

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

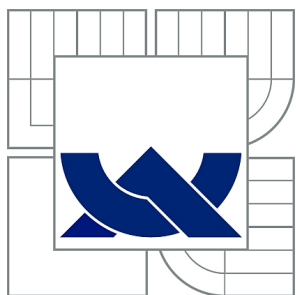
APLIKACE PRO MĚŘENÍ SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK
AKUSTICKÝCH HUDEBNÍCH NÁSTROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

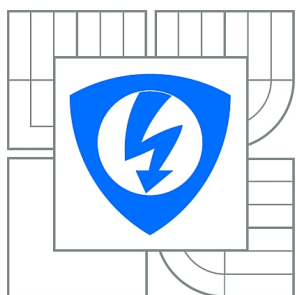
IVETA USTOHALOVÁ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

APLIKACE PRO MĚŘENÍ SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK AKUSTICKÝCH HUDEBNÍCH NÁSTROJŮ

APPLICATION FOR MEASUREMENT OF MUSICAL INSTRUMENTS DIRECTIONAL
CHARACTERISTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

IVETA USTOHALOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÁCLAV MACH

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Studentka: Iveta Ustohalová

ID: 146985

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Aplikace pro měření směrových charakteristik akustických hudebních nástrojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Rozšiřte algoritmus pro výpočet a vizualizaci směrových charakteristik hudebních nástrojů pro měření s libovolným počtem mikrofonů. Vytvořte grafické uživatelské rozhraní v prostředí Matlab a změřte směrové charakteristiky nejméně dvou hudebních nástrojů (housle, klarinet). Změřené charakteristiky porovnejte s "referenčními" charakteristikami v doporučené literatuře (pokud jsou k dispozici) a vyhodnoťte ve zvolených frekvenčních pásmech. Postup měření pečlivě zdokumentujte a připravte návod pro měření směrových charakteristik.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2008, 440 s.. ISBN 978-80-7331-127-8.

[2] GEIST, Bohumil. Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: Muzikus, 2005, 281 s. ISBN 80-862-5331-7.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 4.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Václav Mach

Konzultanti 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 práce se zabývá směrovými charakteristikami akustických hudebních nástrojů a jejich měřením. V práci je popsáno sestavení měřicí aparatury včetně mikrofonního pole a realizace následného měření. Dále je popsáno zpracování získaných zvukových nahrávek ve formátu *.wav programem vytvořeným pro tento účel v prostředí MATLAB. Výstupem jsou grafy znázorňující směrové charakteristiky zvolených nástrojů – houslí, klarinetu, kytary a akordeonu ve vybraných třetinooktávových pásmech. Výsledky měření jsou interpretovány a v případě dostupnosti porovnávány s hodnotami uvedenými v literatuře.

KLÍČOVÁ SLOVA

Směrová charakteristika, barva zvuku, vyzařování, mikrofon, akustické nástroje, zvuk, hudba

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the directional characteristics of acoustics music instruments measurements. Compilation of measuring apparatus including microphone array and the individual steps of measurement and post-processing of audio recordings in *.wav format using program created in MATLAB and ment for this purpose is described. The output are graphs showing the directional characteristics of selected instruments – violin, clarinet, guitar and accordion in selected one-third octave bands. The measurement results are interpreted and if available, compared with results given in literature.)

KEYWORDS

Directional characteristics, timbre, radiation, microphone, array, acoustics instruments, sound, music

USTOHALOVÁ, Iveta *Měření směrových charakteristik akustických hudebních nástrojů*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 53 s. Vedoucí práce byl Ing. Václav Mach

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měření směrových charakteristik akustických hudebních nástrojů“ jsem vypracovala 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 neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Machovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci a dále Ing. Jirímu Schimmelovi, PhD. za cenné rady a optimistický přístup.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	9
1 Akustické hudební nástroje	10
1.1 Vznik tónu v hudebním nástroji	10
1.2 Strunné nástroje	11
1.2.1 Housle	12
1.2.2 Kytara	12
1.3 Dechové nástroje	13
1.3.1 Klarinet	13
1.3.2 Akordeon	13
1.4 Dynamika tónu hudebních nástrojů	13
1.4.1 Zvukové pole nástroje	14
2 Směrové charakteristiky	16
2.1 Vyzařovací vlastnosti hudebních nástrojů	16
2.1.1 Barva tónu	18
2.1.2 Rychlostní potenciál	18
2.1.3 Činitel směrovosti	18
2.1.4 Index směrovosti	18
3 Elektroakustická měření	20
3.1 Umělá generace tónu	20
3.2 Měření v reálném prostoru	21
4 Praktická realizace měření	23
4.1 Mikrofonní pole	23
4.2 Popis prvků měřicí soustavy	24
4.3 Nastavení a kalibrace měřicí soustavy	25
4.4 Průběh měření	26
4.5 Softwarové zpracování signálu	27
5 Realizace v prostředí MATLAB	30
5.1 Volba parametrů funkce	30
5.2 Funkce vypocty.m	32
5.3 Grafické rozhraní pomocí GUIDE	33

6 Naměřená data	34
6.1 Housle	34
6.2 Klarinet	35
6.3 Kytara	37
6.4 Akordeon	38
7 Závěr	41
Literatura	43
Seznam symbolů, veličin a zkratk	44
Seznam příloh	45
A Návod k měření	46
A.1 Rozestavení měřících mikrofónů	46
A.2 Synchronizace zařízení	47
A.3 Signálová cesta	49
A.4 Kalibrace mikrofónů	50
A.5 Měření	52
A.5.1 Instrukce pro hráče	52
A.5.2 Program Cubase	52
B Obsah elektronické přílohy	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Hlavní směry (3 dB) vyzařování houslí v horizontální rovině podle[2]	17
4.1	Půdorys vzájemného postavení měřících mikrofónů a měřeného zdroje zvuku v bezodrazové komoře	27
4.2	Bokorys vzájemného postavení měřícího mikrofónu a měřeného zdroje zvuku v bezodrazové komoře	27
4.3	Signálové cesty mezi jednotlivými prvky měřící soustavy	28
5.1	Zjednodušené zobrazení průběhu skriptu v prostředí MATLAB	31
6.1	Modulová kmitočtová charakteristika tónu G houslí	34
6.2	Směrové charakteristiky tónu G houslí pro vybraná kmitočtová pásma	35
6.3	Modulová kmitočtová charakteristika tónu G klarinetu	36
6.4	Směrové charakteristiky tónu G klarinetu pro vybraná kmitočtová pásma	36
6.5	Modulová kmitočtová charakteristika akordu G kytary	37
6.6	Směrové charakteristiky akordu G kytary pro vybraná kmitočtová pásma	38
6.7	Pozice hudebníka při hře na kytaru	38
6.8	Modulová kmitočtová charakteristika akordu G akordeonu	39
6.9	Směrové charakteristiky akordu G akordeonu pro vybraná kmitočtová pásma	39
6.10	Pozice hudebníka při hře na akordeon	40
A.1	Ukázka nastavení prvního A/D převodníku	47
A.2	Výběr ASIO Driveru Hammerfall DSP	48
A.3	Kontrola nastavení ASIO Hammerfall DSP	49
A.4	Kontrola nastavení ASIO Driveru Hammerfall DSP, Mode – Slave . . .	50
A.5	Nastavení směrování vstupů A/D převodníku do kanálů ADATu	51

ÚVOD

Hudba provází člověka již od pradávna. Snad to byla jeho touha vytvářet tóny podobné zpěvu ptáků, zpříjemnit si práci nebo jen ukrátit dlouhou chvíli, co jej přimělo vytvářet primitivní hudební nástroje. V průběhu let pak tyto jednoduché nástroje zdokonalil až do dnešní podoby, kdy je hráč jejich prostřednictvím schopen produkovat široké spektrum tónů. Zvuk jednotlivých nástrojů od sebe rozeznáme díky jeho barvě, ta však výrazně závisí na vzájemném postavení hudebníka a posluchače či snímacích mikrofونů. K určení co možná nejideálnější takovéto vzájemné polohy potřebujeme znát hlavní směry vyzařování nástroje, jež vychází z jeho směrových charakteristik. Tato práce se zabývá postupy měření směrových charakteristik pomocí mikrofونního pole, zpracováním získaných nahrávek do podoby grafického výstupu a jeho vyhodnocením.

Nejdříve budou vysvětleny základní pojmy týkající se vyzařování a dynamiky akustických hudebních nástrojů. Stručně se zde také seznámíme s principem generování zvuku strunnými a dechovými nástroji, jejichž vybraní zástupci jsou předmětem této práce. Poté se budeme zabývat teorií a postupy měření směrových charakteristik nástrojů v bezodrazové komoře i reálném prostoru. Krátce zmíníme výhody a nevýhody umělé generace tónu v porovnání s buzením nástroje reálným hráčem.

Praktická část práce se potom skládá z realizace měření vybraných hudebních nástrojů – houslí, klarinetu, kytary a akordeonu pomocí mikrofونního pole, podrobné dokumentace tohoto měření ve formě návodu, a následného zpracování naměřených hodnot v prostředí MATLAB. Popis jednotlivých prvků programu a jejich funkce se nachází v kapitole 5. Výstupem jsou grafy směrových charakteristik pro zvolená třetinooktávová pásma, které jsou porovnávány s referenčními hodnotami získanými z uvedených publikací. Výsledky práce a porovnání získaných dat jsou interpretovány v kapitole 6.

1 AKUSTICKÉ HUDEBNÍ NÁSTROJE

Akustické hudební nástroje jsou definovány jako vhodně upořádaná, kmitání schopná hmota, která svoji kmitavou energii vyzařuje do prostoru ve formě zvukové vlny[2]. My se na ně můžeme dívat jako na provázanou soustavu oscilátoru a rezonátoru, která pokud je vhodným způsobem buzena (excitována), dokáže do okolního prostoru vyzařovat vlnění, které vnímáme jako zvuk.

1.1 Vznik tónu v hudebním nástroji

Akustický systém každého hudebního nástroje tvoří tři funkční části. Budící element či mechanismus neboli excitátor, kmitající element neboli oscilátor a zesilující a vyzařující element – rezonátor.

Úlohu rezonátoru nelze ztotožňovat s funkcí klasického zesilovače, nýbrž filtru, který ve spektru kmitů oscilátoru zdůrazňuje, tj. subjektivně „zesiluje“ konkrétní frekvenční oblasti. Současně rezonátor umožňuje vyzářit kmitavou energii oscilátoru do okolního prostoru s minimálními ztrátami. V případě houslí a dalších smyčcových nástrojů je, jak už jejich název napovídá, excitátorem smyčec, oscilátorem struna a rezonátorem ozvučná skříňka.

Při generaci a přenosu hudebního signálu tvoří hráč spolu s nástrojem organický celek, jež má řadu specifických vazeb a vlastností. Hráč může být s nástrojem v tom nejtěsnějším kontaktu, kdy je sám přímým zdrojem energie pro oscilátor nebo dokonce samotným funkčním oscilátorem, což je případ dechových nástrojů. Za rezonátor může být hráč považován (vyjma zpěvu), při hře na lidový nástroj zvaný brumle. Opakem takto těsné vazby je například hra na varhany s pneumatickou či elektrickou tónovou trakturou, při níž je hráč s nástrojem svázán naprosto minimálně.

Typ excitátoru resp. časový průběh buzení oscilátoru určuje charakter produkovaného tónu a tím i základního typologického zařazení hudebního nástroje. U neperkusních nástrojů má buzení kontinuální průběh, u perkusních nástrojů impulzní průběh. U obou typů nástrojů jsou kmity oscilátoru vždy tlumené, u neperkusních nástrojů se jedná o nucené kmity, u perkusních nástrojů o kmity volné. V rámci klasické systemetiky odpovídá typ oscilátoru – kmitající struna strunným nástrojům (chordofonům), jazýček (jednoduchý i dvojitý) rozkmitávaný proudem vzduchu dechovým nástrojům (aerofonům), kmitající membrána blanzvučným nástrojům (membranofonům) a oscilátor v podobě kmitající tyče, trubice či desky nástrojům samozvučným (idiofonům)[2].

Základní vlastností hudebních nástrojů je schopnost determinace výšky, hlasitosti, barvy a délky tónu v případě vyladěných nástrojů, u nevyladěných nástrojů odpadá schopnost přesně determinovat výšku tónu resp. zvuku. Na uvedené vlastnosti tónu má zásadní vliv konstrukce hudebního nástroje, technologie zpracování a materiál jeho jednotlivých funkčních částí, ale také způsob hry a klimatické podmínky.

Hlavním požadavkem na konstrukci hudebního nástroje je přenos kmitavé energie mezi jednotlivými funkčními částmi (především mezi oscilátorem a rezonátorem), u nichž pak hraje důležitou roli jejich hmotnost, tlumení a provedení či těsnost vzájemné vazby mezi nimi. Celková stavba a přesnost jejího provedení pak určuje, která část nástroje bude determinovat např. výšku tónu. Kupříkladu u houslí je touto částí oscilátor – struna. Její výrazné rezonanční vlastnosti a nízké tlumení převažují nad sice hmotnější a rozměrnější rezonanční skříňkou, která je ale mnohem silněji tlumena.

Výsledné vlastnosti tónu, především pak jeho barva, jsou obecně dány „součinem“ spektra kmitů oscilátoru a frekvenční charakteristiky rezonátoru[2].

1.2 Strunné nástroje

Prapředkem dnešních houslí, stejně jako ostatních strunných nástrojů je s největší pravděpodobností obyčejný luk. První struny se vyráběly ze zvířecích střívek. Byly pružné, pozoruhodně pevné a bylo poměrně snadné vytvořit množství strun s velice podobnými vlastnostmi. Později byly tyto struny nahrazeny kovovými, které vykazovaly vlastnosti ještě lepší – především větší pevnost. Bylo také mnohem jednodušší vyrobit více identických kusů[4].

Struna je základním kmitajícím elementem – oscilátorem strunných nástrojů, jednoduchá či opředená, kovová, střevová nebo z plastické hmoty. Struna představuje pružné prostředí, ve kterém se šíří příčné vlnění, tj. v kolmém směru k převažujícímu rozměru struny – délce[2]. Na dokonale tuhém upevnění struny dochází k úplnému odrazu vlny a to s opačnou fází. Tím, že je struna upevněna na obou koncích, je její výsledný pohyb součtem dvou vln šířících se po ní proti sobě. Výsledný tón záleží na délce struny, příkladem může být „zkracování“ strun jejich přitisknutím na hmatník v určité části – vzdálenosti, ale také na konkrétním místě délky struny kde je buzena. Strunné nástroje mohou být buzeny drknutím, jako například kytara, úderem u klavíru nebo smýkáním, což je případ smyčcových nástrojů, do kterých patří například housle. A právě housle a kytara patří mezi vybrané nástroje, jejichž směrovými charakteristikami se tato práce zabývá.

1.2.1 Housle

První skutečné housle se objevily kolem roku 1580 a během krátké doby dosáhly velké obliby. Vrchní deska houslí je obvykle vyráběna z měkkého dřeva jako je smrkové nebo borovicové. Právě vrchní deska je hlavním rezonátorem. Zbytek ozvučné skříňky je vyráběn z tvrdšího dřeva, například javorového. Hmatník bývá většinou mahagonový. Mezi odborníky se dodnes spekuluje o tom, jakou měrou se tvary ozvučné skříňky podílí na akustických vlastnostech houslí a jestli nejsou spíše jen dekorativní záležitosti. Nejznámějším výrobcem houslí byl Antonio Stradivari. Během jeho života prošly housle několika výraznými vylepšeními, která nebyla nikdy překonána a od jeho smrti se už housle příliš nezměnily. Smyčec, jež je původcem onoho krásně táhlého tónu houslí se dodnes obvykle vyrábí z koňských žíní, jelikož s žádnými syntetickými materiály nebylo dosaženo takové kvality reprodukce, jako právě s přírodními žíněmi.[4].

