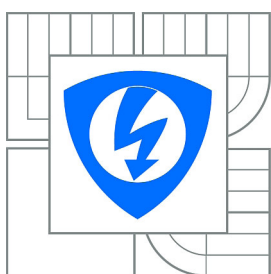


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULACE POSLECHOVÉHO PROSTORU, AZIMUTU A VZDÁLENOSTI ZVUKOVÉHO ZDROJE PRO VÍCEKANÁLOVÉ OZVUČOVACÍ SYSTÉMY

SIMULATIONS OF AUDITORY SPACE AND AZIMUTH&DISTANCE OF SOUND SOURCE,
FOR MULTICHANNEL SOUND SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

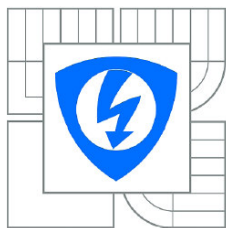
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. KRISTIÁN ORLOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV BALÍK, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Kristián Orlovský
Ročník: 2

ID: 72992
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Simulace poslechového prostoru, azimutu a vzdálenosti zvukového zdroje pro vícekanálové ozvučovací systémy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Implementujte metodu pro simulaci šíření zvukových vln v uzavřeném poslechovém prostoru v Matlabu. Simulaci připravte pro běžně používané multikanálové zvukové formáty. Do simulace zahrňte výsledky měření absorpce různých stavebních materiálů a pro tyto materiály připravte sadu aproximačních filtrů optimalizovaných pro nízkou výpočtovou náročnost. Simulujte dva případy šíření zvukových vln. V prvním případě bude volitelný půdorys poslechového prostoru, materiál stěn, poloha zvukového zdroje a posluchače. V druhém případě realizujte metodu panoramování zvukového signálu, kdy bude možné měnit azimut zvukového zdroje a vzdálenost zvukového zdroje od posluchače. Obě simulace budou ovládány pomocí grafického uživatelského rozhraní.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Pulkki V. Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning. J. Audio Eng. Soc., vol. 45, no. 6, pp. 456-466 (1997 June).

[2] Pernaux J.M., Boussard P., Jot J.M. Virtual Sound Source Positioning and Mixing in 5.1 Implementation on the Real-Time System Genesis. In Proc. Conf. Digital Audio Effects (DAFx-98), 1-5, 1998, ISBN 84-88042-24-8

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Táto práca je zameraná na simuláciu posluchového priestoru. Popisuje najčastejšie používanú panoramovacú metódu, ktorou je vektorová metóda. Ďalej sa zaoberá obrazovou metódou, ktorá umožňuje výpočet parametrov priamej zvukovej vlny a zvolený počet odrazených zvukových vln v pravouhlej miestnosti. Túto metódu porovnáva s metódou ray-tracing, taktiež často používanou. Študuje problematiku frekvenčne závislej zvukovej pohltivosti materiálov pri odrazoch zvukovej vlny od steny. Na základe týchto poznatkov sú navrhnuté vo vývojovom prostredí MATLAB dve aplikácie. Jedna slúži na simulovanie virtuálneho zvukového prostredia. Druhou je aplikácia pre panoramovanie azimutu a vzdialenosti zdroja zvuku.

ABSTRACT

This thesis is aimed at simulation of auditory space. It describes the most frequently used panning method: Vector Base Amplitude Panning. Also is focused on image source method, which allows computing the parameters of direct sound wave and reflections in rectangular room. This method is compared with ray-tracing method, which is also often used. It deals with the matter of the frequency – dependent absorption of materials in reflection of the sound wave against the wall. On the basis of these information two applications were designed in MATLAB development environment. The first one allows the simulation of auditory space. The other one is the application for sound source panning by its azimuth and distance.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

simulovanie posluchového priestoru, panoramovanie zdroja zvuku, panoramovanie, vektorová metóda, vektorové panoramovanie, VBAP, simulácia prvotných odrazov, obrazová metóda, metóda ray-tracing, zvuková pohltivosť materiálov, aplikácia pre simulovanie posluchového priestoru, aplikácia pre panoramovanie zdroja zvuku

KEYWORDS

simulation of auditory space, sound source panning, panning, vector base amplitude panning method, vector base amplitude panning, VBAP, simulation of early reflections, image source method, ray-tracing method, material sound absorption, application for auditory space simulation, application for sound source panning

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ORLOVSKÝ, K. Simulace poslechového prostoru, azimutu a vzdálenosti zvukového zdroje pro vícekanálové ozvučovací systémy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Balík, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému Simulácia posluchového priestoru, azimutu a vzdialenosti zvukového zdroja pre viackanálové ozvučovací systémy som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálneho projektu a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedeného semestrálneho projektu ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohto projektu som neporušil autorské práva tretích osôb, obzvlášť som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení §11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia §152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa 26. 5. 2011

.....
podpis autora

POĎAKOVANIE

Touto cestou chcem poďakovať predovšetkým vedúcemu tejto bakalárskej práce Ing. Miroslavovi Balíkovi PhD. za odborné vedenie, cenné rady a výdrž s mojou povahou pri spracovaní tejto práce.

Nemenej dôležité poďakovanie venujem svojim rodičom za silnú a neoceniteľnú podporu v štúdiu.

Podakovať sa chcem aj firme SONING Praha a.s., ktorá nám ochotne poskytla nimi namerané koeficienty zvukovej pohltivosti rôznych stavebných materiálov potrebných pri realizácii tejto práce.

V Brne dňa 26. 5. 2011

.....
Podpis autora

OBSAH

Úvod	9
1. Panoramovanie zdroja zvuku	10
1.1 Úvod	10
1.2 Dvojrozmerné amplitúdové panoramovanie.....	11
1.2.1 Základný popis.....	11
1.2.2 Odvodenie metódy	12
1.2.3 Aplikovanie 2D VBAP pre viac, než dva reproduktory.....	14
1.2.4 Zhrnutie	16
2. Modelovanie šírenia zvukovej vlny v uzavretom priestore	18
2.1 Úvod	18
2.2 Obrazová metóda.....	19
2.3 Metóda Ray-Tracing.....	23
3. Zvuková pohltivosť materiálov.....	26
3.1 Úvod	26
3.2 Návrh filtrov simulujúcich reálne materiály	26
3.2.1 Meranie koeficientov pohltivosti	26
3.2.2 Návrh filtrov.....	28
3.3 Návrh parametrických filtrov	30
4. Multikanálová simulácia prvotných odrazov	33
4.1 Aplikácia pre simuláciu posluchového prostredia	33
4.1.1 Teoretický popis.....	33
4.1.2 Popis parametrov.....	34
4.1.3 Popis aplikácie a GUI	35
4.2 Aplikácia pre panoramovanie zdroja zvuku.....	37
4.2.1 Teoretický popis.....	37
4.2.2 Popis parametrov.....	39
4.2.3 Popis aplikácie a GUI	40

5. Posluchové testy	43
6. Záver	44
Použitá literatúra	46
Zoznam použitých skratiek.....	47
Zoznam príloh	48

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. č. 1.1: Dvojkanálová stereofónna konfigurácia.....	11
Obr. č. 1.2: Vektorové vyjadrenie stereofónneho rozloženia.....	14
Obr. č. 1.3: Dvojrozmerné VBAP s piatimi reproduktormi.	15
Obr. č. 2.1: Príklad impulzovej odozvy miestnosti s označenou priamou vlnou, prvotnými a mnohonásobnými odrazmi	18
Obr. č. 2.2: Dvojrozmerné rozvinutie izieb pomocou zrkadlenia cez všetky steny, čím vznikajú nové virtuálne zdroje.	20
Obr. č. 2.3: Znázornenie princípu výpočtu vzdialenosti, ktorú musí prekonať zvuková vlna na ceste od reálneho zdroja (RZ) ku poslucháčovi (RP) pomocou nájdeného virtuálneho zdroja (VZ).	21
Obr. č. 2.4: Princíp vyhľadávania odrazov metódou ray-tracing.	23
Obr. č. 2.5: Metóda ray-tracing zobrazená pomocou obrazovej metódy.....	24
Obr. č. 3.1: Bloková schéma použitých shleving filtrov (LSF a HSF).....	30
Obr. č. 3.2: Bloková schéma fázovacieho článku 1. rádu	31
Obr. č. 3.3: Znázornenie sériovej kombinácie LSF a HSF	32
Obr. č. 4.1: GUI aplikácie pre simuláciu posluchového prostredia	36
Obr. č. 4.2: Topológia miestnosti pre panoramovanie zdroja zvuku s naznačenými polohami poslucháča a zdroja zvuku	38
Obr. č. 4.3: Znázornenie princípu panoramovania azimutu pre panoramovanie zdroja zvuku	38
Obr. č. 4.4: Znázornenie parametrov pre panoramovanie zdroja zvuku	40
Obr. č. 4.5: GUI aplikácie pre panoramovanie zdroja zvuku	41
Obr. č. 5.1: Topológia miestnosti kde boli vykonávané priebežné posluchové testy	43

ÚVOD

Dnešná doba zažíva prudký rozmach v oblasti audiovizuálnej a výpočtovej techniky, čo spôsobuje pomalé zabúdanie na niekdajšie monofónne zvukové systémy a čoraz častejšie upriamuje pozornosť na viackanálové audio systémy, ktoré sa udomácňujú v stále väčšom počte obývacích miestností. Hoci priestorový zvuk nie je novinkou posledných pár rokov, tento rozvoj priniesol prepracovanejšie systémy, ktoré dovoľujú rýchle digitálne spracovanie signálov a tak aj záznam a prehrávanie videa s viackanálovou zvukovou stopou, hranie počítačových hier podporujúcich priestorovú reprodukciu zvuku a mnoho ďalších rôznorodých aplikácií. Tie zas vyžadujú novšie a dokonalejšie algoritmy pre panoramovanie zvuku schopné realizovať svoju funkciu aj v reálnom čase s čo najlepším výsledkom.

Pre panoramovanie zvuku existujú viaceré metódy. V prvej časti je priblížená najčastejšie používaná vektorová metóda panoramovania. Táto metóda bola popísaná v [2]. Je tu podrobný popis aj odvodenie tejto metódy pre 2 reproduktory. Následne je myšlienka tejto metódy rozšírená pre použitie vo viackanálovej reproduktorovej sústave. Práca takisto približuje problematiku simulovania reálneho posluchového priestoru. Popisuje jednu z metód (obrazovú metódu, popísanú v [6]) na výpočet prvotných odrazov (early reflections) v pravouhlej miestnosti, ktorá slúži na výpočet ich parametrov, ako sú uhol dopadu k poslucháčovi a vzdialenosť, ktorú k nemu musia uraziť. Uvádza aj hlavnú myšlienku metódy ray-tracing a takisto túto metódu porovnáva s obrazovou metódou. Ďalší problém pri simulovaní zvukových odrazov je frekvenčne závislá zvuková pohltivosť materiálu, od ktorého sa daná zvuková vlna odrazila. Aby bolo možné túto pohltivosť simlovať, je najprv potrebné popísať, ako sa meria a čo predstavujú tieto namerané hodnoty.

V práci by mali na základe týchto poznatkov byť navrhnuté aplikácie. Jednou z nich je aplikácia pre simulovanie posluchového prostredia. Tá by mala na základe vstupných parametrov, ako sú rozmery miestnosti, poloha zdroja zvuku a poslucháča, materiál jednotlivých stien a maximálny rád odrazu nasimulovať posluh v tomto virtuálnom prostredí. Umožní tak simulovať posluh v prostredí, ktoré sa nemusí reálne vyskytovať a zhodnotiť tak jeho akustické vlastnosti.

Druhou je aplikácia pre panoramovanie zdroja zvuku. Táto aplikácia by mala na základe poznatkov popísaných v tejto práci simulovať polohu zdroja zvuku. A to nie len na základe jeho azimutu, ale mala by vedieť panoramovať aj jeho vzdialenosť od poslucháča.

1. PANORAMOVANIE ZDROJA ZVUKU

1.1 Úvod

Zvukové pole, ktoré nás obklopuje, je veľmi komplexné. Skladá sa z priamych zvukových vln, odrazených zvukových vln a mnohonásobných odrazov, ktoré sú po prijatí ľudským uchom spracovávané v hlave ako celok. Priestorové počutie je dôležitou súčasťou poznania obklopujúceho sveta. Smer, odkiaľ zdroj zvuku šíri mechanické vlnenie je možné lokalizovať na základe dvoch podnetov:

ITD (Interaural Time Difference) je časová diferencia, založená na časovom oneskorení zvuku, ktorý je prijímaný jednotlivými ušami. K privrátenému uchu dorazí zvuková vlna o niečo skôr, než k odvrátenému. Uplatňuje sa pri vzdialených zdrojoch zvuku.

IID (Interaural Intensity Difference) je zas intenzitná diferencia a tá sa uplatňuje pri blízkyh zvukových zdrojoch, kde sa práve nemôže uplatniť časová diferencia. Veľkosť tejto diferencie je závislá na smere prichádzajúceho zvuku a na jeho frekvencii. Na základe týchto parametrov je zvuk ovplyvnený akustickým tieňom hlavy.

Okrem týchto podnetov pre lokalizáciu zvuku v priestore sluch využíva niektoré iné podnety ako spektrálne farbenie.

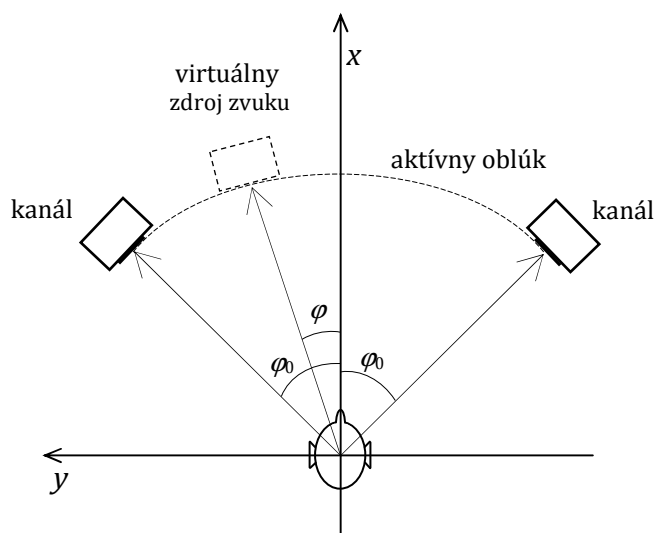
Vnášanie virtuálneho trojrozmerného zvukového poľa do posluchových situácií je jednou z oblastí skúmania audio reprodukčného poľa. Prvé audio nahrávky boli monofónneho charakteru. Vytvárali bodové zvukové polia. Významným krokom bola dvojkanálová (stereofónna) reprodukcia, ktorou bolo zvukové pole rozšírené na čiaru medzi dvoma reproduktormi. Tento typ rozloženia zvukového poľa je stále najčastejšie používanou reprodukčnou metódou v domácih ale aj profesionálnych zariadeniach. V priebehu vývoja bolo navrhnutých niekoľko možností, ako zväčšiť zvukové pole. Horizontálne (pantofonické) zvukové pole bolo vytvorené s rôznym počtom reproduktorov a s rôznymi systémami kódovania, dekódovania a formátovania. V drvivej väčšine systémoch sú reproduktory rozmiestnené dvojrozmerné (horizontálne). Existuje aj niekoľko pokusov vytvoriť perifonické (všetky sféry) zvukové pole s trojrozmerným reproduktorovým rozmiestnením.

V tejto časti bude podrobne detailne rozobrať jedna z najčastejšie používaných panoramovacích techník, technika vektorového panoramovania.

1.2 Dvojrozmerné amplitúdové panoramovanie

1.2.1 Základný popis

Dvojrozmerné amplitúdové panoramovanie, takisto známe ako intenzitné panoramovanie, je najznámejšou panoramovacou metódou. Použitie siaha od malých domácich stereofónnych zosilňovačov po profesionálne mixpulty. Metóda je však len nejakým napodobením lokalizácie reálneho zdroja. V jednoduchej amplitúdovej panoramovacej metóde vyžarujú dva reproduktory súvislé signály, ktoré môžu mať rozličné amplitúdy. Poslucháč potom vníma ilúziu jedného sluchového bodu (virtuálny/umelý zdroj zvuku), ktorý môže byť umiestnený v dvojrozmernej zóne určenej lokalitami reproduktorov a poslucháčom riadením amplitúd signálu reproduktorov. Príklad vytvorenia takéhoto virtuálneho zdroja zvuku je na Obr. č. 1.1. Dva reproduktory sú umiestnené symetricky s ohľadom na stredovú rovinu. Reprodukory sú polohované pod uhlom $\varphi_0 = \pm 60^\circ$. Amplitúdy signálov sú riadené jednotlivo zosilňovacími činiteľmi g_1 a g_2 [2].



Obr. č. 1.1: Dvojkanálová stereofónna konfigurácia

Smer virtuálneho zdroja je závislý na pomere amplitúd vyžarovaných signálov. Ak je virtuálny zdroj pohyblivý a jeho hlasitosť by mala byť konštantná, zosilňovacie činitele, ktoré riadia úroveň kanálov musia byť normalizované. Zvukový výkon vyžarovaný týmto zdrojom bude nastavený na nastaviteľnú hodnotu C [2]:

$$g_1^2 + g_2^2 = C \quad (1.1)$$

Parameter C ($C > 0$) tak vnímame ako regulátor hlasitosti virtuálneho zdroja. Vnem vzdialenosti virtuálneho zdroja zvuku závisí na stanovení parametra C , hlasnejší je ten zvuk, ktorý je bližšie lokalizovaný a naopak. Na zvýšenie presnosti riadenia vzdialenosti zdroja zvuku môžu byť použité niektoré psychoakustické javy a pridané niektoré iné zvukové zložky, ako sú odrazy a ozveny, čím sa zaoberá iná kapitola tejto práce.

Keď nepotrebujeme riadiť vzdialenosť virtuálneho zdroja, môže byť ten umiestnený na oblúku medzi reproduktormi, ktorého polomer je definovaný vzdialenosťou medzi poslucháčom a reproduktormi. Oblúk je nazývaný aktívny oblúk, ako je to viditeľné na Obr. č. 1.1.

V panoramovacom procese je definovaný len smer, kde by sa mal virtuálny zdroj javiť a panoramovacie zariadenie vypočítava zosilňovacie činitele. V nasledujúcej časti bude popísaný postup výpočtu týchto činiteľov vektorovou metódou.

1.2.2 Odvodenie metódy

Smerový vnem virtuálneho zdroja zvuku tvorený amplitúdovým panoramovaním vyplýva zo stereofónnej sínusovej vety [1]:

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (1.2)$$

kde $0^\circ < \varphi < 90^\circ$, $-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ a $g_1, g_2 \in <0, 1>$.

V rovnici (1.2) reprezentuje φ uhol medzi osou x a smerom virtuálneho zdroja a $\pm\varphi_0$ je uhol medzi osou x a jednotlivými reproduktormi (viď. Obr. č. 1.1). Táto rovnica je platná, keď je poslucháčova hlava upriamená dopredu. Keď sa poslucháč otočí, alebo jeho hlava nasleduje virtuálny zdroj, je správnejšie použitie tangensovej vety [2]:

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (1.3)$$

kde $0^\circ < \varphi < 90^\circ$, $-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ a $g_1, g_2 \in <0, 1>$.

Rovnice (1.2) a (1.3) boli vypočítané s predpokladom, že prichádzajúci zvuk je rozdielny len vo veľkosti (časová diferenciacia je uchom nepostrehnuteľná), ktorá je platná pre frekvencie pod 500 – 600 Hz. Keď udržiavame úroveň zvukového výkonu konštantnú, zosilňovacie činitele môžeme vypočítať použitím rovníc (1.2) a (1.1) alebo rovníc (1.3) a (1.1). Drobné rozdiely medzi týmito rovnicami

(1.2) a (1.3) znamenajú, že rotácia hlavy spôsobuje malú zmenu polohy statických virtuálnych zdrojov [2].

V dvojrozmernej VBAP metóde popísanej v tejto časti, je dvojkanálová stereofónna reproduktorová konfigurácia inými slovami vyjadrená ako dvojrozmerná vektorová základňa. Základňa je definovaná jednotkovými vektormi [2]:

$$\mathbf{l}_1 = [l_{11} \quad l_{12}]^T \quad \text{a} \quad \mathbf{l}_2 = [l_{21} \quad l_{22}]^T \quad (1.4)$$

ktoré smerujú k jednotlivým reproduktorm 1 a 2, čo je zrejmé z Obr. 1.2. Tieto vektory sú stĺpcové, avšak pre ich zápis sa používa označenie T, ktoré značí transponovanie riadkových vektorov. Jednotkový vektor:

$$\mathbf{p} = [p_1 \quad p_2]^T \quad (1.5)$$

ktorý smeruje k virtuálnemu zdroju, môže byť chápaný ako lineárne spojenie reproduktorových vektorov ($\mathbf{l}_1$ a $\mathbf{l}_2$) [2]:

$$\mathbf{p} = g_1 \mathbf{l}_1 + g_2 \mathbf{l}_2 \quad (1.6)$$

V rovnici (1.6) sú g_1 a g_2 v postavení zesilňovacích činiteľov, ktoré môžu byť chápané ako nezáporné skalárne premenné. Rovnicu môžeme písať aj v maticovej forme [2]:

$$\mathbf{p}^T = \mathbf{g} \cdot \mathbf{L}_{12} \quad (1.7)$$

$$\mathbf{g} = [g_1 \quad g_2] \quad (1.8)$$

$$\mathbf{L}_{12} = [\mathbf{l}_1 \quad \mathbf{l}_2]^T \quad (1.9)$$

Táto rovnica je riešiteľná, ak existuje $\mathbf{L}_{12}^{-1}$ [2]:

$$\mathbf{g} = \mathbf{p}^T \cdot \mathbf{L}_{12}^{-1} = [p_1 \quad p_2] \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (1.10)$$

Táto inverzná matica $\mathbf{L}_{12}^{-1}$ musí spĺňať

$$\mathbf{L}_{12} \cdot \mathbf{L}_{12}^{-1} = \mathbf{I} \quad (1.11)$$

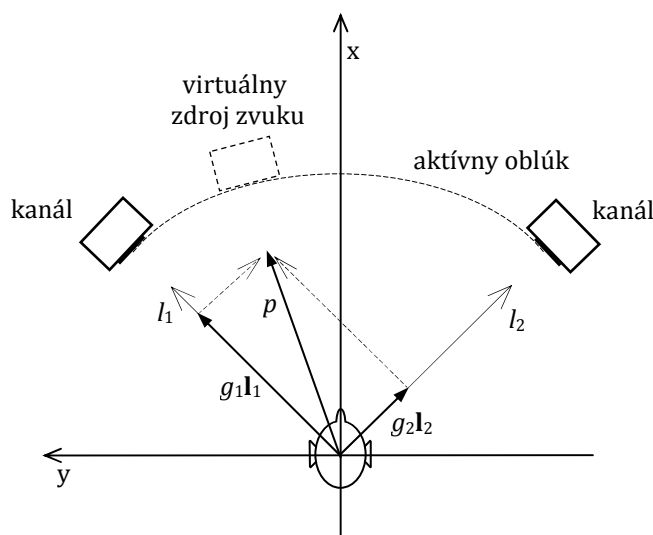
kde $\mathbf{I}$ je jednotková matica. $\mathbf{L}_{12}^{-1}$ existuje, keď $\varphi_0 \neq 0^\circ$ a $\varphi_0 \neq 90^\circ$; oba problémové prípady ($\varphi_0 = 0^\circ$ a $\varphi_0 = 90^\circ$) odpovedajú celkovo nezaujímavým stereofónnym reproduktorovým rozmiestneniam. Pre také prípady môže byť

koncipované jednorozmerné VBAP. To znamená, že zdroj zvuku sa pohybuje len po jednej z osí (x , y , popr. z), kedy sa riadi jeho vzdialenosť od poslucháča a to reguláciou zosilnenia.

