

Panoramovanie zdroja zvuku s možnosťou zmeny jeho zdanlivej vzdialenosti

Sound source panning with the possibility of distance rendering

Kristián Orlovský, Miroslav Balík

kristian.orlovsky@phd.feec.vutbr.cz, balik@feec.vutbr.cz

Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií VUT v Brně.

Abstrakt: Je popísaných viacero metód umožňujúcich panoramovanie azimutu zdroja zvuku. Tento článok popisuje metódu špekulatívneho mapovania vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča v horizontálnej rovine (tzv. distance rendering) pomocou ich umiestnenia do virtuálnej miestnosti pravouhlého tvaru a simulácie šírenia zvukovej vlny v horizontálnej rovine od zdroja zvuku k poslucháčovi v tejto miestnosti. Článok popisuje algoritmus výpočtu a simulácie šírenia zvukovej vlny v uzavretom priestore a taktiež popisuje návrh rozmerov a topológie virtuálnej miestnosti, v ktorej sú umiestnení zdroj zvuku a poslucháč. Táto metóda bola aplikovaná v prostredí MATLAB návrhom aplikácie pre panoramovanie zdroja zvuku.

Abstract: There are more methods described for azimuth panning of the sound source. This article describes the method for speculative rendering of distance between sound source and listener in horizontal plane by their location in the virtual room of rectangular shape and simulation of sound waves propagation in the horizontal plane from the sound source to the listener in this room. This article describes an algorithm of calculation and simulation of sound waves in a closed space, and also describes the design of dimensions and topology of this virtual room, in which the sound source and listener are placed. This method was applied in MATLAB by the design of application for sound source panning.

Panoramovanie zdroja zvuku s možnosťou zmeny jeho zdanlivej vzdialenosti

Kristián Orlovský¹, Miroslav Balík¹

¹Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií VUT v Brne
Email: kristian.orlovsky@phd.feec.vutbr.cz, balik@feec.vutbr.cz

Abstrakt – Je popísaných viacero metód umožňujúcich panoramovanie azimutu zdroja zvuku. Tento článok popisuje metódu špekulatívneho mapovania vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča v horizontálnej rovine (tzv. distance rendering) pomocou ich umiestnenia do virtuálnej miestnosti pravouhlého tvaru a simulácie šírenia zvukovej vlny v horizontálnej rovine od zdroja zvuku k poslucháčovi v tejto miestnosti. Článok popisuje algoritmus výpočtu a simulácie šírenia zvukovej vlny v uzavretom priestore a taktiež popisuje návrh rozmerov a topológie virtuálnej miestnosti, v ktorej sú umiestnení zdroj zvuku a poslucháč. Táto metóda bola aplikovaná v prostredí MATLAB návrhom aplikácie pre panoramovanie zdroja zvuku.

1 Úvod

Panoramovaním zdroja zvuku rozumieme jeho umiestňovanie v priestore vzhľadom k poslucháčovi pomocou reproduktorovej sústavy. Dnešné panoramovacie zariadenia umožňujú panoramovať zdroj zvuku na základe jeho azimutu voči poslucháčovi a vyspelé zariadenia dokážu panoramovať takisto aj eleváciu zdroja zvuku voči poslucháčovi. Najbežnejšou technikou panoramovania azimutu zdroja zvuku je vektorovo-základňové amplitúdové panoramovanie (VBAP– Vector-Base Amplitude Panning), ktoré je popísané v [1, 2]. Často používanou technikou je aj Ambisonická technika panoramovania, ktorú popisuje [3, 4]. Tieto dve metódy nezahŕňajú možnosť simulovania vnemu vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča, tzv. distance rendering. Cieľom článku je popísať algoritmus, ktorý umožní nie len panoramovanie azimutu zdroja zvuku, ale aj simulovanie jeho vzdialenosti od poslucháča (distance rendering) a takto nasimulovanú pozíciu potom reprodukovat' pomocou multikanálovej reproduktorovej sústavy.

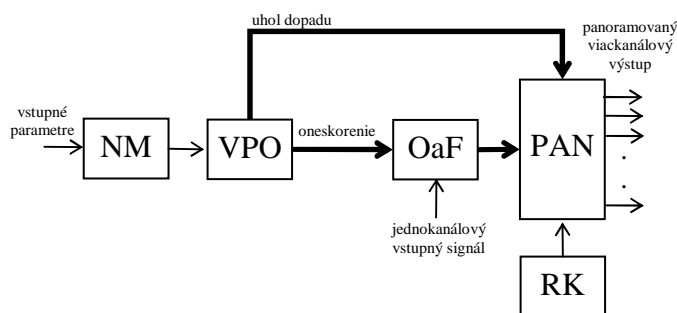
Pre ľudský sluch je odhad vzdialenosti zdroja zvuku značne závislý na prostredí, v ktorom sa nachádzame ako aj na charaktere samotného zvuku (čistý tón s konštantnou frekvenciou alebo signál s určitou šírkou pásma). Keď sa poslucháč aj zdroj zvuku nachádzajú vo voľnom poli (bezodrazový priestor), tak je odhad závislý na intenzite zvuku a parametroch prostredia, ktorým sa zvuková vlna šíri (vlhkosť, teplota apod.). Samotný odhad je závislý na doterajších skúsenostiach. Pri prvotnej expozícii zvuku v neznámom prostredí totiž nie je možné presne odhadnúť vzdialenosť zdroja zvuku od poslucháča. Na rozdiel od voľného poľa poskytuje uzavretý priestor dodatočné informácie o polohe zdroja zvuku, ktorými sú odrazy zvukových vln od prekážok. Vďaka tomu je možné v takomto

prostredí jednoznačnejšie a s väčšou presnosťou určiť vzdialenosť poslucháča od zdroja zvuku [5].