1.2.2 Kytara

Nikdo přesně neví, kdy si hudebníci uvědomili, že uchycením struny prstem v určitém bodě zkrátí její vibrující délku a zahrany tón bude vyšší. Ve středověku se objevily nástroje s dlouhými hmatníky rozdělenými do částí pomocí pražců. Ty byly stejně jako struny ze střívek. Jejich význam je prostý, pouhým přitlačením struny bříškem prstu by se vlivem měkkosti tkáně zvuk struny výrazně utlumil. Přitlačením na pražec má ale struna dostatečně tvrdý podklad, proti kterému může vibrovat, její útlum je proto mnohem menší.

První zmínky o nástroji podobném kytáře pochází ze 13. století, měl čtyři struny a posuvné pražce vyrobené ze střívek. Hudebník ke hře používal husího brku jako trsátka. Vihuela, nástroj se čtyřmi páry strun a deseti pražci, se objevil během 16. Století ve Španělsku. Těšil se velké oblibě a bylo pro něj napsáno mnoho skladeb, které se dochovaly dodnes. Hra na tento nástroj se již příliš nelišila od hry na kytaru tak, jak ji známe dnes, jako trsátka se ale stále používalo ptačího brku.

Během let se počet strun ustálil na šesti a hmatníky, které se začaly vyrábět z kovu, byly pevně uchyceny v předem daných polohách. V průběhu 19. století se ozvučná skříňka kytary výrazně zvětšila, za což vděčí zájmu posluchačů a z toho vycházející snaze o silnější a hlasitější zvuk nástroje. Výsledkem je dnešní kytara, která se může pyšnit titulem nejčastěji používaného hudebního nástroje západního světa.

1.3 Dechové nástroje

Základem dechových hudebních nástrojů, aerofonů, je píšťala v níž je zdrojem zvuku podélné kmitání zvukového sloupce. Jako generátor zvuku slouží tlak vzduchu vytlačovaný z plic či měchů a modifikovaný rty, jazykem, mechanismem či konstrukcí nástroje. Proud vzduchu se nárazem na hranu (ret) mění ve vířivý proud, vzniklé víry vyvolávají tlakové změny a vedou k rozkmitání vzduchového sloupce v píšťale. Čím vyšší je rychlost proudění vzduchu a čím menší je štěrba, tím vyšší je výsledný tón [1].

1.3.1 Klarinet

Tento jednoplátkový hudební nástroj, získal své jméno díky tomu, že ve vyšších polohách zní podobně jako trubka. Klarinet je primárně vyráběn ze dřeva, ale setkáme se i s jeho kovovými variantami. Během historického vývoje se objevily dva hmatové systémy, u nás používanější Boehmův a Öhlerův, ty mají odlišnou soustavu klapek a dírek. Prapředkem klarinetu, který jako první dostal charakteristické klapky je hoboj, který pochází ze 17. století. Následovníkem pak dobře známý saxofon.

1.3.2 Akordeon

Zdrojem zvuku akordeonu je množství dřevěných či plastových jazýčků rozechvívaných proudem vzduchu. Ten je vytvářen pohybem měchu s množstvím záhybů, vyrobeného z tvrdého papíru a potaženého textilem. Rohy jsou pak vyztuženy kovem, aby nedocházelo k jejich zbytečnému opotřebení. Změnou rychlosti pohybu měchu ovládá hráč dynamiku hry. Akordeon má diskantovou (melodickou) a basovou část, které jsou propojeny měchem. Pro ovládání klaviatury diskantové části slouží pravá ruka, pro basovou část ruka levá.

1.4 Dynamika tónu hudebních nástrojů

Nezáleží jen na vlastnostech nástroje, ale i na projevu hráče, jaká bude výsledná dynamika díla. Dva různí hráči, ale i ten stejný hráč v různou dobu mohou zahrát stejnou skladbu s velmi rozdílnou dynamikou, ta se v hudební teorii pohybuje od pianissima (hodnota intenzity odpovídá přibližně 40 dB), až po fortissimo (hodnota maximální intenzity přibližně 100 dB).

Koncertní sítě a divadelní prostory se vyznačují, i když v mnohem menší intenzitě než ostatní prostory, akustickým smogem, vytvářeným posluchači a diváky, hlukem technických zařízení, pronikajícími zvuky z vnějšku atd., proto v těchto prostorech

není nikdy klidová hladina zvuku nulová, ale pohybuje se v rozmezí 35 - 40 dB. Tuto skutečnost je třeba uvažovat v souvislosti se spodní hranicí dynamiky. Intenzita zvuku interpretace by neměla klesnout pod 40 dB, neboť, pokud by se tak stalo, nemohl by být zvuk interpretované skladby vnímán. Výjimkou jsou nahrávací studia, která jsou téměř zvukotěsná. Obdobně je tomu s horní hranicí dynamiky. Hodnota intenzity zvuku okolo 100 dB se blíží prahu bolestivosti, proto, aby nedocházelo při poslechu k nepříjemnému a bolestivému pocitu, udržuje se obvyklá hodnota horní meze okolo 90 dB [1].

Schopnost produkovat tón či zvuk různé hlasitosti představuje nepostradatelnou vlastnost každého hudebního nástroje. Na rozdíl od výšky tónu, kterou můžeme ovlivnit typem konstrukce konkrétní části nástroje, jsou dynamické vlastnosti tónů ovlivnitelné velmi těžko. Vycházejí z obecnějších hmotnostních a rozměrových poměrů v hudebním nástroji. Dynamické rozpětí tónu je definováno jako rozdíl minimální a maximální dosažitelné hladiny akustického tlaku, intenzity, hladiny hlasitosti či přímo hlasitosti v určitém místě prostoru, ve kterém je nástroj umístěn. Dynamický rozsah hudebního nástroje je rozdíl minimální a maximální dosažitelné hladiny v průběhu jeho celého tónového rozsahu. Ve většině případů je dynamický rozsah nástroje větší než dynamické rozpětí jednotlivých tónů tohoto rozsahu[2].

1.4.1 Zvukové pole nástroje

Dynamické rozpětí jednotlivých tónů nemusí být a také u většiny hudebních nástrojů v průběhu tónového rozsahu není konstantní. Závislost maximální a minimální dosažitelné hladiny akustického tlaku či intenzity na frekvenci resp. výšce tónu vymezuje tzv. zvukové pole nástroje. Rozlišujeme 4 základní typy tohoto pole: Zvukové pole vokálně-dechového typu, flétnového typu, klarinetového typu, jež se s výšou tónu nejprve rozšiřuje a pak zužuje a pole strunného typu, které se vynačuje konstantní minimální i maximální dosažitelnou hladinou a tím i konstantním dynamickým rozpětím tónu. Tento typ pole vykazují strunné nástroje smyčcové, drnkací či úderné obvykle s mírným zužováním rozpětí tónu směrem k diskantu (sopránu) nástroje. Pro nás budou zajímavé poslední dva typy, tedy pole klarinetového a strunného typu.

Způsob buzení a režim kmitání oscilátoru i rezonátoru nástroje do značné míry ovlivňují průběh zvukového pole. Proto u strunných nástrojů, kde nedochází k podstatné změně režimu kmitání struny a rezonanční skříňky či desky při změně výšky či hlasitosti tónu, je dynamické rozpětí tónu na jeho výšce téměř nezávislé a současně totožné s dynamickým rozsahem nástroje.

Dynamické vlastnosti tónu jsou dávány do přímých souvislostí s energetickým režimem hudebního nástroje. Velké dynamické rozpětí tónu (zejména pak směrem k vysokým hladinám) i jeho snadný ozev odpovídají vysoké akustické účinnosti

nástroje. Ve skutečnosti představuje každý hudební nástroj z obecného pohledu systém s velmi nízkou účinností, která je způsobena celou řadou energetických ztrát v nástroji.

S energetickým buzením nástroje, např. úderem kladívka, tlakem smyčce či proudem vzduchu nejsou spojeny pouze dynamické, ale také barevné změny tónu. Neoddělitelnost subjektivního vjemu hlasitosti a barvy je tak doplněna o objektivní vztah spektrální struktury tónu a hladiny akustického tlaku v daném místě před hudebním nástrojem[2].

Nástroje nejsou bodovými zářiči, proto jimi vyzářená zvuková energie nemá ve všech směrech protoru konstantní intenzitu. Maximum vyzářené energie nesměřuje stále stejným směrem, ten je závislý mimo jiné na právě generovaném kmitočtu. V této souvislosti mluvíme o směrové charakteristice vyzařování hudebních nástrojů[1].

2 SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY

Jednou ze základních akustických vlastností každého hudebního nástroje je směrovost jeho vyzařování. Směrové vyzařovací charakteristiky dávají představu o rozložení akustického pole v okolí hudebního nástroje na různých kmitočtech. Následující kapitola vychází z knihy Hudební akustika [2].

2.1 Vyzařovací vlastnosti hudebních nástrojů

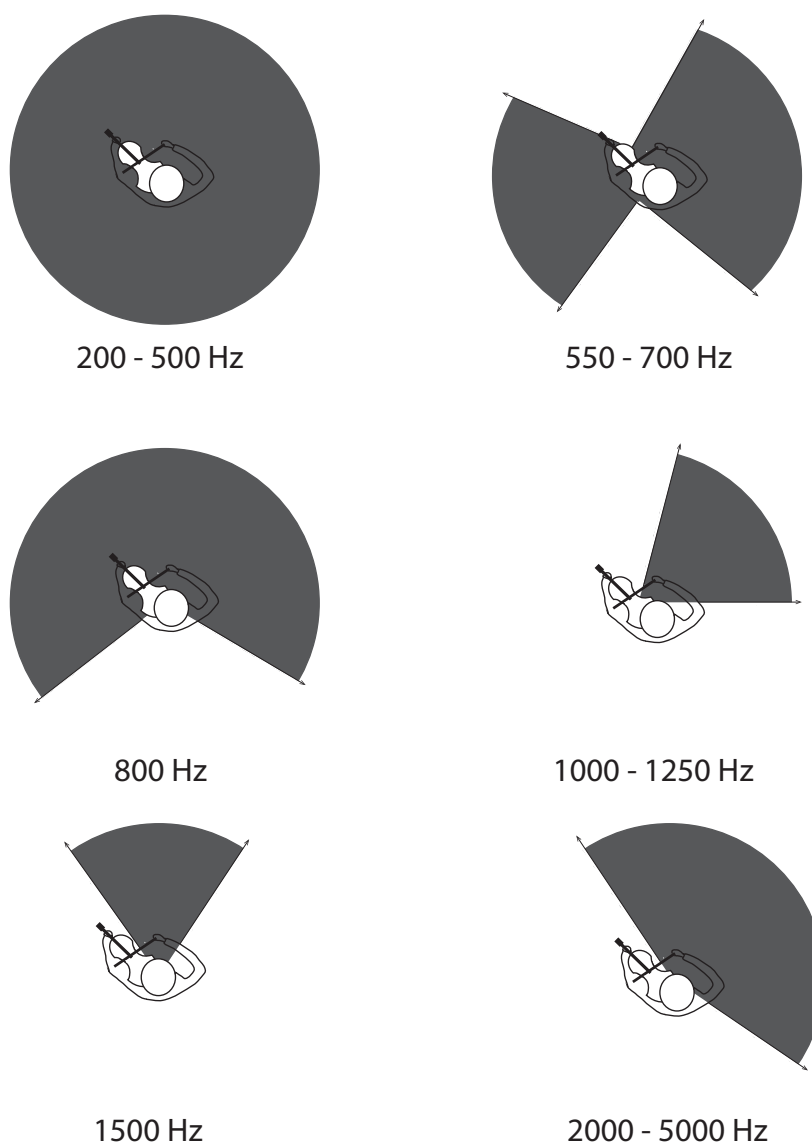
Žádný reálný zdroj zvuku nevyzařuje svoji akustickou energii do okolního prostoru zcela rovnoměrně ve všech směrech. Všesměrové vyzařování zdroje je zásadně omezeno jeho reálnými rozměry vztaženými k délce, resp. frekvenci vyzařované vlny. Čím větší je rozměr zdroje a čím kratší je vlnová délka jím vyzařovaného zvuku, tím směrovější jsou vyzařovací vlastnosti zdroje a naopak. U hudebních nástrojů určují velikost zdroje zvuku rozměry oscilátoru a rezonátoru. Chceme-li přibližně vypočítat směrovou charakteristiku hudebního nástroje, musíme nahradit jejich aktivně vyzařující části jednoduchými útvary. Směrové vyzařovací vlastnosti jsou v teorii akustických vysílačů dány rozložením tzv. rychlostního potenciálu v okolí kmitajícího bodu.

Směrové charakteristiky jsou nejčastěji zobrazovány v podobě polárního diagramu, kde je pro daný tón, respektive danou frekvenci znázorněna závislost akustického tlaku na úhlu odklonu místa, ve kterém měříme, od akustické osy měřeného nástroje. Průběh charakteristik je nezávislý na vzdálenosti od nástroje, to ale platí pouze pro vzdálené pole. V blízkém poli jsou směrové charakteristiky na vzdálenosti výrazně závislé a mají mnohem složitější průběh.

Pro měření směrových charakteristik nejčastěji využíváme bezodrazovou komoru. Takovéto měření nám však nedává úplnou představu o směrových vlastnostech hudebního nástroje, ty jsou v reálných prostorech ještě ovlivňovány například odrazem od podlahy koncertního sálu apod. Hodnoty akustického tlaku v závislosti na úhlu uvažovaného směru od hudebního nástroje znázorňujeme pomocí polárního grafu. Směrové vlastnosti zdroje můžeme jednoduše vyjádřit pomocí činitele směrovosti a indexu směrovosti.

Z hlediska subjektivního vjemu se odchylky od všesměrového vyzařování projevují jako změny hlasitosti příslušných harmonických tónů. V praxi to znamená, že u směrově vyzařujícího hudebního nástroje se změna vzájemné polohy nástroje a posluchače či snímacího mikrofону projeví jako změna barvy komplexního tónu. Určujeme proto hlavní směry vyzařování, tj. oblasti (rovinné či prostorové úhly), uvnitř kterých neklesá hladina akustického tlaku o více než 3 dB nebo 10 dB pod

maximální hodnotu pro danou frekvenci nebo celé pásmo frekvencí. Ve společném průniku hlavních směrů vyzařování pro daná pásma frekvencí nedochází ke změně barvy tónu a z energetického hlediska odevzdává hudební nástroj tímto směrem maximum svého akustického výkonu. Hlavní směry (3 dB) vyzařování houslí jsou znázorněny na obrázku 2.1. Vyzařovací vlastnosti hudebního nástroje, které určují frekvenční strukturu jeho tónu resp. zvuku v konkrétním bodě okolního prostoru a tím i subjektivní vjem barvy, nejsou důsledkem pouze obecného konstrukčního, tj. tvarového a rozměrového uspořádání nástroje, ale také celé řady kvalitativních aspektů včetně vlivu materiálu.



Obr. 2.1: Hlavní směry (3 dB) vyzařování houslí v horizontální rovině podle[2]

2.1.1 Barva tónu

Pojem „barva tónu“ zná svět od konce 18. Století. Byla považována za nahodilou vlastnost hlasu nebo kvality zvuku, kterou je možno popsat slovy podobně jako třeba barvy obrazu. Již od počátku byla ve svých definicích vztahována k subjektivní představě kvality zvuku a pro její verbální popis převzata adjektiva z jiných smyslových oblastí, především ze zraku a hmatu. Jakýkoliv vztah k matematickému popisu signálu však nebyl v té době vůbec zvažován.