Vypočítavanie zosilňovacích činiteľov g_1 a g_2 používajúce rovnicu (1.10) vyhovuje tangensovej vete v rovnici (1.3). Keď je reproduktorová základňa pravouhlá, ($\varphi_0 = \pm 45^\circ$), zosilňovacie činitele sú taktiež rovnaké ako tie, ktoré sú kódované Ambisonickým systémom, s výnimkou, že zosilňovacie činitele v Ambisonii môžu nadobúdať záporné hodnoty. V takýchto prípadoch sú však absolútne hodnoty činiteľov rovnaké. Keď $\varphi_0 \neq 45^\circ$, zosilňovacie činitele musia byť normalizované použitím rovnice [2]:

$$\mathbf{g}_{\text{norm}} = \frac{\sqrt{C\mathbf{g}}}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}} \quad (1.12)$$

Zosilňovacie činitele $\mathbf{g}_{\text{norm}}$ teraz vyhovujú rovnici (1.1).



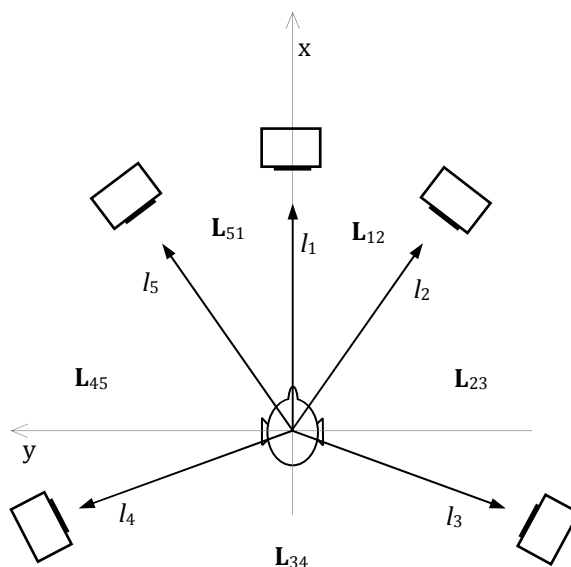
Obr. č. 1.2: Vektorové vyjadrenie stereofónneho rozloženia

1.2.3 Aplikovanie dvojrozmerného VBAP pre viac, než dva reproduktory

Vo väčšine existujúcich audio systémoch, ako napr. v Dolby Surround systémoch, sa používajú viac než dva reproduktory v horizontálnej rovine. Takéto systémy tiež môžu byť koncipované s vektorovými základňami. Nastavenie reproduktorových párov je zvolené zo systému a signál je použitý v ktoromkoľvek čase na jeden pár. Takto pozostáva reproduktorový systém z

viacerých vektorových základní, ktoré si navzájom konkurujú. Každý reproduktor môže patriť do dvoch základní. Na Obr. č. 1.3 je zobrazený reproduktorový systém s piatimi reproduktormi s použitím dvojrozmerného VBAP.

Virtuálny zdroj môže byť vytváraný reproduktorovou základňou na aktívnom oblúku, na ktorom je umiestnený. Takéto zvukové pole môže byť vytvorené pomocou VBAP zjednotením aktívnych oblúkov vytvorených reproduktorovými základňami. Najlepšia a najjednoduchšia cesta výberu reproduktorových základní v dvojrozmerných prípadoch je nechať ich vytvárať susednými reproduktormi. V reproduktorovom systéme vykreslenom na Obr. č. 1.1 môžu byť vytvorené základne L_{12} , L_{23} , L_{34} , L_{45} a L_{51} . Aktívne oblúky základní sa tak neprekrývajú [2].



Obr. č. 1.3: Dvojrozmerné VBAP s piatimi reproduktormi. Vektory l_n smerujú k reproduktorom; Reproduktorové vektorové základne L_{mn} sú vytvorené susednými reproduktormi

Použitie neprekrývajúcich sa aktívnych oblúkov poskytuje súvislú zmenu zosilňovacích činiteľov pri panoramovaní pohyblivého zdroja zvuku. Keď zvuk prechádza z jedného páru na iný, zosilňovací činiteľ reproduktoru, ktorý nie je použitý po zmene, sa pred zmenou reproduktorovej základne postupne zníži na nulu. Tým nebude ovplyvňovať polohu zdroja zvuku na novom aktívnom oblúku. Túto polohu už bude dotvárať iný reproduktor. Skutočnosť, že všetky ostatné reproduktory okrem vybraného páru sú nečinné sa môže javiť ako plytvanie zdrojmi. Lenže takto môže byť dobrá presnosť lokalizácie docielená pre hlavné zvuky, zatiaľ čo ostatné reproduktory môžu vytvárať odrazy a dozvuky [2].

Pár môže byť vybraný počítaním nekalibrovaných zosilňovacích činiteľov v rovnici (1.10) používajúcej všetky vektorové základne a výberom základne, ktorá nevykazuje žiadne záporné činitele. Záporný činiteľ musí byť pred normalizáciou nastavený na nulu, aby tak ďalej neovplyvňoval polohu virtuálneho zdroja [2].

1.2.4 Zhrnutie

Vektorové panoramovanie je tiež nazývané ako intenzitné. Je to z dôvodu, že panoramovanie touto metódou spočíva vo vysielaní signálov rôznych amplitúd dvoma reproduktormi (bez oneskorenia medzi týmito reproduktormi) a tým sa virtuálny zdroj zvuku javí niekde na aktívnom oblúku medzi týmito dvoma reproduktormi (vid'. Obr. č. 1.1). Jednotlivé amplitúdy vysielaných signálov sú závislé práve na polohe tohto virtuálneho zdroja zvuku. Pri použití viacerých reproduktorov sa tento zdroj umiestňuje podľa potreby medzi vybrané dva susedné reproduktory použitím vzťahu (1.10) uvedeného v druhej časti tejto kapitoly. Pomocou neho vypočítame zosilňovacie činitele pre jednotlivé vektorové základne a na základe vypočítaných ziskov potrebných pre jednotlivé reproduktory v jednotlivých základniach určíme vhodnú dvojicu pre reprodukciu virtuálneho zdroja zvuku. O jeho pozícii tak rozhoduje intenzita zvuku prijímaná a vyhodnocovaná jednotlivými ušami (intenzitná metóda) a časová diferencia sa tak neuplatní, pretože predpokladáme rovnomernú vzdialenosť reproduktorov od poslucháča. Vektorové panoramovanie umožňuje použitie neobmedzeného počtu reproduktorov v ľubovoľnom dvoj alebo trojrozmernom rozložení okolo poslucháča. Reprodukory vyžadujú rovnomernú vzdialenosť od poslucháča a predpokladá sa, že posluchová miestnosť nie je veľmi odrazivá.

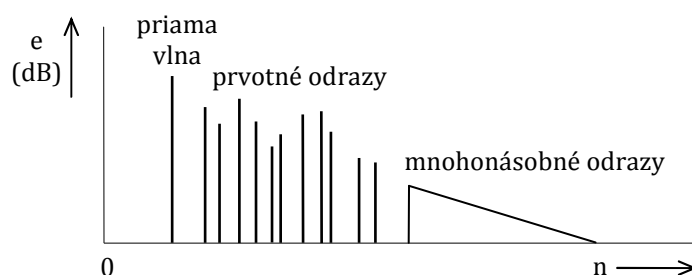
Presnosť lokalizácie vektorovo panoramovaného zdroja zvuku pri implementácii na 5-kanálovej reproduktorovej sústave bola závislá na jeho azimute voči poslucháčovi. Na základe subjektívneho hľadiska ho bolo možné najpresnejšie lokalizovať, keď bol umiestnený pred poslucháčom. V týchto miestach sa dal jeho smer určiť s presnosťou na cca 5°. Menšia presnosť bola dosahovaná pre umiestnenie virtuálneho zdroja za poslucháčom a najhoršie dopadlo umiestňovanie zdroja zvuku po stranách poslucháča. V niektorých kritických prípadoch (uprostred aktívneho oblúka medzi dvoma reproduktormi) dokonca dochádzalo k situácii, že zvuk reproduktorov nebol vnímaný ako jeden celok, ale každý reproduktor zvlášť, čo bol dosť nežiaduci jav. Ďalším nedostatkom tejto metódy je taktiež malá zmena vnemu polohy virtuálneho zdroja zvuku pri pootočení hlavou, čo je spomenuté už v jej popise. K najväčším rozdielom dochádza práve po stranách poslucháča. Dôvodom tohto nedostatku je

aj akustický tieň hlavy, ktorý ovplyvňuje signál prijímaný uchom na odvrátenej strane hlavy a to je v prípade umiestnenia virtuálneho zdroja pod azimutom $\varphi = 90^\circ$ a $\varphi = 270^\circ$ pomerne značné. Na tieto javy vplýva aj minimálny posluchový uhol, ktorý je pre polohy zdroja zvuku po bokoch a za poslucháčom väčší, než pre umiestnenie pred ním [9]. Túto absenciu by bolo možné do určitej miery vyriešiť zvýšením počtu reproduktorov rozmiestnených okolo poslucháča. Čiastočné zlepšenie nastalo už pri použití šiestich reproduktorov.

2. MODELOVANIE ŠÍRENIA ZVUKOVEJ VLNY V UZAVRETOM PPRIESTORE

2.1 Úvod

Na začiatku bola spomenutá komplexnosť zvukového poľa, ktoré nás obklopuje. Vytvárať dojem virtuálneho zdroja zvuku len na základe priamej vlny od zdroja zvuku k poslucháčovi je pomerne neatraktívne, pretože neobsahuje zložky obohacujúce vnem zvuku. Pri panoramovaní zvuku nie je dôležité len správne umiestnenie virtuálneho zdroja v priestore, ale aj simulácia javov vznikajúcich jeho šírením v danom virtuálnom prostredí. Tie sú taktiež dôležité pre dobrú zrozumiteľnosť a aj posluchovo príjemnejší vnem zvuku. Dôležitou časťou sú frekvenčne závislé odrazy zvuku od prekážok, ktoré prichádzajú k poslucháčovi s rôznym oneskorením, taktiež známe pod pojmom prvotné odrazy (early reflections). Sú to pomerne jasne počuteľné a dobre lokalizovateľné odrazy zvuku prichádzajúce k poslucháčovi po prvých odrazoch od stien akustického priestoru. Ďalej sú to mnohonásobné odrazy, inak nazývané aj difúzny dozvuk (reverb). Je to zmes zvukových signálov, ktoré po mnohonásobných odrazoch od stien akustického priestoru prichádzajú k poslucháčovi. Túto komplexnosť najlepšie vystihuje tzv. impulzová odozva akustického priestoru (Obr. č. 2.1). Impulzová odozva akustického priestoru môže byť definovaná ako impulzná charakteristika systému, ktorý simuluje šírenie zvukových vln v akustickom priestore s daným počtom vstupov a výstupov [9].



Obr. č. 2.1: Príklad impulzovej odozvy miestnosti s označenou priamou vlnou, prvotnými a mnohonásobnými odrazmi

Táto kapitola je zameraná práve na simuláciu prvotných odrazov pomocou obrazovej metódy (Image Source Method). Táto metóda nie je jediná svojho druhu. Existuje viacero rôznych algoritmov umožňujúcich výpočet týchto odrazov. Zvolil som si ju však pre jej jednoduchosť, efektivitu algoritmu

a účinnosť, ktorá zaručuje, že budú nájdené všetky odrazy do zvoleného kritéria (do zvolenej maximálnej vzdialenosti od zdroja zvuku).

Hoci je touto metódou možné vypočítavať odrazy v trojrozmernom priestore, úvahy sú sústredené pre dvojrozmerné panoramovanie, ktoré je v dnešnej dobe najrozšírenejšie. Preto aj vysvetlenie a postup výpočtov bude uvedený pre dvojrozmerné pole. Vnútri miestnosti pravouhlého tvaru, ktorej odrazy budú počítané, sa nevyskytujú žiadne prekážky. Jej steny sú dokonale rovné, z materiálu, ktorý je charakterizovaný frekvenčne závislým činiteľom pohltivosti.

2.2 Obrazová metóda

Základný princíp obrazovej metódy je, že cesta zahŕňajúca odrazy môže byť reprezentovaná priamkou spájajúcou poslucháča a príslušný virtuálny zvukový zdroj. Pojem virtuálny zdroj je zavedený na priblíženie fungovania tejto metódy a jeho význam sa mierne líši od významu používaného v predchádzajúcej kapitole.

Vzhľadom na dvojrozmerné panoramovanie uvažujme jednoduchú pravouhlú miestnosť s rozmermi a a b v smeroch osí x a y v súradnicovej sústave, ktorá má počiatok vo zvolenom bode izby (vhodné je zvoliť počiatok v ľavom dolnom rohu izby). Ďalej uvažujme, že povrchy všetkých stien sú rovinné s daným absorpčným koeficientom α . Za takýchto podmienok môžeme vygenerovať dvojrozmerné pole buniek obrazov, kde každá bunka obsahuje jeden obraz zdroja s rovnakým výstupným výkonom ako reálny zdroj. Rozvinutie buniek vzniká ich zrkadlením všetkými smermi, pričom poloha virtuálnych zdrojov v dvoch susedných bunkách bude zrkadlová a ako rozhranie zrkadla bude vystupovať ich spoločná stena. Súradnice zdroja a prijímača sú dané jednotlivo pre zdroj $[x_z, y_z]$ a prijímač $[x_p, y_p]$ a obe sú umiestnené mimo okraje miestnosti. Obr. č. 2.2 ilustruje koncept, kde je viditeľné priestorové rozloženie obrazov zdroja zvuku.

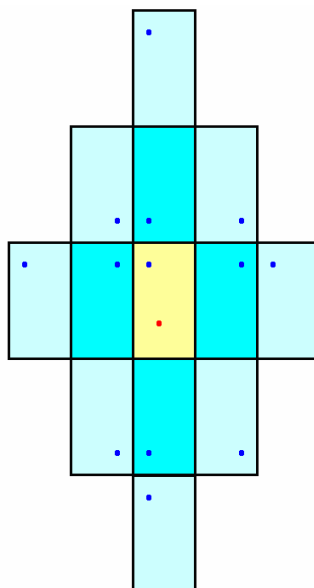
Vzhľadom na predpoklad, že povrchy všetkých stien sú rovinné, bez akýchkoľvek nedokonalostí, môžeme predpokladať, že vzťah medzi dopadajúcou a odrazenou vlnou bude popísaný Snellovým princípom. Ten vraví, že uhol medzi normálou (kolmicou na rovinu dopadu) a dopadajúcim lúčom je rovnaký ako uhol medzi normálou a odrazeným lúčom:

$$|\sin \theta_d| = |\sin \theta_o| \quad (2.1)$$

$$|\theta_d| = |\theta_o|$$

kde θ_d je uhol dopadu a θ_o je uhol odrazu.

K nájdeniu tohto uhla, resp. miesta dopadu, nám slúžia práve virtuálne zdroje vo virtuálnych izbách.

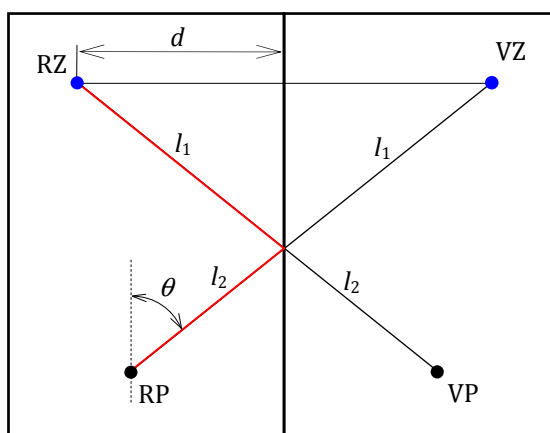


Obr. č. 2.2: Dvojrozmerné rozvinutie izieb pomocou zrkadlenia cez všetky steny, čím vznikajú nové virtuálne zdroje (modré body) pre výpočet prvotných odrazov. Žltá bunka reprezentuje pôvodnú izbu s reálnym zdrojom zvuku, tmavšie okolité izby predstavujú miestnosti s virtuálnymi zdrojmi pre odrazy prvého rádu a svetlejšie okrajové izby zas miestnosti pre odrazy druhého rádu.

Tie umožňujú jednoduchý výpočet vzdialenosti urazenej vlnou a uhol jej dopadu k poslucháčovi aj pre niekoľkonásobné odrazy. Je to možné tým, že daná cesta môže figurovať ako priamka spájajúca poslucháča s príslušným virtuálnym zdrojom. Ako je naznačené na Obr. č. 2.3, vzdialenosť medzi virtuálnym zdrojom a poslucháčom je pre naznačený odraz prvého rádu rovnaká ako vzdialenosť, ktorú by musela vlna prekonať od reálneho zdroja zvuku k poslucháčovi. Takisto to platí aj pre uhol dopadu. Takto sa ich výpočet značne zjednoduší. Analogicky sa postupuje aj pre odrazy vyšších rádov. Metóda v podstate umožňuje výpočet odrazov neobmedzeného rádu.

Polohu virtuálneho zdroja môžeme nájsť presunom z reálneho bodu (reálny zdroj, alebo rozmnožovaný virtuálny zdroj) do vzdialenosti $2d$ v smere kolmom na rovinu zrkadlenia, ako je to na Obr. č. 2.3. V prípade, že uvažujeme rôzne materiály jednotlivých stien, je potrebné si takisto pamätať steny, ktorými sa virtuálny zdroj odrážal. V najjednoduchšom prípade je to pamätaním si steny, ktorá nám slúžila ako odrazová plocha. Pri viacnásobných odrazoch takisto aj steny, ktoré slúžili ako odrazová plocha pre virtuálne zdroje, ktoré im predchádzali. Ak by sme však chceli simulovať aj časti stien, ako napr. okno, alebo nejaký výklenok (pri izbe v tvare mnohostena), museli by sme presne

sledovať miesto, v ktorom sa pretína spojnica poslucháča a virtuálneho zdroja s okrajmi virtuálnych miestností.



Obr. č. 2.3: Znázornenie princípu výpočtu vzdialenosti, ktorú musí prekonať zvuková vlna na ceste od reálneho zdroja (RZ) ku poslucháčovi (RP) pomocou nájdeneho virtuálneho zdroja (VZ). Vzdialenosť je rovná $l_1 + l_2$, čo predstavuje vzdialenosť VZ a RP. Uhol dopadu odrazenej vlny možno vypočítať na základe známych súradníc VZ a RP pomocou goniometrických funkcií.

Teraz, keď máme spôsob na zistenie polohy obrazu bodu, potrebujeme postup na uplatnenie týchto operácií, aby bolo zabezpečené, že sa nájde každý virtuálny zdroj. Základná koncepcia algoritmu je veľmi jednoduchá. Odrážať všetky virtuálne zdroje cez každú odrazivú plochu. Tento algoritmus je rekurzívny, pretože odrážanie virtuálneho zdroja cez stenu vytvorí nové virtuálne zdroje, ktoré sa následne odrážajú ďalej cez všetky steny. Výpočet pozícií virtuálnych zdrojov môže byť znázornený ako strom. Uzly v strome predstavujú virtuálne zdroje a vetvy vznikajú, keď je virtuálny zdroj odrazený cez steny. Rád virtuálneho zdroja uvádza počet odrazov potrebných pre jeho vytvorenie. Virtuálne zdroje vytvorené odrazom cez steny izby nazývame potomkami virtuálnych zdrojov. Je však potrebné brať ohľad na to, že nemôžu byť vytvorení všetci potomkovia daného virtuálneho zdroja. Za neplatné sa považujú virtuálne zdroje, ktoré boli vytvorené odrazom od tzv. neodrazivej steny. Neodrazivou stenou sa stáva tá, ktorou bol vytvorený množiaci sa virtuálny zdroj. Odrazom od tejto steny by sme totiž dostali duplikát už existujúceho virtuálneho zdroja. Jednou z možností, ako tomuto kroku predísť je neodrážať virtuálny zdroj cez túto stenu, alebo po odrazení tento virtuálny zdroj ignorovať.