V tomto článku bude popísaný návrh algoritmu, ktorý umožní špekulatívne mapovanie vzdialenosti zdroja zvuku v horizontálnej rovine pomocou umiestnenia poslucháča aj zdroja zvuku do virtuálnej miestnosti pravouhlého tvaru s premennými rozmermi. Tieto rozmery budú závislé na konkrétnej mapovanej vzdialenosti. Simulovaním šírenia zvukovej vlny v tejto virtuálnej miestnosti tak získame určité množstvo prvotných zvukových odrazov (v horizontálnej rovine), ktoré okrem priamej vlny poskytnú poslucháčovi dodatočné informácie o vzdialenosti zdroja zvuku, čím sa zlepší jeho vnem danej vzdialenosti. Algoritmus vypočíta a simuluje zvolené množstvo zvukových odrazov v horizontálnej rovine pomocou viackanálovej reproduktorovej sústavy. Túto problematiku objasňuje 2. kapitola tohto článku. Návrh spomínanej virtuálnej miestnosti ako aj jej topológie popisuje kapitola č. 3. Tento prístup vychádza z návrhu algoritmu navrhnutého pre simuláciu posluchového prostredia, ktorý bol riešený v diplomovej práci [6]. Článok taktiež popisuje aplikovanie panoramovacej metódy v prostredí MATLAB vytvorením aplikácie pre panoramovanie zdroja zvuku.

2 Simulovanie šírenia zvukovej vlny

Popisované špekulatívne mapovanie vzdialenosti, ktoré spočíva v simulovaní šírenia zvukovej vlny v uzavretom priestore, môžeme rozdeliť do niekoľkých základných krokov, ktoré popisuje bloková schéma na obrázku 1:



Obrázok 1: Bloková schéma simulovania šírenia zvukovej vlny v uzavretom posluchovom priestore

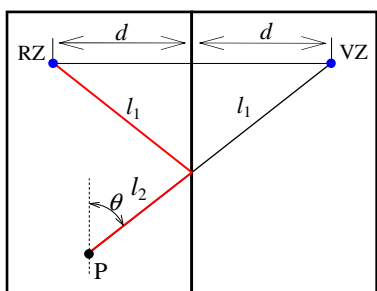
Prvým krokom algoritmu popísaného blokovou schémou na obrázku 1 je návrh miestnosti (blok NM). Na základe panoramovanej vzdialenosti zdroja zvuku

od poslucháča sa navrhnu rozmiery pravouhlej miestnosti a jej topológia (umiestnenie poslucháča a zdroja zvuku v danej miestnosti). Simulovaním šírenia zvukovej vlny v tejto miestnosti dosiahneme vnem vzdialenosti panoramovaného zdroja zvuku od poslucháča. Pre takto navrhnutú topológiu miestnosti sa v druhom kroku (blok VPO- výpočet parametrov odrazov) realizuje výpočet parametrov zvukových vln, ktoré dopadajú k poslucháčovi ako odrazené od stien miestnosti. Jeho výsledkom je uhol dopadu zvukovej vlny, vzdialenosť, ktorú vlna musí uraziť k poslucháčovi a aj informácia o stenách, ktorými sa táto zvuková vlna musela odraziť, aby dosiahla poslucháča. Výpočet týchto informácií je možné realizovať rôznymi metódami, ako je obrazová metóda [7, 8, 9] alebo metóda ray-tracing [9, 10] a pod. V ďalšom bloku realizujúcom oneskorenie a filtráciu (blok OaF) vstupného monofónneho zvukového signálu sa vytvorí zvukový signál pre každý simulovaný odraz. Takto upravené signály jednotlivých zvukových odrazov sa panoramujú zvolenou panoramovacou metódou v bloku PAN podľa ich uhla dopadu k poslucháčovi a požadovanej reproduktorovej konfigurácie (blok RK). Takto panoramované signály jednotlivých odrazov pre príslušné reproduktorové kanály sčítame a vo výsledku tak dostávame na výstupe zvukový signál pre jednotlivé reproduktorové kanály.

2.1 Výpočet parametrov odrazov zvukovej vlny

2.1.1 Obrazová metóda

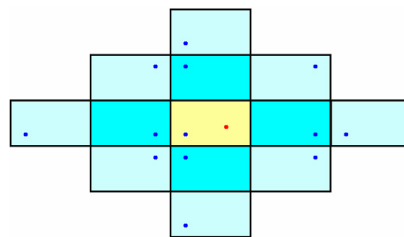
Táto metóda umožňuje výpočet parametrov dopadu zvukových vln k poslucháčovi po ich odrazení od stien uzavretého posluchového priestoru. Je efektívna a účinná, čo zaručuje, že budú nájdené všetky odrazy do zvoleného kritéria. Princíp metódy spočíva v reprezentovaní zvukovej vlny odrazenej od stien miestnosti, ako priamky, spájajúcej virtuálny zdroj zvuku umiestnený vo virtuálnej miestnosti s poslucháčom [9]. Túto situáciu bližšie popisuje obrázok 2.



Obrázok 2: Znázornenie princípu výpočtu vzdialenosti, ktorú musí prekonať zvuková vlna na ceste od reálneho zdroja zvuku (RZ) ku poslucháčovi (P) pomocou virtuálneho zdroja zvuku (VZ) nájdeného zrkadlením cez stenu.

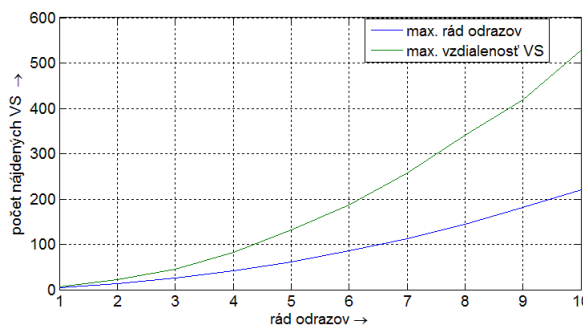
Vzdialenosť, ktorú musí prekonať zvuková vlna od reálneho zdroja zvuku (RZ) k poslucháčovi, je rovná $l_1 + l_2$, čo predstavuje takisto aj vzdialenosť medzi virtuálnym zdrojom zvuku (VZ) a poslucháčom (P). Uhol dopadu odrazenej vlny θ možno vypočítať na základe známych súradníc P, VZ

a rozmerov miestnosti pomocou goniometrických funkcií. Súradnice VZ vypočítame zo známej polohy RZ pomocou zrkadlenia tak, že obraz (VZ) sa za stenou zrkadlenia nachádza v rovnakej vzdialenosti ako RZ pred ňou, pričom spojnica týchto bodov (RZ a VZ) je kolmá na konkrétnu stenu zrkadlenia (obrázok 2). Polohy jednotlivých virtuálnych zdrojov potom nájdeme odražením všetkých zdrojov zvuku (reálneho aj virtuálnych) cez všetky odrazivé plochy (v tomto prípade steny miestnosti) do zvoleného kritéria, čo môžeme vidieť na obrázku 3.