V roce 1843 Ohm formuloval základní psychoakustický zákon (někdy uváděný jako Ohm-Helmholtzův), podle kterého lidské ucho vnímá pravidelné kmitání (tzn. kmitání sinusového průběhu) částic vzduchu jako jednoduchý tón a každé jiné periodické kmitání těchto částic rozkládá v řadu pravidelných (sinusových) kmitů a vnímá k nim odpovídající řadu jednoduchých tónů. U periodických zvuků tak ucho pracuje jako frekvenční analyzátor a vyhodnocuje frekvenci a amplitudu jednotlivých dílčích kmitů jako celkový vjem – vjem barvy zvuku. V tomto vjemu však není zastoupena fáze dílčích kmitů, protože lidské ucho fázi zvukového signálu jako takovou nezaregistruje. Tímto Ohm natrvalo zakotvil barvu tónu mezi matematicky definovatelné vlastnosti zvuku [2].

2.1.2 Rychlostní potenciál

Rychlostní potenciál Φ je hypotetická skalární veličina definovaná tak, že její gradient je roven akustické rychlosti. Rychlostní potenciál byl zaveden pro jednodušší řešení vlnové rovnice zvukového pole. Platí pro něj vztah [5]

$$\text{grad}\Phi = v = v_x i + v_y j + v_z k. \quad (2.1)$$

2.1.3 Činitel směrovosti

Činitel směrovosti Q_Z je poměr akustického tlaku p_θ změřeného v daném směru θ (obvykle v akustické ose zdroje zvuku) ve vzdálenosti 1m ku akustickému tlaku p_{str} vytvořenému ve stejném místě volného pole všesměrovým akustickým zdrojem se stejným akustickým výkonem [5] (viz rovnice 2.2), která zní

$$Q_Z = \frac{p_\theta^2}{p_{\text{str}}^2}. \quad (2.2)$$

2.1.4 Index směrovosti

Index směrovosti I_Q je činitel směrovosti vyjádřený v decibelech, určený jako rozdíl mezi hladinou akustického tlaku v daném směru vyvolanou směrově vyzařujícím

zdrojem zvuku a průměrnou hladinou akustického tlaku, kterou by zdroj stejného akustického výkonu vyvolal při všesměrovém vyzařování [5] (viz rovnice 2.3), která zní

$$I_Q = 10 \log Q. \quad (2.3)$$

3 ELEKTROAKUSTICKÁ MĚŘENÍ

Hudební nástroje představují různě složité akustické soustavy s objektivně měřitelnými přenosovými vlastnostmi. Tyto vlastnosti vyjadřují komplexní změnu energetického podnětu po jeho průchodu hudebním nástrojem. Protože ale neexistují žádné neměnné standardy určující ideální subjektivní vjem tónu či zvuku, nejsme schopni stanovit ani ideální parametry hudebních nástrojů. Akustická měření hudebních nástrojů mohou absolutizovat pouze obecně interpretovatelné vlastnosti, jako např. závislost velikosti akustického tlaku v definovaném bodě v prostoru kolem nástroje na frekvenci, nikoliv však jednoznačné přiřazení této závislosti subjektivnímu vjemu, který právě tuto závislost odráží. Měření však mohou absolutizovat rozdíly mezi těmito závislostmi u různých nástrojů a tyto rozdíly pak dávat do souvislosti s obdobnými relativními vztahy mezi odpovídajícími subjektivními vjemy.

Smyslem akustických měření hudebních nástrojů je získání takových kvantitativních údajů, které co nejvíce vypovídají o subjektivním vnímání zvuku nástroje. Metodika akustických měření hudebních nástrojů vychází, podobně jako metodika běžných akustických měření, z podmínky platnosti resp. pravdivosti, přesnosti a opakovatelnosti výsledků měření. Na rozdíl od běžných měření má na výsledné hodnoty velký vliv subjektivní hodnocení jejich kvality. U některých měření mají výsledky pouze zprostředkovaný vztah ke kvalitě hodnoceného nástroje, přesto jsou schopny poskytovat pravdivou interpretaci např. rozměrových, materiálových i konstrukčních poměrů a jejich vlivu na vlastnosti tónu při vzájemném porovnávání nástrojů.

Přesnost výsledků měření souvisí především s přesností použitých přístrojů. Pravdivost výsledků je určována systematickými chybami, které lze korigovat volbou jiné metody měření. Opakovatelnost výsledků je ovlivněna výskytem nahodilých chyb, které jsou vyvolané buďto vnějším rušením nebo vlastním objektem měření. Chyby způsobené rušením přístrojů lze korigovat opakovaným měřením. Chyby nahodilé ale obvykle vedou k nepoužitelnosti výsledků. Spolehlivost měřící metody je výrazně ovlivněna vstupními podmínkami. Za ty označujeme všechny proměnné parametry, které přímo nebo nepřímo souvisejí se vznikem tónu, jeho přenosem a snímáním (objektivní analýza) nebo percepcí (subjektivní analýza)[2].

3.1 Umělá generace tónu

Vznik tónu na hudebním nástroji přímo souvisí s průběhem budící energie a typem vazby mezi excitátorem a oscilátorem. Je proto prakticky nemožné zahrát dva naprosto shodné tóny, což výrazně znesnadňuje přesné opakování měření. Jemné odchylky ve výšce, dynamice a barvě tónu, které ze subjektivního hlediska zapřičiňují

esteticky žádoucí nestabilitu tónu, je však pro objektivní měření nutno co nejvíce potlačit stabilizací vstupních podmínek. Toho dosáhneme omezením či dokonce vyloučením vlivu hráče.

Umělou generací tónu jsme schopni odchylky potlačit, avšak možnost náhrady hráče úzce souvisí s typem vazby mezi excitátorem a oscilátorem. Čím je tato vazba těsnější, tím je náhrada hráče složitější. To pak může mít vliv na přirozenost uměle generovaného tónu a jeho následné subjektivní hodnocení.

Pokud mají náhrady hráče vést k vybuzení reálného tónu, musí splňovat určité požadavky. Nesmí být zdrojem vedlejších hluků a jejich konstrukce by měla jen minimálně omezovat přirozené vyzařování tónu. Současně musí umožnit buzení tónu v běžném výškovém i dynamickém rozpětí, kontrolu a opakovatelné nastavení všech objektivních parametrů tohoto buzení. Jednoduchými mechanismy pro náhradu hráče jsou například úderný mechanismus pro klávesové nástroje, tzv. přehrávací lavice nebo nekonečný smyčec pro housle a violy. U takovýchto nástrojů můžeme nastavit jednotlivé parametry jako je síla a rychlost úderu nebo tlak smyčce a jeho rychlost.

Složitější je pak buzení tónu u dechových nástrojů. K tomuto účelu se používají umělá ústa. Problémem je však dokonalá imitace reálného nasazení tónu za pomoci umělého jazyka. Přes nesporné výhody, umožňující objektivizaci i vysoký stupeň stabilizace vstupních podmínek měření, nedovoluje umělé buzení reálného tónu diagnostikovat přenosové vlastnosti hudebních nástrojů, ale pouze registrovat vlastnosti produkovaného tónu.

Pro účely měření různých vlastností hudebních nástrojů se podmínky vzniku tónu pouze simulují např. pomocí elektrodynamického budiče. Tón produkovaný jím buzenými houslemi nevykazuje sice reálné vlastnosti, především po dynamické či barevné stránce, ale objektivně přenosové vlastnosti ozvučné skříňky nástroje. U plechových hudebních nástrojů používáme budič elektroakustický. [2]

Měřit můžeme také jednotlivé díly hudebních nástrojů samostatně. Tato měření nesimulují podmínky vzniku tónu, ale cíleně sledují určité akustické či mechanické vlastnosti dílu, které jsou dávány do souvislosti s jeho subjektivní kvalitou, respektive s jeho příspěvkem ke kvalitě nástroje jako celku[2].

3.2 Měření v reálném prostoru

Akustické pole, zejména pak přítomnost odrazů výrazně ovlivňuje opakovatelnost výsledků i jejich pravdivost, proto provádíme akustická měření hudebních nástrojů v bezodrazové komoře, kde je akustické pole tvořeno pouze přímými vlnami. Teoretická spolehlivost bezodrazové místnosti je dána jejím nejmenším rozměrem, který

určuje tzv. kritickou frekvenci, pod kterou hodnota činitele pohltivosti stěn se již nerovná 1[2].

Při měření hudebního nástroje v reálném prostoru se snažíme co nejvíce vyloučit vliv akustických vlastností prostoru na naměřená data. Toho můžeme dosáhnout například určitým počtem a rozmístěním měřících mikrofónů, typem a způsobem přehrávání nástroje i vlastní zpracováním dat. Vztah měřícího mikrofónu a měřeného nástroje, tzn. jejich vzájemná poloha je v první řadě určována směrovými vyzařovacími vlastnostmi nástroje. Při respektování hlavních nebo častěji užitečných směrů vyzařování, dovoluje podrobná znalost blízkého i vzdáleného pole vyvarovat se umístění měřícího mikrofónu v sousedství výrazných lokálních minim směrových charakteristik, která mohou nepříznivě ovlivnit výsledky měření. Vliv směrovosti vyzařování lze potlačit průměrováním tónu hudebního nástroje v prostoru, a to snížením signálu více měřícími mikrofóny, což podstatně komplikuje jeho následné zpracování. Abychom zajistili neměnnost vzájemné polohy mikrofónu a nástroje, upevňujeme mikrofóny do držáků. [3]

4 PRAKTICKÁ REALIZACE MĚŘENÍ

Pro minimální ovlivnění zvukového pole odrazy je důležité provádět měření ve volném poli. Proto byla pro naše účely použita bezodrazová místnost, kde je vliv odražených vln minimální a doba dozvuku se blíží k nule. Pokud je vyzařování zdroje zvuku stacionární, nebo je-li proměnlivost jeho vyzařování při opakování měření zanedbatelná, můžeme směrové vyzařovací vlastnosti zdroje zvuku měřit jedním mikrofonom. Postupně měníme jeho polohu na zvolené měřicí ploše, která definovaným způsobem obklopuje zdroj zvuku. Tato metoda je však dosti časově náročná a navíc při interpretaci reálným hráčem je vyzařování hudebních nástrojů nestacionární a velmi těžko opakovatelné. Proto je nezbytné použít větší počet mikrofونů a vyzařování nástroje snímat ve všech směrech současně.

Měřenými nástroji byly housle, klarinet, kytara a akordeon buzené reálnými hráči. Během měření jsme pořídili několik nahrávek ať už celých skladeb nebo jen samostatných tónů či akordů. Důraz byl kladen především na délku tónu a to z důvodu obsažení všech složek daného tónu a také na dostatečné pauzy mezi jednotlivými tóny popřípadě tlumení nástroje po odehrání tónu, aby se při stříhu neprolínaly složky jednoho tónu se složkami tónu dalšího. Naměřené hodnoty, tj. zvukové soubory ve formátu *.wav byly dále spracovány v programu vytvořeném pro tento účel v prostředí MATLAB viz 5. Pro sestavení a interpretaci výsledných směrových charakteristik nástrojů byla použita nahrávka tónu G, v případě kytary a akordeonu pak celého akordu G.

4.1 Mikrofonní pole

Měření bylo prováděno v bezodrazové komoře a to z důvodu eliminace nežádoucích zvukových elementů jako jsou odrazy nebo jiné zdroje zvuku mimo měřeného. Pro měření jsme zvolili kruhové pole s poloměrem 2 m. Při volbě jeho velikosti jsme vycházeli z [2], kde je jako ideální pro měření směrových charakteristik uvedena kružnice o poloměru 2 až 4 metry a také z velikosti bezodrazové komory. K měření jsme použili 16 mikrofونů rozmístěných s 12° rozestupy. Pro definování poloh jednotlivých mikrofونů jsme použili laserový úhloměr EPT-SA08, pomocí kterého jsme mikfony v pravidelných rozestupech rozmístili po obvodu půlkruhu. První mikrofون byl umístěn na pozici 0° a poslední ve 180° . Získali jsme tak hodnoty energie pro 16 různých směrů. Pravidelné rozložení mikrofونů bylo zvoleno proto, abychom obsáhli hlavní směry vyzařování na všech frekvencích viz obrázek 2.1. Přesné rozměry pole viz obrázky 4.1 a 4.2. Při větším počtu měřících mikrofونů může být jejich rozestavení i nerovnoměrné, přičemž můžeme vycházet právě z předpokládaných hlavních

směrů vyzařování. To znamená, že tam, kde očekáváme největší vyzařování umístíme více mikrofonů, zatímco do míst kde předpokládáme jen minimální vyzařování umístíme například jen jeden mikrofon.

Mikrofony byly rozestavěny do půlkruhu kolem hráče. Jejich pozice jsme volili tak, aby byl každý mikrofon ve všech směrech vždy minimálně 50 cm vzdálen od stěny komory. Pokud by byly mikrofony příliš blízko stěn, mohlo by docházet, dle parametrů komory, k nepřesnostem měření způsobeným odraženými vlnami. I tak se ale prostor komory nadá považovat za naprosto bezodrazový. Během měření se v něm nacházela měřicí technika, která je zdrojem odrazů. Rozložení mikrofonů v komoře je zobrazeno na obrázku 4.1 v podobě půdorysu a na obrázku 4.2 v podobě bokorysu. Dalším nastavovaným parametrem byla výška umístění mikrofonů. Ta se odvíjí od měřeného nástroje, výšky hráče a jeho polohy při hře. Pro kytaru buzenou hráčem sedícím na židli jsme zvolili výšku mikrofonů 112 cm, tak aby byla jejich výška přibližně shodná s výškou zářiče nástroje. Hodnotou 112 cm jsme byli také limitováni z důvodu konstrukce mikrofonních stojanů. U akordeonu a klarinetu jsme zvolili shodnou výšku 140 cm, a pro housle výšku 165 cm. Opět jsme dbali na to, aby výška mikrofonu odpovídala předpokládané poloze zářiče nástroje [6], [7].

Všechny výšky a vzdálenosti byly měřeny pomocí svinovacího metru, což mohlo způsobit jisté nepřesnosti měření. Stejně tak použití laserového úhlooměru je zatíženo jistou chybou měření, jelikož úhly není možné nastavit s přesností na 1° a samotný úhloměr není příliš stabilní, což při samotném nastavování způsobovalo mírné posuvy jeho osy. Stejně tak podlaha v bezodrazové místnosti neposkytuje dostatečně rovný povrch a úhloměr bylo nutno v průběhu měření vyvažovat.

4.2 Popis prvků měřicí soustavy

Pro realizaci mikrofonního pole jsme měli k dispozici 16 všesměrových, kondenzátorových mikrofonů AUDIX TM1. Měřicí mikrofony jsou připojeny ke dvěma A/D převodníkům s integrovaným předzesilovačem pomocí kabelů s konektory XLR. Snažíme se při tom, aby délka všech kabelů byla přibližně stejná, což ale v našem případě nebylo možné. První a druhý převodník jsou propojeny koaxiálním kabelem s redukcí na BNC, z rozhraní RS232. První převodník slouží jako master a pro celý systém nastavuje synchronizaci časovým kódem WordClock. Z důvodu omezení maximálního přenosu optického kabelu ADAT, je vzorkovací frekvence nastavena na 48 kHz. Se zvukovým rozhraním Hammerfall jsou A/D převodníky propojeny již zmiňovaným optickým kabelem ADAT na jehož kanály jsou namapovány jednotlivé výstupy. Zvukové rozhraní Hammerfall je integrovaným PCI zařízením počítače s programem Cubase ve kterém je každý vstup zaznamenáván do jedné stopy. Pro

každý mikrofon, tj. pro každý směr, ve kterém nás velikost vyzářené energie zajímá, tak vznikne jeden zvukový soubor. Nahrávky jsou pak následně vyexportovány ve formátu *wav a dále zpracovávány v prostředí MATLAB. Schéma měřicí soustavy a jednotlivých signálových cest je zobrazeno na obrázku 4.3.