Ďalšou podmienkou pre výpočet polôh virtuálnych zdrojov je maximálna vzdialenosť virtuálneho zdroja. Virtuálne zdroje ďalej od poslucháča, než je táto

vzdialenosť, sú vyradené a tak je vymedzená hranica potomstva, pretože nie je možné, aby boli potomkovia takéhoto zdroja bližšie k poslucháčovi. Táto tzv. podmienka príbuzenstva umožňuje ukončenie algoritmu. Aj keď by bolo možné ukončiť množenie na základe inej podmienky, napr. nájdením všetkých virtuálnych zdrojov do určitého rádu, príbuzenstvo je to, čo zabezpečuje, že bude nájdená každá zvuková cesta kratšia, než zvolené maximum. Táto úplnosť je dôležitá pre presne charakterizujúce správanie miestnosti. Pri uvažovaní izby nepravidelného tvaru by bolo potrebné sledovať ešte tretie kritérium, ktorým je viditeľnosť virtuálneho zdroja. Rôzne okolnosti totiž môžu spôsobiť, že hoci bol potomok vytvorený korektne, odraz, ktorý by predstavoval, by sa ku poslucháčovi nikdy nedostal. Takýmito vplyvmi môžu byť napr. tupý uhol medzi dvoma stenami, popr. nejaká prekážka a pod. Aplikovaním obrazového modelu na nepravidelné tvary nie len skomplikujeme postup pre nájdenie polôh virtuálnych zdrojov, ale musí byť prevedený aj test viditeľnosti na určenie, ktoré virtuálne zdroje sú viditeľné a musia sa tak testovať všetky novovytvorené virtuálne zdroje [6]. Keďže v našom prípade počítame s pravouhlou miestnosťou bez prekážok, túto podmienku nie je potrebné sledovať, pretože v simulovanej izbe sú všetky uhly pravé (90°) a ako bolo uvedené na začiatku, v miestnosti sa nenachádzajú žiadne prekážky. To znamená, že všetky nájdené virtuálne zdroje budú viditeľné.

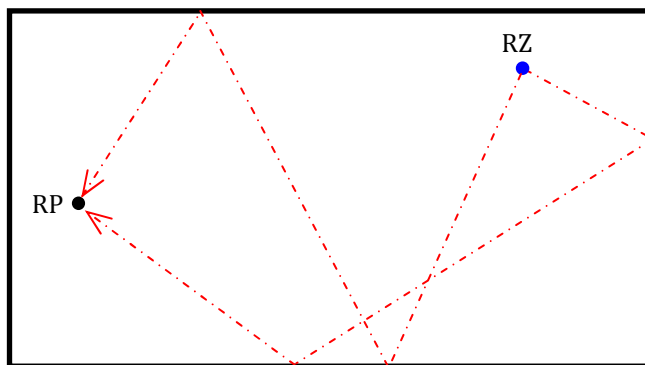
Keďže platí Snellov princíp, môžeme tak predpokladať, že žiadna časť vlny nebude rozptýlená, ale vlna dopadajúca na stenu sa odrazí, pričom jej určitá časť bude stenou pohltená. Miera pohltenia je závislá na použitom materiáli steny, ktorý je špecifikovaný činiteľom pohltivosti. Ten sa rovná pomeru pohltenej intenzity I_p ku celkovej dopadajúcej intenzite I_c :

$$\alpha = \frac{I_p}{I_c} \quad (2.2)$$

Tento koeficient je frekvenčne závislý a zisťuje sa meraním. Jeho verné napodobenie je pre simulovanie stien daného materiálu veľmi dôležité, k čomu sa dostanem v ďalšej časti. Realizuje sa číslicovým filtrom. Každý virtuálny zdroj je podľa počtu odrazov od jednotlivých stien filtrovaný príslušným počtom filtrov. Keďže verné simulovanie zahŕňa odrazy aspoň 5. až 7. rádu (pri pravouhlej miestnosti ich je vyše 150), je to jedna z časovo najnáročnejších operácií.

2.3 Metóda Ray-Tracing

Ray-tracing je ďalšou veľmi obľúbenou metódou na analyzovanie zvukových ciest, pretože býva jednoduchšia na programovanie ako obrazová metóda, najmä pre zložité tvary. Avšak, ak by mohli tieto dve metódy realizovať nekonečne dlhý výpočet odrazov, potom by dospeli k identickým výsledkom. Rozdiely vznikajú dôsledkom rozdielných prístupov metód obmedziť výpočet na konečnú veľkosť. Metóda ray-tracing obmedzuje svoj výpočet predpokladom, že zdroj vysiela konečný počet lúčov rovnomerne rozptýlených všetkými smermi. Výsledkom toho je, že táto metóda vždy nájde stanovený počet zvukových ciest, ale tie nebudú nevyhnutne všetkými odrazmi v stanovenom časovom rozpätí. V technike ray-tracing je každý lúč ťažený pomocou lineárnej extrapolácie a zrkadlového odrazu, kým nedosiahne okolie poslucháča (Obr. 2.4) [6].

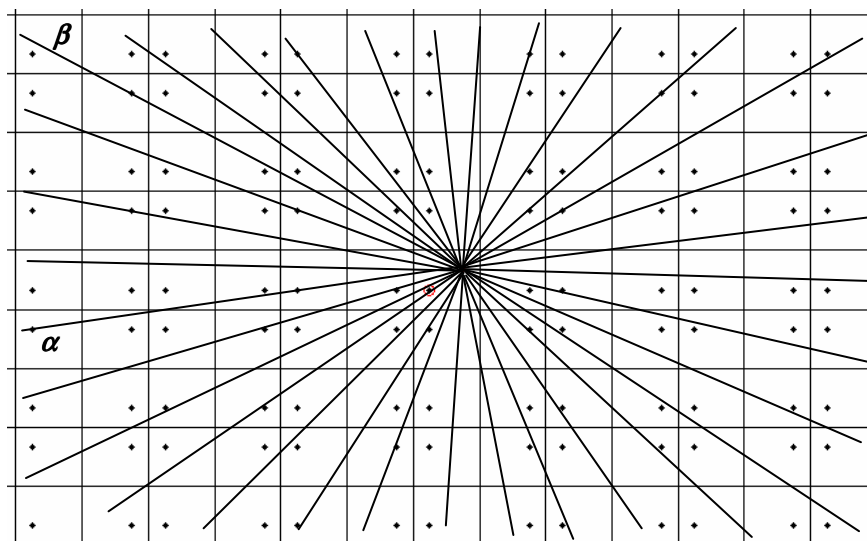


Obr. č. 2.4: Princíp vyhľadávania odrazov metódou ray-tracing. Od reálneho zdroja zvuku (RZ) sa vyhľadávajú cesty k reálnemu poslucháčovi (RP) pomocou tzv. lúčov.

V metóde ray tracing je emitovaný konštantný počet lúčov do rôznych smerov priestoru s rovnakým uhlom od daného zdrojového bodu (zdroja zvuku). Trasy týchto lúčov sú sledované pozdĺž lúčov a tie strácajú svoju energiu s každým odrazom podľa absorpčných koeficientov povrchov daných stien. Keď lúče zasiahnu povrch, ich nový smer sa vypočíta podľa Snellovho zákona (2.1).

Môžeme analyzovať počínanie tejto metódy použitím myšlienok obrazovej metódy na ray-tracing. Jednoduchá cesta zapríčiňujúca jednoduchý odraz môže byť ekvivalentne reprezentovaná ako priama cesta spájajúca zdroj s virtuálnym poslucháčom umiestneným v susednej virtuálnej izbe. Keď rozšírime túto myšlienku, opäť získame mriežku virtuálnych izieb obklopujúcich reálnu miestnosť (Obr. č. 2.5), avšak teraz každá virtuálna izba obsahuje skôr virtuálneho poslucháča, než virtuálny zdroj. Každá z ciest nájdených metódou ray-tracing môže byť rozložená do priamej cesty spájajúcej zdroj s niektorým z virtuálnych poslucháčov v mriežke. Ako obvykle, obrazový model zjednodušuje

analýzu možnosťou uvažovať priame cesty namiesto ciest obsahujúcich odrazy (ktoré vyžíva metóda ray-tracing) [6].



Obr. č. 2.5: V metóde ray-tracing sa lúče vysielané zdrojom šíria prostredím, kým nenájdu virtuálneho poslucháča. Lúč α nedosiahol druhého virtuálneho poslucháča, ktorý je zatienený bližším poslucháčom. Lúč β dorazil k virtuálnemu poslucháčovi neďaleko okraja zobrazenia, ale minul niekoľkých, ktorí sú bližšie.

Obrázok znázorňuje dva hlavné problémy, ktoré sa môžu vyskytnúť pri metóde ray-tracing. Prvý problém je, že vzdialenejší virtuálny poslucháč môže byť ukrytý za bližším. Keď lúč označený α je šírený zdrojom, prejde krátku cestu, kým nenájde virtuálneho poslucháča umiestneného v izbe vzdialenej len dve izby od miesta vzniku. V tomto bode obvykle dôjde k zastaveniu šírenia lúča. Avšak mal pokračovať, aby napokon objavil aj druhého virtuálneho poslucháča umiestneného trocha ďalej od zdroja. Druhý problém je popísaný lúčom β , ktorý znázorňuje, ako minul niekoľko bližších virtuálnych poslucháčov pred konečným zasiahnutím jedného na okraji obrázka. Je dôležité uvedomiť si, že riešenia týchto dvoch problémov sú navzájom v rozpore. Za účelom riešiť prvý by sme radi zmenšili veľkosť poslucháčovej oblasti na minimalizovanie veľkosti jeho tieňa. Takýmto konaním sa zníži pravdepodobnosť nájdenia virtuálneho poslucháča lúčom, obnovujúca druhý problém [6].

Obrazová metóda obmedzuje svoj výpočet odmietaním virtuálnych zdrojov nájdených príliš ďaleko od poslucháča. Následkom toho zaručene nájde všetky virtuálne zdroje vnútri polomerom určenej vzdialenosti od poslucháča. Keď informácia týkajúca sa zvukových ciest je obmedzená do impulzovej odozvy, tieto dve metódy vytvoria rôzne impulzové odozvy. Všetky odrazy nájdené metódou ray-tracing úplne súhlasia s odrazmi nájdenými obrazovou metódou. Ibaže obrazová metóda ďalej nájde množstvo odrazov, ktoré metóda ray-tracing minie,

a naopak, metóda ray-tracing nájde množstvo odrazov mimo interval zvolený obrazovou metódou. Niekoľko chýbajúcich zvukových ciest smeruje k podhodnoteniu množstva zvukovej energie v hociktorej dobe rozkladu odrazov. Ale účinok vynechania týchto skorých ozvien zvyčajne bude pri simulácii jasne počuteľný. Je možné minimalizovať chyby metódy ray-tracing zvolením veľmi malej oblasti poslucháča, vysielaním veľkého počtu lúčov a uchovávaním len najkratšej cesty. Skutočným problémom je, že nie je žiaden spôsob, ako zistiť, či niektorá cesta chýbala. Dokonca chýbanie jednej môže zmeniť akustické simulácie. Toto obmedzenie tejto metódy by mohlo tiež vysvetliť odchýlky spozorované pri použití v analýze vlastností zvukových odrazov [6].

Je popísaných veľa rôznych metód pracujúcich na princípe techniky ray-tracing, ale tie nemenia konečný záver. Jedna z nich napr. predpokladá, že poslucháč je bod a lúč má účinný prierez. Je tiež možné ukončiť šírenie lúčov na základe ich celkovej dĺžky. Ponechanie lúčov prechádzať cez poslucháča ich spraví transparentnými. Takto nebudú vrhať tieň a mohli by sa tak nájsť virtuálni poslucháči za bližšie umiestnenými. Sankciou je zbytočné počítanie v prípadoch, kde neboli skrytí žiadni virtuálni poslucháči. Hoci, mohlo by byť možné prinútiť metódu ray-tracing poskytovať presné a úplné informácie, lebo je jasné, že obrazová metóda má samozrejme výhodu v zaistení požadovaných informácií.

3. ZVUKOVÁ POHLTIVOSŤ MATERIÁLOV

3.1 Úvod

Jednou z najdôležitejších posluchovéch vlastností prostredia, priestoru, je práve zvuková pohltivosť materiálov, ktorá je frekvenčne závislá. Rôzne materiály majú rôznu pohltivosť v rôznych frekvenčných pásmach. Táto vlastnosť jednotlivých materiálov sa dá chápať ako materiálová konštanta a umožňuje nám rozlíšiť, či sa nachádzame v obývacej miestnosti plnej pohltivých materiálov, alebo v obloženej kúpeľni, kde sa zvuková energia v prostredí pohltí pomalšie (prostredie je viac odrazivé a preto aj doba dozvuku v takomto prostredí je vyššia). Pohltivosť materiálu je závislá na fyzikálnych podmienkach materiálu (teplota materiálu, jeho relatívna vlhkosť a pod.). Na základe predchádzajúceho zaoberania sa touto problematikou v mojej bakalárskej práci som došiel k záveru, že verné napodobenie frekvenčne závislej odrazivosti od stien pre konkrétne materiály tvorí značné percento pravdepodobnosti dobrého posluchového vnemu. A to z dôvodu, že ľudské ucho je schopné sa počas života "naučiť" rozoznávať akustické vlastnosti rôznych materiálov. Určite nestačí do cesty zaradiť len nejaký útlmový článok, ktorý rovnako utlmí celú šírku pásma. Je potrebné navrhnuť filter, ktorý bude čo možno najpresnejšie aproximovať činitele prenosu určené pri rôznych frekvenciách. Simulácie vykonané pri realizácii mojej bakalárskej práce obsahovali filtre simulujúce frekvenčne závislú pohltivosť materiálov. Avšak posluchové testy ukázali, že použité koeficienty pohltivosti daných materiálov neboli vyhovujúce, pretože nimi simulované odrazy sa javili ako neprirodzené. Bolo to spôsobené buď vysokým, alebo naopak nízkym potlačením jednotlivých frekvenčných pásiem. Tieto podnety viedli k získaniu reálnejších koeficientov pohltivosti daných materiálov.

3.2 Návrh filtrov simulujúcich reálne materiály

3.2.1 Meranie koeficientov pohltivosti

Meranie zvukovej pohltivosti materiálov je pomerne náročný proces vyžadujúci zvláštne podmienky, ktorých podrobné naštudovanie a aj samotná realizácia prekračuje rámec tejto práce. Preto sme sa spolu s vedúcim tejto práce obrátili s touto problematikou na firmu SONING Praha a.s., ktorá sa okrem iného zaoberá aj meraním akustických vlastností materiálov. Táto firma nám na našu žiadosť poskytla nimi namerané koeficienty pohltivosti pre rôzne bežne používané stavebné materiály. Tieto koeficienty boli namerané pre jednotlivé

materiály v dozvukovej komore podľa normy ČSN EN ISO 354. Táto medzinárodná norma presne stanovuje metódu a podmienky merania činiteľov zvukovej pohltivosti akustických materiálov, alebo ekvivalentnej pohltivej plochy objektov (ako napr. nábytok, osoby, alebo akustické telesá) v dozvukovej komore. Meranie sa vykonáva získaním kriviek dozvukového poklesu, na základe ktorých sa potom stanoví ekvivalentná pohltivá plocha daného skúšobného vzorku. Pojmom ekvivalentná pohltivá plocha norma označuje hypotetickú plochu dokonale pohltivého povrchu bez ohybových javov, ktorá by ako jediný objekt v inak dokonale odrazivej miestnosti viedla k rovnakej dobe dozvuku ako v danej miestnosti (bez vzorku a so vzorkom). Dobou dozvuku sa rozumie čas v sekundách, za ktorý dôjde po vypnutí zdroja zvuku k poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB. Podstata metódy spočíva v meraní priemernej doby dozvuku v dozvukovej komore s namontovaným skúšobným vzorkom a bez neho. Z nameraných dôb dozvuku sa použitím Sabineovej rovnice vypočíta ekvivalentná plocha A_T skúšobného vzorku [8]:

$$A_T = \frac{55,3V}{cT} - 4Vm \quad (3.1)$$

kde V je objem komory, T je nameraná doba dozvuku, c je rýchlosť zvuku pri aktuálnej teplote a m je súčiniteľ útlmu zvuku vo vzduchu.

Spomínaná norma definuje vlastnosti dozvukovej komory, ako je napríklad jej objem, veľkosť a pomer strán a takisto aj jej tvar. Tieto požiadavky sú dôležité pre dosiahnutie takého zvukového poľa vnútri komory, ktoré sa blíži difúznemu. To je nevyhnutné pre získanie vierohodných výsledkov merania, pretože takto nameraná zvuková pohltivosť materiálov sa blíži zvukovej pohltivosti, ktorá by bola nameraná za základných predpokladov prijatých pre normalizáciu [8]. Text normy takisto určuje rozmery, tvar a umiestnenie skúšobného vzorku v komore. Tie by sa však mali takisto čo najviac približovať použitiu tohto materiálu v praxi. Je dôležité si uvedomiť, že výsledky merania by sa mali čo najviac blížiť reálnej aplikácii daného prvku, jeho umiestnenia v priestore a pod. Hodnoty činiteľov pohltivosti dodané firmou SONING Praha a.s. boli pri meraní umiestnené na podlahe miestnosti a okolo nich bola umiestnená ohrada, ktorá zabráňovala šíreniu zvuku za materiál. Pre úspešné meranie je dôležitá takisto konfigurácia rozmiestnenia zdroja zvuku a mikrofónov zaznamenávajúcich hladinu akustického tlaku v miestnosti. Norma popisuje dve metódy získavania dozvukových kriviek. Je to metóda prerušeného šumu a metóda integrovanej impulzovej odozvy. Metóda prerušeného šumu pracuje na princípe priameho záznamu poklesu hladiny akustického tlaku po vybudení uzavretého priestoru širokopásmovým alebo pásmovým šumom. Meranie touto metódou sa vykonáva viacnásobne a pre rôzne konfigurácie mikrofónov a zdroja zvuku, za účelom

redukovania neistoty merania spôsobenej štatistickými odchýlkami. Dozvuková krivka je tak výsledkom štatistického procesu, ktorý na docielenie vyhovujúcej opakovateľnosti vyžaduje priemerovanie niekoľkých dozvukových kriviek alebo dôb dozvuku odmeraných pre jednu konfiguráciu mikrofón/reproduktor. Metóda integrovanej impulzovej odozvy získava krivky dozvukového poklesu integráciou kvadrátu impulzových odoziev odzadu. Integrovaná impulzová odozva je deterministická funkcia, ktorá nie je náchylná na štatistické odchýlky, takže priemerovanie nevyžaduje. Vyžaduje však omnoho náročnejšie prístrojové vybavenie a spracovanie dát oproti metóde prerušeného šumu. Výsledok je teoreticky totožný s dozvukovým poklesom priemerovaným z nekonečného počtu poklesov získaných metódou prerušeného šumu [8].

Samotný činiteľ zvukovej pohltivosti sa vypočíta ako pomer ekvivalentnej pohltivej plochy vzorku ku skutočnej ploche vzorku [8]:

$$\alpha_p = \frac{A_T}{S} \quad (3.2)$$

kde S je plocha pokrytá skúšobným vzorkom (v m²) a A_T je ekvivalentná pohltivá plocha (v m²) vypočítaná zo vzťahu [8]:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (3.3)$$

kde A_2 je ekvivalentná pohltivá plocha dozvukovej miestnosti bez vzorku a A_1 je ekvivalentná pohltivá plocha dozvukovej miestnosti so vzorkom. Význam veličín c , T , V a m je zhodný ako vo vzťahu č. (3.1).

3.2.2 Návrh filtrov

Signál, ktorý bude reprezentovať konkrétny odraz sa musí filtrovať toľko krát, koľko krát sa od steny odrazil. Panoramovací algoritmus na základe informácie o stene, od ktorej by sa vlna odrazila, vyberie filter, ktorým tento signál spracuje. Zrealizoval som 10 rôznych filtrov, ktoré simulovali zvukové odrazy od desiatich rôznych materiálov. Každý z týchto filtrov je typu IIR. Pri návrhu ich prenosovej charakteristiky som vychádzal z hodnôt činiteľov pohltivosti α_p daného materiálu pre oktávové frekvencie od 125 Hz po 4 kHz, ktoré nám poskytla zmienená firma SONING Praha a.s.

Tab. č. 1: Hodnoty činiteľa pohltivosti pre vybrané frekvencie zvolených materiálov namerané a poskytnuté firmou SONING Praha a.s.

Materiál	činiteľ zvukovej pohltivosti α (-) pre vybrané oktávové frekvencie (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Sklo	0,28	0,20	0,10	0,09	0,09	0,08
Omietka na tehle	0,10	0,10	0,09	0,10	0,11	0,11
Tapeta	0,08	0,09	0,09	0,09	0,12	0,15
Betón	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09
Drevo	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,11
Jekor	0,08	0,09	0,12	0,18	0,30	0,33
Záves 1	0,04	0,23	0,40	0,57	0,53	0,40
Záves 2	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Sadrokartón akustický	0,10	0,15	0,35	0,60	0,50	0,30
Sadrokartón	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Predchádzajúca tabuľka uvádza koeficienty pohltivosti α_p , ktoré určujú, aká miera zvukovej energie bude materiálom pohltená pri dopade zvukovej vlny na tento materiál. Avšak pre návrh filtra, ktorý má simulovať frekvenčne závislé odrazy potrebujeme poznať, aká časť zvukovej energie bude od materiálu odrazená. Tá predstavuje rozdiel zvukovej energie dopadajúcej na materiál (stenu) od energie materiálom pohltenej:

$$\alpha_o = 1 - \alpha_p \quad (3.4)$$

kde α_o je koeficient odrazivosti a α_p je koeficient pohltivosti zvukovej energie daným materiálom. Keďže koeficient α_o aj α_p uvádzajú pomer energií a filter pracuje s napätím signálu, tak je potrebné normalizovať tieto hodnoty do napäťovej úrovne odmocnením:

$$\alpha_{o_norm} = \sqrt{1 - \alpha_p} \quad (3.5)$$

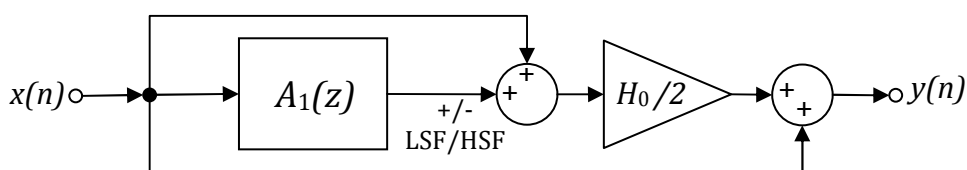
kde α_{o_norm} už sú koeficienty odrazivosti, na základe ktorých som navrhol jednotlivé číslicové filtre. Ako som spomínal, tieto filtre sú typu IIR a je minimalizovaný rád filtra pre optimalizovanie výpočtového výkonu. Mnou navrhnuté filtre sú 2. až 6. rádu. Frekvenčné charakteristiky týchto filtrov navrhnutých na základe týchto činiteľov pohltivosti sú uvedené v prílohe A. Vyznačujú sa veľmi malým útlmom v jednotlivých pásmach (rádovo desatiny až

jednotky dB). Aj napriek takémuto nízkemu rádu filtrov je odchýlka prenosovej charakteristiky navrhnutých filtrov od požadovaného tvaru minimálna a nepresahuje 0,2 dB, čo je obzvlášť dôležité pri simulovaní odrazov vyššieho rádu. Opakovaným použitím jedného filtra by odchýlka narastala a tým by degradovala celý proces. Odchýlka 0,2 dB napríklad pri odrazoch 10. rádu spôsobí medzi požadovaným a získaným priebehom rozdiel o 2 dB. Na takto vysoký rád odrazu je to však znesiteľná chyba, ktorá sa vyskytuje aj pri materiáloch v bežnej praxi. Žiaden materiál totiž nemá úplne rovnaké vlastnosti ako konkrétna vzorka meraného materiálu (tvrdosť, drsnosť). V bežnej praxi takisto nemáme zaručené klimatické podmienky, pri ktorých bola daná vzorka meraná (teplota, vlhkosť a pod.). Avšak je dôležité, že týmito filtermi simulované pohltivé vlastnosti sa meranému materiálu približujú vo veľkej miere.

