vytvořených WAV souborů pomocí Matlabu jsme provedli jednoduchý experiment. Jeho cílem bylo:

- Ověřit funkčnost použitého elektroakustického řetězce – včetně umístění reproduktorů a hardwarového i softwarového řešení
- Najít limita a kritické místa experimentu a podrobit je dalšímu zkoumání
- Definovat problematické části metody a navrhnout patřičnou metodu, která bude tyto části zkoumat
- Poznat subjektivní vjemy experimentu a zaměřit se na jeho sporné momenty

6.1 Použitý elektroakustický řetězec

Signálovým zdrojem našeho experimentu je 6 mono souborů ve formátu WAV, které jsou vytvořeny pomocí matematických vztahů VBAP panorámování. Soubory jsme přehráváme v multitrackovém přehrávači DAW - Cubase 6 Elements. Pro tyto účely je DAW řešení asi nejlepší - hlavně díky flexibilnímu routování signálů pomocí zvukové karty. Karta RME, kterou máme v laboratoři k dispozici, umožňuje 6 mono výstupů. Z výstupů jsou signály vedeny přímo do šesti aktivních reproduktorů, které přehrávají kombinaci šesti signálů.

6.2 Testování

Prvním krokem bylo ověření panorámování v celém rozsahu 360° . Zvolili jsme přehrávání růžového šumu o délce 0,5 s - čas naznačuje, že se jedná o velmi krátký časový impuls, tzv. "burst". Tyto sekvence jsme přehrávali se stejně dlouhou prodlevou s krokem nejprve 20° , poté 10° . Výsledkem bylo 18, respektive 36 zkoumaných virtuálních zdrojů. Záměrně jsme volili řazení pozic virtuálních zdrojů za sebou, abychom mohli vnímat linearitu systému, tedy posloupnost pozic. Subjektivní dojmy, které vyplynuly z tohoto základního ověření jsou následující:

- Obtížná rozpoznatelnost pozic $100\text{--}120^\circ$
- Obtížná rozpoznatelnost pozic $30\text{--}50^\circ$ - působí dojem zastavení se zdroje, respektive posunutí o krok neodpovídající lineárnímu posunu o 10° nebo 20° .
- Horší identifikace virtuálního zdroje v rozmezí $30\text{--}110^\circ$ - pozice působila méně ostře nežli pozice před i za posluchačem

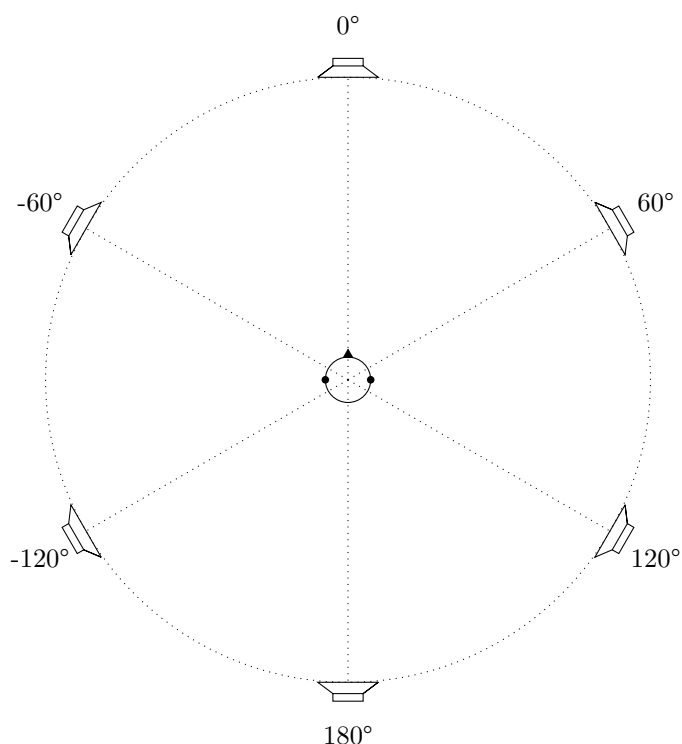
Z těchto poznatků můžeme postřehnout, že problémové místo tohoto uspořádání reproduktorů je v místě největší vzdálenosti dvou následujících reproduktorů. Z

literatury [5] se můžeme dočíst, že uspořádání bylo kritizováno za jeho špatnou kvalitu v lokalizaci směru ve všech pozicích kromě předních. Tato informace je ovšem umocněna tím, že se vyjadřuje k uspořádání bez zadního reproduktoru na 180° - tzn. pouze k variantě s 5 reproduktory. Dále je však dodáno, že za účelem dosažení lepší kvality může být přidáno dalších reproduktorů. My jsme rozšířili rozestavení o zadní reproduktor, který nám pomohl dosáhnout dobré rozlišovací schopnosti v rozmezí 110° až -110° .

Dalším zkušebním experiment bylo lokalizace pozic 70° , 80° a 90° , která byla následně porovnávána s lokalizací na pozicích 10° , 20° a 30° . Cílem bylo otestovat, zda lidské ucho je schopno rozpoznat stejně velký rozdíl ve všech úhlech ve stejné míře. Výsledný pocit byl takový, že přední pozice na mě působily ostřeji a šlo rozpoznat virtuální zdroje lépe, než-li na boční pozici.

Na tento konkrétní případ by se dal navrhnout sofistikovanější experiment, který by nám tento pocit jedné pokusné osoby objasnil. Nicméně tento nabytý poznatek se zužitkuje při první testovací skupině, kdy budeme vědět, kde je problém a budeme zkoumat, jak se na těchto úhlech chovají nabyté výsledky.

Pro zajímavost jsme ještě použili jiné rozestavení reproduktorů, nežli udává norma a podstoupili jsme stejným zkušební testům.



Obr. 6.1: Experimentální pozice reproduktorů pro zkušební experiment.

Pro tento účel jsme museli ale přepočítat koeficienty zesílení pro nové pozice re-

produktorů. Reproduktoři jsme rozvrhli se stejnými rozestupy - tedy po 60° (viz. 6.1). Nejprve jsme systém otestovali na lineritu, kdy prokazoval poměrně lepší linearitu, než-li u předchozího rozestavění. Dále jsme testovali schopnost rozeznání předních a bočních pozic. Zde opět nebyl tak velký rozdíl v rozdíl mezi bočními a předními pozicemi virtuálních zdrojů - pocit ze systému byl daleko lepší.

7 ÚPRAVA ELEKTROAKUSTICKÝCH KRITÉRIÍ

K dosažení tížených výsledků u našich experimentů je nutným předpokladem splnění normy, respektive anulování chyb v takovém rozsahu, aby neměly na výsledky dopad. Je třeba si ujasnit, které parametry a v jakém rozsahu jsme schopni vyřešit. Vzhledem k charakteru práce není možné jakýmkoliv způsobem ovlivnit akustické parametry místnosti a ani technické parametry reproduktorů — konkrétně jejich směrovost. Jediným kritériem, který můžeme ovlivnit je frekvenční charakteristika reproduktorů v místnosti.

Frekvenční charakteristika je obecně závislá na 2 člancích řetězce — jednak na vnitřním charakteru obvodů v reprobedně a dále také na processingu vstupního signálu. My můžeme ovlivnit charakter signálu jeho změnou v signálovém procesoru aplikací EQ. To jsme také udělali pomocí digitálního parametrického EQ, který je interním efektem v Cubase 7.5. – viz. 7.1.

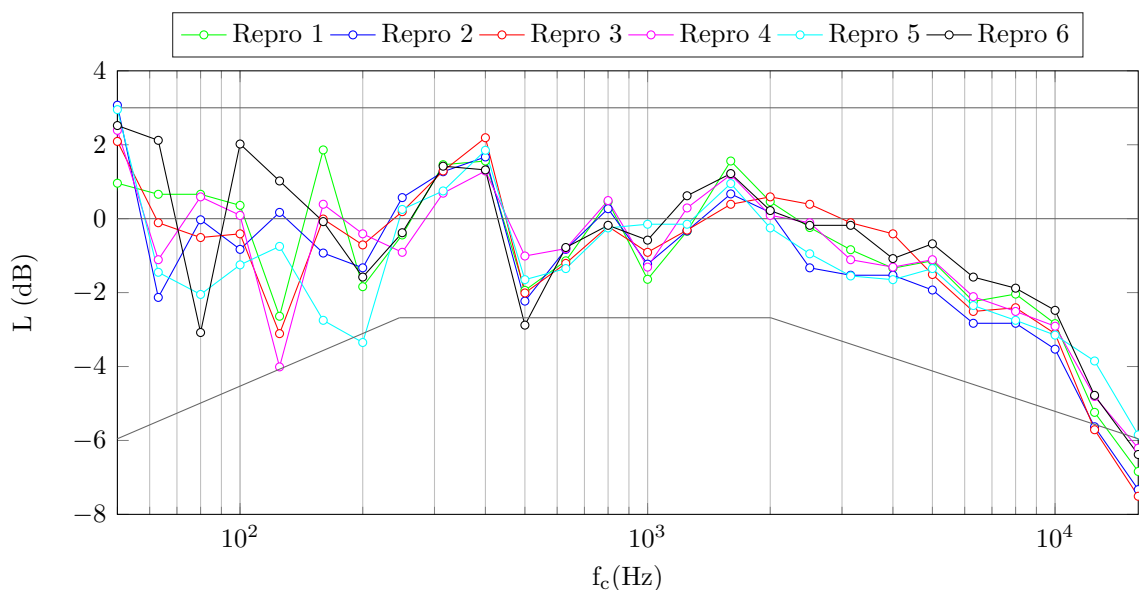


Obr. 7.1: EQ křivka z.

EQ jsme následně proměřili přímo na výstupu ze zvukové karty, abychom zjistili zesílení signálu v třetinooktávových pásmech. Výsledek je patřív v grafu 7.3.

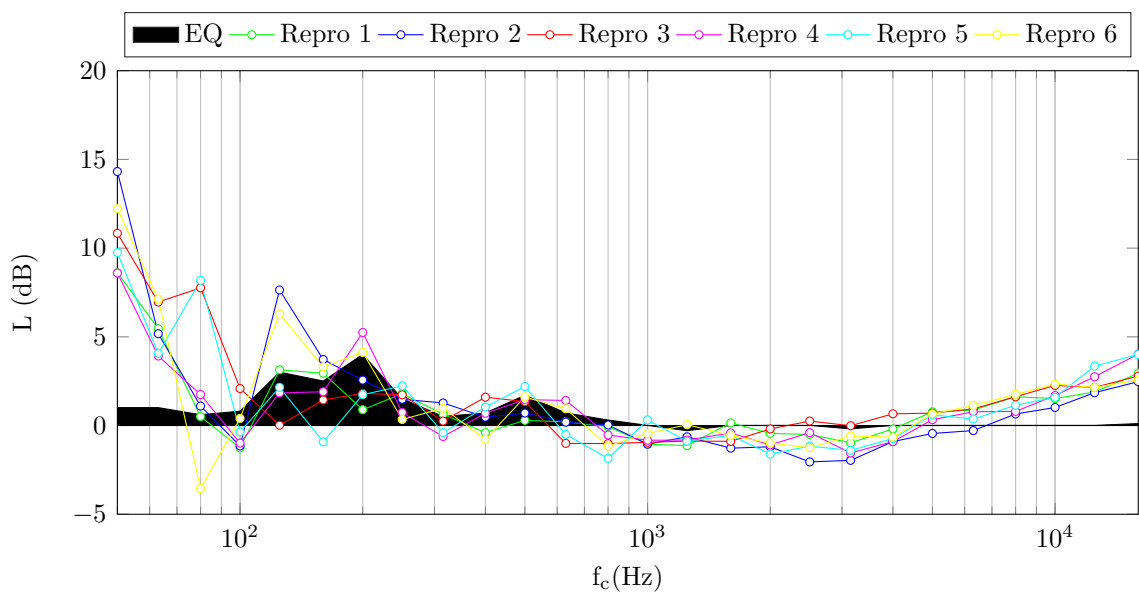
7.1 Úprava frekvenční charakteristiky

Výsledkem aplikace EQ na vstupní růžový šum je frekvenční odezva splňující podmínku ITU BS.1116-1 – viz. 7.2.



Obr. 7.2: Frekvenční charakteristika v laboratoři SC1.22 podle normy BS.1116-1.