4.3 Nastavení a kalibrace měřicí soustavy

Abychom získali co možná nejpřesnější hodnoty je třeba jednotlivé prvky soustavy před měřením řádně nastavit a provést kalibraci. Nejprve je třeba nastavit jeden z A/D převodníků tak, aby v pozici master zajišťoval synchronizaci celé soustavy. K tomu nám slouží počítač s ovladačem M-AUDIO ProFire 2626 za jehož pomoci provedeme konfiguraci převodníku, který k němu připojíme pomocí kabelu FireWire. Protože potřebujeme vstupy pro signál ze všech 16 měřících mikrofonů současně, použijeme ještě druhý A/D převodník, který obdobným způsobem nastavíme tak aby se řídil signálem WordClock z převodníku prvního. Stejně tak se tímto signálem musí řídit i zvukové rozhraní Hammerfall. Že tomu tak je si můžeme ověřit pomocí programu Cubase, kde v nastavení ASIO Driveru (v našem případě ASIO Hammerfall DSP) v části System Clock je parametr Mode nastaven na hodnotu Slave. ASIO Drivery nám slouží k přímému přístupu ke zvukovému rozhraní, vyhneme se tak ovladačům, které jsou pro komunikaci běžně využívány operačními systémy a mají větší latenci.

Poté co sestavíme signálovou cestu vedoucí od měřících mikrofonů až do PC, pomocí něhož budeme nahrávat zvukové soubory, je třeba nastavit zesílení jednotlivých mikrofonních vstupů tak, aby měl signál na všech kanálech v počítači stejnou úroveň.

V první části jsme nastavovali zesílení na A/D převodnících za pomoci NTI AL1 Acoustilizeru, nastaveného na měření hladiny akustického tlaku. Zvolený měřicí přístroj se ukázal jako nevhodný z důvodu malého vstupního napětového rozsahu díky kterému jsme se při kalibraci pohybovali na hranici přebuzení. Proto je pro tento účel lepší použít měřič NTI XL2. Kalibraci jsme prováděli pomocí tónového kalibrátoru. V komoře kalibrátoru je přesně definovaný, konstantní akustický tlak, máme tak jistotu, že při nastavování zesílení jsou všechny mikrofony buzeny signálem se shodnými parametry. Vstupní signál z jednotlivých vstupů jsme pomocí PC s ovladačem postupně směřovali na výstup A/D převodníku, kde byl připojený měřič. Po zapnutí kalibrátoru a ustálení jsme každý vstup zesílili natolik, aby měřič ukazoval hodnotu přibližně 120 dB SPL. Po této hrubé kalibraci je možno PC s ovladačem odpojit.

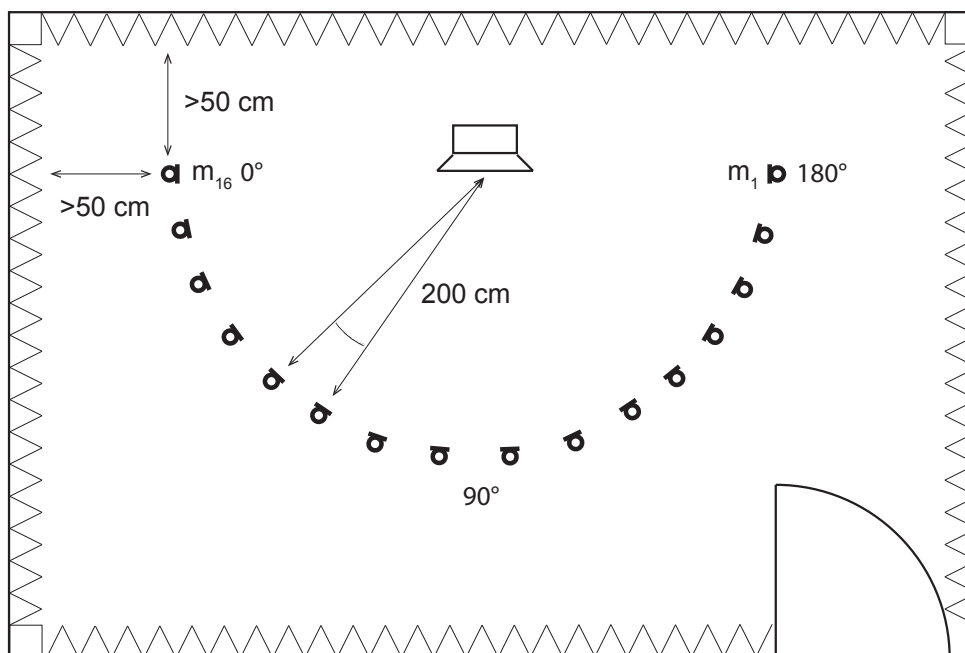
Ve druhé části kalibrace jsme dorovnávali nepřesnosti jednotlivých vstupů pře-

vodníku. V programu Cubase jsme do signálové cesty každého mikrofonu vložili volně dostupnou VST pruginu MLoudnesAnalyzer, která umožňuje monitorování aktuální hodnoty dBFS. Jako referenční zdroj zvuku nám opět sloužil tónový kalibrátor. Pomocí sliderů jsme nastavili zesílení jednotlivých kanálů tak, aby měly všechny stejnou úroveň -3 dBFS. Orientovali jsme se přitom podle aktuální hodnoty (Momentary), zobrazované pluginou. Vždy bylo třeba vyčkat několik sekund, než se tato hodnota po nasazení a spuštění kalibrátoru ustálila. Tuto část kalibrace bylo potřeba provést před započítím měření každého nástroje, jelikož se hodnoty vlivem manipulace s mikrofony nepatrně měnily přičemž na jejich konstantní hodnotě závisí přesnost měření.

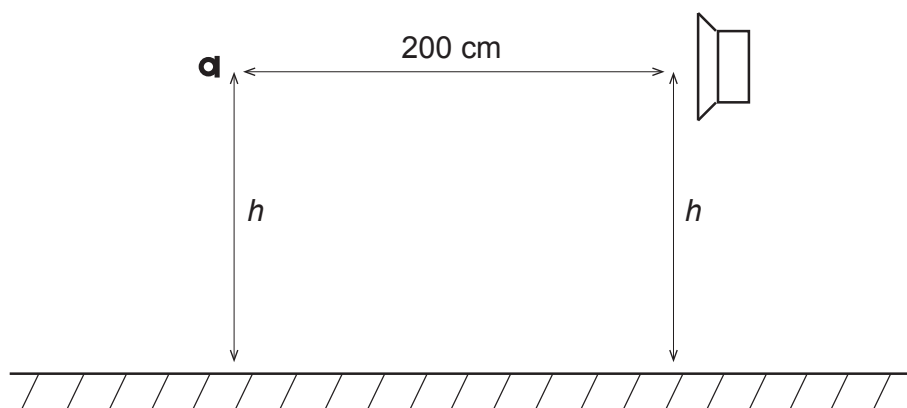
4.4 Průběh měření

Během měření stojí hráč ve středu mikrofonního pole čelem k 90°, tj. v našem případě k polovině kružnice. Postavení hráče vůči mikrofonnímu poli je znázorněno na obrázku 4.1. Pro lepší orientaci byla přesná poloha na podlaze označena barevnou izolační páskou stejně, jako polohy jednotlivých mikrofonů. V zájmu kvality a rychlosti měření byl každý hráč před uzavřením bezodrazové komory seznámen s požadavky a průběhem měření a byly vysvětleny případné nejasnosti. Hudebníci byli instruováni, že pro potřeby následného zpracování je třeba nechat tón plně rozvinout, tedy jej zahrát, několik vteřin vyčkat a poté nástroj utlumil. Především při přehrávání samostatných tónů je pak hráče třeba upozornit, že mezi jednotlivými tóny musí dělat delší pomlky (přibližně 5 sekund, ale záleží na nástroji a uvážení hráče), aby se neprolínaly, čímž by došlo ke zkreslení naměřených hodnot. Hudebník byl vždy instruován, aby se během hry příliš nepohyboval a nedocházelo tak k proměnám vzájemné polohy mikrofonů a měřeného nástroje. Během měření nebylo z technických důvodů s hráčem možno komunikovat, pouze jej sledovat pomocí webkamery umístěné v bezodrazové komoře. Snímání prostoru kamerou velmi usnadňuje celé měření, vzhledem k absenci talkbacku mohl hráč signalizovat problémy nebo ukončení přehrávání směrem k režijní místnosti a také bylo možno sledovat projev hráče a následně jej upozornit na případné nedostatky.

Záznam vstupu z měřících mikrofonů byl proveden v programu Cubase. Pro každý nástroj byla pořázena nahrávka tónu G v různých oktávách (výškách), nahrávka skladby, jež si zvolil hudebník a pro akustickou kytaru pak ještě akord G jak celý, tak rozložený. Po ukončení měření byly nahrané stopy pro každý nástroj vyexportovány ve formátu *.wav.



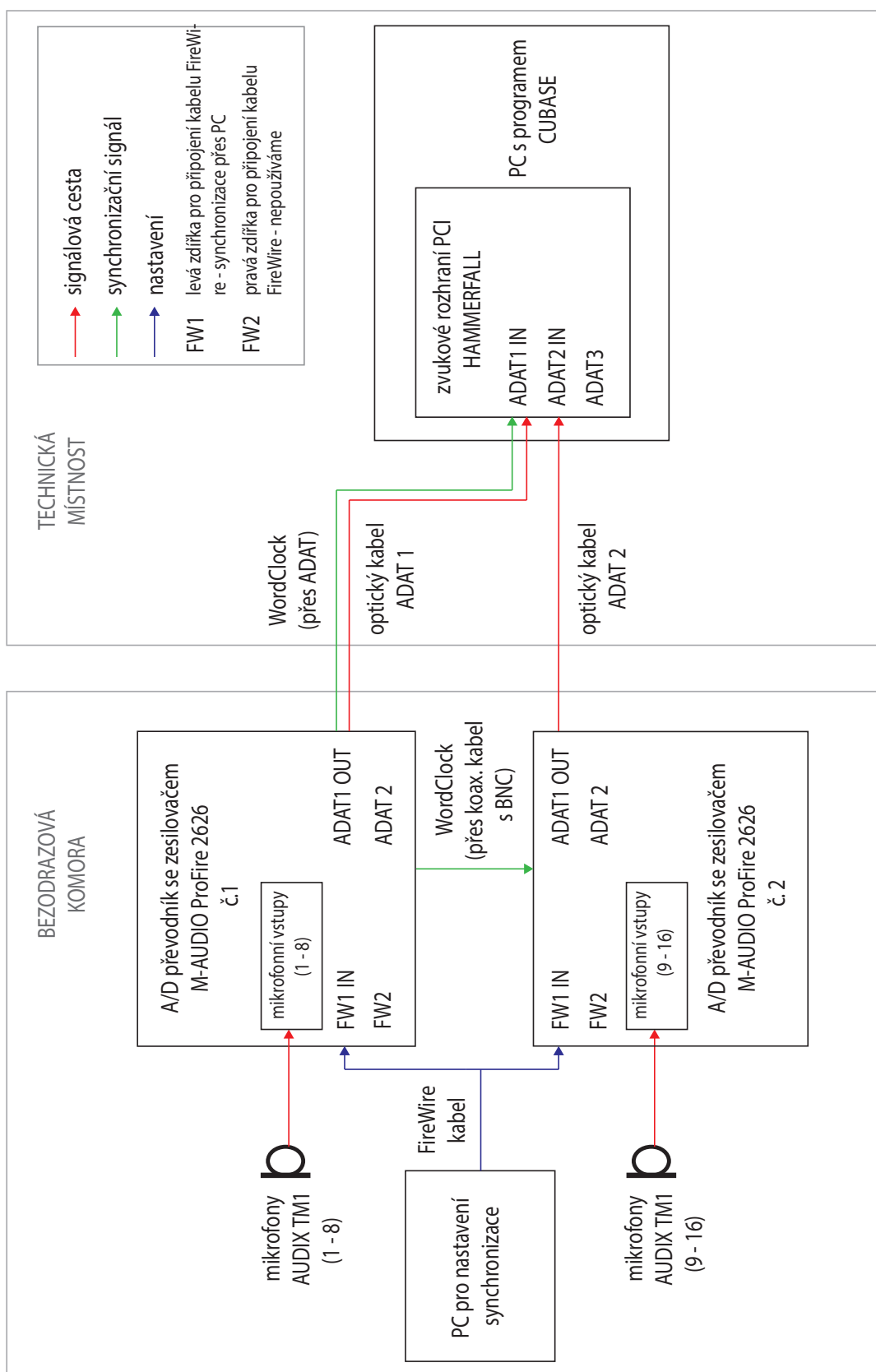
Obr. 4.1: Půdorys vzájemného postavení měřících mikrofونů a měřeného zdroje zvuku v bezodrazové komoře



Obr. 4.2: Bokorys vzájemného postavení měřícího mikrofону a měřeného zdroje zvuku v bezodrazové komoře

4.5 Softwarové zpracování signálu

V předchozí části byly zmíněny hardwarové prvky měřící soustavy, ty ale k zachycení zvukových nahrávek samy o sobě nestačí. Je třeba využít vhodných softwarových nástrojů. Prvním z nich je program Cabase 5, v němž jsou zaznamenávány výstupy jednotlivých mikrofونů, které jsou následně vyexportovány ve formátu *.wav. Slouží



Obr. 4.3: Signálové cesty mezi jednotlivými prvky měřicí soustavy

také pro zpřesnění nastavování úrovně zesílení jednotlivých kanálů. K tomu abychom tuto úroveň mohli přesně monitorovat nám slouží MLoudnesAnalyzer, jedná se o freeware VST pluginu, která je schopna monitorovat úroveň signálu na jednotlivých vstupních kanálech programu Cubase. Pro každý vstupní kanál je třeba ji zařadit do signálové cesty zvlášť.

Dalším použitým nástrojem je program Audacity, v němž probíhá stříh jednotlivých nahrávek. Jeho výhodou je jeho volná dostupnost a také jednoduchost ovládnání v porovnání s například již zmiňovaným Cubase nebo Wavelabem. Abychom byli schopni zobrazit směrové charakteristiky změřených nástrojů, je třeba získané nahrávky ve formátu *.wav zpracovat pomocí programu vytvořeného v prostředí MATLAB. Tímto zpracováním se podrobněji zabývá následující kapitola.

5 REALIZACE V PROSTŘEDÍ MATLAB

Aplikace pro výpočet a zobrazení směrových charakteristik je realizována v prostředí MATLAB. Hlavním důvodem pro tuto volbu je jednoduchost implementace potřebných funkcí, jako například výpočet FFT, vykreslování grafů v polárních souřadnicích nebo funkce pro načítání zvukových souborů wavread. Grafická část je vytvořena v MATLABu pomocí nástroje GUIDE, sloužícího k návrhu uživatelského rozhraní programů.

5.1 Volba parametrů funkce

V první části funkce je zjišťován počet souborů které mají být zpracovávány, jenž je shodný s počtem měřících mikrofonů. Dochází zde k načítání hodnot úhlů pokud byly zadány uživatelem, pokud ne je automaticky vypočten krok podle vztahu

$$uhel = \frac{180}{\text{početmikrofonu} - 1}. \quad (5.1)$$

S tímto krokem jsou pak nastavovány úhly v rozsahu 0° až 180°. V obou případech jsou hodnoty úhlů uloženy do proměnné `uhly`. Dále jsou tu definovány horní mezní kmitočty všech oktávových a třetinooktávová pásem a kritické kmitočty. Nakonec je testováno který z nabízených typů kmitočtových pásem byl vybrán a podle toho je provedena požadovaná část funkce.