3.3 Návrh parametrických filtrov

Pre simulovanie frekvenčne závislej odrazivosti materiálov je možné použiť aj jednoduchší model filtrov s nižším rádom. Ten by sa uplatnil hlavne pri systémoch, ktoré spracúvajú prúdy dát (v reálnom čase) alebo v prípade, kde sa nevyžaduje presné simulovanie akustických vlastností konkrétneho materiálu. V takomto prípade sa dá navrhnuť jednoduchší filter, ktorý dokáže aproximovať frekvenčnú charakteristiku nejakého konkrétneho materiálu v požadovanej kvalite. Na základe navrhnutých reálnych filtrov môžeme pozorovať, že aproximácia ich modulovej frekvenčnej charakteristiky sa dá realizovať sériovou kombináciou filtra typu low-shelving (LSF) a high-shelving (HSF). Takáto kombinácia filtrov by bola len 2. rádu, čo by bolo značné zjednodušenie vo výpočte. Avšak takýmito filtermi už nebude možné dosahovať presné simulácie posluchového priestoru. Naproti tomu sa jeho uplatnenie nájde v množstve iných aplikácií.

Výhoda takéhoto filtra spočíva v jednoduchosti návrhu a dostatočnomu pokrytí požadovaných tvarov frekvenčnej charakteristiky. Návrh filtra spočíva v stanovení 2 vstupných parametrov pre každý z filtrov. Je to medzná frekvencia f_m a zosilnenie v shelving oblasti G . Bloková štruktúra takéhoto filtra je viditeľná na Obr. č. 3.1 [10]:



Obr. č. 3.1: Bloková schéma použitých shelving filtrov (LSF a HSF)

Prenosová funkcia takejto štruktúry je [10]:

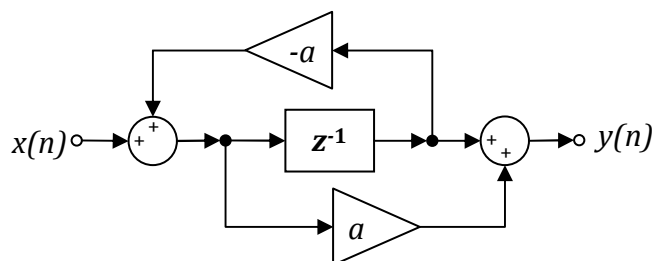
$$H(z) = 1 + \frac{H_0}{2} (1 \pm A_1(z)) \quad (3.6)$$

kde v zátvorke použijeme znamienko + pre LSF a znamienko - pre HSF. Parameter H_0 vypočítame zo vzťahu:

$$H_0 = V_0 - 1 \quad (3.7)$$

$$V_0 = 10^{\frac{G}{20}} \quad (3.8)$$

Shelving filtre sú filtre typu IIR pracujúce s fázovacím článkom 1. rádu, ktorý je v Obr. č. 3.1 znázornený blokom $A_1(z)$. Bloková schéma tohto fázovacieho článku je na Obr. č. 3.2:



Obr. č. 3.2: Bloková schéma fázovacieho článku 1. rádu

Parameter a vo fázovacom článku vypočítame pre HSF a LSF zo vzťahu [10]:

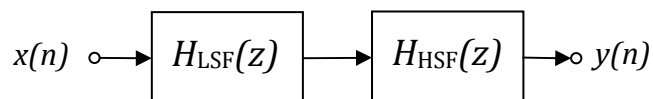
$$\begin{aligned} G > 0 \quad a &= \frac{\tan\left(\frac{\pi \cdot f_m}{f_{vz}}\right) - 1}{\tan\left(\frac{\pi \cdot f_m}{f_{vz}}\right) + 1} \\ G < 0 \quad - \text{LSF:} \quad a &= \frac{\tan\left(\frac{\pi \cdot f_m}{f_{vz}}\right) - V_0}{\tan\left(\frac{\pi \cdot f_m}{f_{vz}}\right) + V_0} \\ - \text{HSF:} \quad a &= \frac{V_0 \cdot \tan\left(\frac{\pi \cdot f_m}{f_{vz}}\right) - 1}{V_0 \cdot \tan\left(\frac{\pi \cdot f_m}{f_{vz}}\right) + 1} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Prenosová funkcia fázovacieho článku je:

$$A_1(z) = \frac{a + z^{-1}}{1 + a \cdot z^{-1}} \quad (3.10)$$

Koeficienty prenosovej funkcie b a a získame dosadením prenosovej funkcie fázovacieho článku (3.10) do prenosovej funkcie shelving filtra (3.6).

Takto získame koeficienty prenosovej funkcie b a a pre oba filtre (LSF a HSF) nastavené podľa požiadaviek. Z týchto koeficientov potom vypočítame koeficienty sériovej kombinácie týchto dvoch filtrov, ktoré použijeme pre filtrovanie signálu.



Obr. č. 3.3: Znázornenie sériovej kombinácie LSF a HSF

4. MULTIKANÁLOVÁ SIMULÁCIA PRVOTNÝCH ODRAZOV

V tejto kapitole sú popísané dve nezávislé aplikácie, ktoré som navrhol vo vývojovom prostredí Matlab na základe poznatkov z predchádzajúcich častí práce. Jedna aplikácia slúži pre simuláciu jednoduchého virtuálneho posluchového prostredia a druhá umožňuje panoramovať zdroj zvuku. Obe aplikácie sú vybavené grafickým užívateľským rozhraním (GUI) pre jednoduchšiu prácu s týmito aplikáciami.

4.1 Aplikácia pre simuláciu posluchového prostredia

4.1.1 Teoretický popis

Táto aplikácia umožňuje simulovať jednoduchú pravouhlú posluchoвую miestnosť, v ktorej sa nevyskytujú žiadne prekážky. Jej steny sú dokonale rovné, z materiálu, ktorý je charakterizovaný frekvenčne závislým činiteľom pohltivosti. Na základe topológie miestnosti (jej rozmery, poloha poslucháča a zdroja zvuku) program modeluje obmedzený počet zvukových vĺn, ktoré by sa pri danej topológii šírili od zdroja zvuku k poslucháčovi. Množstvo zvukových vĺn, ktoré chceme modelovať je možné nastaviť. Pre verné napodobenie akustických vlastností virtuálneho prostredia je dôležité aplikovať pri výpočtoch pohltivé vlastnosti materiálov v danom prostredí, čo výraznou mierou vplýva na samotný vnem. Aplikácia podľa zadaných parametrov vypočítava smer jednotlivých zvukových vĺn (priamej vlny a prvotných odrazov) a vzdialenosť, ktorú musia prekonať k poslucháčovi. Pre jednotlivé zvukové vlny zároveň uchováva v pamäti steny, ktorou sa musia odraziť, aby sa dostali k poslucháčovi. Tento výpočet je realizovaný pomocou obrazovej metódy, ktorá je popísaná v kapitole č. 2. Voľba tejto metódy je pre jej jednoduchosť, efektivitu algoritmu a účinnosť. V ďalšom kroku prebieha úprava signálu jednotlivých odrazov pre potreby napodobenia akustických vlastností virtuálneho priestoru. Tento krok zahŕňa frekvenčné aj amplitudové obmedzenie signálu. Frekvenčné obmedzenie je potrebné pre simulovanie frekvenčne závislej zvukovej pohltivosti materiálov stien, od ktorých sa daná zvuková vlna odráža. Realizuje sa pomocou číslicových filtrov, ktorých návrh je popísaný v kapitole č. 3 pre každé odrazenie od steny.

Riadením veľkosti amplitúdy (nezávisle na frekvencii) sa simuluje šírenie zvukovej vlny v priestore. Zvuk sa šíri od zdroja rovnomerne všetkými smermi

(všesmerový zdroj zvuku). Takto vznikajú guľové vlnoplochy, ktoré majú na povrchu rovnakú intenzitu zvuku. Plocha takejto guľovej vlnoplochy so vzdialenosťou od zdroja zvuku narastá, preto musí intenzita zvuku klesať. Avšak v každej vzdialenosti musí mať vlnoplocha rovnaký činný výkon zvukového vlnenia [11]:

$$P = 4\pi r_1^2 \cdot I_1 = 4\pi r_2^2 \cdot I_2 \quad (4.1)$$

kde I_1 a I_2 sú intenzity zvuku v radiálnych vzdialenostiach r_1 a r_2 . Z toho vyplýva:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (4.2)$$

Podľa tohto výrazu intenzita zvuku klesá so štvorcom vzdialenosti. Jeho úpravami obdržíme vzťah popisujúci zmenu hladiny intenzity zvuku spôsobenú zmenou vzdialenosti od zdroja zvuku:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1} \quad (4.3)$$

Pomocou tohto výrazu aplikácia riadi amplitúdu signálov jednotlivých odrazov a simuluje tým šírenie zvukovej vlny priestorom. Ako referenčná vzdialenosť (r_1) je zvolená vzdialenosť 1m. Vstupný monofónny signál tak figuruje ako signál, ktorý by sme namerali vo vzdialenosti 1m od virtuálneho zdroja zvuku. Aby sme získali pokles hladiny intenzity zvuku pre daný odraz L_p , tak na miesto vzdialenosti r_2 dosadíme vzdialenosť, ktorú musí zvuková vlna prekonať ku poslucháčovi v metroch. Vzťah 4.3 tak môže byť vyjadrený nasledovne:

$$L_p = 20 \cdot \log r_2 \quad (4.4)$$

Posledným krokom procesu je samotné panoramovanie jednotlivých zvukových vln, ktoré je realizované vektorovým panoramovaním, popísaným v kapitole č. 1. Pomocou neho sa nasimuluje poslucháčovi vnem smeru dopadu zvukových vln podľa zvolenej topológie reproduktorovej sústavy. Takto získaný signál pre jednotlivé kanály zvolenej reproduktorovej sústavy sa uloží vo formáte viackanálového wav súboru, ktorého názov aj umiestnenie je možné vopred nastaviť.

4.1.2 Popis parametrov

Aplikácia je určená na simulovanie posluchového priestoru s pravouhlou topológiou bez prekážok. Umožňuje nastavenie rozmerov miestnosti a polôh poslucháča a zdroja zvuku. Tieto parametre je možné voliť podľa potreby.

Rozmery miestnosti nie sú obmedzené, ale polohy poslucháča a zdroja zvuku sú vymedzené len pre vnútorný priestor miestnosti. Zdroj zvuku je reprezentovaný ako bodový všesmerový zdroj, ktorý vysiela signál z načítaného wav súboru. Aplikácia simuluje šírenie priamej zvukovej vlny ako aj odrazov do zvoleného rádu. Ten určuje konečný počet simulovaných odrazov. Tieto odrazy sa upravujú vo frekvenčnej a amplitúdovej oblasti. Frekvenčná oblasť úpravy je špecifikovaná materiálom steny, od ktorej sa vlna odrazila. Môžeme si vybrať z 10 dostupných najbežnejších stavebných materiálov (Tab. č. 1), ktoré môžeme priradiť pre konkrétne steny. Každá stena môže byť z iného materiálu, avšak jedna stena je tvorená jediným materiálom. Úprava v amplitúdovej oblasti je daná vzdialenosťou, ktorú musí prekonať zvuková vlna od zdroja zvuku k poslucháčovi. Jednotlivé zvukové vlny sú poslucháčovi podané viacreprodukčnou sústavou. Jej topológiu si môže poslucháč zvoliť zo siedmich dostupných bežne používaných reproduktorových konfigurácií:

- 4-kanálový Qadrofónny surround formát
- 4-kanálový LCRS surround formát
- 5.1 ITU-R BS 775 surround formát
- 6.1 DTS-ES / DD-EX Surround Format
- 7.1 DD EX/True HD surround formát
- 7.1 DTS-HD surround formát
- 7.1 SDDS (Sony Dynamic Digital Sound) surround formát

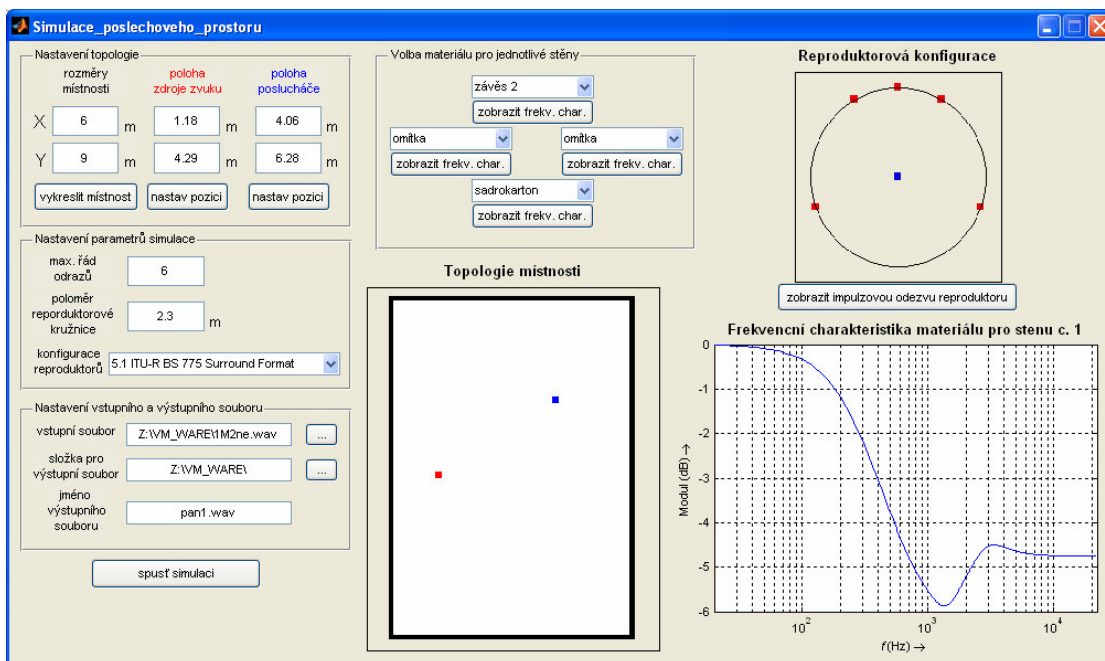
Tieto dostupné topológie majú reproduktory umiestnené na tzv. reproduktorovej kružnici s polomerom r a grafické zobrazenie týchto topológií je umiestnené v prílohe B.

4.1.3 Popis aplikácie a GUI

V tomto bode bude popísaná samotná aplikácia pre simulovanie posluchového priestoru, jej možnosti a jej užívateľské rozhranie (GUI), ktoré môžeme vidieť na Obr. č. 4.1. Samotné užívateľské rozhranie je rozdelené do niekoľkých častí, kde si môže užívateľ nastavovať jednotlivé parametre simulácie.

V časti „Nastavení topologie“ je možné manipulovať s rozmermi miestnosti a polohami poslucháča a virtuálneho zdroja zvuku. Tieto parametre sa zadávajú v karteziánskych súradniciach a sú vzťahované k východzieho bodu, ktorému odpovedá ľavý dolný roh miestnosti. Ten môžeme považovať za nulový bod $[0, 0]$. Od tohto bodu sa nastavujú všetky ďalšie súradnice topológie v smere osí x a y . Zadané súradnice predstavujú vzdialenosť v metroch od východzieho bodu. V tejto časti rozhrania sa nachádzajú aj tri tlačidlá. Tlačidlo „vykreslit

místnost“ umožňuje vykresliť aktuálne zadanú topológiu miestnosti do oblasti „Topologie místnosti“. Aktivovaním niektorého z tlačidiel „nastav pozici“ môžeme nastaviť pozíciu poslucháča alebo zdroja zvuku kliknutím na konkrétnu pozíciu v zobrazenej miestnosti. Takto sa zvolená pozícia zobrazí v miestnosti a zaznačí sa aj jej poloha do príslušných koloniek.



Obr. č. 4.1: GUI aplikácie pre simuláciu posluchového prostredia

Ďalšou časťou je „Nastavení parametrů simulace“, kde si môžeme voliť požadovaný maximálny rád odrazov použitý pre výpočet jednotlivých odrazov a aj konkrétnu reproduktorovú konfiguráciu. Pre ňu je potrebné zadať polomer kružnice, na ktorej sa nachádzajú reproduktory. Samotné rozloženie reproduktorov si môžeme zvoliť zo siedmych dostupných najčastejšie sa vyskytujúcich konfigurácií. Vybranú konfiguráciu môžeme vidieť v časti pre zobrazenie reproduktorovej konfigurácie.

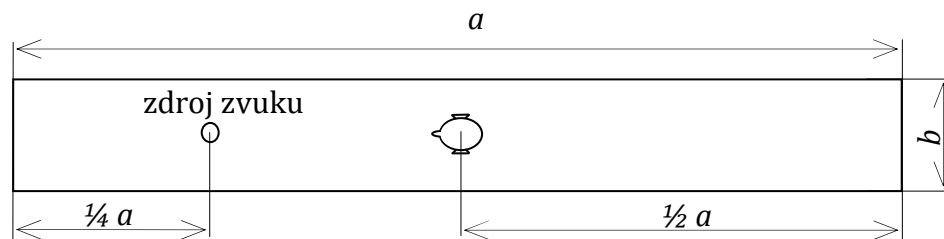
V časti „Nastavení vstupního a výstupního souboru“ sa volí vstupný wav súbor, ktorý reprezentuje zvukový signál vysielať virtuálnym zdrojom zvuku v miestnosti. Nastavenie je možné buď zadaním jeho adresy na disku v bežnom formáte (C:\adresár\...\súbor.wav), alebo je možné tlačidlom otvoriť rozhranie pre vyhľadanie súboru na disku. Rovnako môžeme postupovať aj pri zvolení adresára pre výstupný súbor (priamym zadaním cesty, alebo zvolením výstupného adresára v otvorenom rozhraní). Názov výstupného súboru môžeme vpísať do príslušnej kolonky. Pri nezadanom výstupnom adresári sa automaticky výstupný viackanálový wav súbor uloží do adresára, v ktorom sa nachádza vstupný súbor. Ak nezadáme názov výstupného súboru, tak bude ten uložený pod názvom „panning.wav“.

Priestor pre vykreslenie miestnosti je označený nápisom "Topologie místnosti". Po zadaní parametrov sa tu vykreslí miestnosť v maximálnej možnej mierke. Miestnosť je ohraničená čiernymi tučnými čiarami s bielym pozadím. V nej je možné voliť polohy poslucháča a zdroja zvuku. Tie sú zobrazené malým štvorcom červenej farby pre zdroj zvuku a modrej farby pre poslucháča. Pre každú stenu je možné zvoliť materiál, z ktorého je vyhotovená. Tento krok sa realizuje v časti "Volba materiálu pro jednotlivé stěny". V tomto bloku sú rolovacie menu, ktorými je možné zvoliť konkrétny materiál pre jednotlivé steny zo všetkých dostupných materiálov. Pri každom menu pre výber materiálu sa nachádza aj tlačidlo "zobrazit frekv. char.", ktorým je možné zobraziť modulovú frekvenčnú charakteristiku daného filtra simulujúceho frekvenčne závislú odrazivosť materiálu. Tá sa zobrazí v časti pre zobrazenie grafov. V nej je možné takisto zobraziť aj impulzovú odozvu konkrétneho reproduktora pre zvolenú topológiu simulovaného posluchového prostredia a reproduktorovú konfiguráciu. Jej zobrazenie je možné po kliknutí na tlačidlo s názvom "zobrazit impulzovou odezvu reproduktoru" a kliknutím na konkrétny reproduktor reprezentovaný červeným štvorcom v časti pre zobrazenie zvolenej reproduktorovej sústavy.

4.2 Aplikácia pre panoramovanie zdroja zvuku

4.2.1 Teoretický popis

Druhá navrhnutá aplikácia slúži pre panoramovanie zdroja zvuku. Pomocou nej je možné simulovať multikanálovou reproduktorovou sústavou zdroj zvuku umiestnený v priestore. Simulovanie nezahŕňa len panoramovanie azimutu, ale aj panoramovanie vzdialenosti od poslucháča. Samotná aplikácia sa od aplikácie pre simulovanie posluchového priestoru veľmi nelíši. V oboch prípadoch je princíp rovnaký. Avšak pri panoramovaní zdroja zvuku sa uvažuje priestor neznámy, čiže sa tu nepracuje s konkrétnou topológiou virtuálnej miestnosti (rozmery miestnosti, poloha zdroja zvuku a poslucháča), ale s virtuálnym priestorom, konkrétne s virtuálnou miestnosťou pravouhlého tvaru (rovnako ako predch. aplikácia). Virtuálna miestnosť slúži na generovanie určitého množstva odrazov, ktoré sú potrebné pre interpretáciu vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča. Požadovaná panoramovaná vzdialenosť sa premietne do jedného z rozmerov miestnosti (konkrétne do dĺžky), čím vznikne premenlivé posluchové prostredie, ktorého rozmermi môžeme riadiť vnem vzdialenosti zdroja zvuku. Umiesťenie poslucháča a zdroja zvuku v tejto miestnosti môžeme vidieť na Obr. č. 4.2.