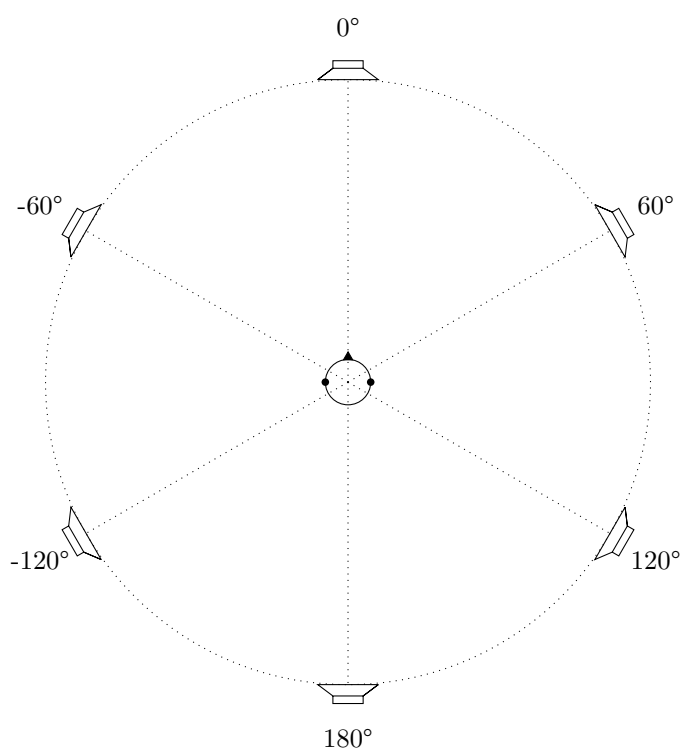
Pokud porovnáme frekvenční charakteristiky před aplikací EQ a poté, bude výsledkem graf zesílení v místě poslechu — tedy reálná EQ beden závislá na akustických vlastnostech místnosti, viz. 7.3. Kromě námi zesílených pásem dochází také k zesílení pásem na jiných frekvencích. Je to způsobeno hlavně módy v místnosti, které se zesilují i ve vztahu k hlasitosti okolních pásem. Proto charakteristiky beden uvedené v grafu 7.3 mají rozdílný charakter, jelikož na každém místě reprobedny máme jiné akustické podmínky.



Obr. 7.3: Frekvenční charakteristika v laboratoři SC1.22 podle normy EBU 3276.

7.2 Úprava rozmístění reproduktorů

Dalším parametrem, který jsme upravili pro vyhodnocení našeho experimentu byly úhlové rozestupy mezi reproduktory. My zvolili variantu lineárního rozmístění — tedy 6 reproduktorů rozmístěno v kruhu po 60° . Tato volba měla hlavní zapříčinění ve velké nelinearitě u systému 5.1 doporučeného normou. U tohoto typu rozmístění se nám pohybující zdroj zdál daleko více nelineární, než-li tomu bylo u systému s rovnoměrným rozestavěním. Doporučením norem jsme se v tomto případě neřídili i z toho důvodu, že norma udává doporučení pro poslechové místnosti, kde je tzv. surround systém sestaven právě na základě 5.1. rozmístění. K experimentům založených na identifikaci směru přicházejícího zvuku je pro nás stěžejní právě správná linearita systému.



Obr. 7.4: Rozmístění reproduktorů při závěrečném experimentu.

8 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

Měření probíhalo v laboratoři SC1.22. Experimentu se zúčastnilo 10 respondentů. Složení respondentů bylo především z řad studentů audioinženýrství. Nutným předpokladem pro zdolání námi navržených testů byla základní znalost geometrie, bez které nebyla možnost vyhodnotit měření. Tohle všichni respondenti splňovali a nespornou výhodou je profesní zaměření respondentů, jejichž zvukařská praxe značně zlepšuje schopnost popisovat jevy, které respondent slyší.

Respondenti vyhodnocovali 4 různé metody, které byly navrženy v souladu s doporučením literatury [2]. Návrhy a teoretický nástin metod je podrobněji popsán v kapitole 5.

8.1 Metoda 1

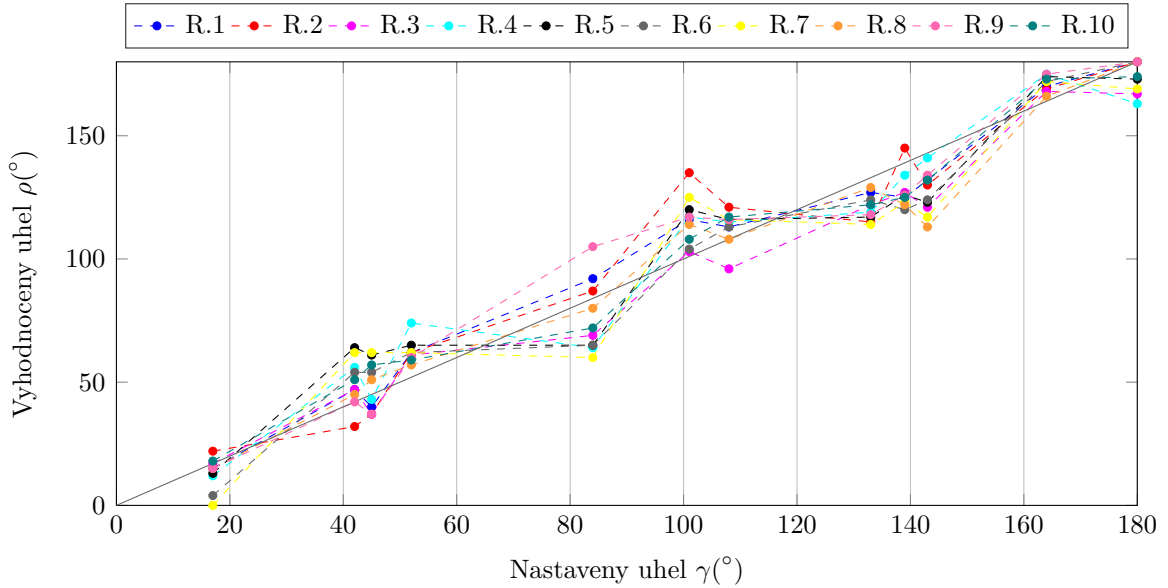
První metoda je poněkud rozdílná od doporučení vyhodnocování psychoakustických jevů, jelikož nevyužívá přímé vyhodnocení hodnoty posluchačem. Princip spočívá v otáčení respondenta na židli za zdrojem zvuku. Podmínkou je, že otočit na židli se může až poté, co přestane slyšet zdroj zvuku. Tohle opatření je důležité z toho důvodu, aby vyhodnocujícímu nebylo umožněno vyhodnocovat pozici zdroje pomocí pohybu hlavy.

Tento test jsme několikrát předem vyzkoušeli a vytvářel velmi dobré výsledky už při testování na členech týmu. Posluchač musí předem vědět počet šumových "burstů", které za sebou uslyší. My jsme volili 5 vzorků, z nichž každý hrál 500 ms a 300 ms byla pauza mezi nimi. Posléze se posluchač otočí na místo odkud přichází zvuk pomocí otočné židle.

Na otočnou židli jsme připevnili laserový zaměřovač, který nám na stupnici ukazoval hodnotu natočení od výchozí polohy 0° . Po natočení se hodnota zaznamenala a posluchač se opět vrátil do výchozí pozice připraven na vyhodnocení dalšího zvukového podnětu.

Jelikož jsme neměli časovou možnost vytvořit sofistikovanou a plně zkalibrovanou měřicí židli, naše židle měla svou toleranci. Tolerance činila cca 5° v závislosti na pozici posluchače vůči židli, kdy se mohla poloha jeho hlavy nepatrně vychýlit. Tento jev jsme se snažili minimalizovat usazením posluchače co nejvíce rovně k čemuž nám pomohlo opěradlo na záda a dále i opěrátka na ruce. Právě položení rukou na opěrátka vymezilo významný pohyb posluchače a umožňovalo mu sedět v napřímené poloze celé měření.

Výsledky jsou patrné v grafu 8.1. Na něm můžeme sledovat výchylky od lineární přímky, která představuje ideální křivku vyhodnocení — tedy např. 100° virtuálního



Obr. 8.1: Naměřené hodnoty úhlů v závislosti na vstupní hodnotě úhlu γ .

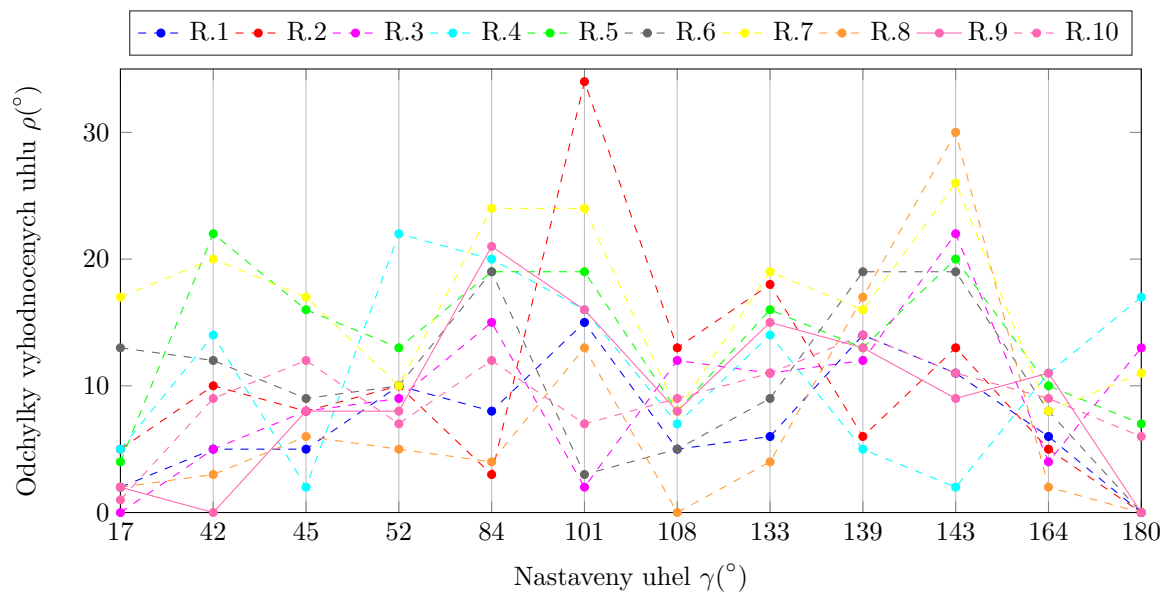
zdroje odpovídá 100° reálného vjemu. Vzhledem k časové náročnosti vyhodnocení jsme volili pouze 12 vzorků v určitých místech.

Abychom tyto odchylky podrobněji popsali, vyjádřili jsme je jako absolutní hodnoty od původní hodnoty — tedy odchylku od nastavené hodnoty, nehledě na nedotočení či přetočení. Odchylku jsme vytvořili obměnou vzorce pro směrodatnou odchylku — namísto aritmetického průměru hodnot jsme však od naměřených dat odečítali nastavenou hodnotu úhlu γ

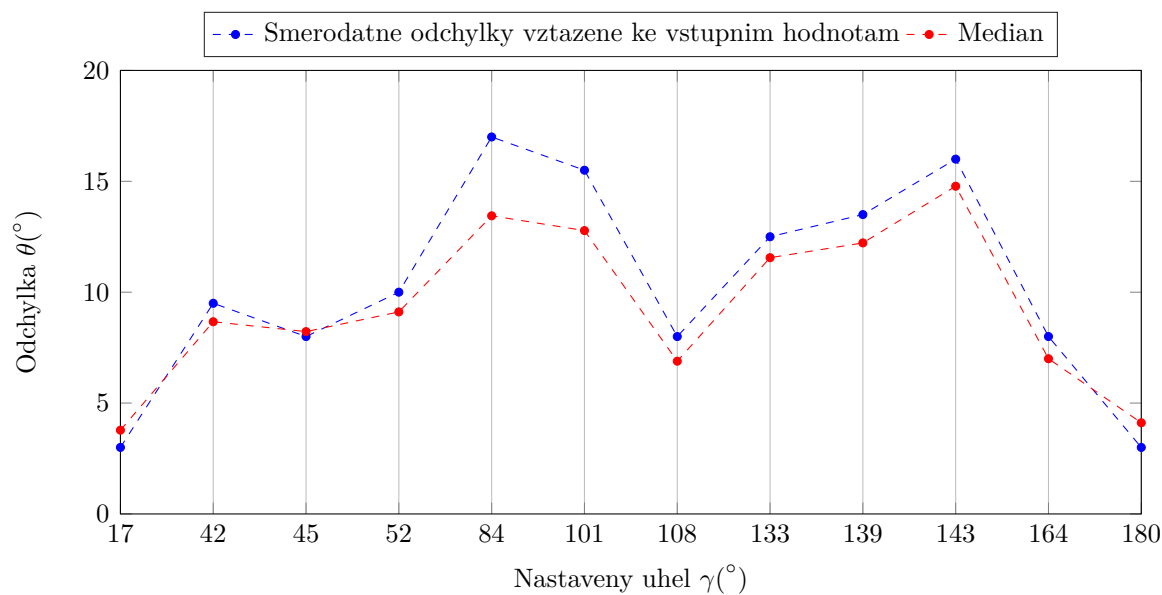
$$\theta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_\gamma)^2}, \quad (8.1)$$

kde x_i je posluchačem vyhodnocený úhel a x_γ je nastavený úhel pomocí VBAP.