Hlavní funkce `Smerovky_GUI` je rozdělena na 3 téměř identické části, ty se liší pouze vstupními proměnnými, závislými na zvoleném typu pásem. Pro každý typ existuje samostatná matice `F`, ve které je uložen vektor hodnot horních mezních kmitočtů jednotlivých pásem a matice `b_F`, do které jsou jako vektor ukládány čísla jednotlivých pásem zvolených pro vykreslení do grafu. Ty mohou mít hodnotu 1 pro první pásmo, až `n`, které závisí na celkovém počtu pásem. Jsou to tedy indexy odkazující na polohu pásma v matici `F`. Další vstupní proměnné jsou pro všechny části shodné.

Každá z částí obsahuje funkci `wavread`, pomocí které jsou v cyklu `for` s počtem opakování rovným počtu měřících mikrofonů nahrávány jednotlivé zvukové nahrávky ve formátu `*.wav`. Ty jsou dále zpracovány pomocí funkce `vypocty`, která je pro každý typ specifická a jež bude podrobněji popsána v další části. Vypočtené hodnoty jsou ukládány matice

Hodnoty jsou poté přepočítány na dB tak, že celá matice je vynásobena $20 \cdot \log_{10}$. Následně je vytvořena matice, do níž jsou uloženy pouze hodnoty pro pásma jejichž vykreslení je požadováno. V ní je pomocí funkce `min` vyhledána nejnižší hodnota a ta je poté odečtena od všech ostatních hodnot v matici. Tím zajistíme, že nejnižší



Obr. 5.1: Zjednodušené zobrazení průběhu skriptu v prostředí MATLAB

hodnotou bude 0. Zabráníme tak nesprávnému vykreslování grafu funkcí `polar`, jež není schopna zobrazit záporné hodnoty, které mohou logaritmováním při přepočtu na dB vzniknout. V poslední části je dle volby uživatele vykreslen grafy v polárních souřadnicích buďto funkcí `polar`, která zobrazí hodnoty pro jednotlivé mikrofony

jako spojitou funkci nebo pomocí funkce `compass`, která zobrazuje hodnoty pro jednotlivé mikrofony jako vektory v závislosti na jejich velikosti. Z důvodů opačného rozložení úhlů, kdy MATLABu je zcela vlevo 180° zatímco v bezdrazové místnosti byla tato poloha volena jako 0° a naopak, je třeba před vykreslením hodnoty v matici otočit pomocí funkce `flip1r`. Výsledkem je, že první hodnota bude nyní na posledním místě, druhá na předposledním atd. Pokud bychom hodnoty neotočili, zobrazované charakteristiky by byly zrcadlově otočené a tudíž by neodpovídaly postavení hráče v komoře. Popisky úhlů není třeba otáčet, protože jsou relativní. Důležité je pouze pořadí měřících mikrofonů, respektive jednotlivých zvukových souborů. Zjednodušený průběh funkce `Smerovky_GUI` je znázorněn na obrázku 5.1.

5.2 Funkce `vypocty.m`

Druhou částí je funkce `vypocty`, která je volána z první části v cyklu `for`. Tato funkce je stěžejní, neboť obsahuje veškeré výpočty potřebné k získání směrových charakteristik. Pro každý z typů pásem je vytvořena vlastní funkce. Jednotlivé funkce jsou prakticky totožné, liší se pouze jednou vstupní proměnnou a tou je matice horních mezních kmitočtů \mathbf{F} , která obsahuje pro každý typ pásem jiné hodnoty.

Na vstupní signál v ní aplikujeme Hammingovo okno, čímž docílíme zvýšení váhy vzorků ve střední části signálu, kde předpokládáme nejvyšší hlasitost a stabilitu tónu (nejvyšší úroveň signálu). Poté ze signálu získáme jednotlivé spektrální složky pomocí rychlé fourierovy transformace. [8]

Defakto tak teď známe hodnoty energie pro jednotlivé kmitočty a směry. Protože je ale zbytečné zabývat se každým kmitočtem zvlášť, budeme uvažovat o velikosti energie v jednotlivých kmitočtových pásmech. Proto bude naším dalším krokem určit hraniční kmitočty jednotlivých pásem.

Horní mezní kmitočty pásma zjistíme ze vztahu

$$f_h = f_n \cdot \sqrt[6]{2} \quad (5.2)$$

a dolní mezní kmitočty pásma zjistíme ze vztahu

$$f_d = \frac{f_n}{\sqrt[6]{2}}, \quad (5.3)$$

kde f_h je horní mezní kmitočty, f_d dolní mezní kmitočty a f_n střední kmitočty pásma s kmitočtem n . Protože jsou ale tyto hodnoty všeobecně známé, není nutno je v programu počítat.

Při výpočtu mezních vzorků pro každé pásmo budeme vycházet z horního mezního kmitočtu daného pásma, kterými naplníme matici \mathbf{F} . Známe frekvence pásem,

známe délku L , neboli počet vzorků v nahrávce a známe vzorkovací kmitočet f_{vz} . Můžeme proto použít vztah

$$n_h = f_n \cdot \frac{L}{f_{vz}}, \quad (5.4)$$

ze kterého získáme číslo horního mezního vzorku a uložíme ho do proměnné nh . Protože víme, že horní mezní kmitočet jednoho pásma je dolním mezním kmitočtem pásma dalšího a naopak, dostáváme hodnoty, které uložíme do proměnné nd .

Nakonec do matice **Fe** uložíme vypočtenou průměrnou hodnotu energie pro každé pásmo.

5.3 Grafické rozhraní pomocí GUIDE

Pro realizaci grafického rozhraní byl zvolen nástroj GUIDE, který je součástí prostředí MATLAB. Jeho výhodou je snadnost ovládání, kdy si můžeme celý vzhled okna, přes které bude probíhat komunikace programu s uživatelem, sestavit pomocí tlačítka myši. Následně je vygenerován kód – funkce umožňující práci s ovládacím prvkem. Tuto část kódu je třeba propojit se zbytkem funkce. Propojení probíhá v zásadě tak, že ve funkcích, určených jednotlivým ovládacím prvkům grafického rozhraní, jsou zjištěny hodnoty zadané uživatelem, uloženy do globálních proměnných a následně předány hlavní části programu. Podle těchto hodnot se dále řídí průběh funkce, například jsou načteny úhly, které uživatel zadal nebo je vykreslen graf v závislosti na zatržení – 1 nebo nezatržení – 0 pole výběru.

Nevýhodou použití GUIDE je zejména to, že výsledný zdrojový kód nemusí být a často není optimální, což je daň za univerzálnost řešení. Další nevýhodou je nutnost využívání globálních proměnných při předávání hodnot mezi jednotlivými funkcemi, což často způsobuje chyby v běhu programu. Ty je nutno detekovat a ošetřit [9].

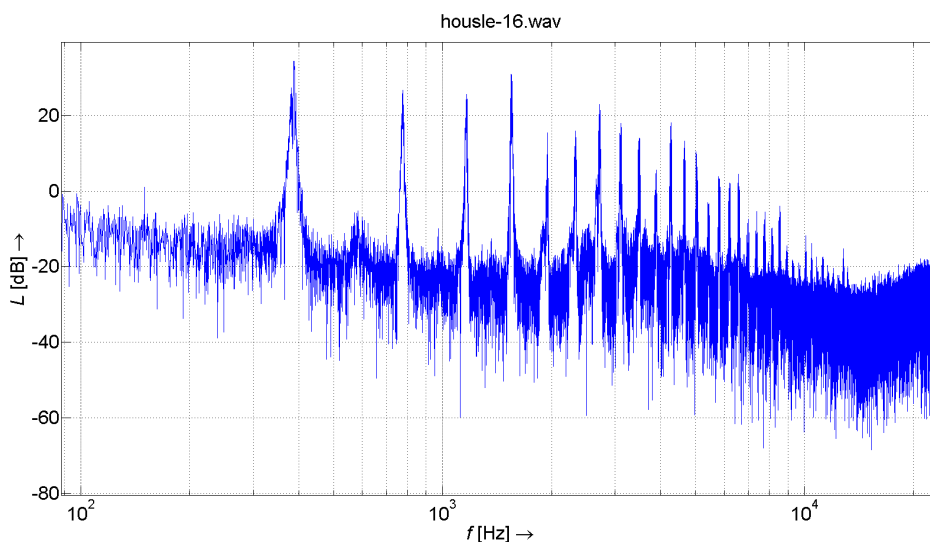
6 NAMĚŘENÁ DATA

Tato kapitola se zabývá prezentací a zhodnocením výsledků dosažených při realizaci soustavy pro měření směrových charakteristik akustických hudebních nástrojů popsané v kapitole 4. Zvukové nahrávky jednotlivých nástrojů ve formátu *.wav byly zpracovány pomocí softwarových prostředků uvedených v kapitole 4. Pro každý měřený nástroj je zobrazena modulová kmitočtová charakteristika sloužící k určení třetinooktávových kmitočtových pásem, ve kterých nástroj vyzařuje nejvíce akustické energie a má proto smysl zabývat se jejich směrovými charakteristikami. V pásmech, kde nástroj vyzařuje jen minimum energie, se výrazně uplatňuje šum. Charakteristika se pak jeví jako všesměrová a neposkytuje žádnou vypovídající informaci o vlastnostech nástroje.

Dále je při volbě zobrazovaných kmitočtových pásem třeba uvažovat kritický kmitočet bezodrazové komory, který je v našem případě 100 Hz. Charakteristiky pro pásma nižšími kmitočty než kmitočet kritický, nemá smysl zobrazovat, jelikož pro každou jinou vzájemnou polohu mikrofону a nástroje při zachování úhlu a vzdálenosti mezi nimi, naměříme jinou hodnotu.

Směrové charakteristiky jsou zobrazovány pro tón G v případě houslí a klarinetu a akord G pro kytaru a akordeon.

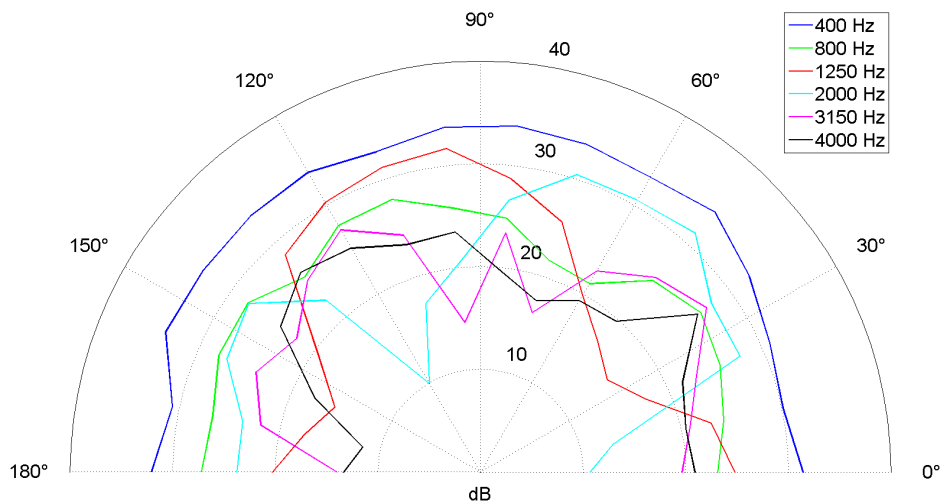
6.1 Housle



Obr. 6.1: Modulová kmitočtová charakteristika tónu G houslí

Na obrázku 6.1 vidíme, že nejvíce akustické energie vyzařují housle na kmitočtu

přibližně 400 Hz, což je také první výrazné maximum, další najdeme na kmitočtu 800 Hz a každé další s odstupem 400 Hz. Z toho vyplývá, že základní frekvencí tónu G je přibližně 400 Hz. Většinu akustické energie housle vyzařují mezi 400 Hz a 5 kHz. Nad kmitočtem 7 kHz už je vyzářená energie naopak velmi nízká a na zobrazené hodnoty má výrazný vliv šum.

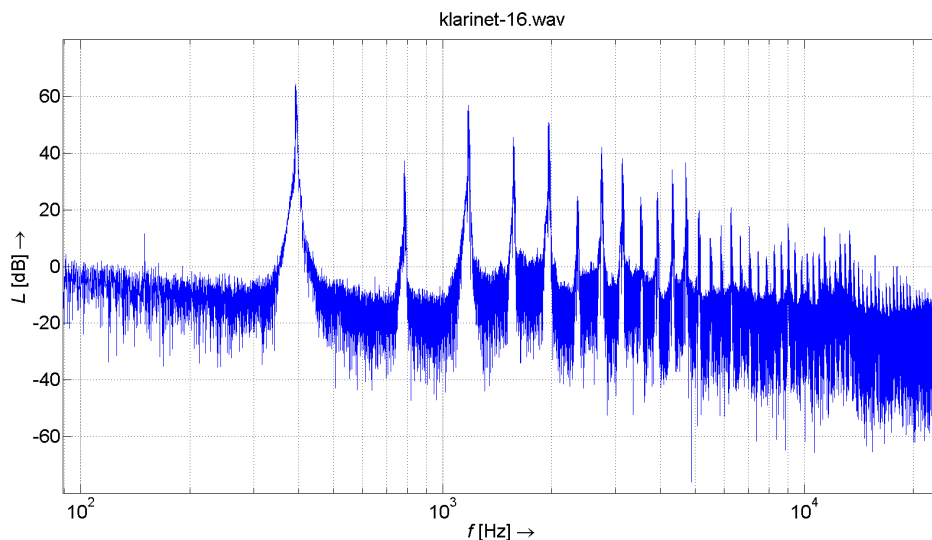


Obr. 6.2: Směrové charakteristiky tónu G houslí pro vybraná kmitočtová pásma

Směrové charakteristiky tónu G houslí pro třetinooktávová pásma se středním kmitočtem 400, 800, 1250, 2000, 3150 a 4000 Hz, jsou znázorněny na obrázku obrázek 6.2. Do kmitočtu 500 Hz se u houslí nevyskytují prakticky žádné směrové závislosti, čímž se potvrdil náš předpoklad všesměrového vyzařování nástroje přibližně do této frekvence. Výrazná maxima se pak objevují v pásmu se středním kmitočtem 1250 Hz, což odpovídá hodnotám uvedeným literatuře[2], a jež používáme jako referenční. Další, u kterého se objevuje výrazná směrovost je pásmo se středním kmitočtem 2000 Hz. Zatím co na nižších kmitočtech je obvykle patrný jeden výrazný široký lalok a velké rozdíly mezi minimální a maximální energií v těchto pásmech, na vyšších kmitočtech si můžeme povšimnout typického většího množství užších laloků, které svědčí o větší směrovosti.