Obr. č. 4.2: Topológia miestnosti pre panoramovanie zdroja zvuku s naznačenými polohami poslucháča a zdroja zvuku

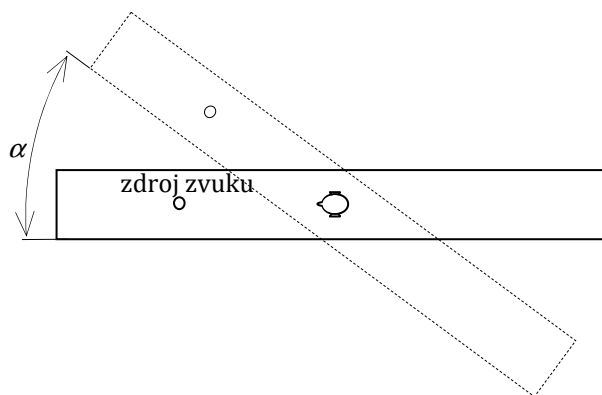
Miestnosť má rozmery a a b , kde rozmer a je závislý na panoramovanej vzdialenosti medzi zdrojom zvuku a poslucháčom a rozmer b je konštantný a nastavený na 6m. Hodnoty týchto nastavení boli zvolené na základe posluchových testov, pri ktorých sa hodnotil subjektívny vnem zo simulácií pre rôzne nastavenie tejto topológie.

Panoramovanie azimutu spočíva v úprave uhlov dopadu jednotlivých zvukových vln k poslucháčovi na základe požadovaného azimutu. Ten je zadáný vopred. Proces výpočtu parametrov odrazov prebieha rovnako ako v predchádzajúcej aplikácii, avšak na jeho konci sa upravujú uhly dopadu priamej zvukovej vlny a jednotlivých odrazov k poslucháčovi podľa vzťahu:

$$\theta_i = \theta + \alpha \quad (4.5)$$

Kde θ_i je upravený uhol dopadu zvukovej vlny k poslucháčovi, θ je vypočítaný uhol dopadu daného odrazu k poslucháčovi a α je panoramovaný azimut zdroja zvuku.

Túto úpravu si môžeme predstaviť natočením miestnosti so zdrojom zvuku okolo poslucháča umiestneného v strede miestnosti o panoramovaný uhol α , čo je zobrazené na Obr. č. 4.3:



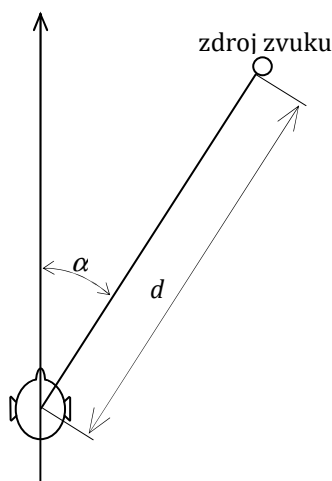
Obr. č. 4.3: Znázornenie princípu panoramovania azimutu pre panoramovanie zdroja zvuku

Takto získané parametre zvukových vln dopadajúcich k poslucháčovi sa nasledne upravujú tak, ako aj v predchádzajúcej aplikácii. Dochádza teda k úprave signálu jednotlivých odrazov vo frekvenčnej aj amplitúdovej oblasti. Na rozdiel od predchádzajúcej aplikácie si v tejto môžeme voľiť filtre simulujúce frekvenčne závislú odrazivosť materiálov z implicitných, alebo si môžeme navrhnuť svoje vlastné filtre. Tieto sú koncipované ako sériová kombinácia nezávislých filtrov LSF a HSF, čo je popísané v kapitole 3.2. Tieto filtre sú nižšieho rádu a dosahujú nižší čas výpočtu simulácií. Neposkytujú priamu voľbu daného materiálu, avšak pri tomto type panoramovania to ani nie je potrebné. Zmenou týchto filtrov môžeme nastaviť prostredie, v ktorom sa tento panoramovaný zdroj zvuku bude nachádzať. Prostredie tak nie je obmedzované počtom dostupných materiálov. Úprava v amplitúdovej oblasti prebieha rovnako, ako aj v predchádzajúcej aplikácii (viď. podkapitola 4.1.1).

Posledným krokom procesu je samotné panoramovanie jednotlivých zvukových vln, ktoré je taktiež zhodné s aplikáciou pre simulovanie posluchového prostredia. Takisto sa aj tu jednotlivé zvukové vlny panoramujú pre zvolenú reproduktorovú konfiguráciu a následne sa signály pre jednotlivé reproduktory uložia do jedného viackanálového wav súboru.

4.2.2 Popis parametrov

Ako bolo spomenuté, táto aplikácia pre panoramovanie zdroja zvuku umožňuje simulovať zdroj zvuku umiestnený v priestore. Jeho poloha je určená polárnymi súradnicami (narozdiel od karteziánskych v predchádzajúcej aplikácii). Azimut predstavuje uhol zvieraný osou poslucháča a spojnicou poslucháča a zdroja zvuku, čo zobrazuje Obr. č. 4.4. Vzdialenosť zdroja zvuku je zas vymedzená stredom zdroja zvuku a stredom hlavy poslucháča a je možné ju voľiť v intervale od 1m do maximálnej hranice, ktorá sa taktiež musí vopred zvoliť. Maximálna vzdialenosť na samotný výsledok panoramovania nemá prakticky žiaden vplyv. Jej zadávanie je len kvôli zobrazeniu topológie reproduktorovej sústavy, naznačenie polohy zdroja zvuku a možnosti jej voľby kliknutím na danú pozíciu v grafe zobrazenia. Poloha poslucháča je nemenná, vždy sa nastavuje uprostred virtuálnej miestnosti. Dôležitým paramterom je aj polomer reproduktorovej kružnice, ktorý popisuje vzdialenosť reproduktorov od poslucháča.



Obr. č. 4.4: Znázornenie parametrov pre panoramovanie zdroja zvuku

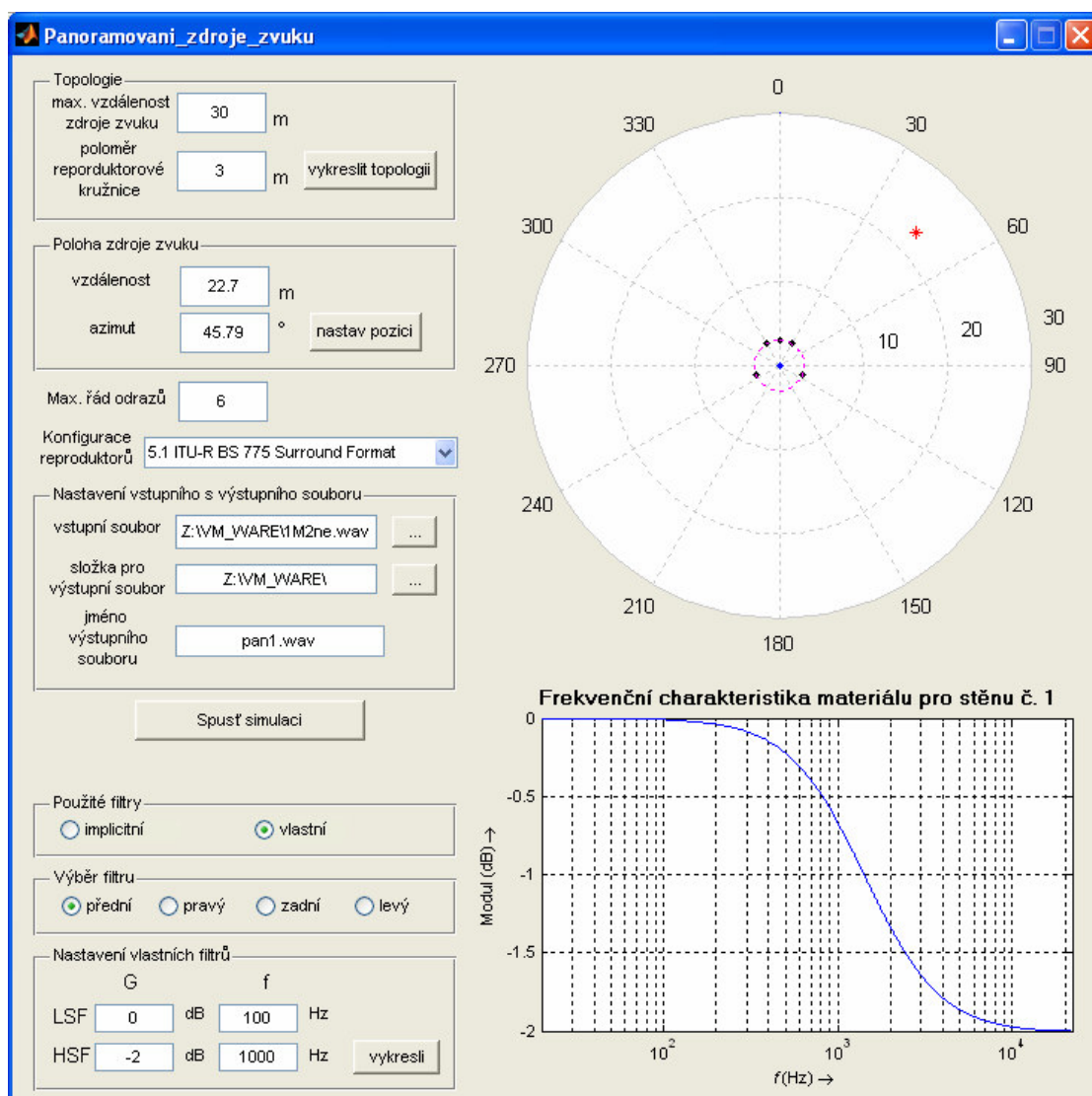
Ako v predchádzajúcej aplikácii, aj v tejto nastavujeme maximálny rád odrazov. Simulované prostredie môžeme nastaviť pomocou číslicových filtrov (simulujúcich frekvenčne závislú odrazivosť stien virtuálnej miestnosti). Tie môžu byť nastavené implicitne, alebo si frekvenčnú charakteristiku jednotlivých filtrov môžeme modelovať pomocou sériovej kombinácie LSF a HSF (popis vid'. kapitola 3.3), ktorých medznú frekvenciu aj zosilnenie si môžeme voľiť pre každý filter zvlášť. Ako implicitné filtre sú použité tri filtre navrhnuté v kapitole č. 3.2.2. Konkrétne sa jedná o filtre:

- záves 2 (stena pred poslucháčom)
- omietka (stena po stranách poslucháča)
- sadrokartón (stena za poslucháčom)

Tieto filtre boli vybraté na základe posluchovéch simulácií, ktoré boli zrealizované pre rôzne kombinácie materiálov. Výber spočíval v nájdení takej kombinácie materiálov, ktorá pri simulácii nebude vykazovať značnú zmenu spektra výsledného signálu (nebude niektoré frekvenčné pásmo nadmerne zvýraznené alebo potlačené). Ako predchádzajúca aplikácia, aj táto umožňuje voľbu reproduktorovej topológie, ktorú môžeme voľiť zo siedmich najbežnejších konfigurácií, ktoré sú vymenované v kapitole č. 4.1.2.

4.2.3 Popis aplikácie a GUI

Pre túto aplikáciu bolo takisto vytvorené užívateľské rozhranie (GUI), ktoré tak umožňuje jednoduchšie používanie. V rozhraní si môžeme nastaviť všetky potrebné parametre pre simuláciu.



Obr. č. 4.5: GUI aplikace pro panoramování zdroje zvuku

Pre vykreslenie topológie je potrebné najprv zadať maximálnu vzdialenosť zdroja zvuku od poslucháča (nemá vplyv na panoramovací proces) a polomer reproduktorovej kružnice v časti “Topologie”. Ako bolo spomenuté v predchádzajúcom bode, poloha poslucháča je v tejto aplikácii nemenná a poloha zdroja zvuku sa nastavuje polárnymi súradnicami vzhľadom k poslucháčovi. Tie sa zadávajú buď ručným vpísaním príslušných hodnôt do príslušných políček v časti “Poloha zdroje zvuku”, alebo sa kliknutím na tlačidlo “nastav pozici” aktivuje možnosť voľby požadovanej polohy pomocou kurzora kliknutím na požadované miesto v zobrazenej topológii. Požadovanú reproduktorovú konfiguráciu si môžeme nastaviť pomocou rolovacieho menu označeného “Konfigurace reproduktorů”. Opäť si môžeme vybrať jednu zo siedmich dostupných a najčastejšie používaných konfigurácií.

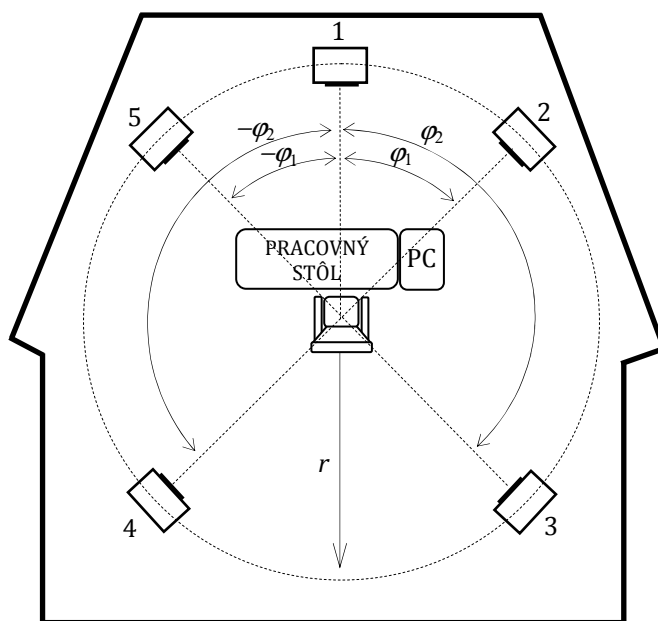
Časť “Nastavení vstupního a výstupního souboru” tu plní rovnakú funkciu ako pri aplikácii na simulovanie posluchového prostredia. Vstupný wav súbor

slúži ako zvukový signál, ktorý generuje panoramovaný zdroj zvuku. Nastavením cesty pre výstupný súbor zvolíme miesto na disku, kam chceme uložiť výstupný súbor obsahujúci signály pre jednotlivé reproduktory (nezadaním cesty sa výstupný súbor uloží do priečinka, odkiaľ načítavame vstupný súbor). Názov výstupného súbora si taktiež môžeme navoliť podľa potreby v príslušnom políčku.

V sekcii, ktorá sa venuje použitým filtrom ("Použité filtry") si môžeme zvoliť použitie implicitných filtrov, ktoré boli vybraté z dostupných filtrov navrhnutých v kapitole 3.2.2, alebo si môžeme nadefinovať vlastné filtre. Prepínaním políčok v časti "Výběr filtru" si môžeme prezerat' alebo nastavovať filtre použité pre simuláciu odrazivosti jednotlivých stien (ich modulová frekvenčná charakteristika sa zobrazuje vpravo do časti určenej pre zobrazenie charakteristiky). V prípade voľby implicitných filtrov si môžeme ich charakteristiky len prezerat'. Avšak ak máme zvolené použitie vlastných filtrov, tak zmenou parametrov v časti "Nastavení vlastních filtrů" môžeme upravovať ich modulovú frekvenčnú charakteristiku podľa potrieb. Tieto filtre sú realizované ako sériová kombinácia LSF a HSF, ktorých zosilnenie a medznú frekvenciu môžeme meniť. Kliknutie na tlačidlo "Vykresli" (v aktívnom stave pri zvolenom použití vlastných filtrov) vykreslí jeho modulovú frekvenčnú charakteristiku a parametre filtra uloží pre jeho použitie v panoramovacom procese.

5. POSLUCHOVÉ TESTY

Návrh algoritmov popisovaných v kapitole č. 4 si vyžadoval priebežné posluchové testy na overenie ich funkčnosti. Tie boli vykonávané v špeciálne vybavenom laboratóriu s čiastočne upravenou dobou dozvuku (na stenách miestnosti boli umiestnené pohltivé materiály, ktoré tak znižovali dobu dozvuku). Táto miestnosť bola vybavená pracoviskom s PC s potrebným softwarovým vybavením. Zvukový výstup z PC bol realizovaný pomocou externého zariadenia zvukovej karty MOTU 896mk3. Pre posluchové testy boli použité dvojpásmové reproduktory GENELEC 1023A umiestnené vo výške hlavy poslucháča. Uprostred miestnosti bolo samotné pracovisko zložené z pracovného stola s monitormi, vedľa ktorého bol PC so zvukovou kartou. Kreslo pre poslucháča sa nachádzalo presne nad stredom reproduktorovej kružnice, ktorej polomer bol $r = 2,3\text{m}$. Rozmiestnenie reproduktorov aj samotná topológia miestnosti je zrejmá z Obr. 5.1. Uhly $\varphi_1 = 45^\circ$ a $\varphi_2 = 135^\circ$.



Obr. č. 5.1: Topológia miestnosti kde boli vykonávané priebežné posluchové testy

Tieto posluchové testy som vykonával spolu s vedúcim tejto práce. Na základe nášho subjektívneho vnemu sme postupne doladili všetky časti algoritmov pre spracovanie signálu (filtrácia signálu, pohltivosť spôsobená šírením zvuku guľovou vlnoplohou a pod.).

Takto navrhnuté algoritmy si vyžadujú aj posluchové testy, ktorými by sa overila presnosť ich simulácie. Avšak v závere realizácie tejto práce už nebolo možné takéto testovanie zorganizovať z časových dôvodov.

6. ZÁVER

Táto práca sa zaoberá problematikou panoramovania zvuku a jeho virtuálnom umiestnení v horizontálnej rovine. Presnosť lokalizácie vektorovo panoramovaného zdroja zvuku pri implementácii na 5-kanálovej reproduktorovej sústave bola závislá na jeho azimute voči poslucháčovi. Najpresnejšie bolo možné polohu zdroja zvuku lokalizovať pred poslucháčom ($\pm 5^\circ$) a najhoršie za poslucháčom ($\pm 10 - 15^\circ$). Po stranách poslucháča boli pozorovateľné kritické uhly, kedy sa zdroj zvuku nejavil ako jeden bod, ale dva body umiestnené v polohe reproduktorov.

Pri implementovaní odrazených zvukových vln do simulácie sa však presnosť lokalizácie zdroja zvuku zvýšila, a to hlavne pre polohy zdroja zvuku za poslucháčom. Z toho vyplýva, že pri vektorovom panoramovaní prvotné odrazy napomáhajú lokalizácii virtuálneho zdroja zvuku v kritických polohách po stranách poslucháča a za ním. Na základe posluchových testov je takisto možné usúdiť, že priaznivo na celkový vnem pôsobí práve kombinácia vektorového panoramovania so simuláciou prvotných odrazov. Zvukové pole nie je jednoduché ako pri panoramovaní priamej vlny (jeden virtuálny zdroj), ale je komplexnejšie.

Výpočet vlastností odrazených zvukových vln (uhol dopadu a vzdialenosť, ktorú museli uraziť) pomocou obrazovej metódy je jednoduchý a má oproti metóde ray-tracing viaceré výhody. Oproti metóde ray-tracing totiž garantuje nájdenie všetkých zvukových ciest do zvoleného kritéria (vzdialenosti od poslucháča). Metóda ray-tracing dokáže nájsť aj vzdialenejšie odrazy, avšak negarantuje nájdenie všetkých bližších. Jej najväčšou výhodou však je jednoduchá algoritmizácia a jej rýchlosť. Pre následný návrh dvoch aplikácií som si však zvolil obrazovú metódu, ktorá plne postačuje pre splnenie zadaných požiadaviek.

Pre potreby simulovania frekvenčne závislej zvukovej pohltivosti materiálov bolo potrebné navrhnuť číslicové filtre, ktoré by čo najpresnejšie simulovali túto frekvenčne závislú zvukovú pohltivosť. Filtre boli navrhnuté na základe koeficientov pohltivosti, ktoré nám pre rôzne materiály poskytla firma SONING Praha a.s. Tieto filtre boli navrhované s ohľadom na nízku výpočtovú náročnosť a rád jednotlivých filtrov je v rozmedzí 2 – 6. Samotné posluchové testy pre jednotlivé materiály ukázali, že oproti filtrom navrhnutým v mojej bakalárskej práci (jednoduché IIR filtre 2. rádu), tieto nové a presnejšie filtre umožňujú podstatne kvalitnejšiu simuláciu posluchového prostredia, ktorá sa javí oveľa reálnejšie. Použité filtre sú 2. až 6. rádu, čo mierne zvýši čas výpočtu. Ten je však možné pri implementácii v niektorom z programovacích jazykov

optimalizovať paralelizovaním výpočtu, keďže je možné spracovávať viacero odrazov naraz (výsledok spracovania jedného neovplyvňuje spracovanie druhého). Takto by bolo možné realizovať panoramovací proces aj v reálnom čase. S výhodou by sa mohol tento panoramovací proces realizovať na GPU, ktorý ponúka vysokú mieru paralelizácie.