Obrázok 3: Dvojmerné rozvinutie miestnosti pomocou zrkadlenia cez všetky steny, čím vznikajú nové virtuálne zdroje (modré body) pre výpočet prvotných odrazov.

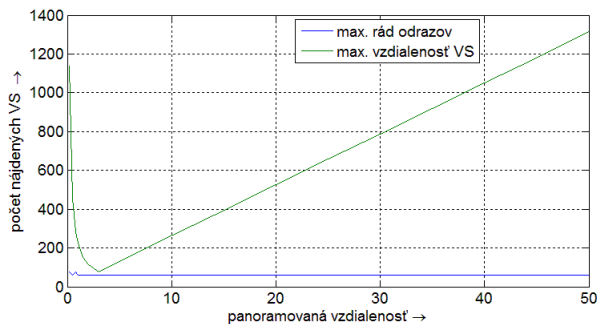
Tento algoritmus je rekurzívny. Odraženie virtuálneho zdroja cez steny vytvorí nové virtuálne zdroje, ktoré sa následne odražia ďalej cez všetky steny. Takto získame potrebný počet odrazov na dosiahnutie vnemu vzdialenosti panoramovaného zdroja zvuku. Podmienka ukončenia algoritmu hľadania virtuálnych zdrojov môže byť nájdenie virtuálnych zdrojov zvuku do zvoleného maximálneho rádu odrazov, alebo nájdenie virtuálnych zdrojov zvuku do zvolenej maximálnej vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča (maximálna vzdialenosť virtuálneho zdroja zvuku od poslucháča) [9]. Vzhľadom na tvar miestnosti je však vhodnejšia podmienka dosiahnutia maximálneho rádu odrazov (čo dokazujú aj obrázky 4 a 5).



Obrázok 4: Závislosť počtu nájdených VS na parametre kritéria vyhľadávania pre obe kritéria vyhľadávania (pre max. rád odrazov je to samotný max. rád odrazov a pre maximálnu vzdialenosť je to súčin max. rádu odrazov a rozmeru dĺžky miestnosti)

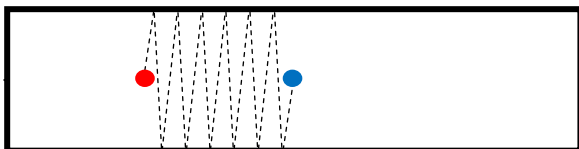
Ako naznačuje obrázok 5, pri použití druhej podmienky by počet generovaných odrazov narastal so zväčšovaním mapovanej vzdialenosti a zbytočne tak zaťažoval výpočet ďalšími potrebnými úkonmi (hlavne filtrovaním a panoramovaním signálu). Naproti tomu pri generovaní

zvukových odrazov do zvoleného maximálneho rádu dostávame konštantný počet odrazov pre všetky panoramované vzdialenosti.



Obrázok 5: Závislosť počtu nájdených VS na mapovanej vzdialenosti pre obe kritériá vyhľadávania (pre max. rád odrazov je to 5. rád odrazov a pre maximálnu vzdialenosť je to teda 5-násobok dĺžky miestnosti)

Rozdiel medzi týmito dvoma kritériami tvoria odrazy vzniknuté mnohonásobným odrážaním zvukovej vlny pozdĺž kratšej steny. Tieto odrazy by síce boli pod hranicou maximálnej vzdialenosti, ale vzhľadom na fakt, že dĺžka virtuálnej miestnosti môže byť niekoľko krát väčšia, než jej šírka, jednalo by sa o mnohonásobné odrazy medzi dvoma dlhšími stenami (obrázok 6), ktorých výsledná energia (vzhľadom na fakt, že musia byť filtrované toľko krát, koľko krát sa odrazili od nejakej steny) bola malá a vyžadovala väčší výpočtový výkon ako odraz nižšieho rádu s väčšou výslednou energiou.



Obrázok 6: Znáznornenie mnohonásobného odrážania zvukovej vlny pozdĺž kratšej steny

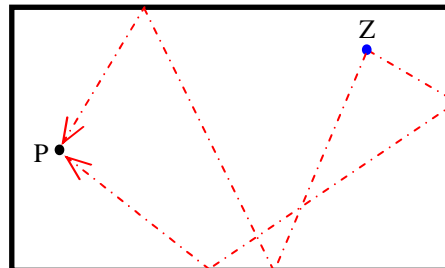
2.1.2 Porovnanie obrazovej metódy s metódou Ray-Tracing

Metóda ray-tracing je v praxi využívaná častejšie, pretože oproti obrazovej metóde je jej použitie pri zložitých tvaroch posluchových priestorov jednoduchšie. V metóde ray-tracing je emitovaný konštantný počet lúčov do rôznych smerov priestoru s rovnakým uhlom od daného zdrojového bodu (zdroja zvuku). Každý lúč je ňahovaný pomocou lineárnej extrapolácie a zrkadlového odrazu, kým nedosiahne okolie poslucháča (obrázok 7) [9]. Sledujú sa trasy týchto lúčov a tie strácajú svoju energiu s každým odrazom podľa absorpčných koeficientov povrchov daných stien. Keď lúče zasiahnu povrch steny, ich nový smer sa vypočíta podľa Snellovho zákona [9]:

$$|\sin \theta_i| = |\sin \theta_o|, \quad (1)$$

kde θ_i predstavuje uhol dopadu a θ_o predstavuje uhol odrazu zvukovej vlny ku kolmici na rovinu dopadu. 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 [9].