Náš statistický soubor má 10 respondentů, což není velké množství dat na to, abychom mohli udělat podrobnou statistickou analýzu. Vytvořili jsme aritmetické průměry a medián u vypočtených odchylek na základě dat od 10 respondentů. U aritmetického průměru jsme vždy maximální hodnotu vynechali, abychom odstranili případné hrubé chyby, které zkreslovaly výsledky. V grafu 8.3 lze vidět 2 křivky pro aritmetický průměr a medián.



Obr. 8.2: Absolutní odchylky od vstupní hodnoty úhlu γ .

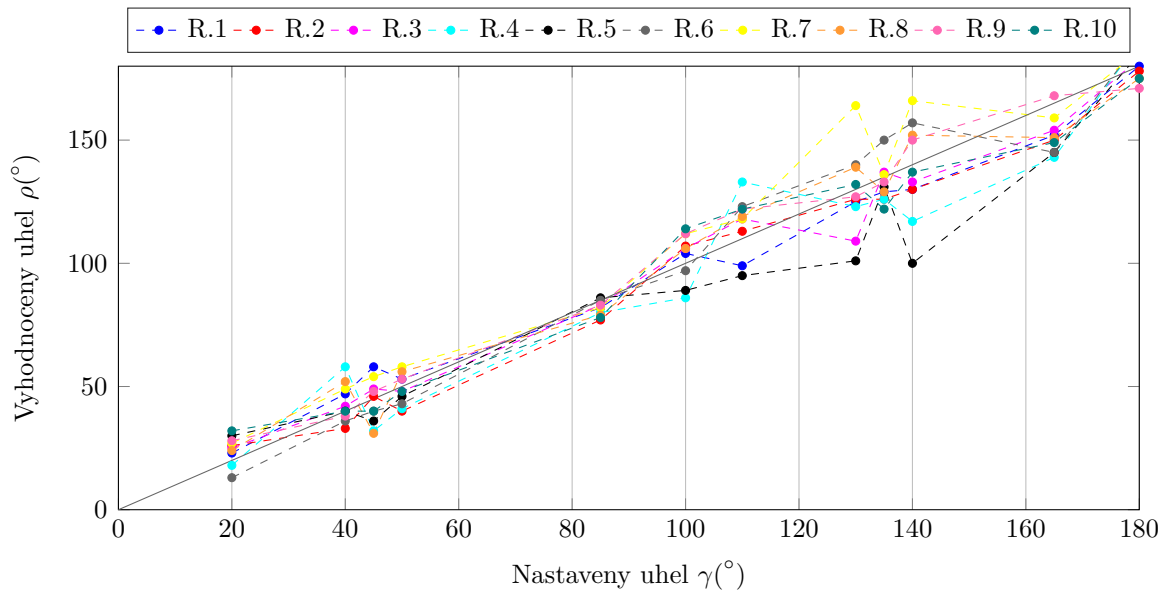


Obr. 8.3: Průměr a medián odchylek vztahených ke vstupní hodnotě úhlu γ .

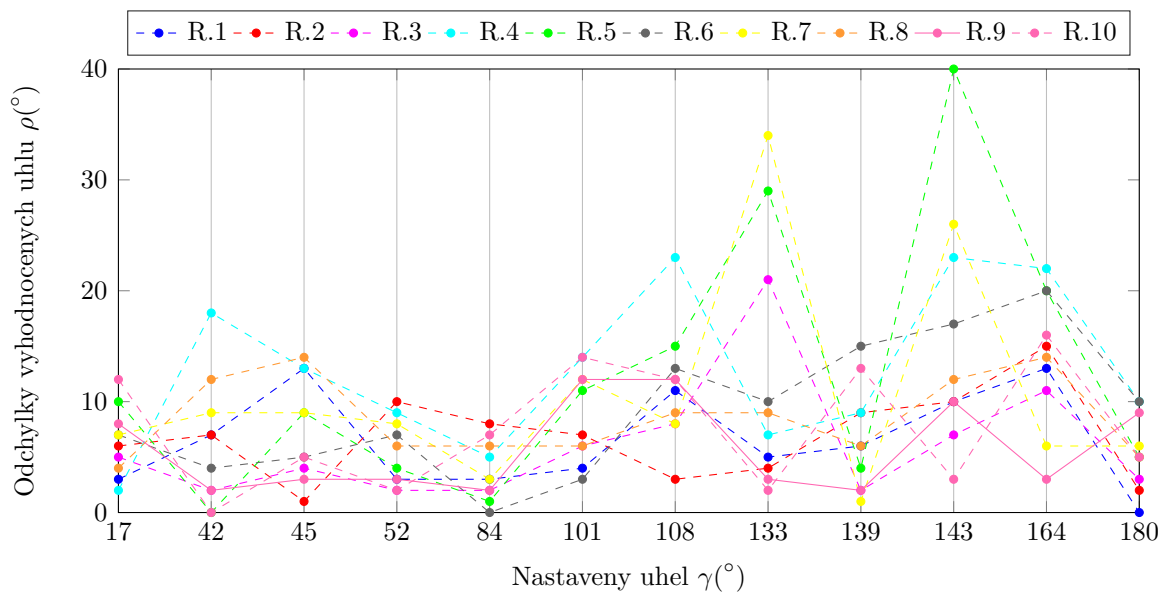
8.2 Metoda 2

Metoda využívá tzv. nastavování zvukových podnětů, čemuž jsme se věnovali okrajově v kapitole 5.2.3. Posluchač dostává za úkol nastavit svůj zvukový vjem podle zadané hodnoty úhlu. V praxi to vypadá tak, že posluchač má znemožněn vizuální kontakt s okolím a pouští se signál pouze z jednoho místa. Místo zdroje zvuku je u každého vyhodnovacího kroku nastaveno jinde, aby neměl posluchač k dispozici žádnou výchozí pozici, od které by mohl odhadová jím nastavenou hodnotu úhlu. Respondent se opět otáčí na otočné židli a je mu odečten úhel o který se otočí. Tato metoda má své jisté omezení v představivosti respondenta — ne každý člověk disponuje přesnou představou rozdělení půlkruhu po úhlových stupních. Skupina našich respondentů je technicky zaměřená a proto zde takový problém není. Problém by nastal při větším počtu lidí, kteří by neměli patřičnou schopnost geometrické představivosti — v tom případě by experimentu tohoto typu ani nebylo možné použít.

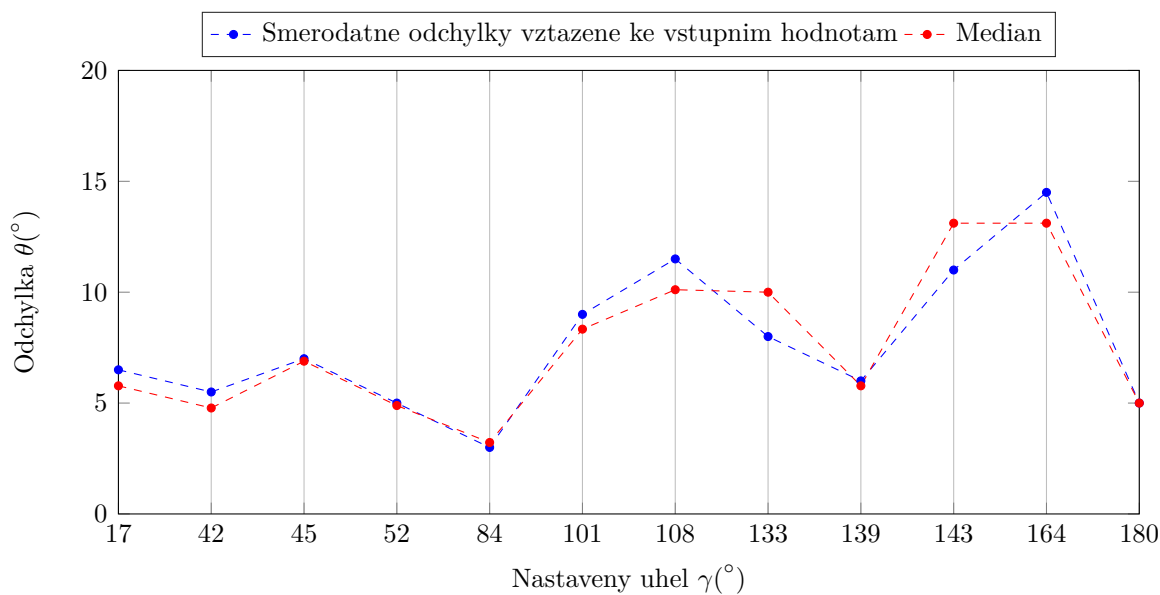
Při vyhodnocování používáme úplně stejný matematický aparát jako je tomu u metody 1.



Obr. 8.4: Naměřené hodnoty úhlů v závislosti na vstupní hodnotě úhlu γ .



Obr. 8.5: Absolutních odchylek od vstupní hodnoty úhlu γ .

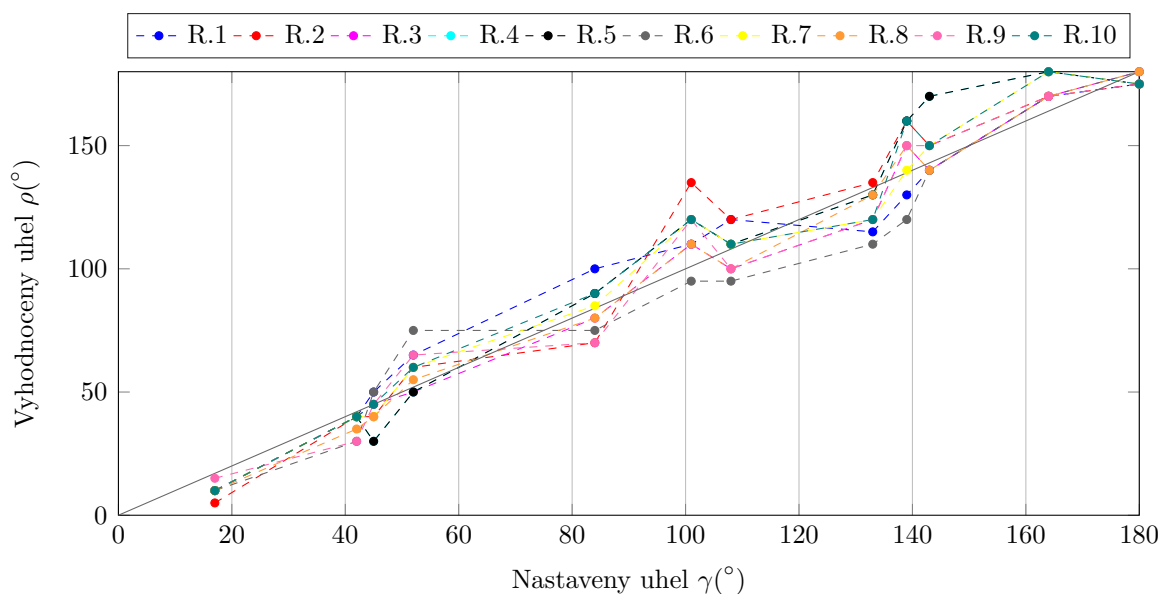


Obr. 8.6: Průměr a medián odchylek vztahených ke vstupní hodnotě úhlu γ .