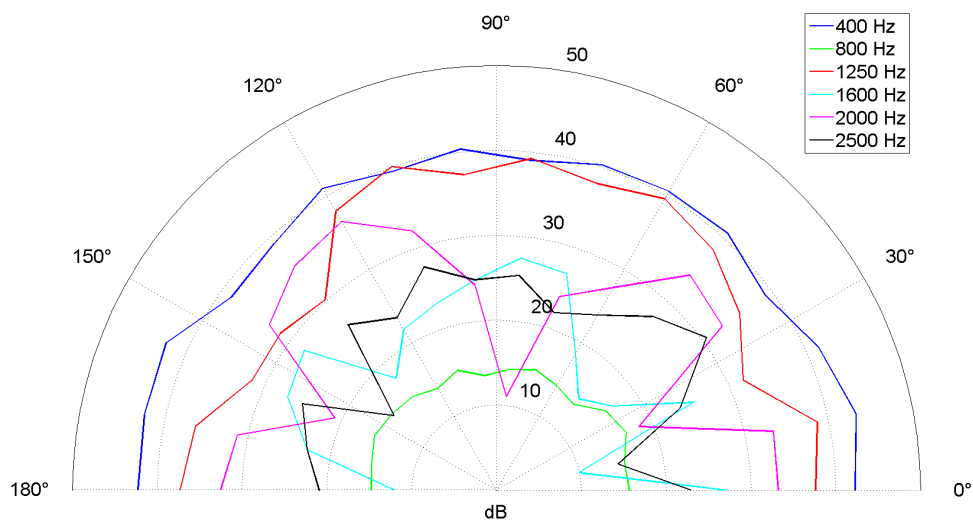
6.2 Klarinet

Jak je vidět na obrázku 6.3, nejvíce akustické energie vyzařuje klarinet na kmitočtu přibližně 400 Hz, což je také první výrazné maximum, další najdeme na kmitočtu 800 Hz a každé další s odstupem 400 Hz od předchozího. Většinu akustické energie



Obr. 6.3: Modulová kmitočtová charakteristika tónu G klarinetu

vyzařuje klarinet mezi 400 Hz a 5 kHz. Nad kmitočtem 7 kHz už je vyzářená energie naopak velmi nízká a na zobrazené hodnoty má výrazný vliv šum.

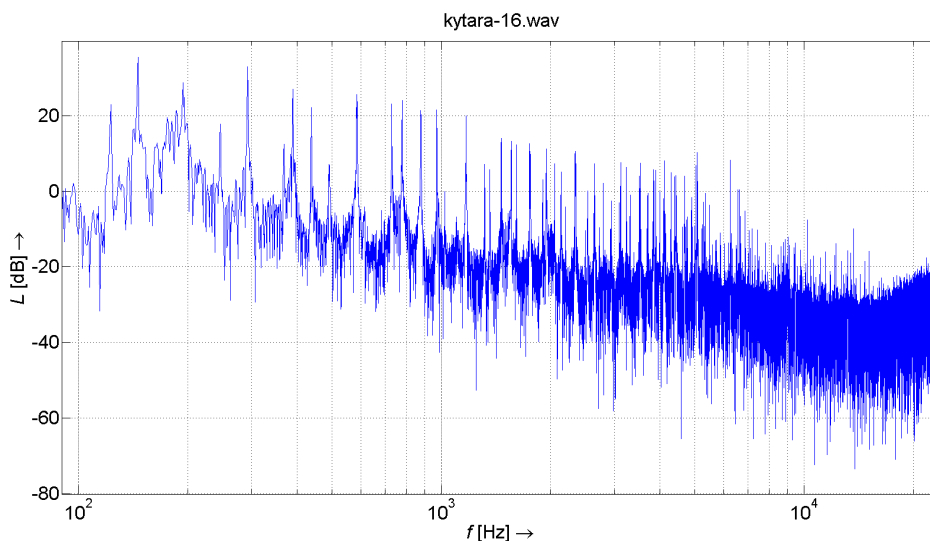


Obr. 6.4: Směrové charakteristiky tónu G klarinetu pro vybraná kmitočtová pásma

Směrové charakteristiky tónu G klarinetu pro třetinooktávová pásma se středním kmitočtem 400, 800, 1250, 1600, 2000 a 2500 Hz, znázorňuje obrázek 6.4. Přibližně do 500 Hz by měla být podle [2] charakteristika klarinetu všesměrová. V našem případě se přibližná všesměrovost objevuje i u kmitočtového pásma se středním kmitočtem 800 Hz, což ale není v přímém rozporu, jelikož výraznější projevy směrovosti nástroje lze dle stejné literatury pozorovat až od přibližně 1 kHz. S rostoucím kmitočtem se

směrovost zvětšuje. Nejvýraznější je u pásma se středním kmitočtem 2000 Hz, kde se objevují 4 výrazné laloky a je zde patrný velký rozdíl mezi minimem a maximem vyzářené energie.

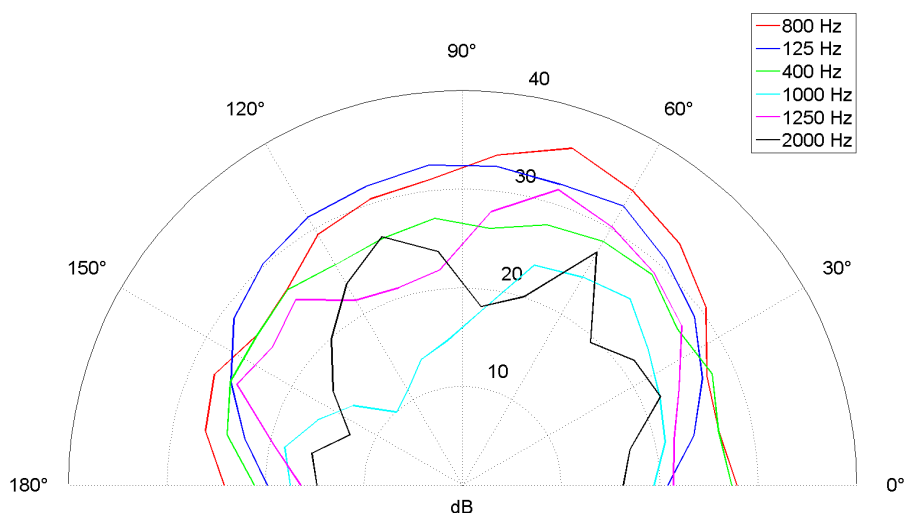
6.3 Kytara



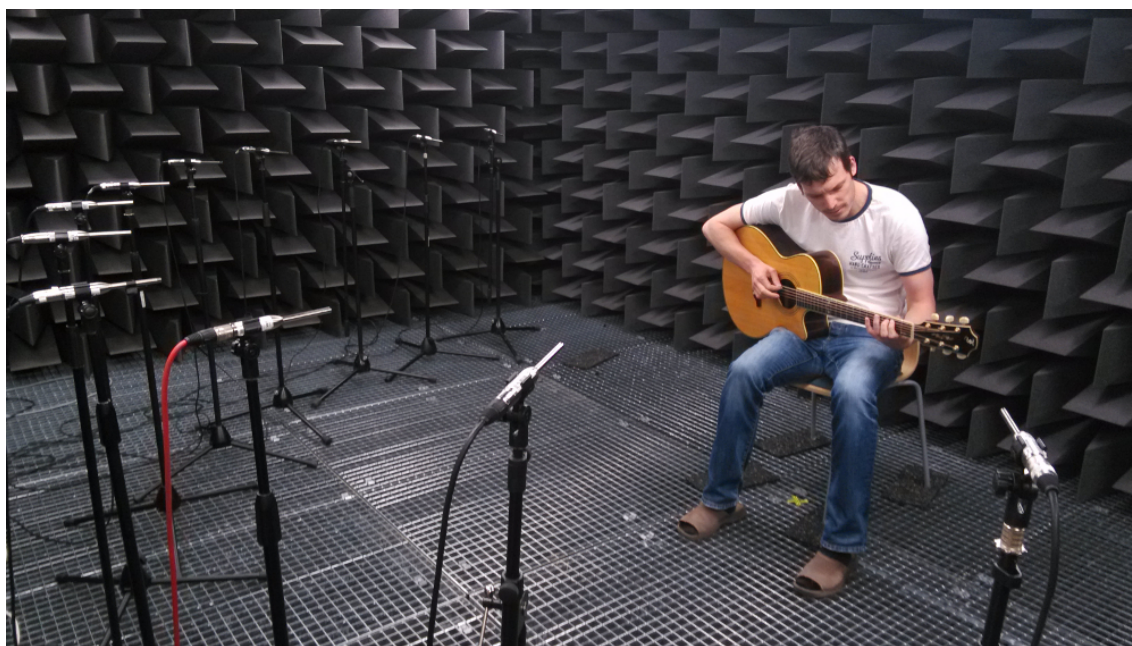
Obr. 6.5: Modulová kmitočtová charakteristika akordu G kytary

Nejvíce akustické energie vyzařuje kytara na kmitočtu přibližně 160 Hz, jak je vidět z obrázku 6.5. První výrazné maximum se nachází na 130 Hz a každé další s odstupem 130 Hz od předchozího. Z toho vyplývá, že základní frekvencí akordu G kytary je přibližně 130 Hz. Většina akustické je kytarou vyzářena mezi 130 Hz a 2,5 kHz. Nad kmitočtem 6 kHz už je vyzářená energie naopak velmi nízká a na zobrazené hodnoty má výrazný vliv šum.

Směrové charakteristiky akordu G kytary pro třetinooktávová pásma se středním kmitočtem 125, 400, 800, 1000, 1250 a 2000 Hz, znázorňuje obrázek 6.4. U kytary se projevuje směrovost už na velmi nízkých kmitočtech, což můžeme vidět na obrázku 6.6. Zatím co pro pásma se středními kmitočty 125 a 400 Hz jsou to jednoduché široké laloky vyzařující ve směru před hráče, pro pásmo se středním kmitočtem 800 Hz už se začíná projevovat směrovost na přibližně 135° a graduje v pásmu se středním kmitočtem 1 kHz, kde již můžeme zřetelně vidět dva různě velké laloky. Podle postavení hráče z obrázku 6.7 můžeme soudit, že v pravé polovině pole se více uplatňuje vliv těla kytary, které se zde nachází z větší části než v polovině levé. Tam se naopak více projevují struny nástroje což znázorňuje výrazný lalok u pásma se střední frekvencí 2 kHz.



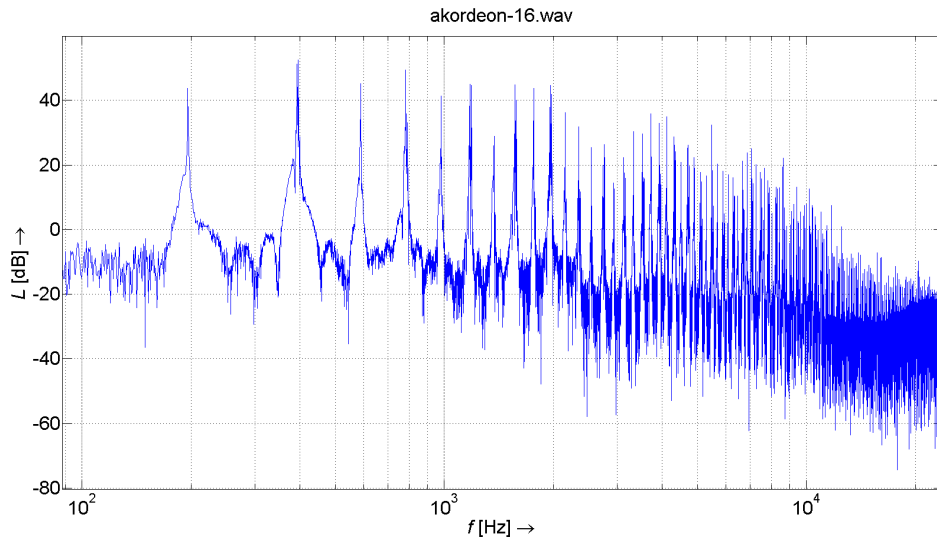
Obr. 6.6: Směrové charakteristiky akordu G kytary pro vybraná kmitočtová pásma



Obr. 6.7: Pozice hudebníka při hře na kytaru

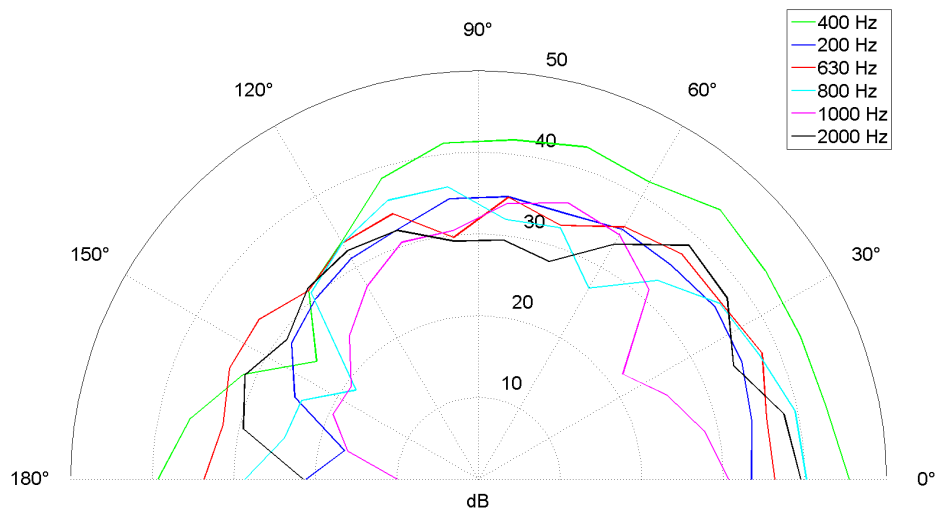
6.4 Akordeon

Z obrázku 6.8 je patrné, že nejvíce akustické energie nástroj vyzařuje na kmitočtu přibližně 400 Hz. První výrazné maximum najdeme na kmitočtu kolem 200 Hz a další pak vždy s odstupem 200 Hz. Z toho vyplývá, že základní frekvence akordu G akordeonu je přibližně 200 Hz. Většinu akustické energie vyzařuje akordeon mezi 200 Hz a 3,5 kHz. Nad kmitočtem 10 kHz už je vyzářená energie naopak velmi nízká



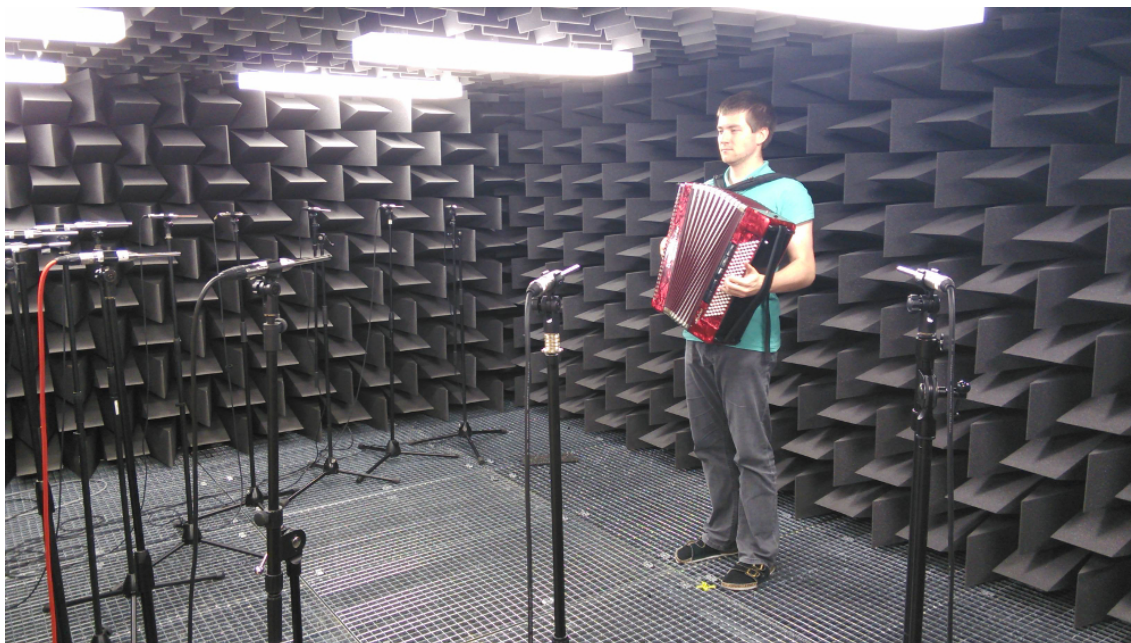
Obr. 6.8: Modulová kmitočtová charakteristika akordu G akordeonu

a na zobrazené hodnoty má výrazný vliv šum.