Obrázok 7: Princíp vyhľadávania odrazov metódou ray-tracing. Od zdroja zvuku (Z) sa vyhľadávajú cesty k poslucháčovi (P) pomocou tzv. lúčov.

Pre porovnanie teda metóda ray-tracing nemusí nájsť všetky zvukové odrazy, ktoré by našla obrazová metóda. Je však jednoduchšia na programovanie a je takisto rýchlejšia. Pre naše účely je ale vhodnejšia obrazová metóda, ktorá nájde všetky odrazy do zvoleného maximálneho rádu. Takisto jednoduchosť simulovaného posluchového prostredia umožňuje jednoduché naprogramovanie a rýchly výpočet parametrov odrazených zvukových vln pomocou tejto metódy.

2.2 Oneskorenie zvukových vln jednotlivých zvukových odrazov

Oneskorenie signálu daného zvukového odrazu o príslušný počet vzorkov n závisí na vzdialenosti urazenej zvukovou vlnou od zdroja zvuku k poslucháčovi a na vzorkovacej frekvencii podľa vzťahu [6]:

$$n = \left\lceil \frac{l}{c} f_{vz} \right\rceil, \quad (2)$$

kde l je vzdialenosť urazená zvukovou vlnou, c je rýchlosť zvuku v danom priestore a f_{vz} je vzorkovacia frekvencia vstupného monofónneho zvukového signálu. Zátvorky značia zaokrúhlenie na celé číslo smerom nahor. Takto získame časové rozdiely medzi jednotlivými zvukovými vlnami prichádzajúcimi do ľudského ucha.

2.3 Zvuková pohltivosť materiálov

Virtuálna miestnosť, v ktorej sú umiestnení zdroj zvuku a poslucháč predstavuje pravouhlú miestnosť, ktorá je vymedzená štyrmi stenami. Od týchto stien sa odrážajú zvukové vlny šíriace sa od zdroja zvuku, ktoré potom dopadajú k poslucháčovi a poskytujú mu dodatočné informácie o polohe zdroja zvuku. Steny sú charakterizované frekvenčne závislým koeficientom pohltivosti, ktorý sa líši pre rôzne materiály. Napodobenie tohto koeficientu pohltivosti je dôležité pre výsledný vnem priestoru okolo poslucháča, aby

sa tento priestor javil reálny. Takisto je dôležité, aby neovplyvňoval do zásadnej miery frekvenčné spektrum výsledného panoramovaného signálu (aby neboli zvýrazňované niektoré frekvenčné pásma zvukového signálu), pokiaľ to nie je priamo vyžadované.

Zvuková pohltivosť môže byť simulovaná číslicovými filtermi, ktorých modulová frekvenčná charakteristika bude aproximovať pohltivé vlastnosti materiálov. Pri panoramovaní zdroja zvuku sa nevyžaduje presná simulácia akustických vlastností virtuálneho posluchového priestoru, preto môžeme túto časť algoritmu zjednodušiť menšou presnosťou frekvenčnej charakteristiky použitých filtrov, čím dosiahneme nižšiu výpočtovú náročnosť algoritmu. Môže byť zanedbaný aj fázový posun, ktorý tieto filtre vytvárajú, keďže prioritou algoritmu nie je presné simulovanie posluchového priestoru.

Pre simulácie boli použité číslicové filtre typu FIR aj IIR. Pre algoritmus boli následne použité filtre typu IIR, ktoré oproti filtrom typu FIR majú veľkú výhodu v nižšej výpočtovej náročnosti (IIR filtre sú 3. až 6. rádu, pričom rád FIR filtrov by pri rovnakej presnosti dosahoval hodnoty rádovo aj niekoľko stoviek) a z pohľadu subjektívneho vnemu zneli veľmi podobne ako filtre typu FIR. Fázová frekvenčná charakteristika filtrov IIR (príloha A) môže byť zanedbaná, keďže ako už bolo spomenuté, hlavnou úlohou algoritmu nie je simulovať presné vlastnosti posluchového prostredia, ale dosiahnuť vnem vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča. Navyše tieto fázové charakteristiky nevykazujú veľké fázové zmeny (rádovo jednotky stupňov). V simuláciách boli použité 3 filtre aproximujúce pohltivé vlastnosti troch materiálov. Ich návrh vychádzal z koeficientov pohltivosti pre tieto materiály nameraných podľa medzinárodnej normy ČSN EN ISO 354 [11]. Ich hodnoty pre oktávové frekvencie uvádza tabuľka 1:

Tabuľka 1: Hodnoty koeficientov pohltivosti použitých materiálov uvedené pre oktávové frekvencie [6].

Materiál	činiteľ zvukovej pohltivosti $\alpha_p(-)$ pre vybrané oktávové frekvencie (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Omietka	0,10	0,10	0,09	0,10	0,11	0,11
Záves	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Sadrokartón	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Koeficienty pohltivosti α_p určujú mieru pohltienia zvukovej energie materiálom pri jej dopade na daný materiál. Pre návrh filtra je potrebná miera energie zvukovej vlny odrazenej od materiálu (koeficient odrazivosti). Ten vypočítame ako pomer rozdielu celkovej intenzity dopadajúcej na daný materiál I_c a intenzity pohltenej materiálom I_p ku celkovej intenzite dopadajúcej na materiál I_c :

$$\alpha_o = \frac{I_c - I_p}{I_c} = 1 - \frac{I_p}{I_c} = 1 - \alpha_p, \quad (3)$$

kde α_o je koeficient odrazivosti daného materiálu. Tento koeficient je potrebné ďalej previesť

z energetickej oblasti do napäťovej, v ktorej pracujú číslicové filtre:

$$\alpha_{o_norm} = \sqrt{1 - \alpha_p}, \quad (4)$$

kde α_{o_norm} už sú koeficienty odrazivosti, na základe ktorých boli navrhnuté jednotlivé číslicové filtre [6]. Pribeh ich frekvenčnej charakteristiky je aproximáciou nameraných bodov z tabuľky 1. Ich modulové frekvenčné charakteristiky ako aj fázové frekvenčné charakteristiky sú zobrazené v prílohe A. Signál, ktorý bude reprezentovať konkrétny odraz sa filtruje toľko krát, koľko krát sa od steny odrazil. Panoramovací algoritmus na základe informácie o stene, od ktorej sa vlna odrazila vyberie filter, ktorým tento signál spracuje [6].