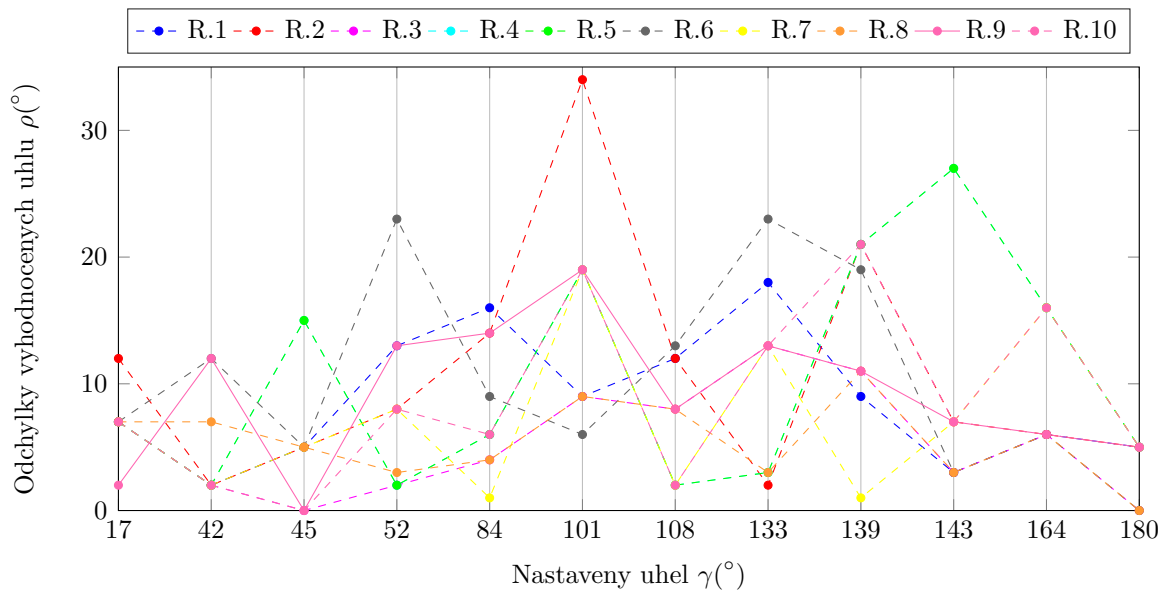
8.3 Metoda 3

Metoda je typem grafických metod (kapitola 5.2.2), které jsme se rozhodli použít hlavně z důvodu její rychlosti vyhodnocení a široké škále hodnot. Respondent dostává polární graf s hodnotami -180° až 180° po 5° krocích – viz. 5.2. Cílem je vyhodnotit vjem přicházejícího zvuku a hodnotu zaškrtnou v polárním grafu. Žádný respondent nevyužil možnosti zapsání hodnot do archu sám, ale hodnoty hlásil zapisovateli. Tuto variantu jsme nakonec uvítali, jelikož tím jsme znemožnili nutnost posluchače vizuálního vjemu a opět byla možnost vyhodnocovat pouze zvukové vjemy.

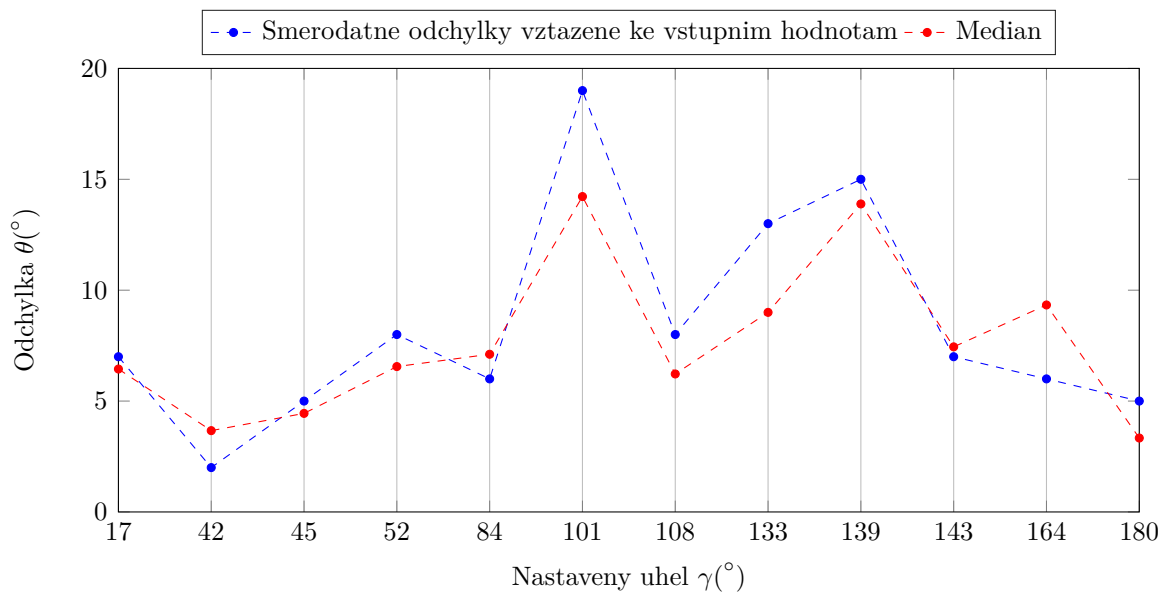
Vyhodnocení grafů je totožné s předchozími metodami.



Obr. 8.7: Naměřené hodnoty úhlů v závislosti na vstupní hodnotě úhlu γ .



Obr. 8.8: Rozdíl absolutních odchylek od vstupní hodnoty úhlu γ .

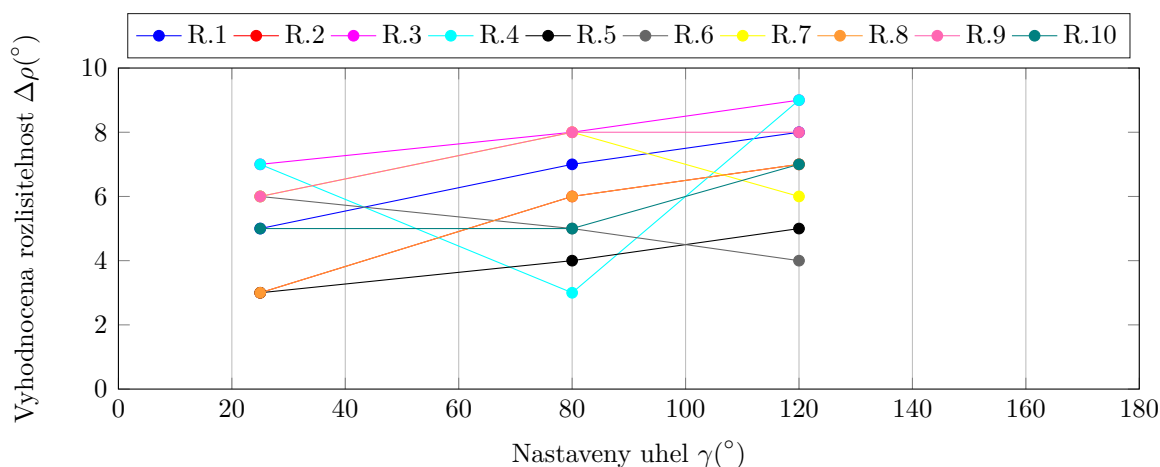


Obr. 8.9: Průměr a medián odchylek vztahených ke vstupní hodnotě úhlu γ .

8.4 Metoda 4

Čtvrtou metodu jsme zvolili v rámci ověření rozlišitelnosti v závislosti na předozadní pozici zdroje. Principem bylo pouštění krátkých 500 ms "burstů" (vždy dvojice) s 200 ms pauzou a poté další vzorky opět po dvojicích. Smyslem bylo rozestup úhlů těchto dvojic od sebe postupně vzdalovat, dokud posluchač nezaznamená moment, kdy se tyto vzorky nenachází ve stejném směru.

Očekávali jsme v předních polohách jednotky stupňů a v zadních až desítky. Následující graf nicméně vypovídá o tom, že při hodnotě úhlu $25^\circ - 35^\circ$ je rozlišitelnost minimálně 3° ale u některých respondentů dokonce až 7° .



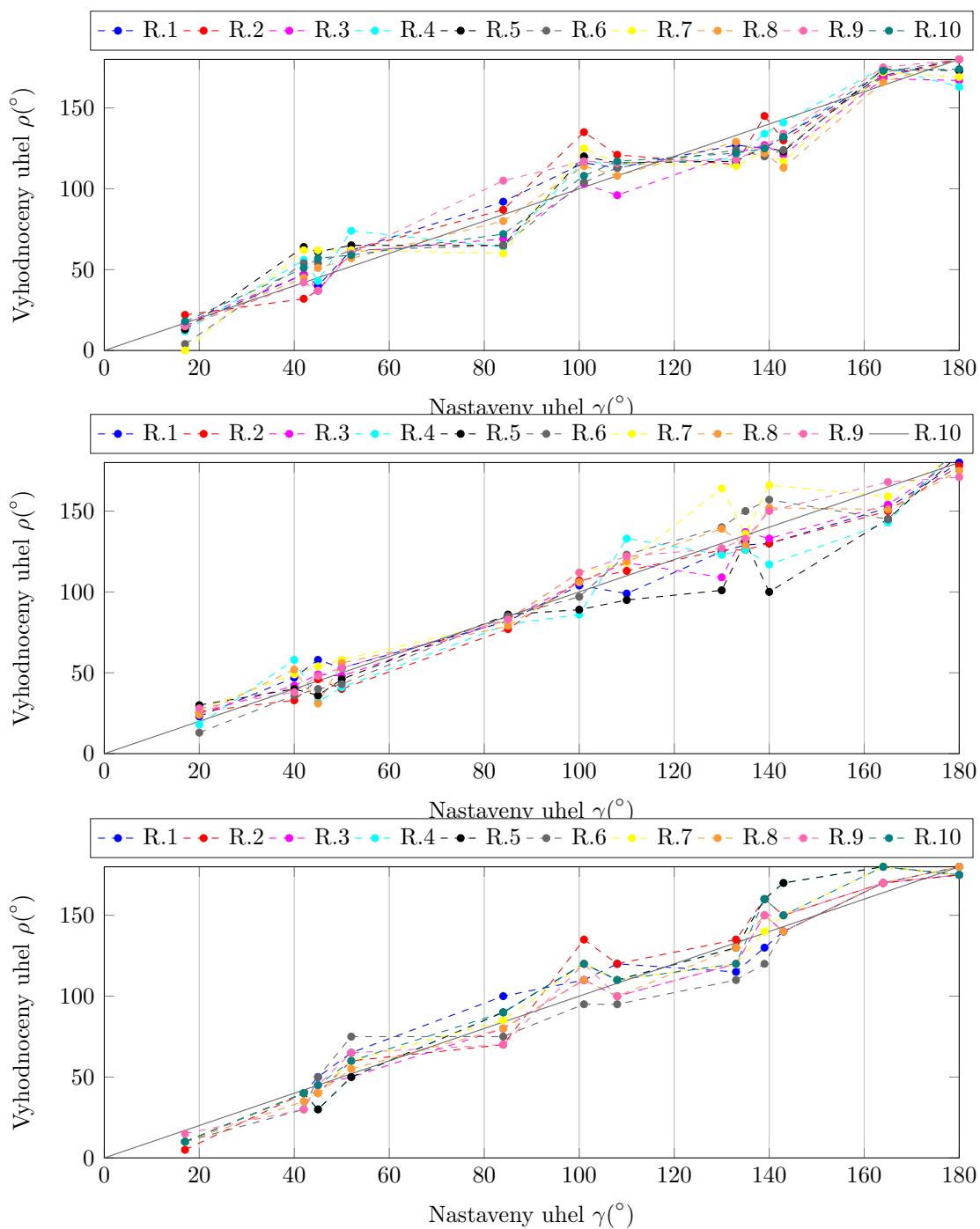
Obr. 8.10: Procentuální vyjádření úhlů nad hodnotou vstupního úhlu γ .

8.5 Shrnutí a porovnání výsledků metod

V předchozích kapitolách jsme si objasnili konkrétní metody vyhodnocení. V této kapitole bych rád porovnal blíže všechny metody mezi sebou a zaměřil se na jejich detaily.

Z grafu 8.11 můžeme odvodit společné znaky pro všechny metody — velmi špatná rozpoznatelnost kolem $120^\circ - 150^\circ$. Velmi zajímavým bodem je 85° , který je vyhodnocován u metody 1 a 3 poměrně chybově — v metodě 3 je tato hodnota naopak určována velmi přesně.