V tejto práci boli popísané aj dve navrhnuté aplikácie. Prvá slúži na simulovanie posluchového priestoru, kde je možné simulovať virtuálny posluchový priestor podľa zadaných parametrov. Simulácie vytvorené touto aplikáciou poskytujú dobrý vnem simulovaného priestoru. Uplatňujú sa pri nich niektoré vlastnosti posluhu v uzavretom priestore, ako napr. znateľné zvýraznenie oblasti nižších frekvencií pri umiestnení poslucháča alebo virtuálneho zdroja zvuku blízko steny alebo rohu. Druhá aplikácia umožňuje panoramovanie zdroja zvuku na základe jeho azimutu a vzdialenosti od poslucháča. Simulácie poskytujú poslucháčovi okrem vnemu azimutu aj vnem vzdialenosti, ktorý sa dosahuje implementovaním prvotných zvukových odrazov. Tento vnem vzdialenosti umožňuje rozoznať aj to, kedy sa zvukový zdroj nachádza vnútri reproduktorovej kružnice a kedy mimo nej. Obe aplikácie sú doplnené grafickým užívateľským rozhraním (GUI) pre jednoduchšiu manipuláciu s nimi.

Časový priestor v dobe dokončovania práce neumožnil vykonať posluchový test pre viacero poslucháčov, preto boli simulácie prevedené len na malom počte poslucháčov bez štatistického spracovania.

V ďalšom zaoberaní sa touto témou by bolo vhodné navrhnuté algoritmy implementovať v jazyku C, kde by bolo možné výpočty simulácií optimalizovať do miery, kedy by mohlo panoramovacie zariadenie pracovať v reálnom čase. Avšak tu bude potrebné riešiť nové problémy, ako napr. segmentáciu spracovávaného signálu s ohľadom na latenciu a pod. Tieto algoritmy by tak mohli byť spracované do podoby zásuvných modulov, tzv. VST pluginov. Ako som už spomenul, algoritmy ponúkajú takisto možnosť paralelných výpočtov.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] B. B. Bauer, "Phasor Analysis of Some Stereophonic Phenomena," J. Acoust. Soc. Am., vol. 33, pp. 1536-1539 (1961 Nov.).
- [2] Pulkki V. Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning. J. Audio Eng. Soc., vol. 45, no. 6, pp. 456-466 (1997 June).
- [3] Pernaux J.M., Boussard P., Jot J.M. Virtual Sound Source Positioning and Mixing in 5.1 Implementation on the Real-Time System Genesis. In Proc. Conf. Digital Audio Effects (DAFx-98), 1-5, 1998, ISBN 84-88042-24-8
- [4] Bruce Wiggins, "An investigation into the real -time manipulation and control of tfree- dimensional sound fields" University of Derby (2004)
- [5] Viveiros, E. B., Gibbs, B. M. An image method for predicting the field performance of acoustic louvres from impulse response measurements. *Applied Acoustics*. 2003, vol. 64, pp.713-730. Dostupný z WWW: <http://www.gaama.ufsc.br/articles/Especializadas/13_01_2003.pdf>
- [6] BORISH, Jeffrey. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. *J. Acoust. Soc. Am.*. 1984, vol. 75, is. 6, s. 1827-1836. Dostupný z WWW: <http://nevyn.nu/realtime_acoustics/Extension%20of%20the%20image%20model%20to%20arbitrary%20polyhedra.pdf>.
- [7] DANCE, S. M., SHIELD, B. M. The complete image-source method for the predistion of sound distribution in non-difuse enclosed spaces. *J. of Sound and Vibr.*. 1997, vol. 201, is. 4, s. 473-489. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WM3-45KKVCG-3J&_user=640830&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000032308&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640830&md5=6ee62bee555926c911ac86ca1571fdcc>
- [8] ČSN EN ISO 354 Akustika- Měření zvukové pohltivosti v dozvukové komoře
- [9] Schimmel, J. Akustika uzavřených prostorů, VUT v Brně, Brno, 2008
- [10] Balík, M. MCAS_Slides_2010, VUT v Brně, Brno, 2010
- [11] EVEREST, F. A. The master handbook of acoustic. 4, USA : McGraw-Hill. 2001, 615 s.

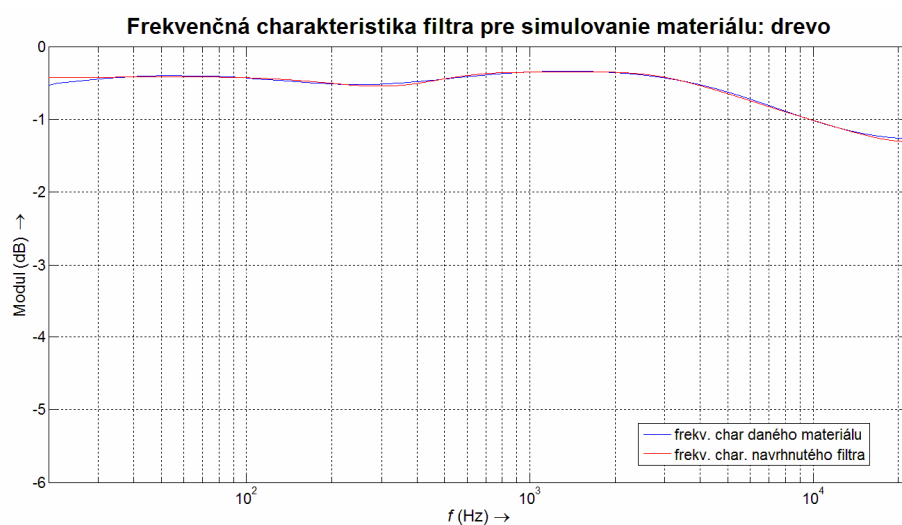
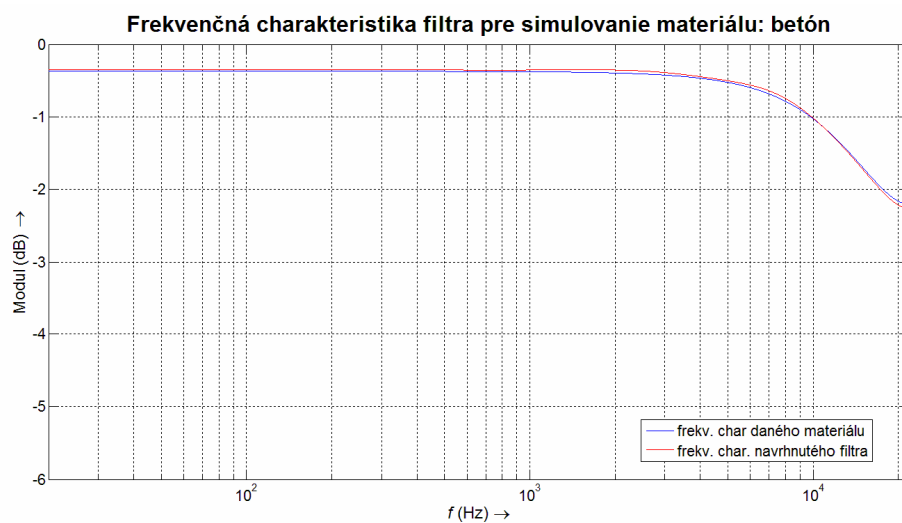
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

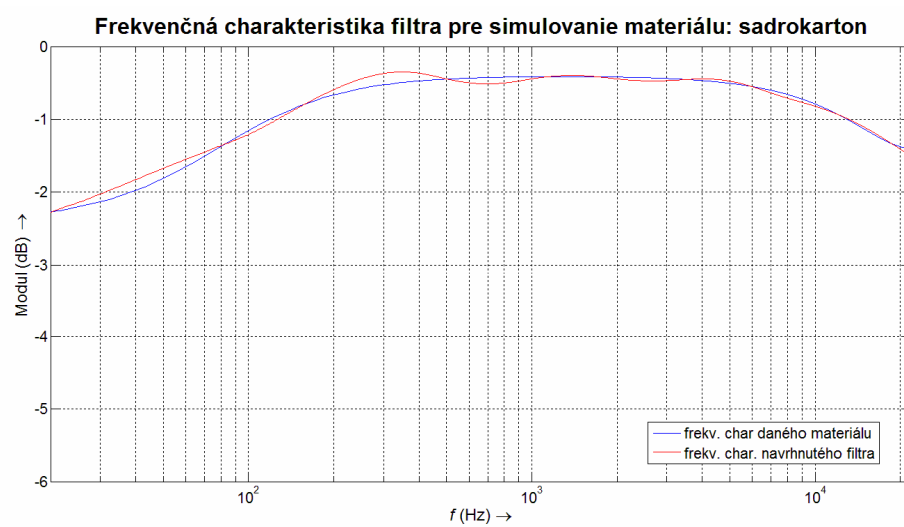
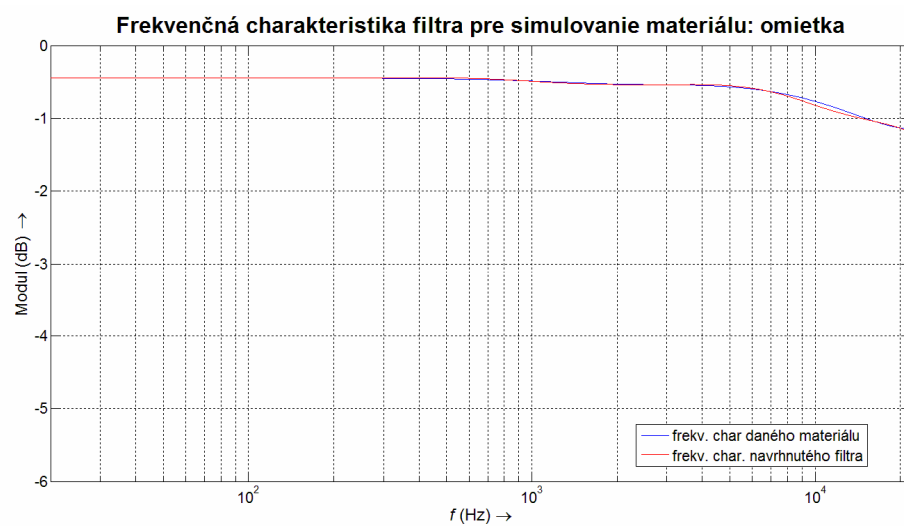
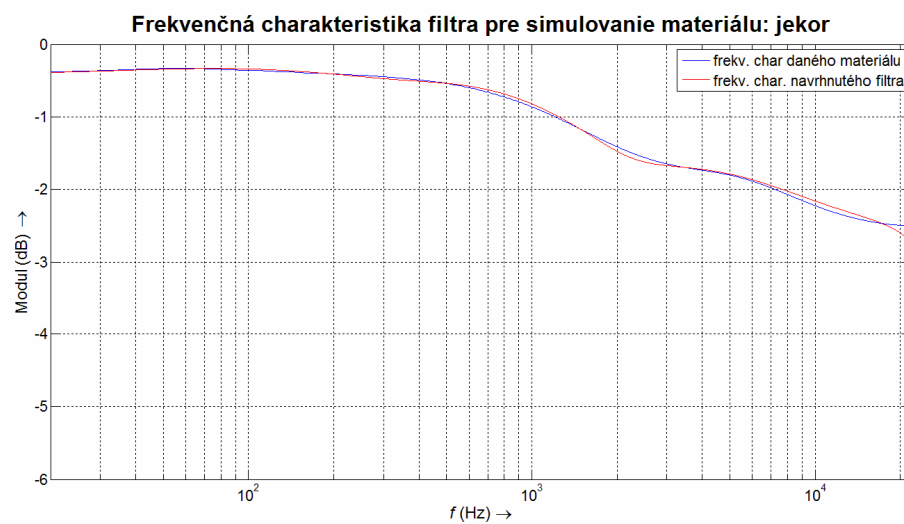
ITD (Interaural Time Difference)	Interaurálna časová diferencia
IID (Interaural Intensity Difference)	Interaurálna intenzitná diferencia
VBAP (Vector Base Amplitude Panning)	Vektorovo- základňové panoramovanie
RS (Real Source)	Reálny zdroj zvuku
RL (Real Listener)	Poslucháč
VS (Virtual Source)	Virtuálny zdroj
IIR (Infinite Impulse Response)	Filter s nekonečnou impulzovou odozvou
FIR (Finite Impulse Response)	Filter s konečnou impulzovou odozvou
GUI (Graphical User Interface)	Grafické užívateľské rozhranie
LSF (Low Shelving Filter)	Low-Shelving filter
HSF (High Shelving Filter)	High-Shelving filter

ZOZNAM PRÍLOH

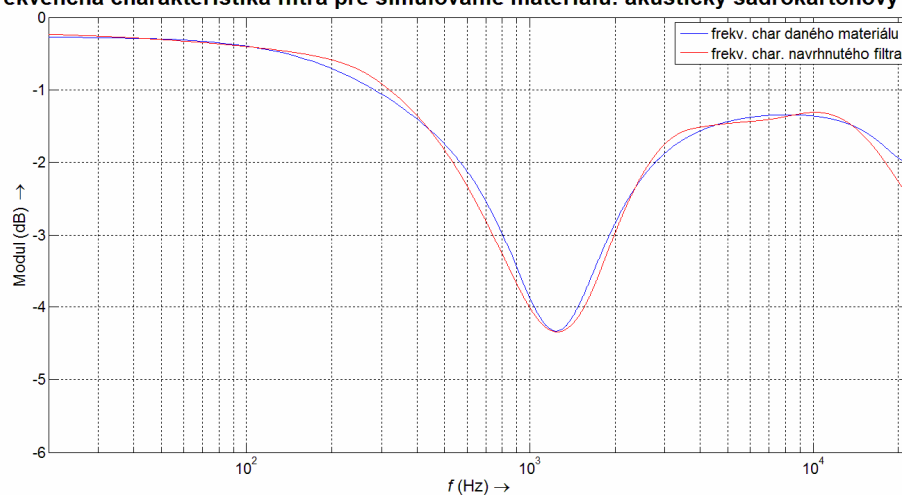
Príloha A	Frekvenčné charakteristiky filtrov realizujúcich simuláciu frekvenčne závislej odrazivosti stien.....	49
Príloha B	Grafické zobrazenie reproduktorových konfigurácií dostupných v jednotlivých aplikáciách.....	53
Príloha C	Príklady impulzových odoziev jednotlivých reproduktorov niektorých simulácií.....	57
Príloha D	Obsah priloženého CD.....	67

Príloha A Frekvenčné charakteristiky filtrov realizujúcich simuláciu frekvenčne závislej odrazivosti stien

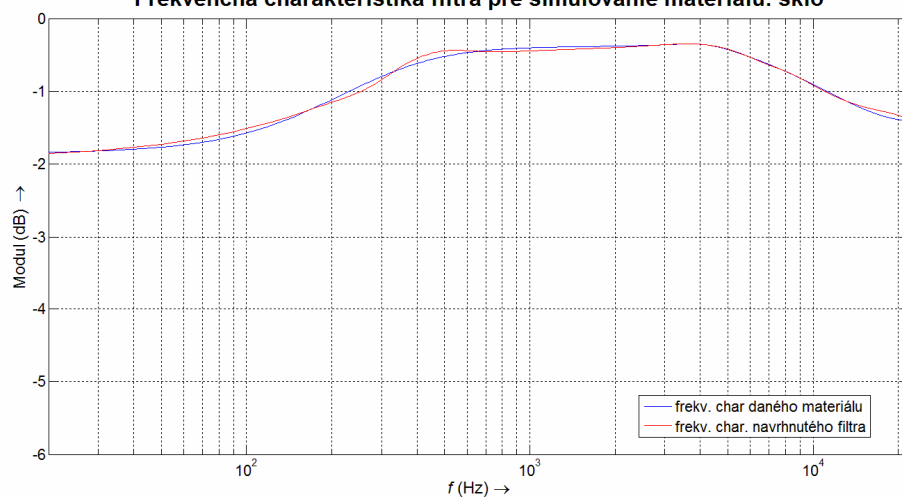




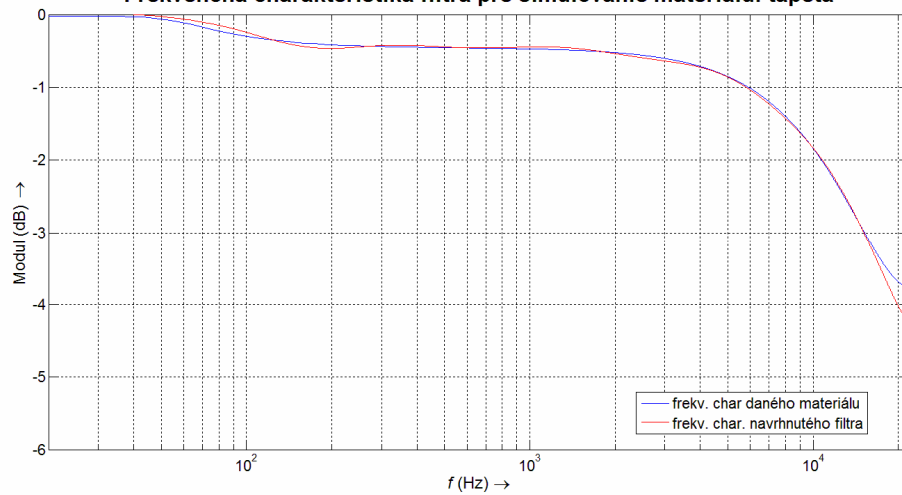
Frekvenčná charakteristika filtra pre simulovanie materiálu: akustický sadrokartonový obklad

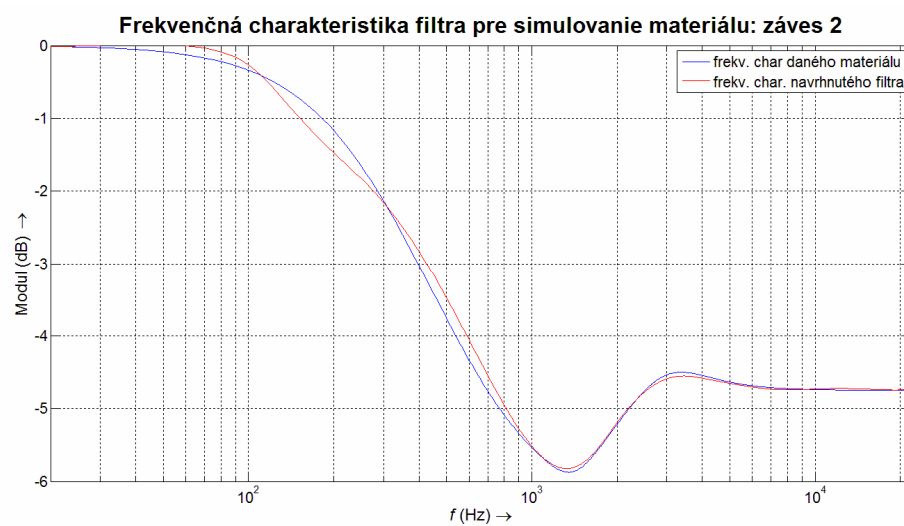
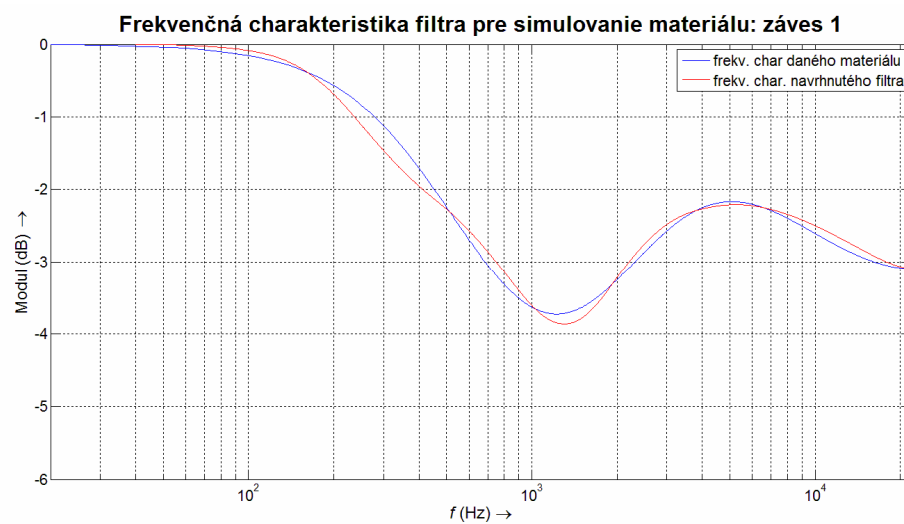


Frekvenčná charakteristika filtra pre simulovanie materiálu: sklo



Frekvenčná charakteristika filtra pre simulovanie materiálu: tapeta

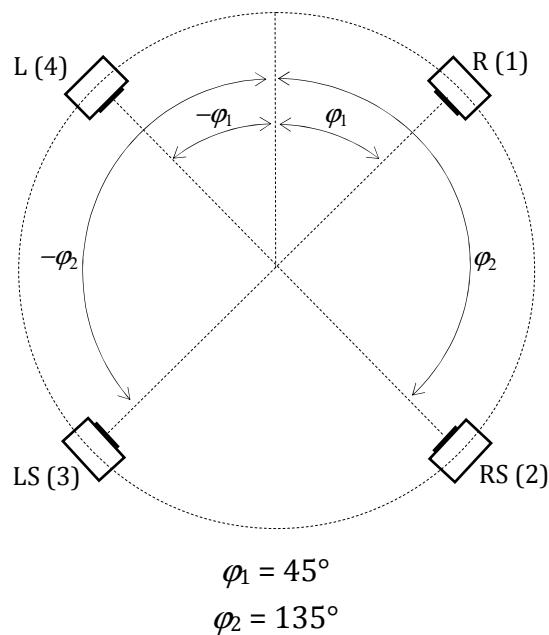




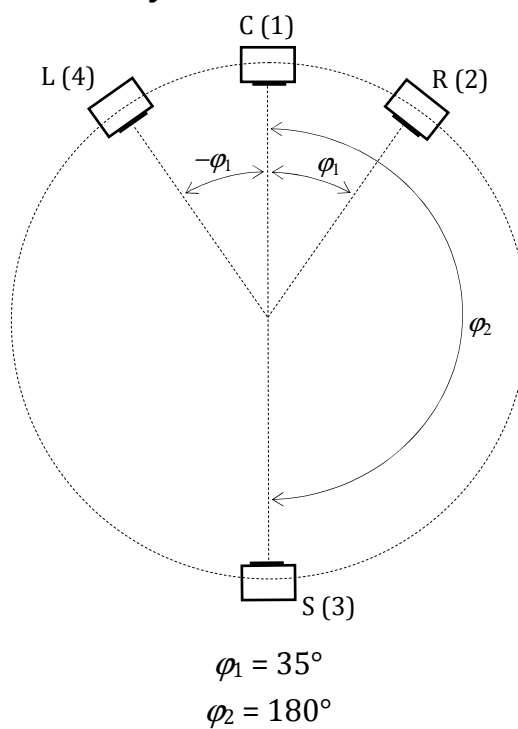
Príloha B Grafické zobrazenie reproduktorových konfigurácií dostupných v jednotlivých aplikáciách