2.4 Úprava intenzity zvukového signálu dopadajúceho k poslucháčovi

Energia signálu jednotlivých zvukových vln, dopadajúcich k poslucháčovi, sa upravuje na základe princípu šírenia zvukových vln od zdroja zvuku hmotným prostredím rovnomerne v guľových vlnoplochách. Tie sú na povrchu charakterizované rovnakou intenzitou 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 [12]:

$$P = 4\pi r_1^2 \cdot I_1 = 4\pi r_2^2 \cdot I_2, \quad (5)$$

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

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (6)$$

Podľa tohto výrazu intenzita zvuku klesá so štvorcem vzdialenosti. Jeho úpravami dostaneme vzťah popisujúci zmenu hladiny intenzity zvuku spôsobenú zmenou vzdialenosti od zdroja zvuku [12]:

$$L_p = 20 \log \frac{r_2}{r_1}. \quad (7)$$

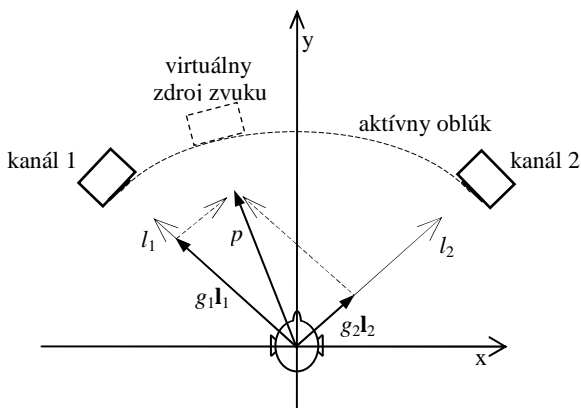
Pomocou tohto výrazu algoritmus riadi amplitúdu signálov jednotlivých odrazov a simuluje tým šírenie zvukovej vlny priestorom. Ako referenčná vzdialenosť (r_1) je zvolená vzdialenosť 1m. Vstupný monofónny signál tak figuruje ako signál s intenzitou, ktorá by bola nameraná vo vzdialenosti 1m od tohto zdroja zvuku. Pre výpočet poklesu hladiny intenzity zvuku pre daný odraz L_p tak na miesto vzdialenosti r_2 je dosadená vzdialenosť, ktorú musí zvuková vlna prekonať ku poslucháčovi v metroch. Vzťah 4.3 tak môže byť vyjadrený nasledovne:

$$L_p = 20 \log r_2. \quad (8)$$

2.5 Panoramovanie zvukových vln

Zvukové vlny, získané v predchádzajúcich podkapitolách, sú následne panoramované zvolenou metódou pre požadovanú reproduktorovú topológiu. Je potrebné použiť viacanálovú reproduktorovú topológiu, ktorej reproduktory budú umiestnené na reproduktorovej kružnici okolo poslucháča. Nedostatočná je dvojkanálová reproduktorová konfigurácia, ktorá neumožňuje pokrytie celej horizontálnej posluchovej roviny poslucháča.

Pre otestovanie navrhnutého algoritmu špekulatívneho mapovania vzdialenosti zdroja zvuku bola použitá metóda vektorovo-základňového panoramovania (VBAP). V jednoduchej dvojkanálovej amplitúdovej panoramovacej metóde vyžarujú dva reproduktory súvislé signály, ktoré môžu mať rozličné amplitúdy. Poslucháč potom vníma ilúziu jedného sluchového bodu (virtuálny zdroj zvuku), umiestneného v dvojrozmernej zóne určenej lokalitami reproduktorov a poslucháčom, riadením amplitúd signálu reproduktorov [1], čo popisuje obrázok 8.



Obrázok 8: VBAP pre dvojkanálovú stereofónnu reproduktorovú konfiguráciu

V dvojrozmernej VBAP metóde je dvojkanálová stereofónna reproduktorová konfigurácia vyjadrená ako dvojrozmerná vektorová základňa, definovaná jednotkovými vektormi [1]:

$$\mathbf{l}_1 = [l_{11} \quad l_{12}]^T \quad \text{a} \quad \mathbf{l}_2 = [l_{21} \quad l_{22}]^T, \quad (9)$$

ktoré smerujú k jednotlivým reproduktorom 1 a 2, čo je zrejmé z obrázka 8. Tieto vektory sú stĺpcové. Jednotkový vektor [1]:

$$\mathbf{p} = [p_1 \quad p_2]^T, \quad (10)$$

ktorý smeruje k virtuálnemu zdroju zvuku, môže byť chápaný ako lineárne spojenie reproduktorových vektorov (\mathbf{l}_1 a \mathbf{l}_2) [1]:

$$\mathbf{p} = g_1 \mathbf{l}_1 + g_2 \mathbf{l}_2. \quad (11)$$

V rovnici (11) sú g_1 a g_2 v postavení zosilňovacích činiteľov, ktoré môžu byť chápané ako nezáporné skalárne premenné. Rovnicu môžeme písať aj v maticovej forme [1]:

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

$$\mathbf{g} = [g_1 \quad g_2] \quad (13)$$

$$\mathbf{L}_{12} = [\mathbf{l}_1 \quad \mathbf{l}_2]^T. \quad (14)$$

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

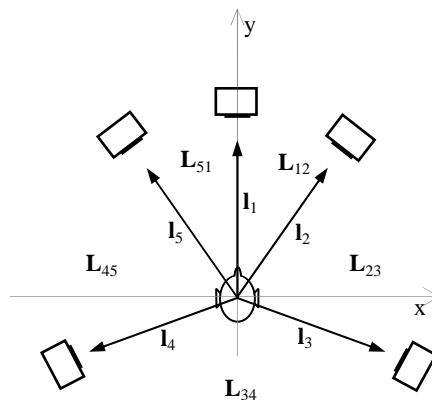
$$\mathbf{g} = \mathbf{p}^T \cdot \mathbf{L}_{12}^{-1} = [p_1 \quad p_2] \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (15)$$