Dalším bodem je 17° — tedy obecně pozice hodně vepředu. Tyto pozice jsou dle teoretických poznatků o směrovosti lidského sluchu vnímány s největším rozlišením. Pokud se podíváme na náš případ z grafu 8.11, je patrné, že významný rozdíl vytváří to, zda se jedná o nastavení podnětů či vnímání podnětů a jejich následné zapsání. Pokud měl za úkol respondent úhel nastavit podle hodnoty, jeho odhad je

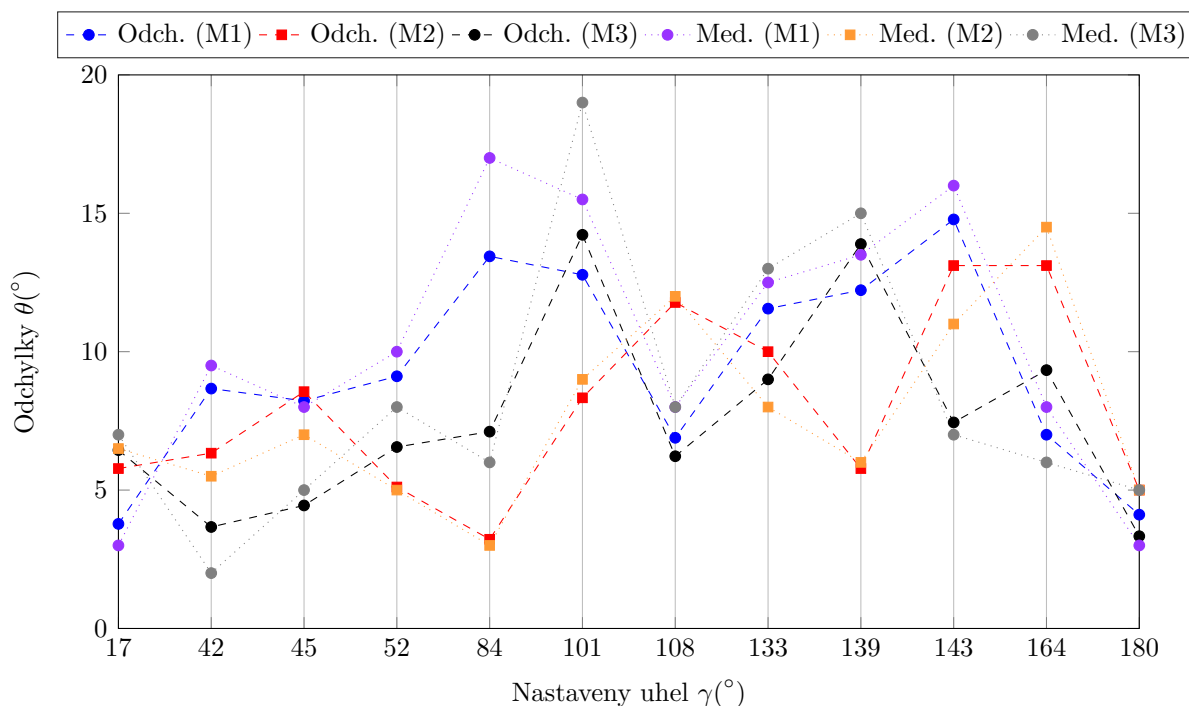


Obr. 8.11: Naměřené hodnoty úhlů v závislosti na vstupní hodnotě úhlu γ .

daleko přesnější než-li při pouhém určování směru přicházejícího zvuku podle určité škály.

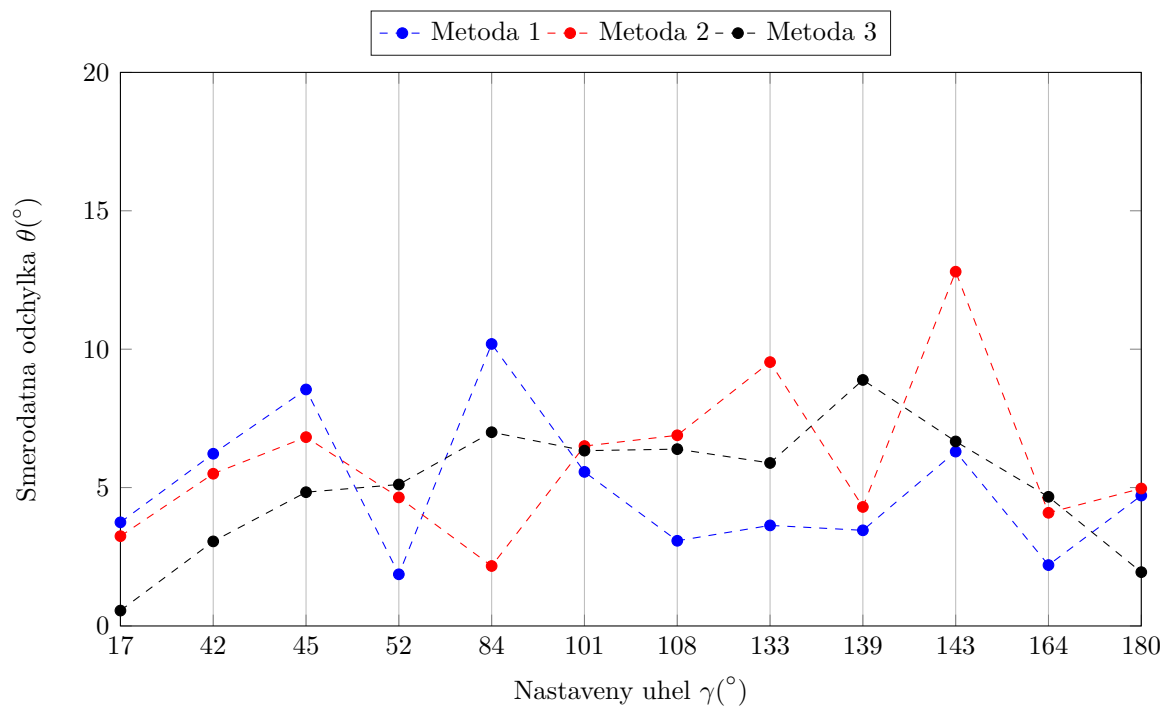
8.5.1 Statistické zpracování měření

Pokud tedy shrneme statistické data, která jsme už uváděli u jednotlivých metod, zjistíme patřičné souvislosti mezi metodami. V následujících dvou grafech vidíme prvně průměrnou odchylku a medián odchylky a dále pouze směrodatnou odchylku metod. Metoda 2 se při úhlu kolem 90° jeví jako nejlépe vyhodnocenou, jelikož obsahuje velmi malou průměrnou i směrodatnou odchylku.

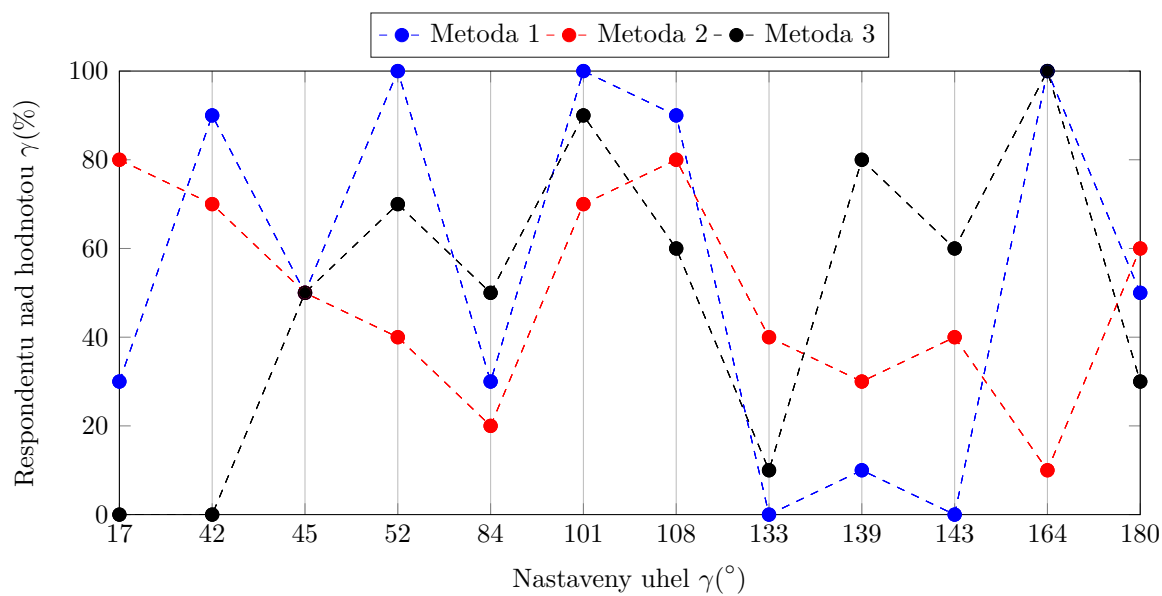


Obr. 8.12: Průměr a medián odchylek vztažených ke vstupní hodnotě úhlu γ .

Informace, zda byla hodnota větší či menší se z předchozích grafů dalo těžce vyčíst. V následujícím grafu jsou vyneseny procentuální poměry mezi hodnotou nad a pod nastavný vstupní úhlem a tím si můžeme udělat konkrétnější představu o tom, kolik respondentů hodnotilo pod nastavenou hodnotou a kolik nad ní.



Obr. 8.13: Směrodatné odchylky jednotlivých metod.



Obr. 8.14: Procentuální vyjádření počtu respondentů nad hodnotou vstupního úhlu γ .

8.5.2 Zhodnocení experimentů

Experimenty, které jsme provedli, měly za úkol demonstrovat základní principy vyhodnocování, objevit jejich úskalí a vyhodnotit použitelnost metod pro další použití.

Zde jsou základní postředy z experimentů:

1. V oblasti vyhodnocování nemá smysl hlubší analýzy dat z důvodu malého počtu respondentů. Reprezentativní vzorek by byl alespoň dvojnásobek respondentů, u kterých bychom zvýšili počet vyhodnocovaných úhlů na 20 a duplikovali bychom tyto hodnoty alespoň 2x.
2. K experimentům bychom potřebovali navrhnout a sestavit otočnou židli, která splní tyto podmínky:
 - (a) Zamezí pohybu trupu a hlavy — to bychom provedli pomocí např. podložky na bradu, která by určila pozici brady a celkově hlavy.
 - (b) Zaručí přesné natočení židle vůči počátku — např. soustava převodů, která by docílila přesného navrácení židle do původní polohy, aby se eliminovala chyba v nepřesném umístění výchozí polohy židle, respektive posluchače.
 - (c) Zkalibrování laserového zaměřovače vůči židli ale i vůči kruhové stupnici.
3. Nainstalovat optickou clonu k minimalizaci vizuálního kontaktu posluchače s okolím.

Pokud se zamyslíme nad výsledky experimentů, můžeme konstatovat, že jsme nezaznamenali žádné velké odchylky měření. Při vyšším počtu respondentů a větším množství vstupních dat bychom si mohli dovolit větší statistickou analýzu dat, což by prospělo regulérnosti výsledků.

V následujících měřeních bych se přikláněl k tomu využít metodu č.2 — tedy metodu nastavování úhlů pomocí otáčení se na židli. Jevila se mi jako nejvíce vyhovující pro respondenta, který měl poměrně velký časový úsek na nastavení natočení podle předem známé hodnoty a tím minimalizoval chyby např. v důsledku krátkého buzení.

9 ZÁVĚR

Cílem semestrální práce bylo ověřit elektroakustické a akustické vlastnosti místnosti a reproduktorů podle norem ITU-R BS.1116-1, EBU 3267 a IEC 60268-13. V druhé a třetí kapitole popisujeme tyto vlastnosti a hodnotíme je s možným odůvodněním jevu, který nastal. Tato práce je zároveň technickou správou, která by vypovídá o charakteru místnosti a použitých monitorů Genelec 1032A.

V dalších kapitolách rozebíráme princip lokalizace zvuku lidskými smysly a je zde rozebrán hlavní záměr této práce – panorámování pomocí VBAP. Na základě těchto poznatků je sestaven program v Matlabu, který generuje soubory s koeficientem zesílení. Ty jsou dále použity k vytvoření WAV souborů, které jsou přehrány šestikanálovým systémem.

Poslední část teoretického úvodu je věnována psychoakustickým metodám a jejich možné aplikaci na náš experiment. V praktické části jsou vyhodnoceny výsledky experimentů na vzorku 10 respondentů. Jsou zde popsány souvislosti v naměřených datech a vykresleny odchylky měření a vysvětleny jejich případné příčiny.

Výstupem a přínosem práce je především vytvoření akustických a elektroakustických parametrů místnosti, jejich vyhodnocení a návrh případných úprav. Po vytvoření technické zprávy s těmito parametry je dalším výstupem práce popis průběhu samotných experimentů založené na vytvoření polohy zdroje zvuku pomocí VBAP. Za cíl práce jsme si neurčili vyřešení psychoakustických otázek, nýbrž pouze otestování dostupných metod vyhodnocení a jejich následná interpretace.