Pozn. číslo v zátvorke pri jednotlivých reproduktoroch predstavuje číslo kanála, ktorý reprezentuje signál pre tento reproduktor vo výstupnom súbore simulácie

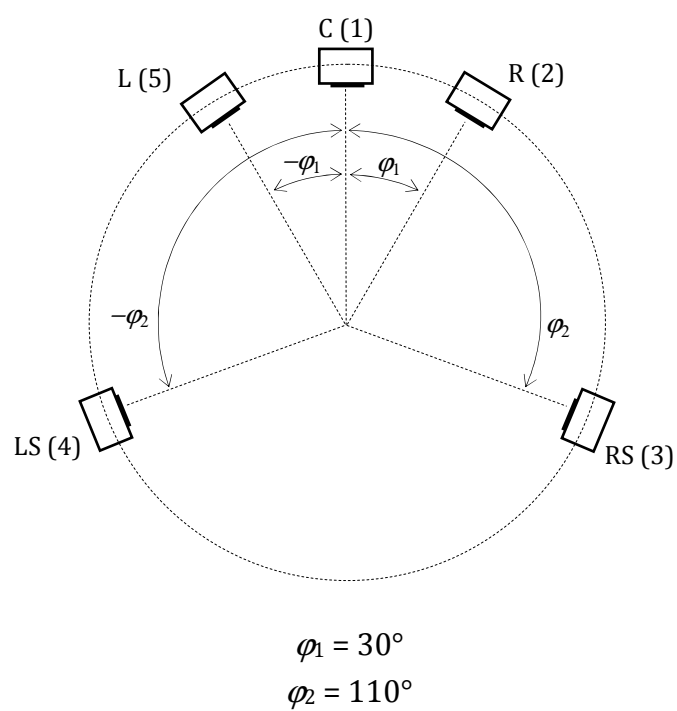
4-kanálový Qadrofónny surround formát



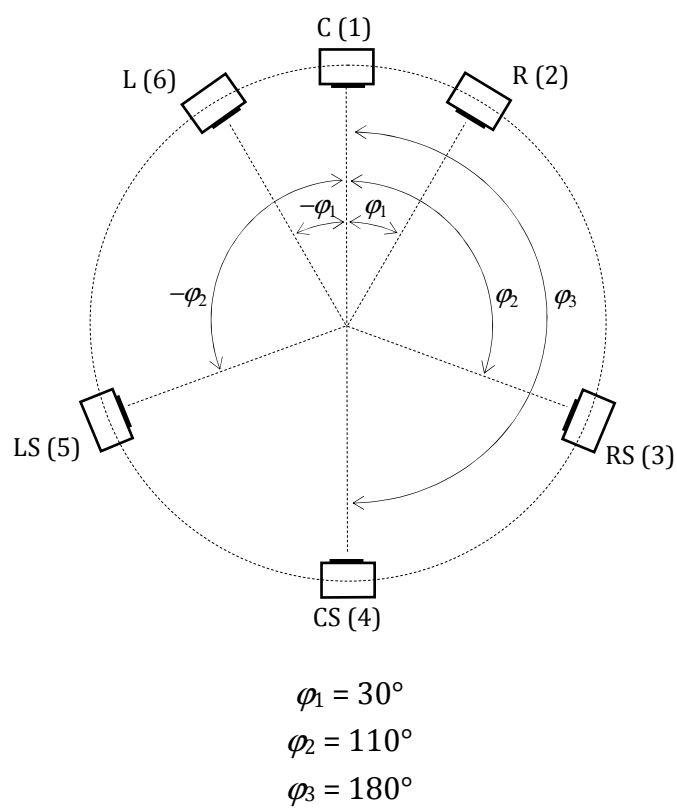
4-kanálový LCRS surround formát



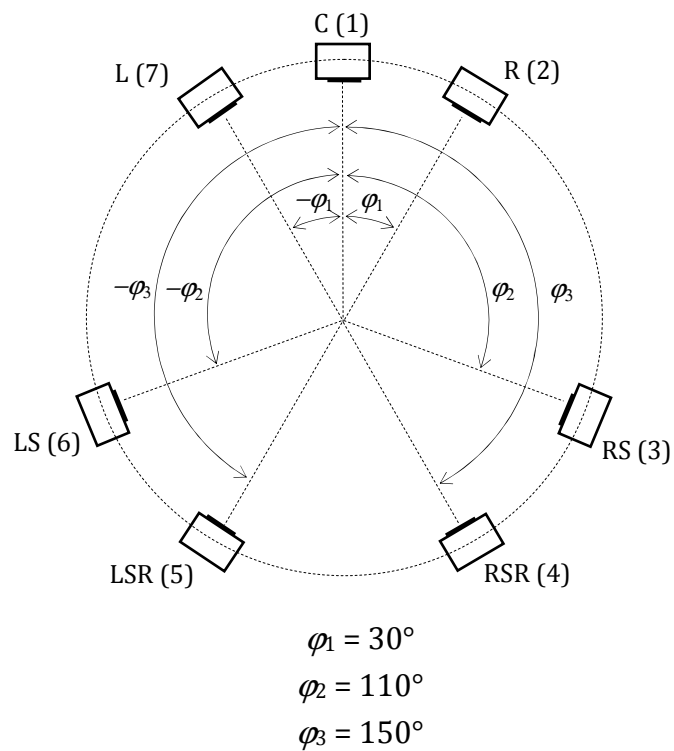
5.1 ITU-R BS 775 surround formát



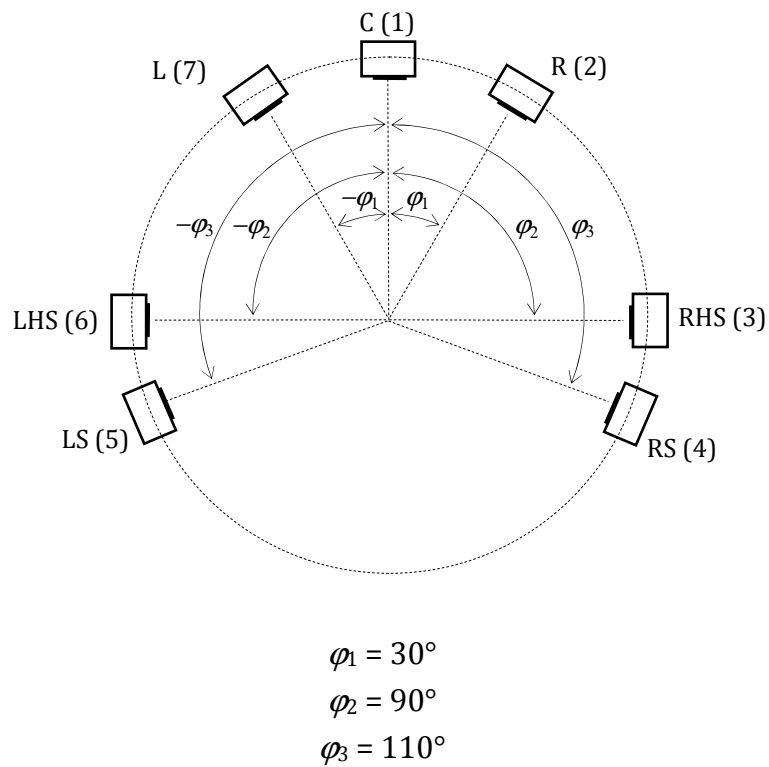
6.1 DTS-ES / DD-EX Surround Format



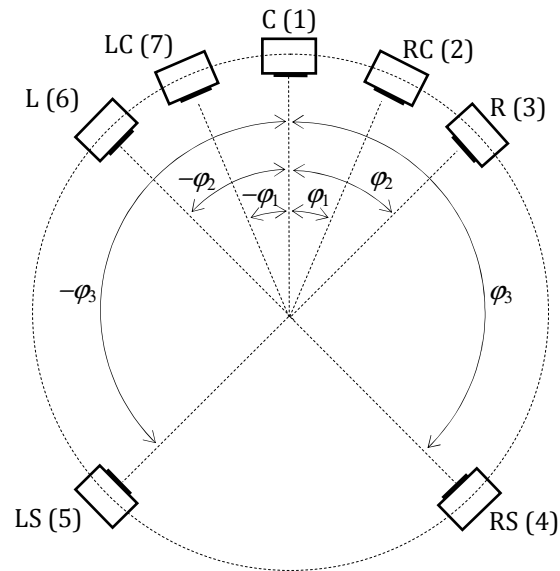
7.1 DD EX/True HD surround formát



7.1 DTS-HD surround formát



7.1 SDDS (Sony Dynamic Digital Sound) surround format



Príloha C Príklady impulzových odoziev jednotlivých reproduktorov niektorých simulácií

Simulácia posluchového priestoru 1

Simulácia pre nastavené parametre:

Rozmery miestnosti: $a = 4\text{m}$ $b = 6\text{m}$

Poloha poslucháča: $x = 3,3\text{m}$ $y = 4,2\text{m}$

Poloha zdroja zvuku: $x = 1,2\text{m}$ $y = 1,7\text{m}$

Maximálny rád odrazov: 5

Polomer reproduktorovej kružnice: 2,3m

Použitá reproduktorová konfigurácia: 5.1 ITU-R BS 775 surround formát

Materiál jednotlivých stien: -pred poslucháčom: záves 2
 - pravá strana poslucháča: omietka
 - za poslucháčom: sadrokarton
 - ľavá strana poslucháča: omietka

Simulácia bola vykonaná najprv bez použitých filtrov, kedy bol signál po odraze násobený širokopásmovým koeficientom odrazivosti pre daný materiál a následne s aplikovanými filterami

Simulácia posluchového priestoru 2

Simulácia pre nastavené parametre:

Rozmery miestnosti: $a = 20\text{m}$ $b = 30\text{m}$

Poloha poslucháča: $x = 16,8\text{m}$ $y = 24,3\text{m}$

Poloha zdroja zvuku: $x = 4,3\text{m}$ $y = 8,5\text{m}$

Maximálny rád odrazov: 5

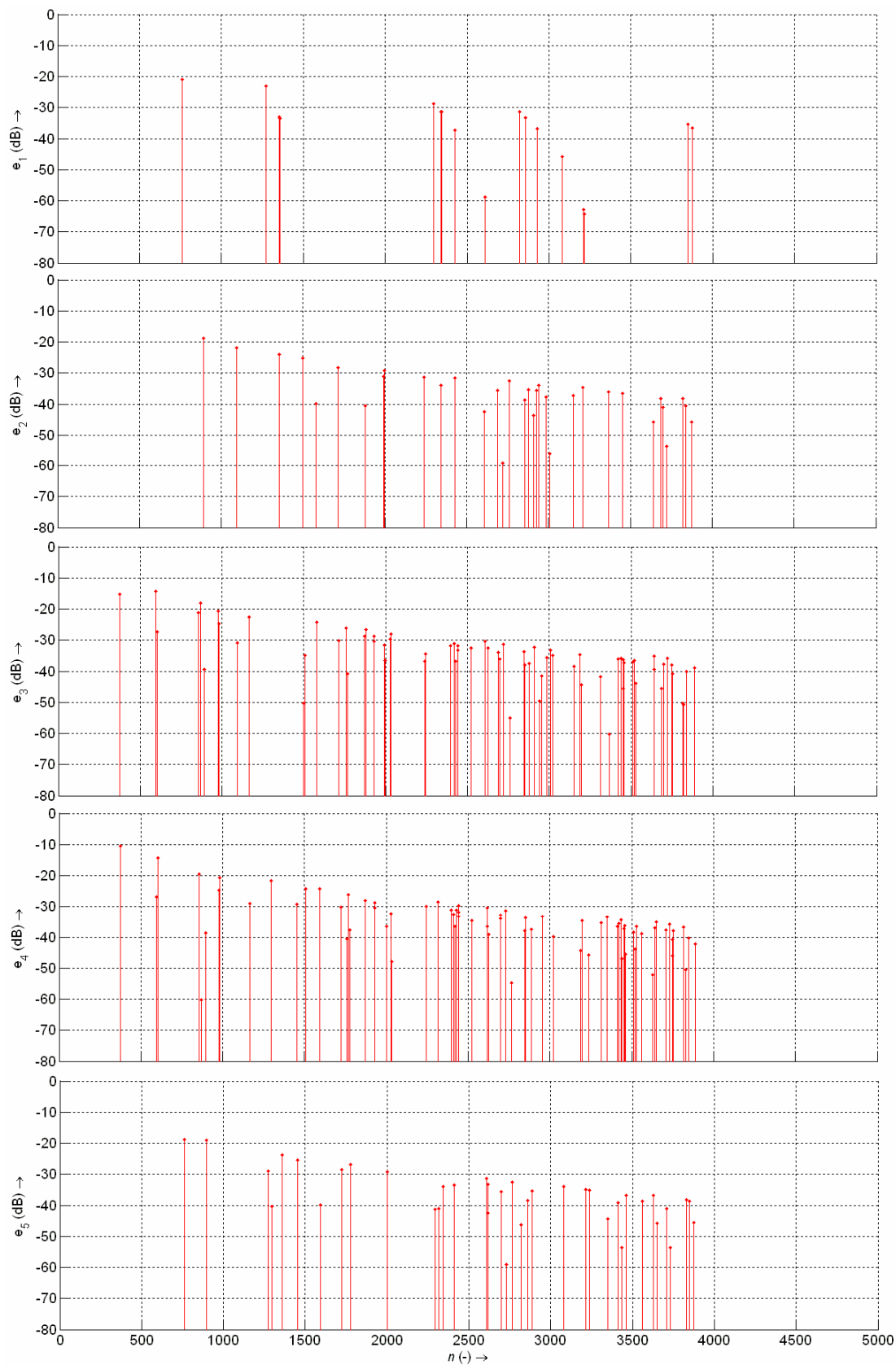
Polomer reproduktorovej kružnice: 2,3m

Použitá reproduktorová konfigurácia: 5.1 ITU-R BS 775 surround formát

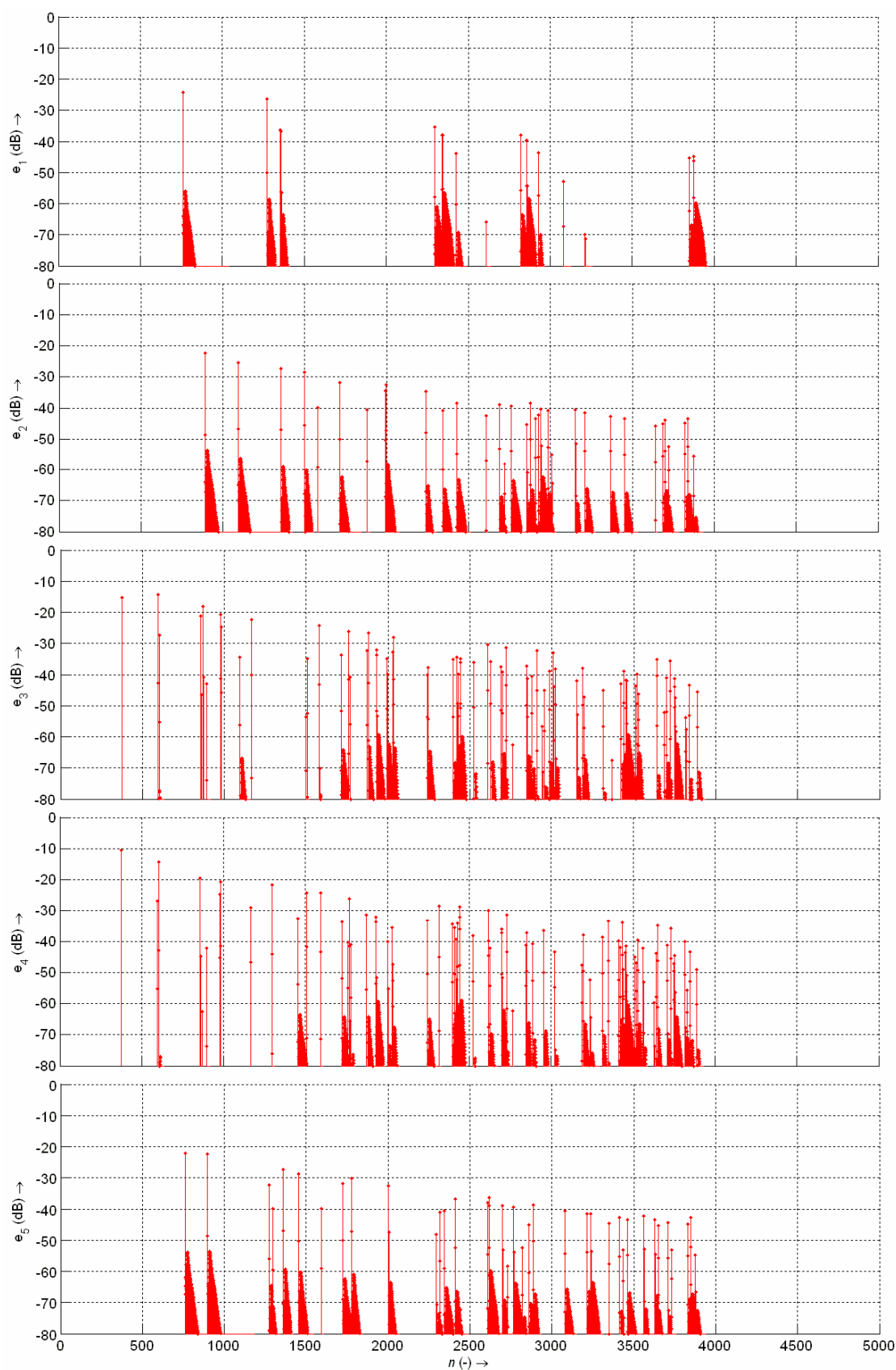
Materiál jednotlivých stien: -pred poslucháčom: záves 2
 - pravá strana poslucháča: omietka
 - za poslucháčom: sadrokarton
 - ľavá strana poslucháča: omietka

Simulácia bola vykonaná najprv bez použitých filtrov, kedy bol signál po odraze násobený širokopásmovým koeficientom odrazivosti pre daný materiál a následne s aplikovanými filterami

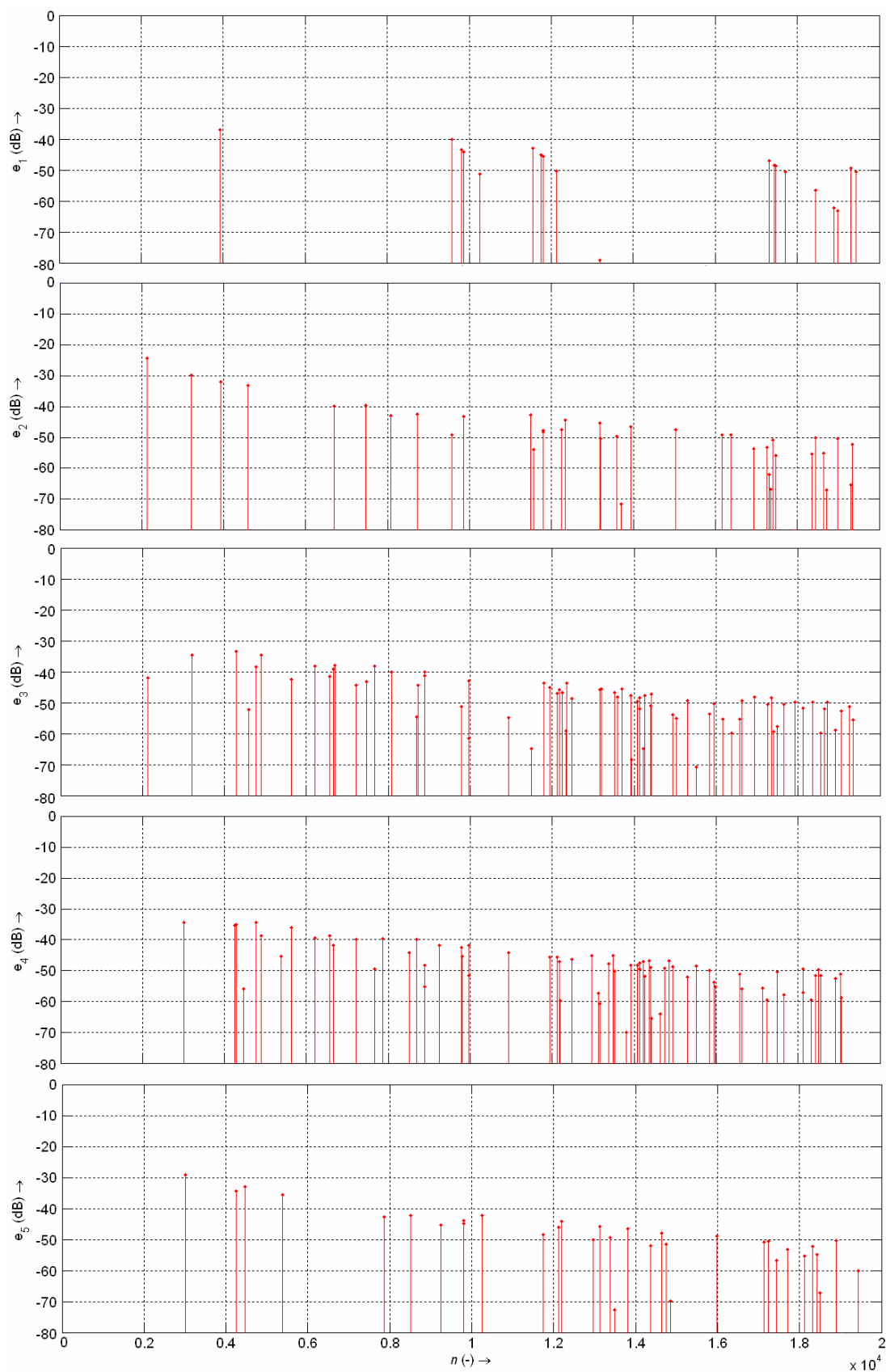
Impulzová odozva reproduktorov pre simuláciu posluchového priestoru 1 (bez použitých filtrov)