Táto inverzná matica \mathbf{L}_{12}^{-1} musí spĺňať [1]:

$$\mathbf{L}_{12} \cdot \mathbf{L}_{12}^{-1} = \mathbf{I}, \quad (16)$$

kde \mathbf{I} je jednotková matica. \mathbf{L}_{12}^{-1} existuje, keď $\varphi_0 \neq 0^\circ$ a $\varphi_0 \neq 90^\circ$. Tieto dva kolízne prípady ($\varphi_0 = 0^\circ$ a $\varphi_0 = 90^\circ$) odpovedajú pomerne nezaujímavým stereofónnym reproduktorovým topológiám, pre ktoré môže byť koncipované jednorozmerné VBAP.

Pre viacanálové reproduktorové konfigurácie pozostáva reproduktorový systém z viacerých reproduktorových základní, ktoré si navzájom konkurujú. Jednotlivé reproduktorové základne sú tvorené susednými reproduktormi (obrázok 9) [1].



Obrázok 9: Reproduktorové základne vo VBAP pre viacanálovú reproduktorovú konfiguráciu

Takto nám vznikne zjednotenie aktívnych oblúkov jednotlivých reproduktorových základní. Virtuálny zdroj zvuku sa tak potom bude nachádzať na aktívnom oblúku dvoch konkrétnych reproduktorov (susedných). Použitie neprekrývajúcich sa aktívnych oblúkov poskytuje súvislú zmenu zosilňovacích činiteľov pri panoramovaní pohyblivého zdroja zvuku. Pár, ktorý bude vytvárať konkrétny virtuálny zdroj zvuku môže byť vybraný počítaním zosilňovacích činiteľov v rovnici (15) používajúcej všetky vektorové základne a výberom základne, ktorá nevykazuje žiadne

záporné činitele. Samotný virtuálny zdroj zvuku tak bude vytváraný jednou zo základní, pričom ostatné základne nevysielaajú žiaden signál [1].

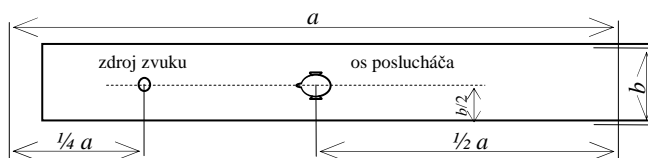
3 Návrh virtuálnej miestnosti

Ako bolo spomenuté v úvode, vnem vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča je v algoritme docielený spresnením tejto vzdialenosti poslucháčovi pomocou simulovania šírenia zvukovej vlny v uzavretom priestore. Ľudský sluch tak môže oveľa presnejšie lokalizovať polohu zdroja zvuku (azimut aj vzdialenosť) [12]. Aby bolo možné poskytnúť tieto dodatočné informácie o polohe zdroja zvuku, je potrebné umiestniť zdroj zvuku aj poslucháča do vhodne navrhnutého virtuálneho uzavretého priestoru s konkrétnou topológiou. Pretože cieľom algoritmu nie je simulovať presné vlastnosti posluchového prostredia, ale dosiahnutie vnemu zdanlivej vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča, vystačíme si len so simulovaním zvukových odrazov v horizontálnej rovine. Navrhnutý priestor je reprezentovaný miestnosťou pravouhlého tvaru s danými rozmermi, kde sa nenachádzajú prekážky a steny sú dokonale hladké (nedochádza k difúznym odrazom) z materiálu, reprezentovaného frekvenčne závislým činiteľom pohltivosti. Takáto miestnosť slúži na generovanie zvoleného množstva zvukových odrazov potrebných pre interpretáciu vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča. Riadením rozmerov miestnosti, a tým aj celej jej topológie, získavame premenlivé posluchové prostredie, ktorým je možné doceliť vnem zdanlivej vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča. Tá sa v rozmeroch miestnosti prejaví konkrétne v jej dĺžke a a šírke b zvolíme ako konštantu. Táto konštantná šírka miestnosti nám zabezpečí krátku dobu dozvuku jednotlivých zvukových odrazov aj pre väčšie mapované vzdialenosti. Rozmery miestnosti a a b (viditeľné na obrázku 6) boli v našich simuláciách stanovené na:

$$a = 2d, \quad (17)$$

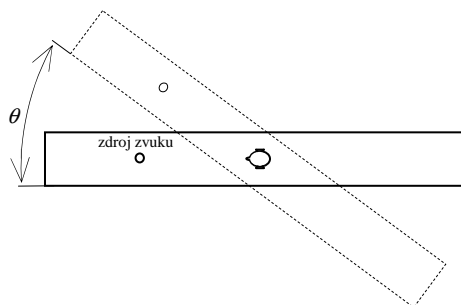
$$b = 6m, \quad (18)$$

pričom d je panoramovaná vzdialenosť zdroja zvuku. Takto vznikne prostredie, kde môžeme simulovať šírenie zvukovej vlny od zdroja zvuku umiestneného v danom bode k poslucháčovi umiestnenom v inom bode. Na základe množstva simulácií s cieľom dosiahnutia čo najlepšieho subjektívneho vnemu bola topológia zvolená podľa obrázka 10 [6]. Táto topológia je variabilná, umiestnenie poslucháča a zdroja zvuku v miestnosti závisí na mapovanej vzdialenosti a tým aj na rozmeroch miestnosti. Takto dosiahneme pomerovo podobné zvukové pole, a tým aj podobné vlastnosti posluchového priestoru pre rôzne mapované vzdialenosti. Voľba topológie bola zvolená s ohľadom na elimináciu vzniku určitých nežiaducich vplyvov, ktoré so sebou prináša poslech v uzavretom posluchovom priestore (vysoká doba a energia dozvuku vo veľkých miestnostiach, spektrálne farbenie zvuku pri umiestnení zdroja zvuku alebo poslucháča tesne v rohu miestnosti a pod.). V takejto miestnosti sa zvuková vlna šíri guľovými vlnoplochami všetkými smermi od zdroja zvuku k poslucháčovi, ktoré sa modelujú príslušnou panoramovacou metódou.