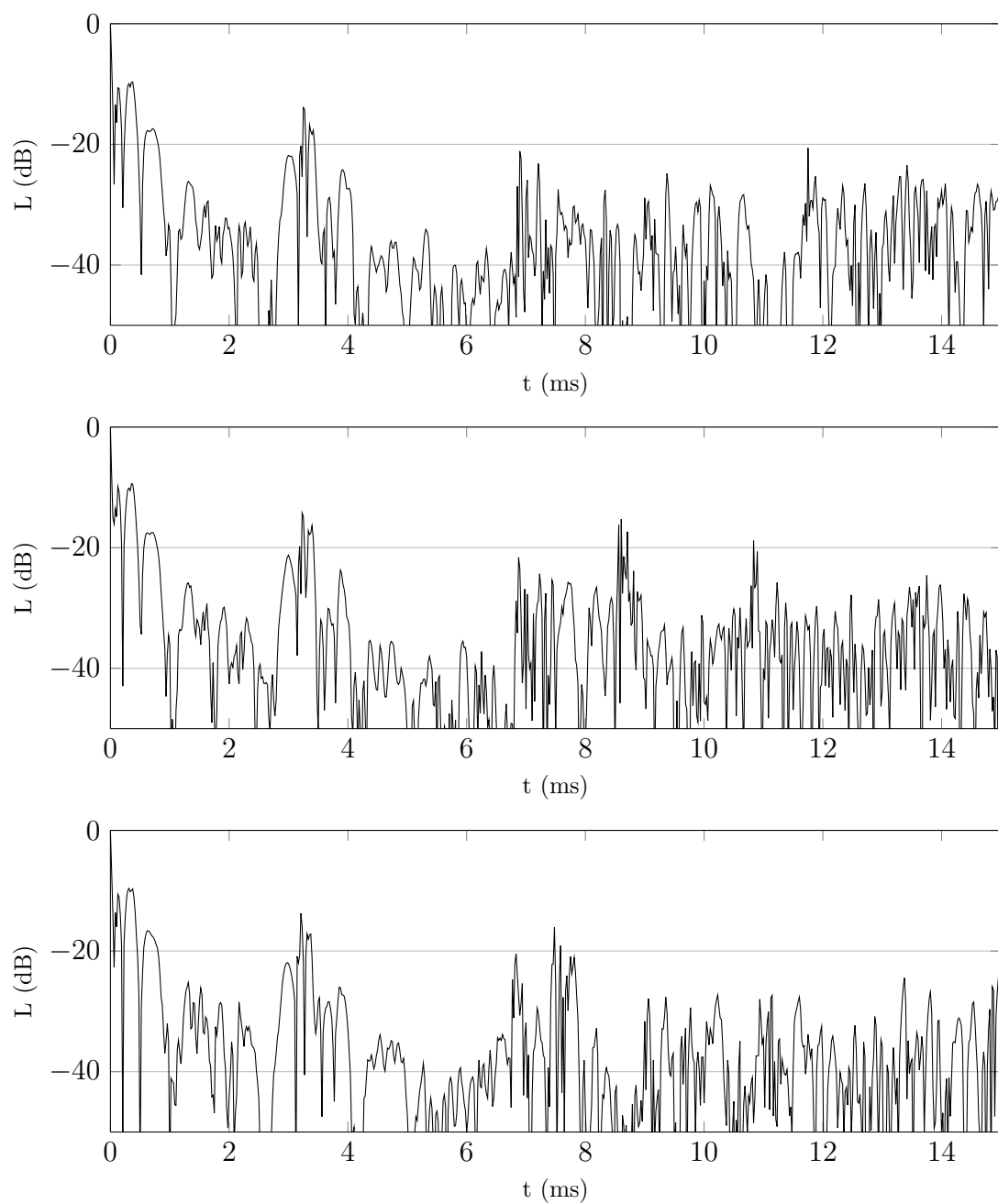
LITERATURA

- [1] BECH, S., ZACHAROV, N. , *Perceptual Audio Evaluation - Theory, Method and Application*. 1st Ed. Wiley, 2006. ISBN 978-0470869239
- [2] MELKA, A. , *Základy experimentální psychoakustiky*. Praha: Nakladatelství AMU, 2005 ISBN 80-7331-043-0.
- [3] International Telecommunication Union , *Recommendation ITU-R BS.1116-1, Methods for the Subjective Assessment of Small Impairments in Audio Systems Including Multichannel Sound System*. <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276.pdf>
- [4] European Broadcasting Union , *Listening conditions for the assessment of sound programme material: Monophonic and two-channel stereophonic*. 2nd Ed.
- [5] WILEY, J. , *DAFX - Digital audio effects*. ISBN 978-0-470-66599-2.
- [6] SCHIMMEL, J. , *Elektroakustika*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013, 167 s. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [7] KLEINER, M., TICHY, J. , *Acoustics of small rooms*.
- [8] ROSSING, T. , *Handbook of acoustics*.
- [9] EVEREST, A. , *Master handbook of acoustics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2009. ISBN 978-007-1603-331.
- [10] PULKKI, V. , *Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning*. J. Audio Eng. Soc., vol. 45, no. 6, pp. 456-466 (1997).
- [11] GENELEC. , *1032A: data sheet*. ©2000 [cit. 2013-11-26]. Dostupné z: <http://www.genelec.com>

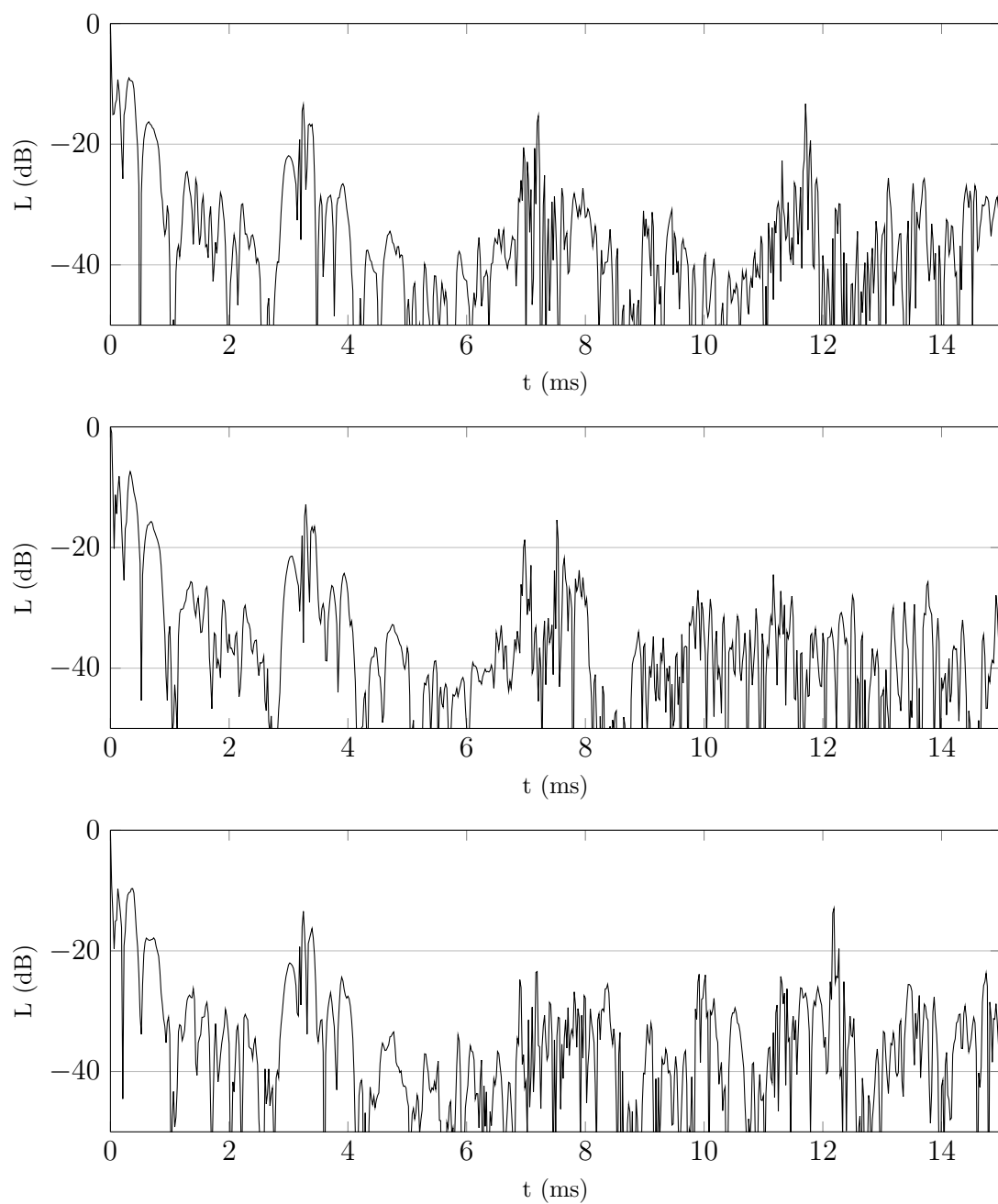
SEZNAM PŘÍLOH

A prvotní odrazy	67
B Směrová charakteristika	69
C Naměřené hodnoty všech respondentů	71
D Obsah přiloženého CD	76

A PRVOTNÍ ODRAZY

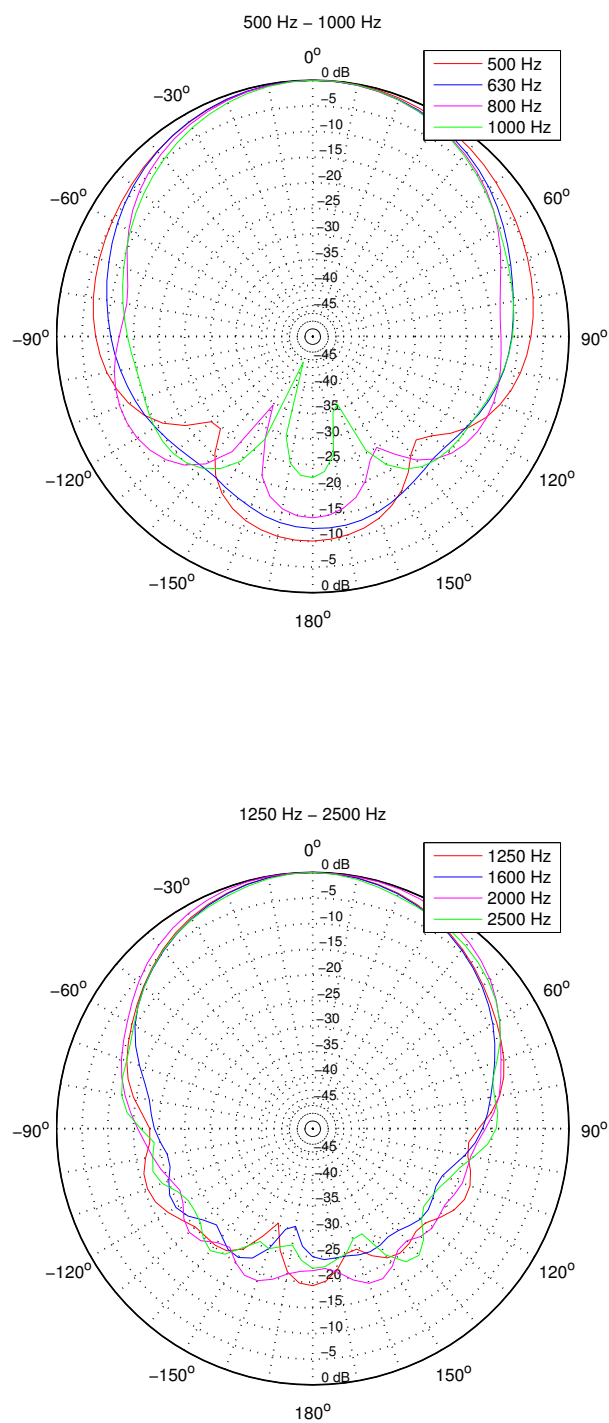


Obr. A.1: Prvotní odrazy monitorů 1, 2 a 3 (řazeno chronologicky).