Obr. 6.9: Směrové charakteristiky akordu G akordeonu pro vybraná kmitočtová pásma

Směrové charakteristiky akordu G akordeonu pro třetinooktávová pásma se středním kmitočtem 200, 400, 630, 800, 1000 a 2000 Hz, znázorňuje obrázek 6.9. Je zřejmé, že vyzařování akordeonu není všesměrové ani na kmitočtech nižších než 500 Hz, jak bychom předpokládali. Vzhledem k poloze minimálních hodnot energie na těchto kmitočtech přibližně v úrovni 140° můžeme odhadovat, že vyzařující části nástroje jsou v těchto místech kryty levou rukou hráče, což by odpovídalo i jeho postavení a



Obr. 6.10: Pozice hudebníka při hře na akordeon

držení nástroje viz obrázek 6.10. Nejvíce se směrovost akordeonu projevuje v pásmu se středním kmitočtem 1 kHz. Zde můžeme vidět výrazný pokles energie kolem 40° , mírný pokles opět v úrovni 140° . Lze usuzovat, že směrovost akordeonu nevyhází jen z konstrukce nástroje samotného, ale je ve velké míře ovlivněna i hráčem. A dále také, že na straně hráčovy levé ruky, nástroj vyzařuje spíše nižší kmitočty a na straně ruky pravé kmitočty spíše vyšší.

7 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo seznámit se s teorií měření směrových charakteristik akustických hudebních nástrojů, toto měření uskutečnit, podrobně zdokumentovat a vytvořit tak návod pro jeho další realizace. Dále pak vytvořit program, včetně grafického rozhraní, pro výpočet a vizualizaci směrových charakteristik ze zvukových nahrávek nástrojů ve formátu *.wav. Získané výstupy následně popsat a v případě dostupnosti porovnat s referenčními hodnotami.

Pro potřebu budoucích měření je ve formě návodu zaznamenán návrh a realizace mikrofonního pole, nastavení a synchronizace jednotlivých prvků měřicí soustavy a celý průběh provedeného měření včetně instrukcí pro hudebníka, zajišťujících eliminaci nežádoucích vlivů hráče na měření. Při volbě parametrů měřicí soustavy bylo nutno vycházet nejen z uvedené literatury, ale také z parametrů bezodrazové komory, která díky svým rozměrům neumožňuje rozestavení měřících mikrofonů v celém 360° rozsahu kruhu při současném zachování jejich minimální doporučené vzdálenosti od nástroje. Zvolen byl proto pouze 180° rozsah rovnoměrně rozdělený mezi 16 mikrofonů s krokem 12°.

Dále byl v prostředí MATLAB realizován program určený ke zpracování výstupních signálů měřících mikrofonů, který umožňuje zobrazení směrových charakteristik nástroje pro jednotlivá třetinooktávová a oktávová pásma a pro kritické kmitočty. Díky grafickému rozhraní si může uživatel jednoduše zvolit která pásma a jakým způsobem, vektorově nebo jako spojitou funkci, chce v grafu vykreslit bez toho, aby přímo zasahoval do zdrojového kódu.

Nástroji, jejichž směrové charakteristiky byly v této práci určovány jsou housle, klarinet, kytara a akordeon. V prvních dvou případech jsou v literatuře [2] k dispozici data pro srovnání. Houslemi přehrávaný tón G nevykazuje do 500 Hz žádnou výraznější směrovost, Ta se objevuje až u pásma se středním kmitočtem 1250 Hz, což v obou případech odpovídá referenčním hodnotám. Ještě výraznější je pak směrovost mezi 1600 Hz a 4 kHz, kde vzniká hned několik výrazných laloků. Stejně tak se s referencí shodují i hodnoty pro tón G klarinetu. Ten se jeví jako všesměrový až do pásma 800 Hz. S rostoucím kmitočtem roste i směrovost, nejvýrazněji se projeví okolo 2000 Hz v podobě čtyř laloků s velkými rozdíly mezi minimem a maximem vyzářené energie. Akord G přehrávaný kytarou se projevuje směrově už v pásmu se středním kmitočtem 125 Hz, což je nejméně ze všech měřených nástrojů. Z charakteristik pro vyšší kmitočty je patrný vliv těla kytar, který se projevuje výrazným lalokem kolem kmitočtu 1000 Hz a vliv strun který se naopak uplatňuje kolem 2000 Hz. Akordeon je ze všech zde uvedených nástrojů konstrukčně nejsložitější a proto je poměrně těžké určit, která z jeho částí se podílí na směrovosti v jednotlivých pásmech. Znamky směrovosti se objevují v úhlu přibližně 140°, tedy přibližně tam, kde má hudebník

při hře levou ruku, na kmitočtech kolem 400 až 800 Hz. Lze tedy usuzovat, že směrovost akordeonu není zapříčiněna jen jeho konstrukcí, ale je ve velké míře ovlivněna i hráčem.

LITERATURA

- [1] GEIST, Bohumil. *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*; Praha: Muzikus, 2005. 281 s. ISBN 80-86253-31-7.
- [2] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*, 1.vydání. Praha: Akademie muzických umění, 2003. 427 s. ISBN 80-73319-01-2.
- [3] SMETANA, Ctirad. *Praktická elektroakustika*. 1.vydání. Praha: SNTL, 1981. 692 s.
- [4] JOHNSTON, Ian. *Measured tones: the interplay of physics and music*; 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 436 s. ISBN 97-81420093-47-6.
- [5] SCHIMMEL, Jiří. *Elektroakustika*; 1.vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013.
- [6] OTČENÁŠEK, Zdeněk a Jan ŠTĚPÁNEK. *Změna barvy zvuku houslí při změně polohy v prostoru kolem nástroje*; Proceedings of the 6th International Colloquium ACOUSTICS '01. Zvolen-Blanská Štiavnica, 2001. str. 35-38. ISBN 80-228-1048-7.
- [7] OTČENÁŠEK, Zdeněk a Václav SYROVÝ. *Directivity of violin radiation*; CD-ROM of Joint Meeting 137th ASA, 2nd EAA Forum Acusticum 1999, 25th DAGA. Berlin, 1999.
- [8] JAN, Jiří. *Číslíkové zpracování a analýza signálů: stručné skriptum*; Brno: MJ servis Brno, s.r.o, 2010. 138 s. ISBN 9788021440180.
- [9] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací*; 1. vydání. Praha: BEN, 2004. 215 s. ISBN 8073001330.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

FFT Rychlá fourierova transformace

GUI Graphical User Interface

WAV Waveform audio file format

f_{vz} vzorkovací kmitočet

f_h Horní mezní kmitočet pásma

f_d Dolní mezní kmitočet pásma

f_n Střední kmitočet pásma

I_Q Index směrovosti

Q_Z Činitel směrovosti

Φ Rychlostní potenciál

SEZNAM PŘÍLOH

A	Návod k měření	46
A.1	Rozestavení měřících mikrofonů	46
A.2	Synchronizace zařízení	47
A.3	Signálová cesta	49
A.4	Kalibrace mikrofonů	50
A.5	Měření	52
A.5.1	Instrukce pro hráče	52
A.5.2	Program Cubase	52
B	Obsah elektronické přílohy	53

A NÁVOD K MĚŘENÍ

Rozhodneme-li se měřit směrové charakteristiky hudebního nástroje, je třeba nejprve uvažovat nad způsobem, jakým budou pořizovány nahrávky daného nástroje v co možná nejvyšší kvalitě, tj. s co největším možným odstupem signálu od šumu. Měření provádíme v bezodrazové komoře, která vykazuje pro tento účel ideální akustické vlastnosti, jelikož je zde akustické pole tvořeno pouze přímými vlnami. K tomu, abychom mohli pomocí MATLABu určit směrové charakteristiky akustického nástroje potřebujeme jeho zvukové nahrávky ve formátu *.wav. Kromě měřící aparatury, která bude popsána dále, potřebujeme PC s programem Cubase nebo podobným, do nějž vícekanálový vstup nahrajeme a poté jej vyexportujeme v požadovaném formátu.

A.1 Rozestavení měřících mikrofونů

První částí měřící aparatury jsou mikrofony. Jejich rozmístění je velmi variabilní, avšak musí splňovat určité podmínky.

Doporučená vzdálenost mikrofونů od měřeného nástroje jsou 2 až 4 metry. Rozestaveny mohou být buď po celém obvodu kruhu, nebo podél jeho části, nejčastěji půlkruhu, ale můžeme zvolit i jinou velikost úseku v závislosti na požadované přesnosti směrových charakteristik v prostoru za hráčem a také na předpokládaných vlastnostech měřeného nástroje. Pokud nám to prostor dovoluje, je nejlepší zvolit celý 360° rozsah, ten pak můžeme rozdělit na různě velké úseky nebo mezi mikrofony zvolit konstantní vzdálenost.

Polohy jednotlivých mikrofونů můžeme určit jednoduchým výpočtem, kdy potřebujeme znát věty o trojúhelníku a úhly ve kterých se mají mikrofony nacházet. Druhou možností je použití laserového úhlooměru EPT-SA08, s jehož pomocí můžeme poměrně jednoduše a hlavně přesně stanovit jednotlivé polohy.

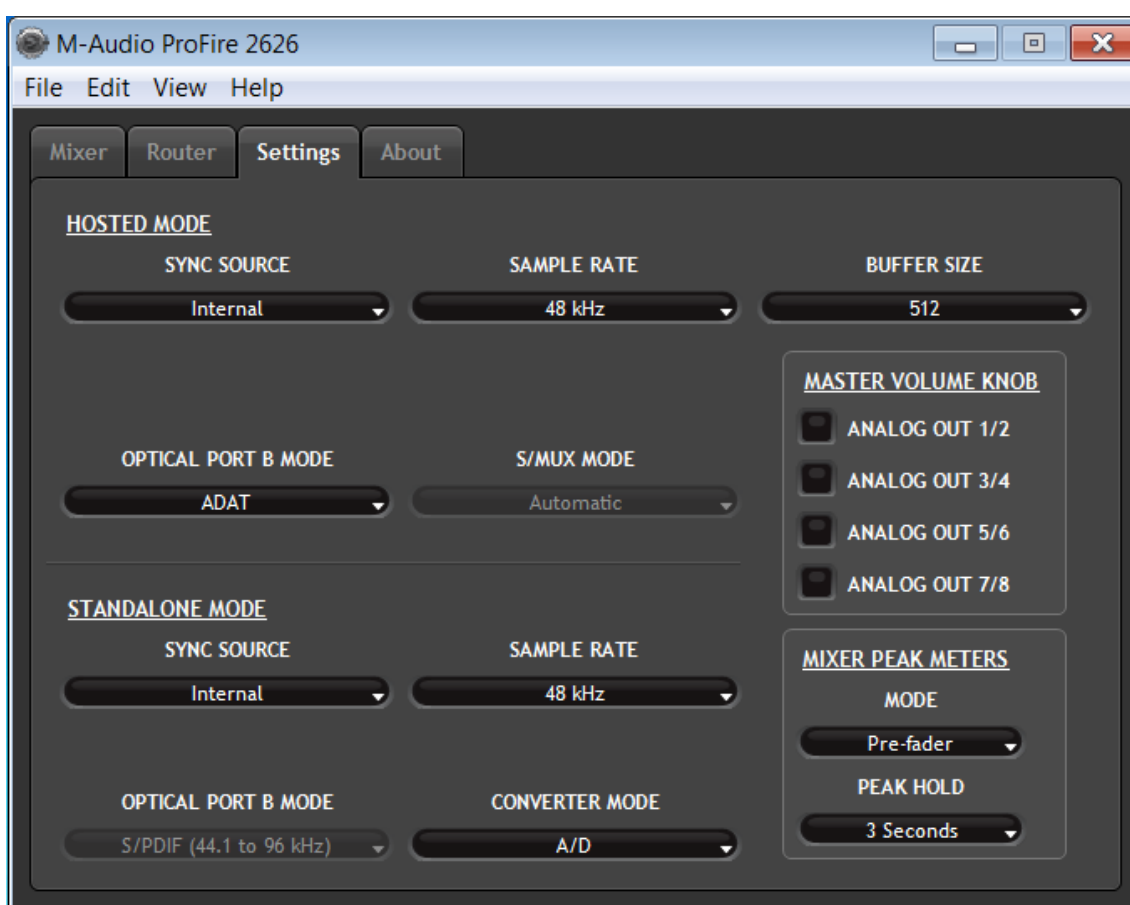
Postupujeme tak, že zvolíme polohu prvního mikrofonu, úhloměr nastavíme na 0°, přičemž paprsek úhlooměru směřuje právě na první mikrofون. Poté úhloměrem pootočíme o zvolený počet stupňů (vzdálenost jednotlivých mikrofونů na kružnici). Z důvodu nedokonalé stability, je třeba dávat pozor, abychom otáčeli pouze horní částí úhlooměru. Při neopatrné manipulaci může dojít k posunutí měřící stupnice a ve výsledku pak ke zkreslení celého měření. I tak je ale třeba počítat s jistou nepřesností, která se pohybuje v rozsahu přibližně -1° až $+1^\circ$ pro každou polohu mikrofonu.

Vzdálenost mikrofونů od středu kružnice měříme pomocí svinovacího metru. Mikrofony umísťujeme do jednotlivých poloh uchycené na výškově nastavitelných sto-

janech. Polohu každého mikrofonu označíme značkou na podlaze, čímž si usnadníme práci při dalších měřeních. Dbáme i na to, aby všechny mikrofony měly jednotnou výšku, kterou nastavujeme v závislosti na nástroji, který chceme měřit. Mikrofony by měly být v úrovni zářiče nástroje. Rozložení úhlů, vzdálenost mikrofonu od středu měřící kružnice a výšku, ve které se mikrofon nachází, si zaznamenáme.