Obrázok 10: Topológia miestnosti pre panoramovanie zdroja zvuku s naznačenými polohami poslucháča a zdroja zvuku

Panoramovanie azimutu je v algoritme dosiahnuté natočením virtuálnej miestnosti so zdrojom zvuku okolo poslucháča o uhol θ , čo zobrazuje obrázok 11.



Obrázok 11: Znázornenie princípu panoramovania azimutu

Tento spôsob je jednoduchý na výpočet odrazov, ktorých rozloženie v danej miestnosti bude rovnaké, ako pri azimute $\theta = 0^\circ$, ale budú voči poslucháčovi a reproduktorovej sústave (ktorá má rovnako ako poslucháč nemennú, statickú polohu) natočené o príslušný uhol θ . V konečnom dôsledku to znamená, že algoritmus vypočíta parametre zvukových odrazov pre azimut $\theta = 0^\circ$ a k vypočítaným hodnotám sa pripočíta ešte azimut θ , o ktorý je zdroj zvuku natočený voči poslucháčovi a jeho osi.

4 Implementácia panoramovacej metódy v prostredí MATLAB

Popísaný algoritmus špekulatívneho mapovania vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča bol implementovaný v prostredí MATLAB, kde bola zrealizovaná aplikácia pre panoramovanie zdroja zvuku v horizontálnej rovine. Tá umožňuje simulovať umiestnenie zdroja zvuku v priestore pod zvoleným azimutom voči poslucháčovi a vo zvolenej vzdialenosti od poslucháča. Aplikácia nepracuje v reálnom čase. Pre túto aplikáciu bolo takisto vytvorené užívateľské rozhranie (GUI), umožňujúce nastaviť všetky parametre potrebné pre simuláciu (príloha B). Táto aplikácia panoramuje jednonábový vstupný zvukový signál na základe nastavených parametrov. Výstupom je viacnábový zvukový súbor formátu wav. V časti pre nastavenie topológie sa nastavuje maximálna vzdialenosť zdroja zvuku, ktorá na samotné panoramovanie nemá žiaden vplyv, slúži len pre zobrazenie topológie. Polomer reproduktorovej kružnice určuje vzdialenosť jednotlivých reproduktorov od poslucháča.

V časti nastavenia polohy zdroja zvuku sa nastavuje samotný azimut zdroja zvuku a jeho vzdialenosť voči poslucháčovi. Zvolenú topológiu si môžeme aj vykresliť do príslušnej časti GUI. Ďalej si môžeme nastaviť aj množstvo zvukových odrazov vznikajúcich vo virtuálnej miestnosti voľbou maximálneho rádu hľadaných odrazov. Aplikácia umožňuje panoramovanie pre reproduktorovú konfiguráciu zvolenú zo siedmich dostupných bežne používaných reproduktorových konfigurácií:

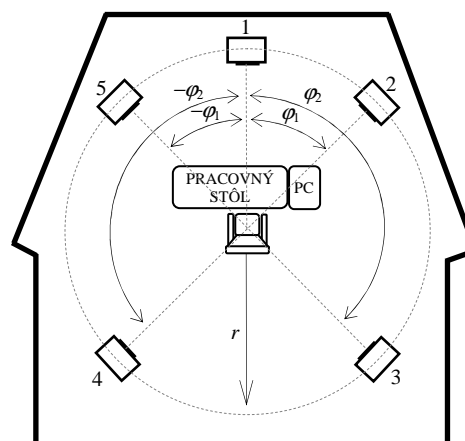
- 4-kanálový kvadrofónny surround formát
- 4-kanálový LCRS surround formát
- 5.1 ITU-R BS 775 surround formát
- 6.1 DTS-ES / DD-EX Surround Format
- 7.1 DD EX/True HD surround formát
- 7.1 DTS-HD surround formát
- 7.1 SDDS (Sony Dynamic Digital Sound) formát

Aplikácia umožňuje voľbu implicitných filtrov simulujúcich frekvenčne závislú pohltivosť stien virtuálnej miestnosti, alebo si môžeme navrhnúť svoje vlastné filtre. Ako implicitné filtre sú použité filtre, ktoré boli navrhnuté podľa koeficientov pohltivosti z tabuľky 1. Vlastné filtre sú koncipované ako sériová kombinácia nezávislých filtrov typu low-shelving (LSF) a high-shelving (HSF). Tieto filtre sú nižšieho rádu, dosahujú nižší čas výpočtu simulácií a umožňujú dostatočné pokrytie požadovaných tvarov frekvenčných charakteristík. Neposkytujú priamu voľbu daného materiálu, avšak tú pri panoramovaní zdroja zvuku nevyžadujeme. Prostredie tak nie je obmedzované počtom dostupných materiálov. Zmenou frekvenčných charakteristík týchto filtrov (LSF aj HSF) riadením medznej frekvencie f_m a zosilnenia v shelving oblasti G sa nastaví prostredie, v ktorom sa tento panoramovaný zdroj zvuku bude nachádzať.

V prílohe C je možné pozorovať impulzové odozvy reproduktorov pre konkrétnu panoramovanú situáciu (taktiež popisánú v prílohe C).

5 Testovanie navrhnutej metódy

Návrh popisovaného algoritmu špekulatívneho panoramovania zdroja zvuku na základe jeho azimutu a vzdialenosti si vyžadoval priebežné posluchové testy na overenie jeho 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 aktívne reproduktory GENELEC 1023A umiestnené vo výške hlavy poslucháča. Uprostred miestnosti bolo samotné pracovisko, zložené z pracovného stola, 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 samotný tvar a topológia miestnosti je zrejma z obrázka 12.



Obrázok 12: Topológia miestnosti, v ktorej boli vykonávané priebežné posluchové testy ($\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 135^\circ$)

Tieto posluchové testy boli vykonávané na základe subjektívneho vnemu a poľa neho sa postupne doladili všetky časti algoritmov pre spracovanie signálu (rozmary a topológia miestnosti, filtrácia signálu, pokles hladiny ak. tlaku spôsobený šírením zvuku guľovou vlnoplochou a pod.).