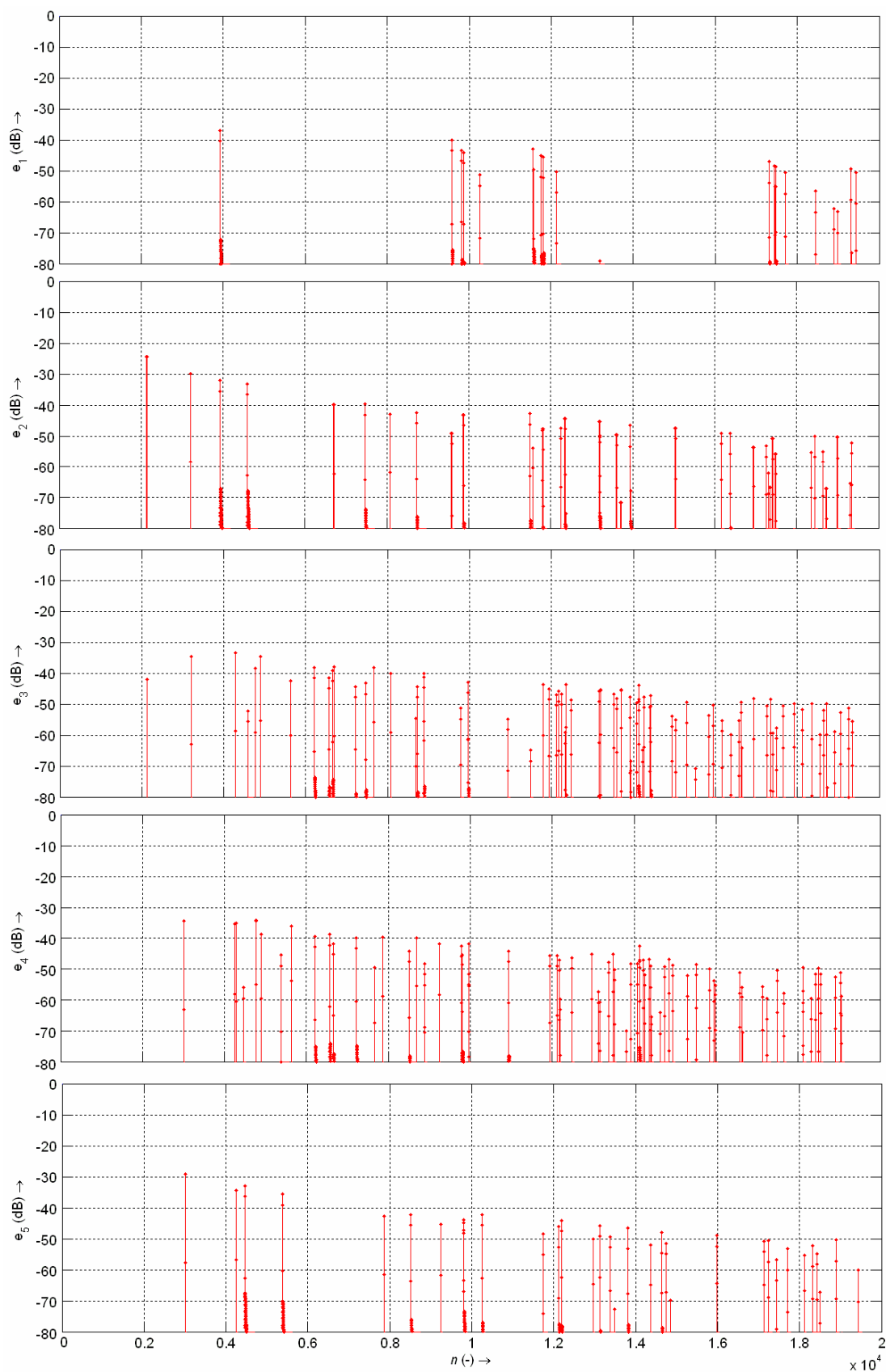
Impulzová odozva reproduktorov pre simuláciu posluchového priestoru 1 (s použitými filtermi)



Impulzová odozva reproduktorov pre simuláciu posluchového priestoru 2 (bez použitých filtrov)



Impulzová odozva reproduktorov pre simuláciu posluchového priestoru 2 (s použitými filtermi)



Panoramovanie zdroja zvuku 1

Simulácia pre nastavené parametre:

Max. vzdialenosť zdroja zvuku: 30m

Polomer reproduktorovej kružnice: 2,3m

Poloha zdroja zvuku: *azimut* = 68,2° *vzdialenosť* = 2m

Maximálny rád odrazov: 5

Použitá reproduktorová konfigurácia: 5.1 ITU-R BS 775 surround formát

Zvolené filtre: implicitné

Materiál jednotlivých stien:

- pred poslucháčom: záves 2
- pravá strana poslucháča: omietka
- za poslucháčom: sadrokarton
- ľavá strana poslucháča: omietka

Simulácia bola vykonaná najprv bez použitých filtrov, kedy bol signál po odraze násobený širokopásmovým koeficientom odrazivosti pre daný materiál a následne s aplikovanými filterami

Panoramovanie zdroja zvuku 2

Simulácia pre nastavené parametre:

Max. vzdialenosť zdroja zvuku: 30m

Polomer reproduktorovej kružnice: 2,3m

Poloha zdroja zvuku: *azimut* = 68,2° *vzdialenosť* = 18m

Maximálny rád odrazov: 5

Použitá reproduktorová konfigurácia: 5.1 ITU-R BS 775 surround formát

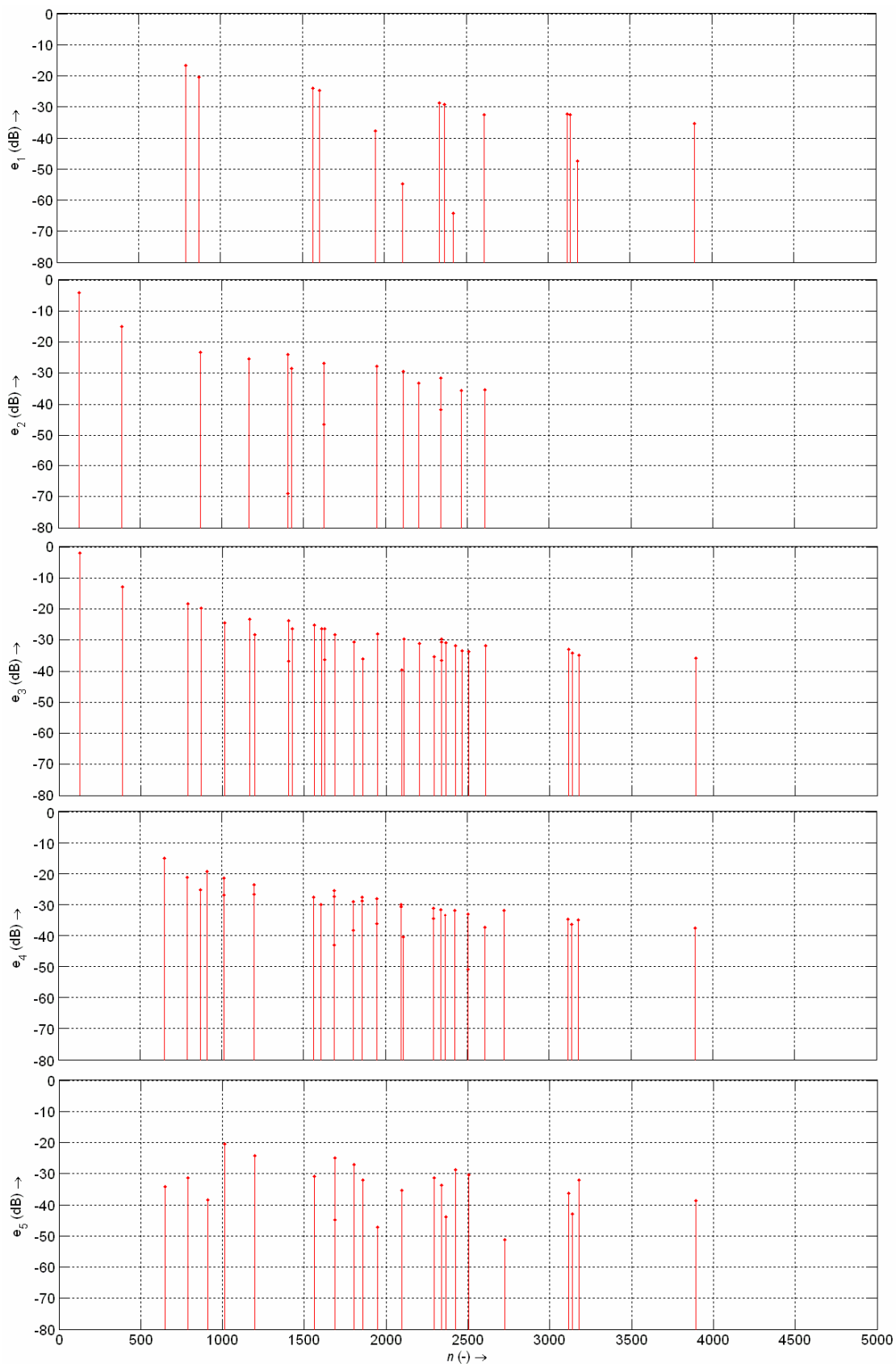
Zvolené filtre: implicitné

Materiál jednotlivých stien:

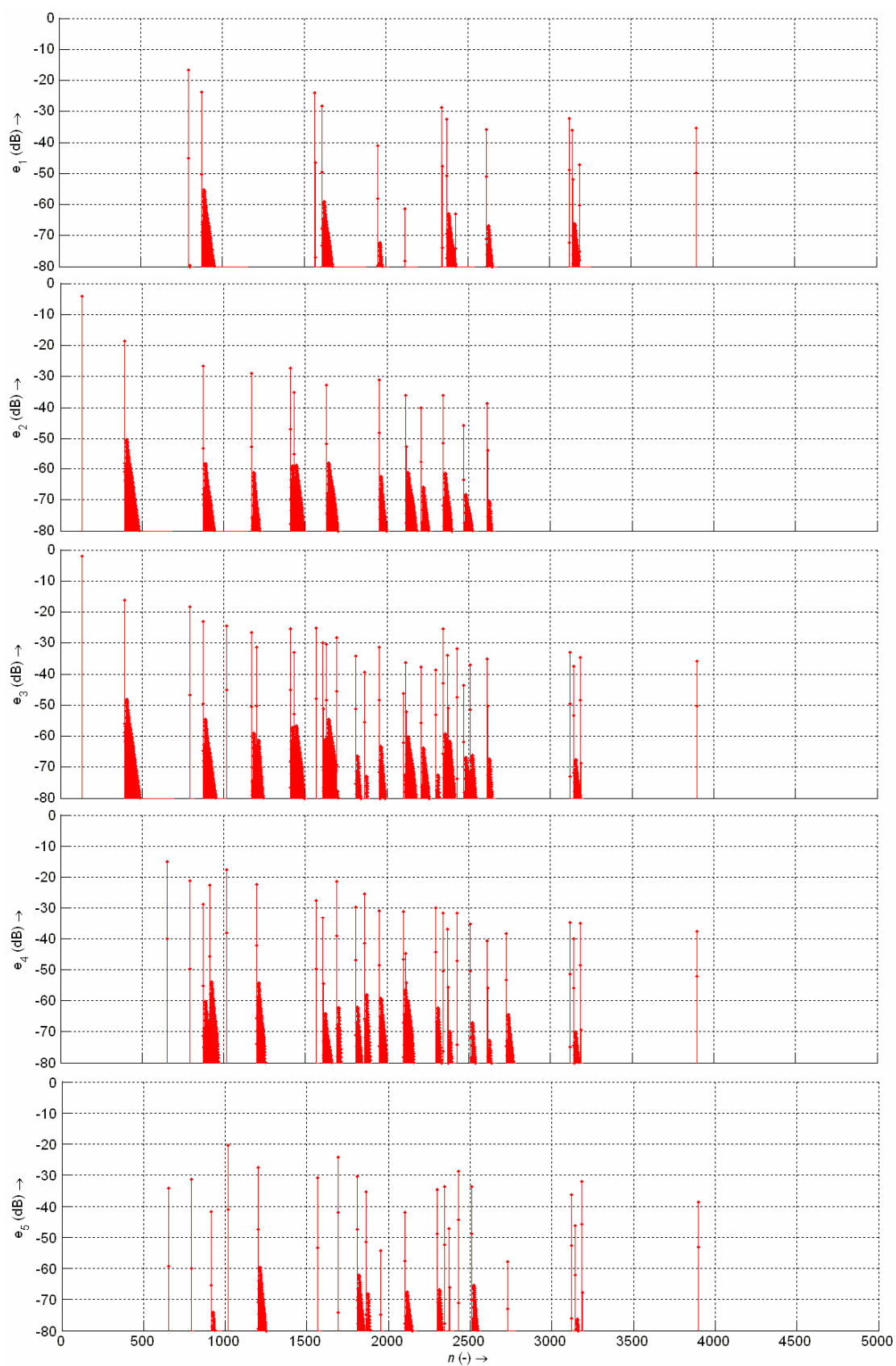
- pred poslucháčom: záves 2
- pravá strana poslucháča: omietka
- za poslucháčom: sadrokarton
- ľavá strana poslucháča: omietka

Simulácia bola vykonaná najprv bez použitých filtrov, kedy bol signál po odraze násobený širokopásmovým koeficientom odrazivosti pre daný materiál a následne s aplikovanými filterami

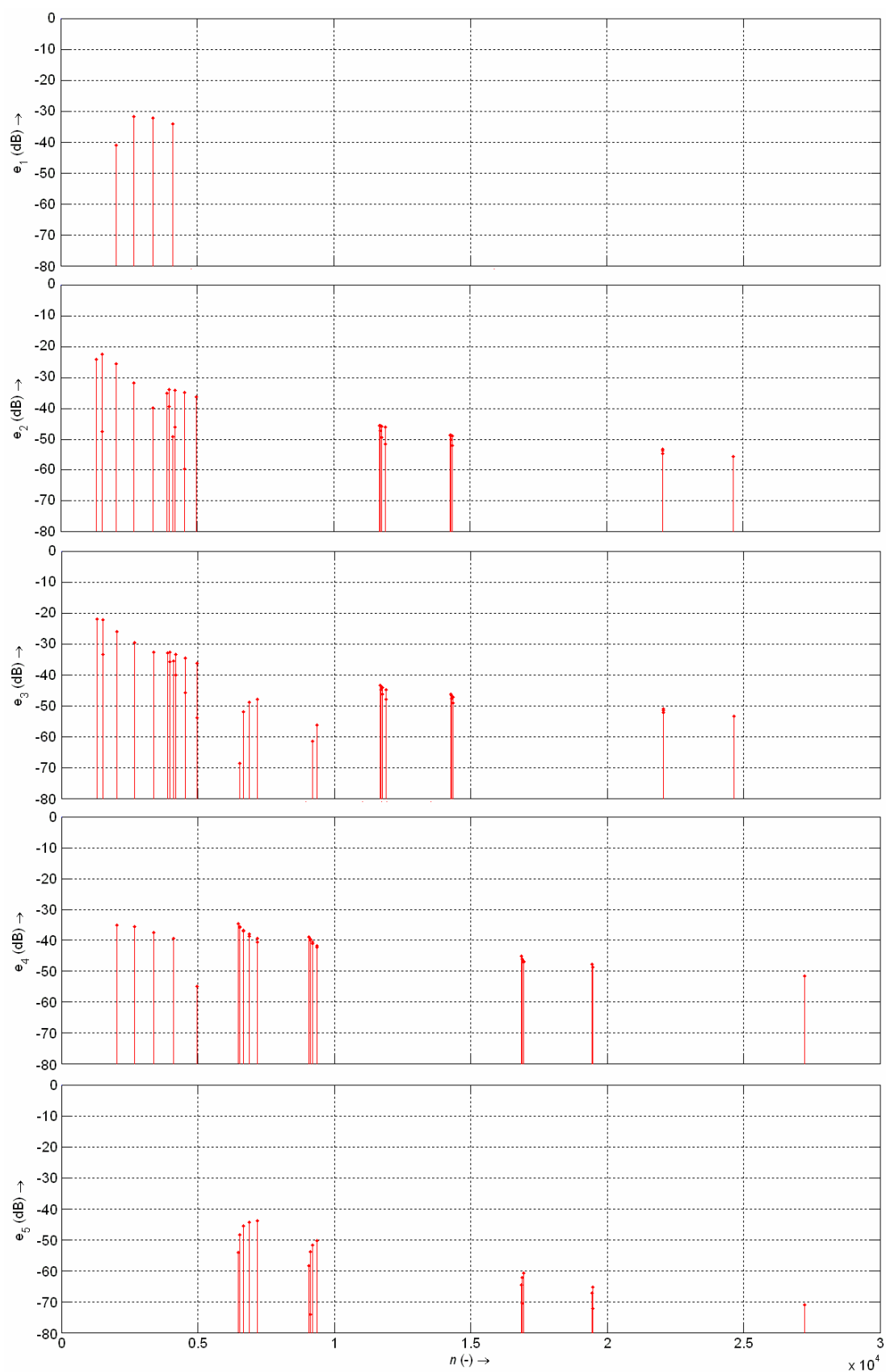
Impulzová odozva reproduktorov pre panoramovanie zdroja zvuku 1 (bez použitých filtrov)



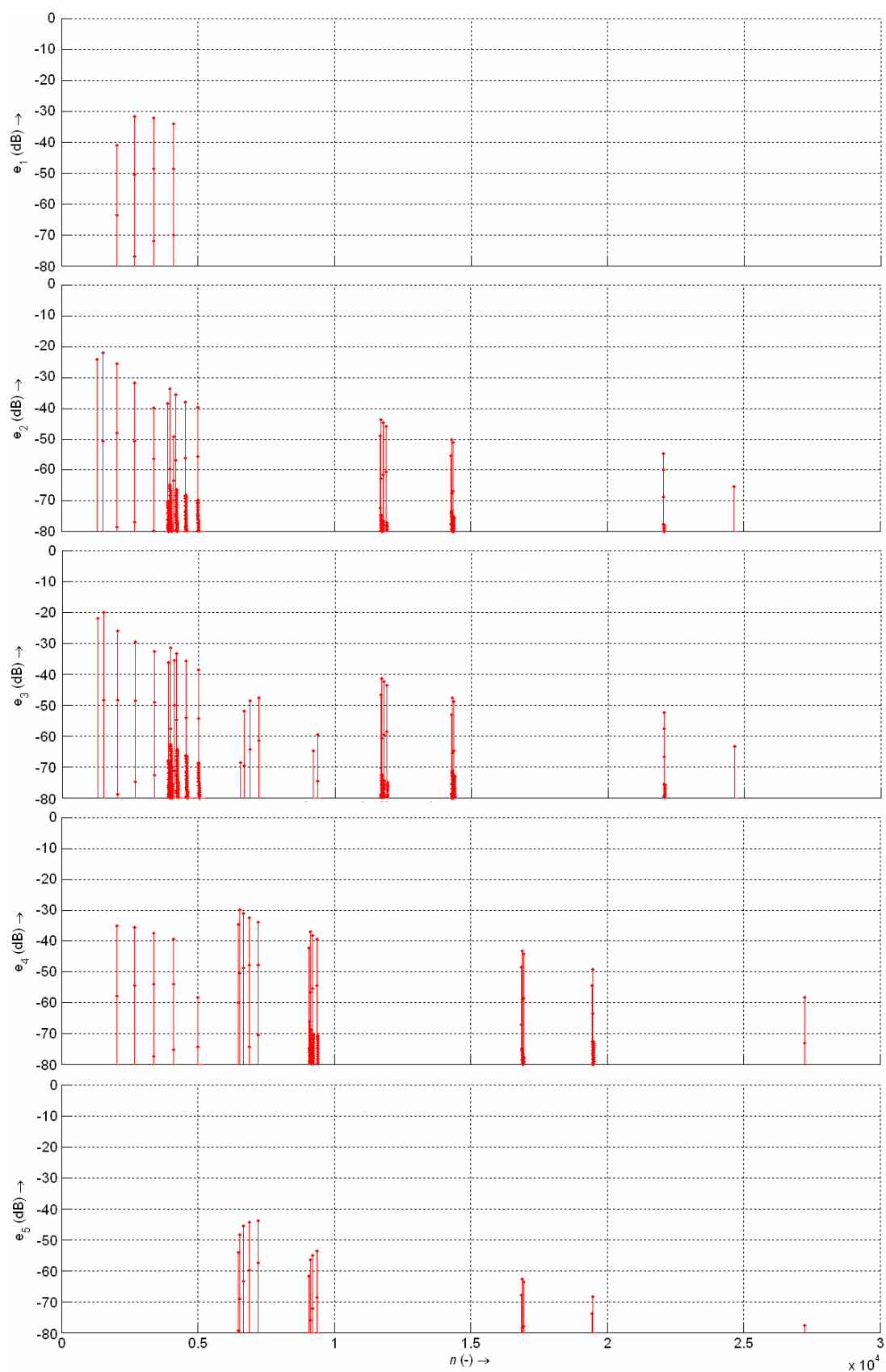
Impulzová odozva reproduktorov pre panoramovanie zdroja zvuku 1 (s použitými filtermi)



Impulzová odozva reproduktorov pre panoramovanie zdroja zvuku 2 (bez použitých filtrov)



Impulzová odozva reproduktorov pre panoramovanie zdroja zvuku 2 (s použitými filtermi)



Príloha D Obsah priloženého CD

- Elektronická verzia bakalárskej práce vo formáte pdf
- Aplikácia pre simuláciu posluchového priestoru
- Aplikácie pre panoramovanie zdroja zvuku
- Príklad simulácií pre obe aplikácie s popisom