A.2 Synchronizace zařízení

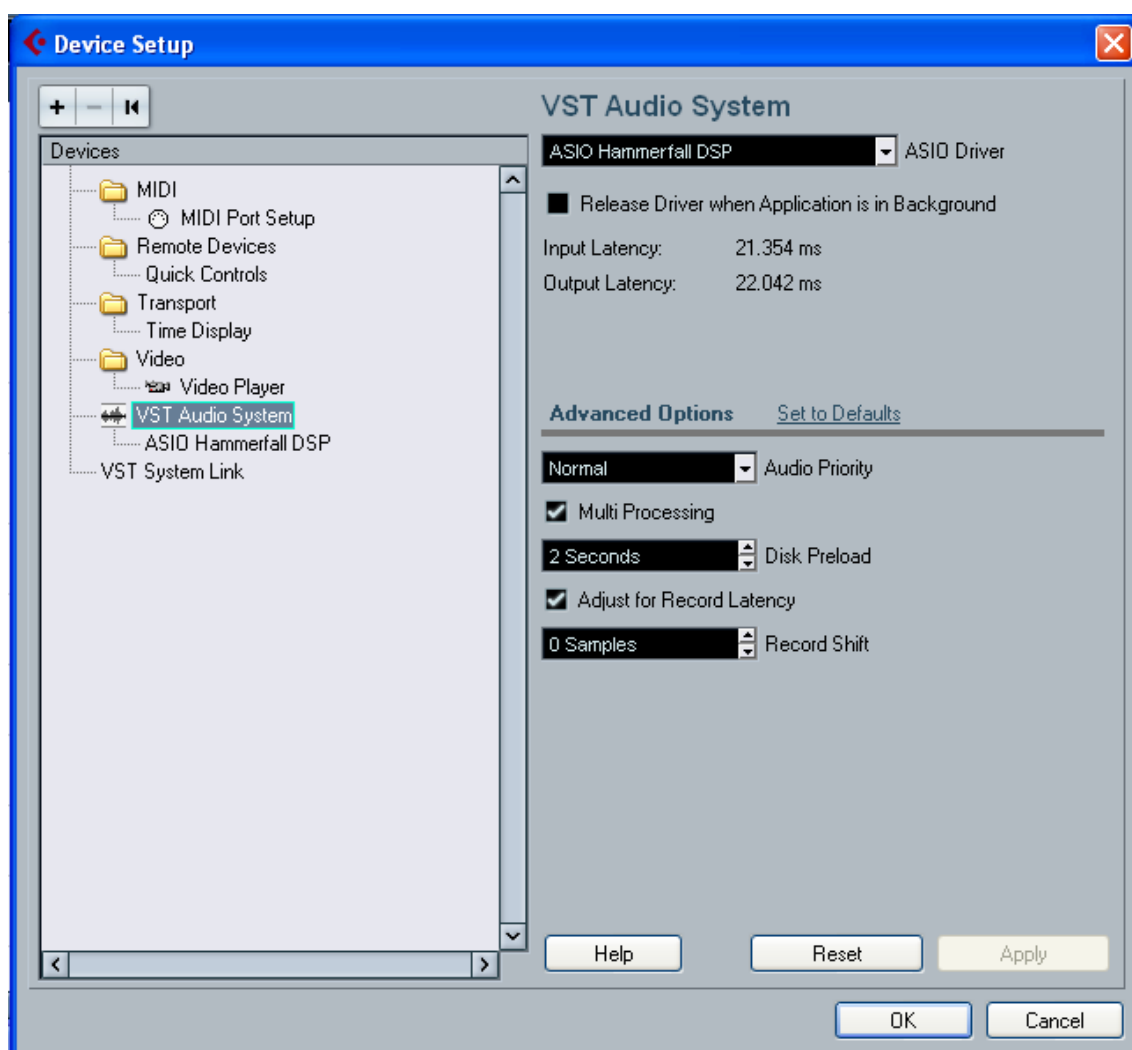
Pro nastavení synchronizace A/D převodníků M-AUDIO ProFire 2626 a zvukového rozhraní Hammerfall slouží počítač s ovladačem M-AUDIO ProFire 2626.



Obr. A.1: Ukázka nastavení prvního A/D převodníku

Počítač připojíme pomocí kabelu FireWire k prvnímu A/D převodníku (použijeme levou zdířku, pravá slouží k propojení převodníků), ten bude v pozici „master“ zajišťovat synchronizaci pomocí časového kódu WordClock. V záložce Mixer nastavíme hodnotu SYNC SOURCE na Internal, SAMPLE RATE zvolíme 48kHz viz obrázek A.1.

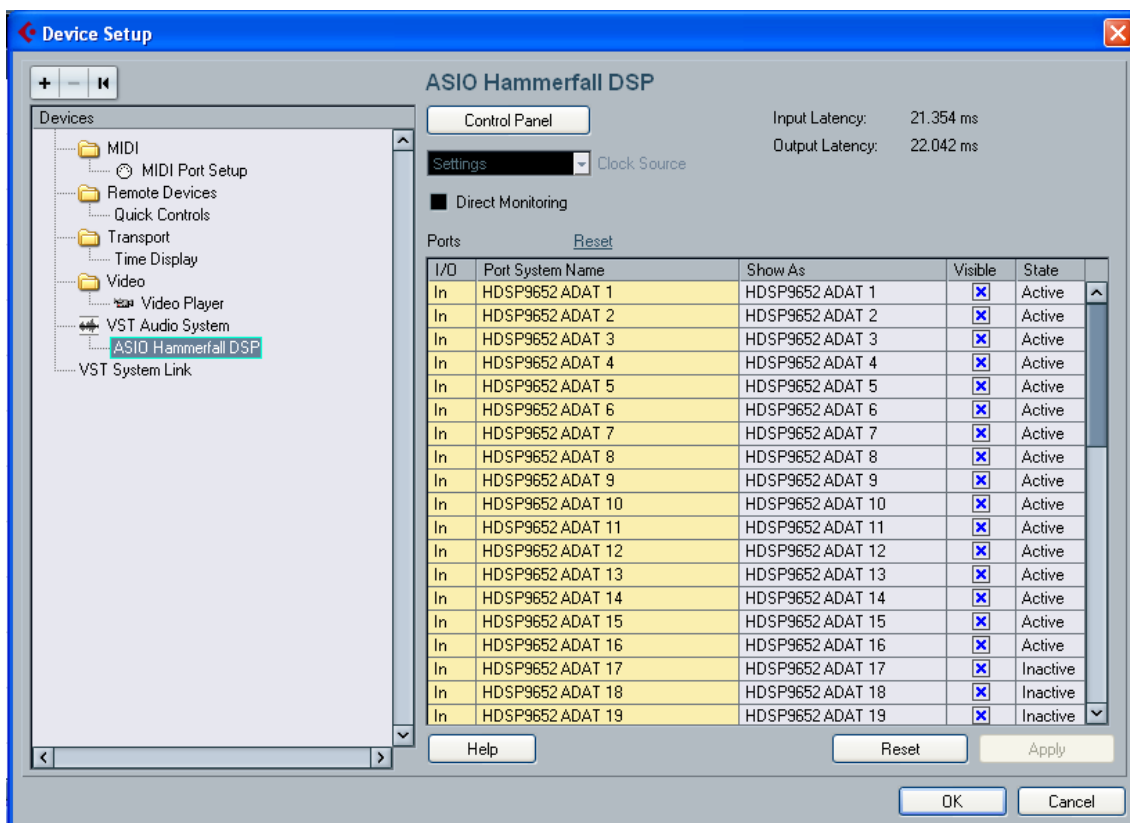
U druhého A/D převodníku nastavíme hodnotu SYNC SOURCE na Word Clock, čímž zajistíme, že se bude řídit signálem z prvního A/D převodníku. SAMPLE RATE bude tudíž nastavena na Automatic. V našem případě bude mít převzatou hodnotu 48kHz. Při přepojování kabelu FireWire z prvního do druhého A/D převodníku je třeba brát v úvahu, že se vždy načítá poslední konfigurace nastavená v PC, nikoliv konfigurace převodníků.



Obr. A.2: Výběr ASIO Driveru Hammerfall DSP

V programu Cubase klikneme na Devices, zvolíme Device Setup a poté VST Audio System. Jako první budeme vybírat ASIO Driver, který nám umožní přímý přístup ke zvukové kartě (vyhneme se tak ovladačům operačního systému). Zvolíme ASIO Hammerfall DSP a potvrdíme (Apply) viz obrázek A.2.

Ve struktuře Devices klikneme na vybraný driver a v nastavení Control Panel zkontrolujeme, že je v módu Slave, tj. že přebírá synchronizační signál wordclock z prvního A/D převodníku viz obrázek A.3 a obrázek A.4.



Obr. A.3: Kontrola nastavení ASIO Hammerfall DSP

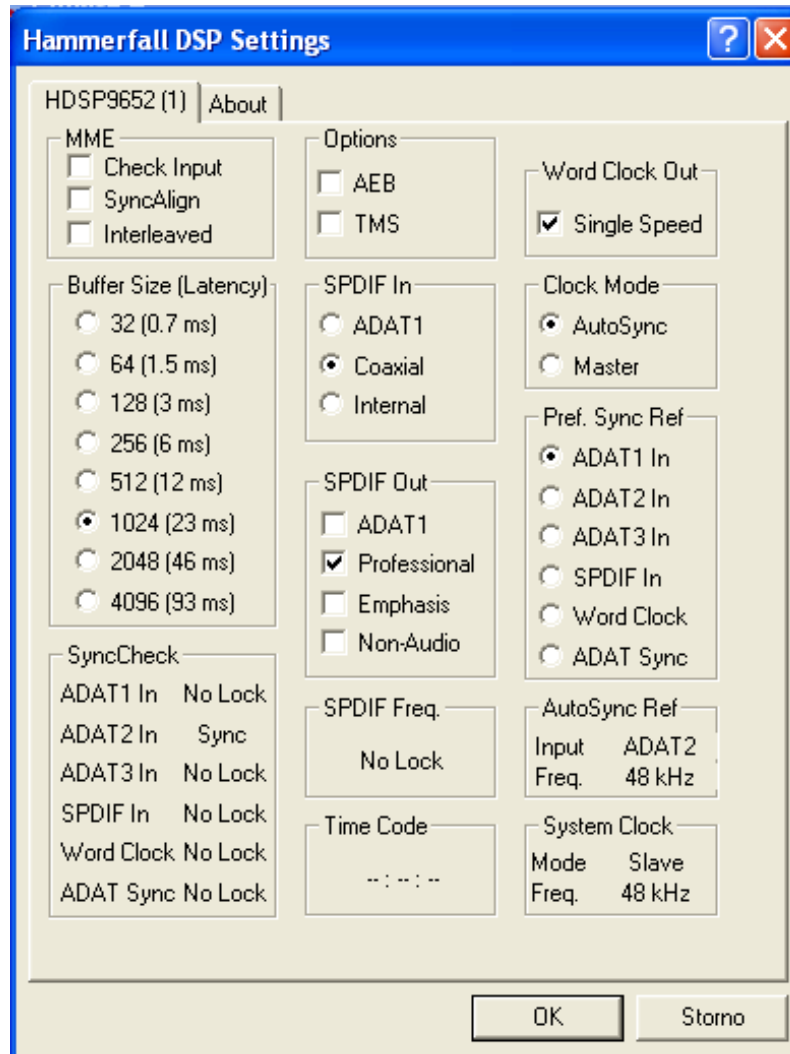
Synchronizace se do druhého A/D převodníku bude posílat přes kabel s konektorem RS232 s redukcí na BNC a do zvukového rozhraní Hammerfall přes optický kabel ADAT.

V záložce Router nastavíme směrování jednotlivých vstupů A/D převodníku do kanálů ADATu viz obrázek A.5.

A.3 Signálová cesta

Signál z mikrofonů přivedeme pomocí kabelů s XLR konektory do A/D převodníku s integrovaným zesilovačem. Snažíme se přitom, aby všechny kabely vedoucí z mikrofonů do A/D převodníku byly stejně dlouhé a bez zbytečných spojů, čímž zabráníme chybám vzniklým různou rezistivitou jednotlivých signálových cest. První i druhý A/D převodník připojíme pomocí optického kabelu ADAT ke zvukovému rozhraní Hammerfall jež je integrovaným PCI zařízením počítače s programem Cubase.

V programu Cubase je nutno namapovat jednotlivé vstupní signály do zvukových stop a to tak, že do každé stopy budeme zaznamenávat signál právě z jednoho mikrofonu. Výsledkem bude počet stop shodný s počtem měřících mikrofonů.



Obr. A.4: Kontrola nastavení ASIO Driveru Hammerfall DSP, Mode – Slave

A.4 Kalibrace mikrofonů

Poté co sestavíme signálovou cestu vedoucí od měřících mikrofonů až do PC, pomocí něhož budeme nahrávat zvukové soubory, je třeba nastavit zesílení jednotlivých mikrofonních vstupů tak, aby měl signál na všech kanálech v počítači stejnou úroveň.

V první části budeme nastavovat zesílení na A/D převodnících. K tomu použijeme měřič NTI XL2, nastavený na měření hladiny akustického tlaku. Ten budeme postupně připojovat na jednotlivé analogové výstupy A/D převodníku, na které budeme pomocí PC ovladače směřovat mikrofonní vstupy. Toto směřování je možné pouze po párech (tj. vždy současně kanály 1 a 2, poté 3 a 4 atd.) Kalibraci budeme provádět pomocí tónového kalibrátoru, který nasadíme na mikrofon a zapneme. V komoře kalibrátoru je přesně definovaný, konstantní akustický tlak, pročež budeme mít jistotu, že při nastavování zesílení jsou všechny mikrofony buzeny stejným



Obr. A.5: Nastavení směrování vstupů A/D převodníku do kanálů ADATu

signálem. Nyní můžeme odpojit počítač používaný k nastavování od A/D převodníků. Dále s ním už nebudeme pracovat.

Po prvotním nastavení zesílení na A/D převodnících by neměly být rozdíly mezi jednotlivými kanály nijak markantní, pokud ano, vypovídalo by to chybě v měřící aparatuře, ale jsou dostatečně velké na to, aby zkreslily naměřené hodnoty, čímž by došlo ke znehodnocení celého měření.

Ve druhé části budeme dorovnávat nepřesnosti jednotlivých vstupů převodníku. V programu Cubase vložíme do signálové cesty výstupu z každého mikrofону VST pluginu MLoudnesAnalyzer volně dostupnou z¹, pomocí které můžeme monitorovat aktuální hodnotu dBFS. Jako referenční zdroj zvuku nám bude opět sloužit tónový kalibrátor. Pomocí sliderů nastavíme jednotlivé kanály tak, aby měly stejnou úroveň. Orientujeme se přitom podle aktuální hodnoty (Momentary), zobrazované pluginou (je třeba vyčkat několik sekund, než se hodnota po nasazení a spuštění kalibrátoru ustálí).

¹<http://www.meldaproduct.com/download.php?bundle=MFreeEffectsBundle>

A.5 Měření

Jakmile máme měřicí aparaturu připravenou, můžeme přejít k samotnému měření. Pro monitorování dění a komunikaci s hráčem v bezodrazové komoře budeme využívat talkback a webkameru propojené do režijní místnosti. V zájmu kvality a rychlosti měření je dobré hráče před uzavřením bezodrazové komory instruovat o požadavcích a průběhu měření, tj. domluvit se na tónech, akordech, popřípadě skladbě, kterou bude reprodukovat a také na způsobu této reprodukce.

A.5.1 Instrukce pro hráče

Důležité je nechat tón plně rozvinout, proto by měl hráč tón zahrát, několik vteřin vyčkat a poté nástroj utlumit. Především při přehrávání samostatných tónů je pak hráče třeba upozornit, že mezi jednotlivými tóny musí dělat delší pomlky (přibližně 5 sekund, ale záleží na nástroji a uvážení hráče), aby se neprolínaly, čímž by došlo ke zkreslení naměřených hodnot.

Hráče postavíme do středu mikrofonního pole tak, aby stál čelem k úhlu 90° a zářič nástroje byl ve středu pomyslné kružnice. Hráč by se měl během hry pohybovat co možná nejméně, byť pro něj statický postoj nemusí být přirozený, je velmi důležitý pro přesnost měření.

A.5.2 Program Cubase

Ujistíme se, že je program Cubase správně nastavený a spustíme nahrávání. Po jeho ukončení klikneme na File, zvolíme Back Up Project. . . , Vytvořit novou složku (soubory se musí vždy ukládat do PRÁZDNÉ SLOŽKY) a poté projekt uložíme. V námi vytvořené složce najdeme po skončení exportu nahrávky z jednotlivých mikrofonů ve formátu *.wav, které budeme dále upravovat (stříhat) například v programu Audacity nebo právě v Cubase, tak abychom získali soubory s jednotlivými tóny popřípadě akordy. Ty budou vstupem pro funkci *smerove_charakteristiky* v prostředí MATLAB.

B OBSAH ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY

Přiložené CD obsahuje elektronickou verzi bakalářské práce ve formátu PDF, zdrojové kódy aplikace a zvukové nahrávky hudebních nástrojů použité v této práci.

- **MATLAB** – obsahuje soubory programu a funkcí použitých pro vypracování bakalářské práce
- **Nahrávky nástrojů** – obsahuje zvukové nahrávky tónu G jednotlivých nástrojů ve formátu *.wav