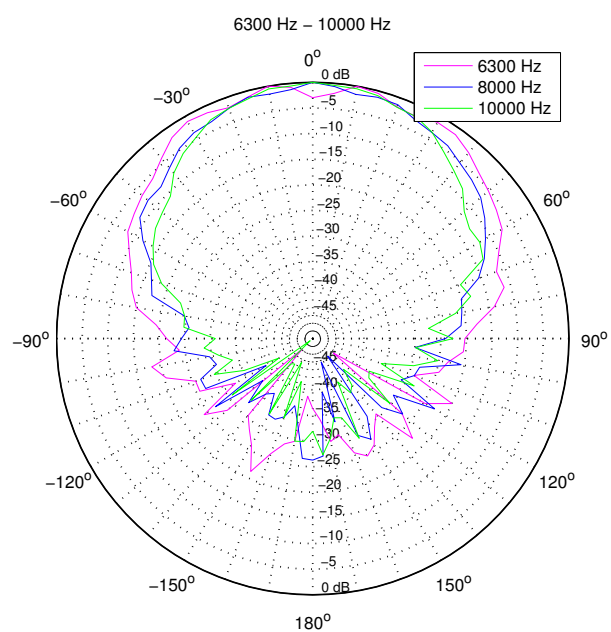
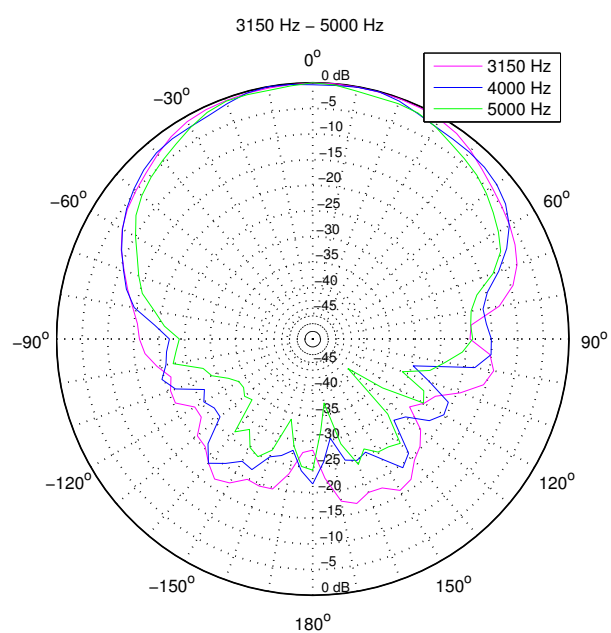


Obr. A.2: Prvotní odrazy monitorů 4, 5 a 6 (řazeno chronologicky).

B SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA

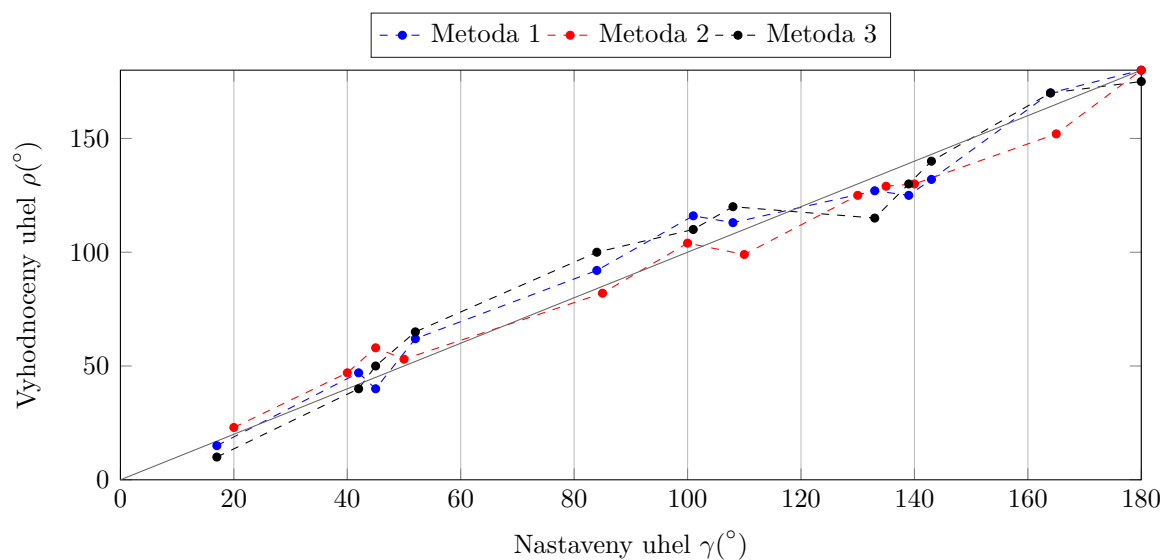


Obr. B.1: Polární graf směrové charakteristiky reproduktoru č.4 pro pásma 500 - 2500 Hz.

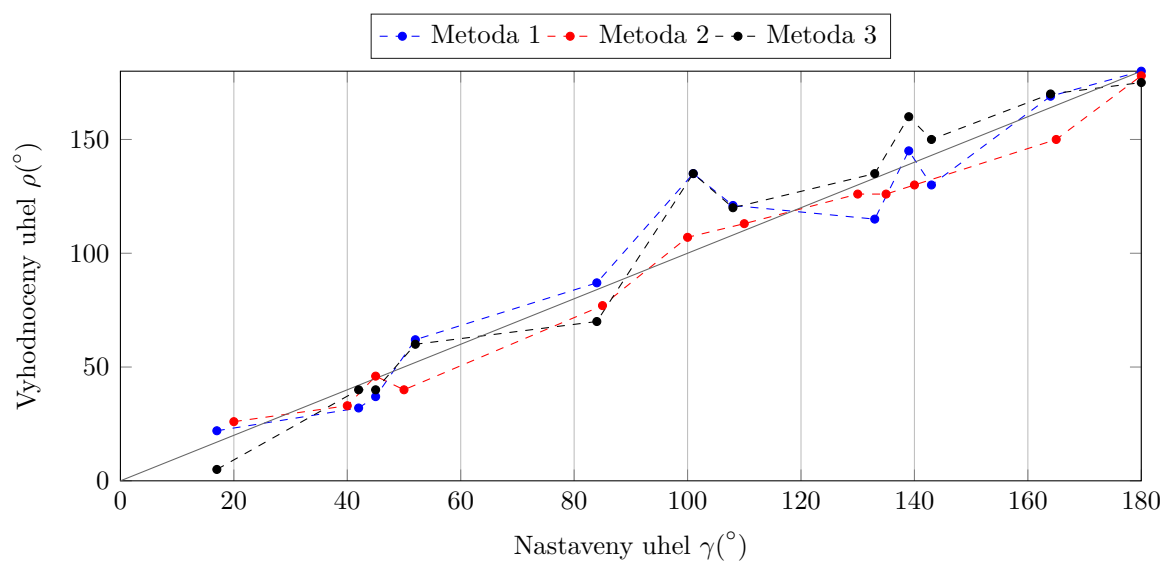


Obr. B.2: Polární graf směrové charakteristiky reproduktoru č.4 pro pásma 3150 - 10000 Hz.

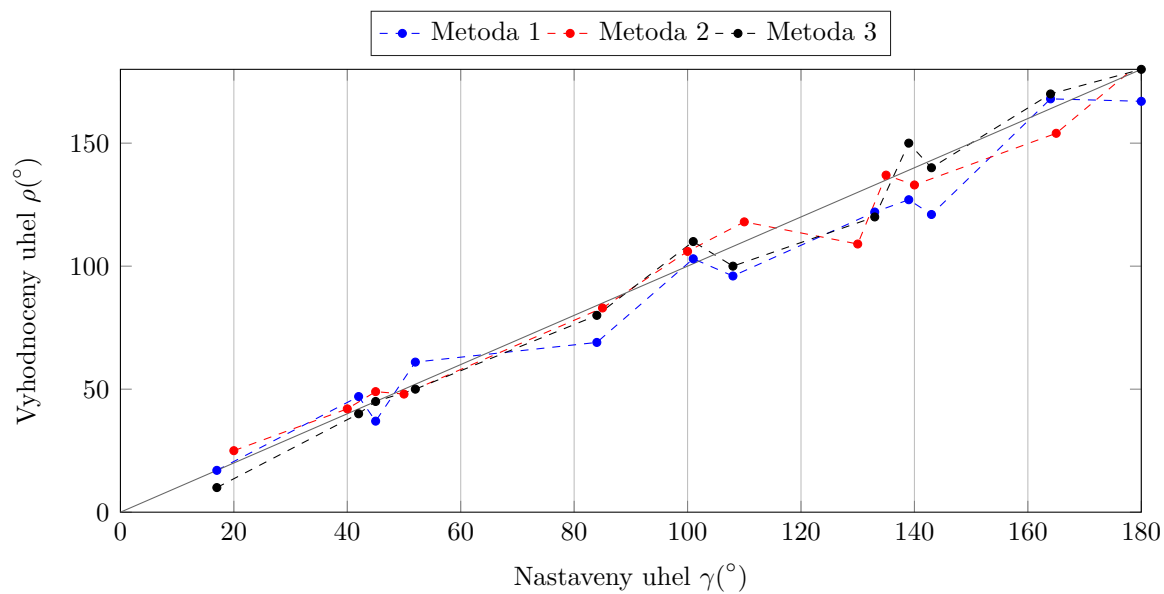
C NAMĚŘENÉ HODNOTY VŠECH RESPONDENTŮ



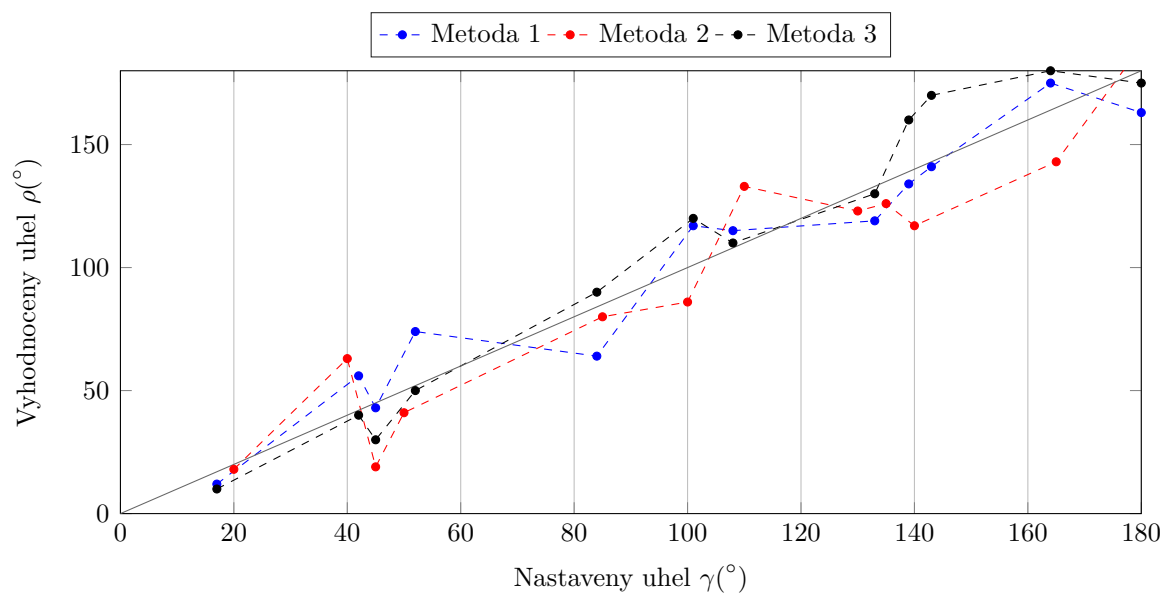
Obr. C.1: Hodnoty — respondent č.1.



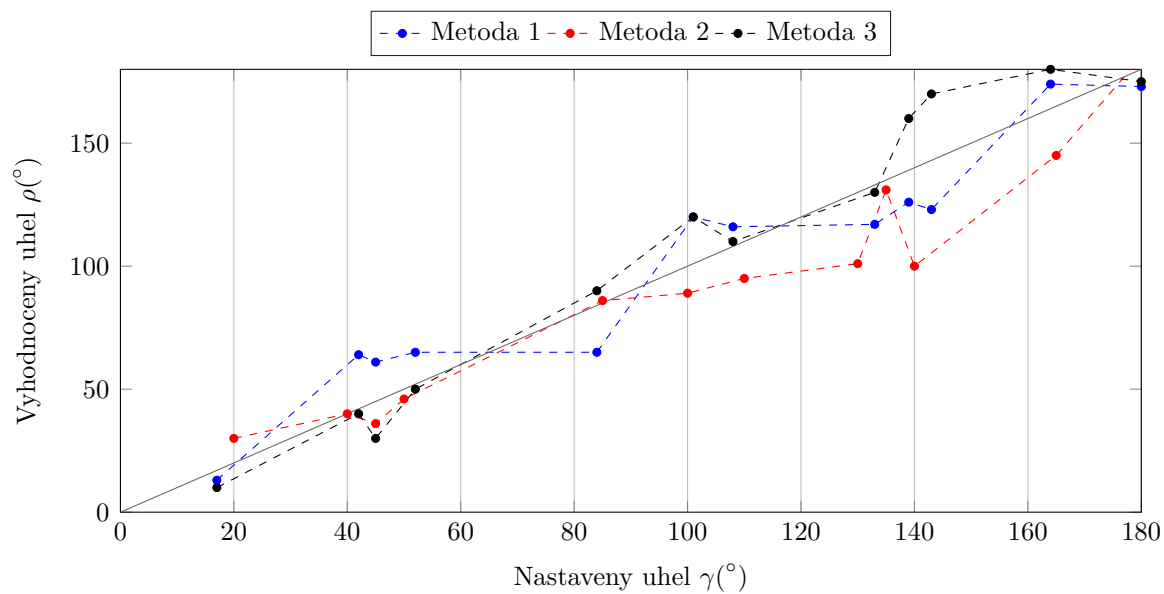
Obr. C.2: Hodnoty — respondent č.2.



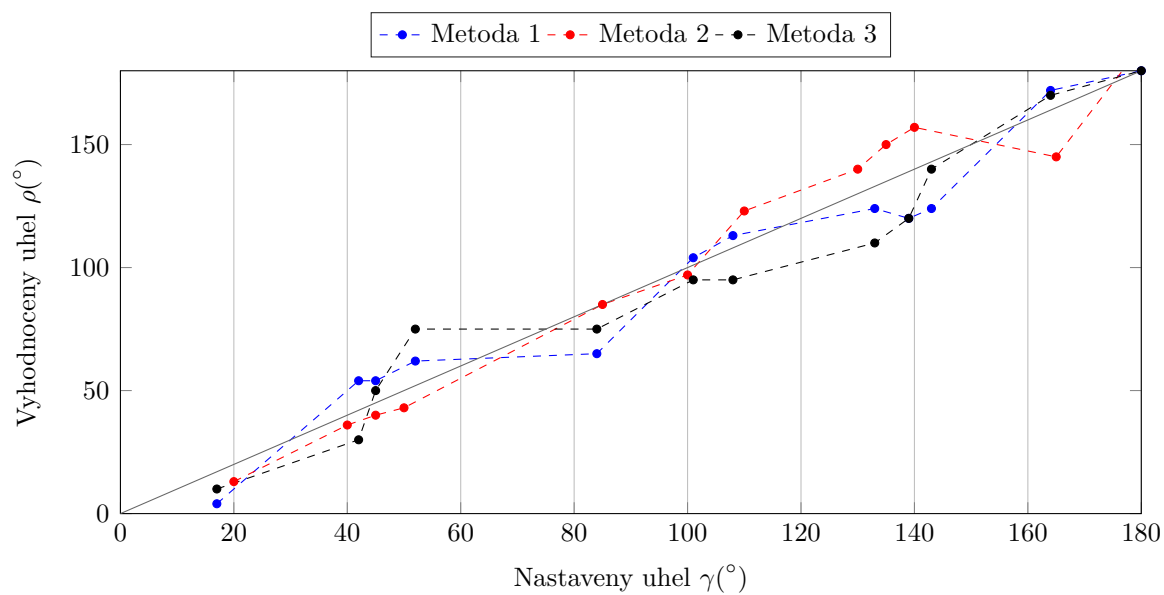
Obr. C.3: Hodnoty — respondent č.3.



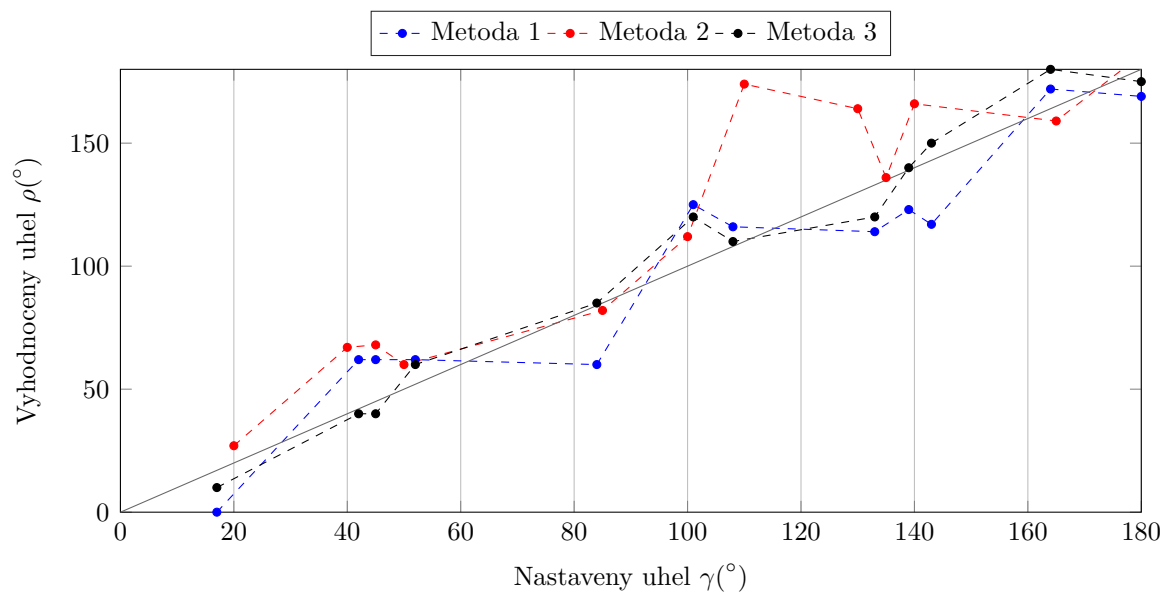
Obr. C.4: Hodnoty — respondent č.4.



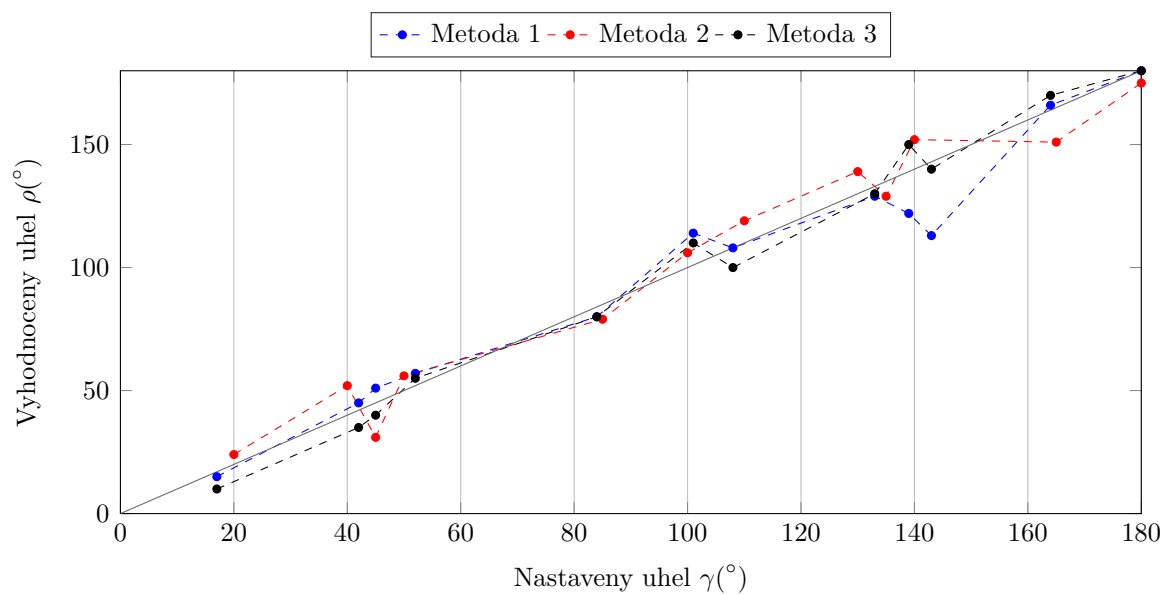
Obr. C.5: Hodnoty — respondent č.5.



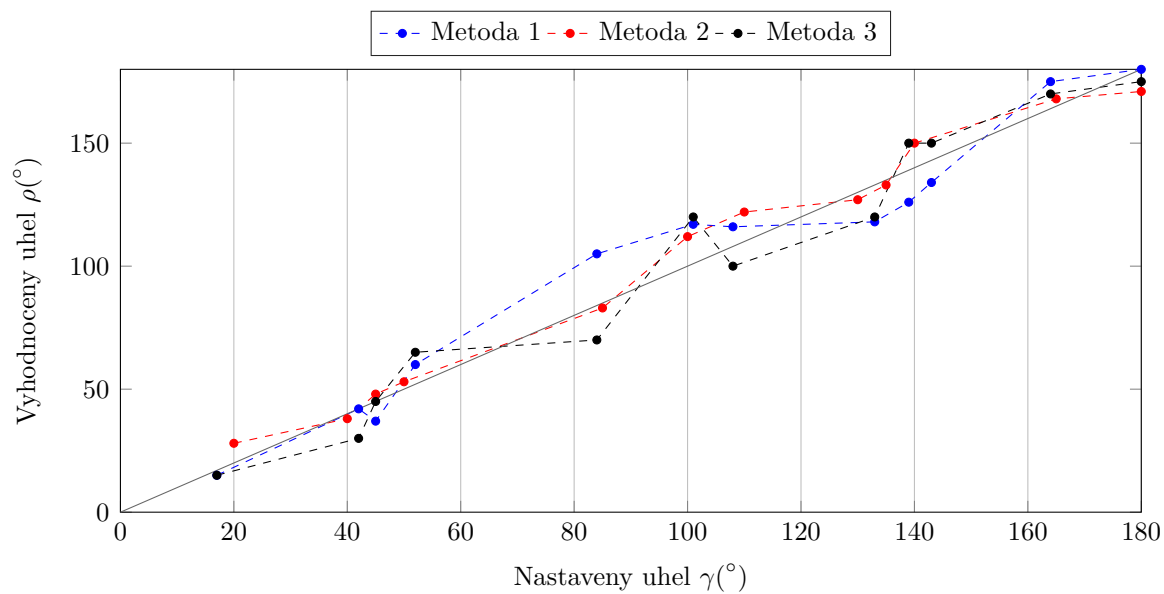
Obr. C.6: Hodnoty — respondent č.6.



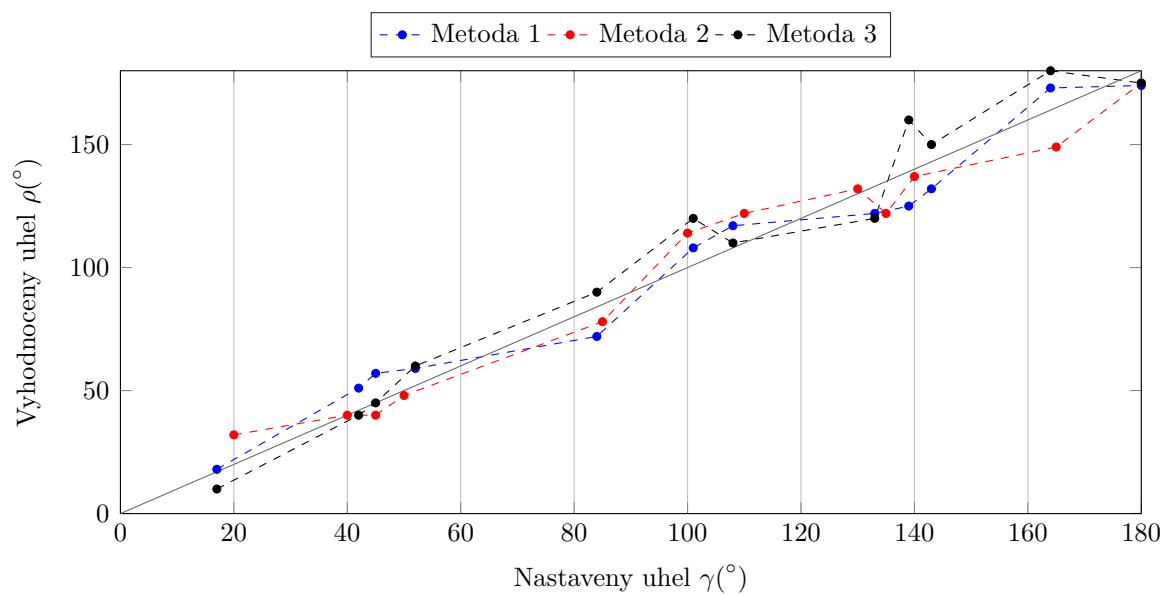
Obr. C.7: Hodnoty — respondent č.7.



Obr. C.8: Hodnoty — respondent č.8.



Obr. C.9: Hodnoty — respondent č.9.



Obr. C.10: Hodnoty — respondent č.10.

D OBSAH PŘÍLOŽENÉHO CD

Příložené CD obsahuje elektronickou verzi bakalářské práce ve formátu PDF a naměřené data ve formátu mat-file — tedy souboru určeného k dalšímu zpracování v Matlabu.

Adresářová struktura přílohy bakalářské práce na CD:

- /Doba dozvuku/
- /Early reflections/
- /Frekvenční charakteristika v místnosti/
- /Frekvenční charakteristika v bezodrazové komoře/
- /Hluk pozadí
- /Index směrovosti/
- /Odklon od osy reproduktoru/
- /Polární grafy/
- /Šum reproduktorů/
- /THD ratio/
- /Zkreslení reproduktoru/
- /Psychoakustické experimenty/
- /Úprava signálu reproduktoru/