6 Záver

Panoramovanie azimutu zdroja zvuku umožňuje viacero známych a popísaných metód [1, 2, 3, 4]. Tento článok popisuje špekulatívne mapovanie vzdialenosti zdroja zvuku voči poslucháčovi, ktoré je možné realizovať pomocou umiestnenia zdroja zvuku a poslucháča do virtuálnej miestnosti a simulovaním šírenia zvukových vln v tejto miestnosti. Metóda bola navrhnutá ako súčasť diplomovej práce [6]. Popis metódy obsahuje návrh virtuálnej miestnosti, ktorej rozmary a topológia boli experimentálne navrhnuté a otestované na základe rozsiahleho množstva simulácií. Článok popisuje výber obrazovej metódy ako vhodnej pre výpočet parametrov odrazov s ohľadom na jej výpočtovú náročnosť a vplyv na ďalšie kroky algoritmu, aby ten nebol zbytočne zaťažovaný nepotrebnými úkonmi. Bol preskúmaný aj vplyv použitia FIR a IIR filtrov pre simuláciu frekvenčne závislej zvukovej pohltivosti, ktorým sú reprezentované materiály odrazivej plochy v miestnosti. Výsledkom bola voľba použitia filtrov typu IIR, ktoré subjektívne znejú veľmi podobne ako filtre typu FIR, ale podstatne znižujú potrebný výpočtový výkon algoritmu. Hoci ich fázová charakteristika nie je lineárna, jej nelinearita sa pohybuje v jednotkách stupňov, čo je zanedbateľné. Experimentálne bola zvolená kombinácia filtrov reprezentujúcich frekvenčne závislú zvukovú pohltivosť jednotlivých stien miestnosti, ktorá ovplyvňovala výsledné spektrum výstupného signálu len v minimálnej miere.

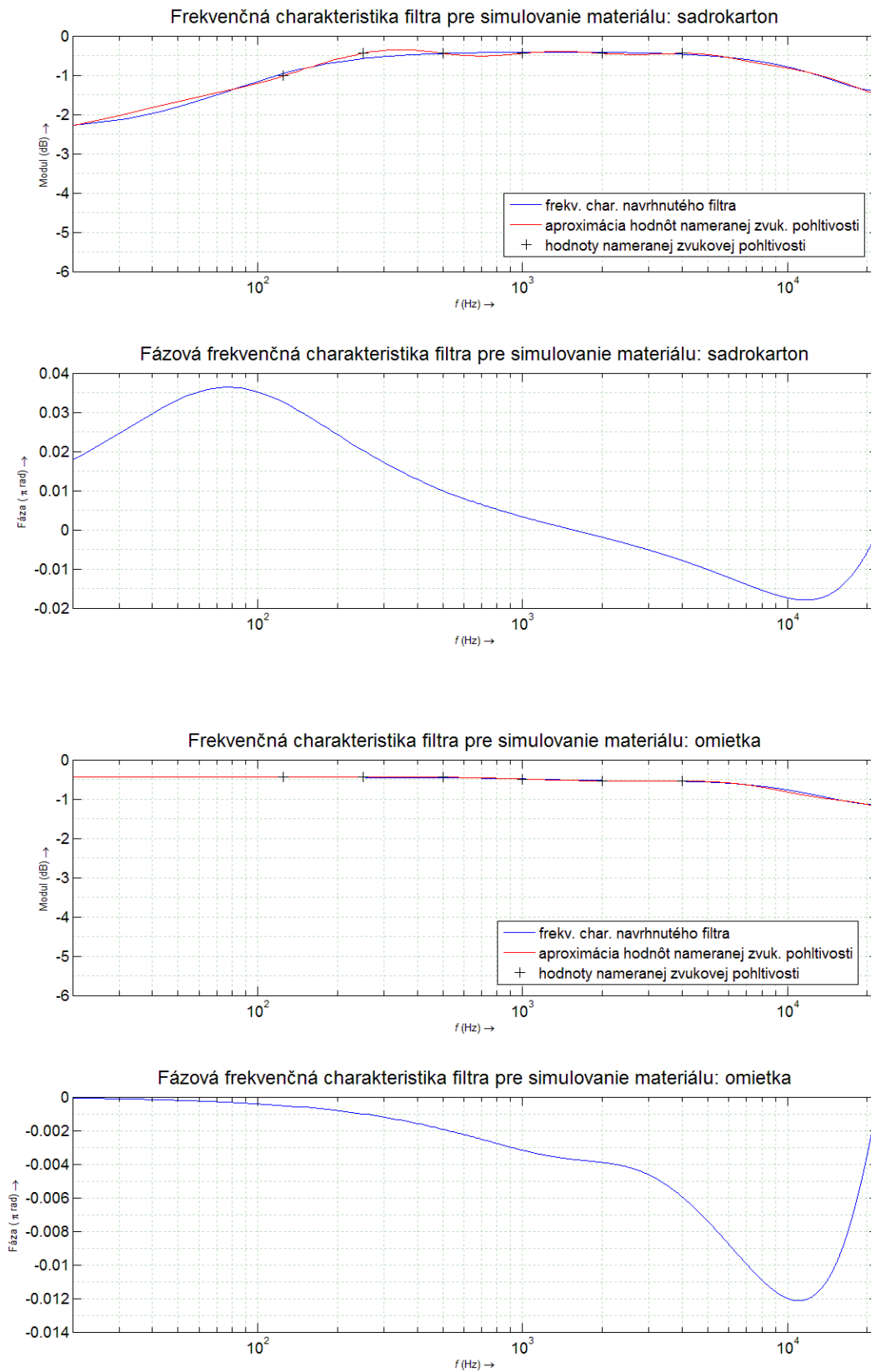
Túto metódu je možné ďalej vylepšovať. Napríklad pre simulovanie vzdialenosti zdroja zvuku od poslucháča pre väčšie vzdialenosti, ako sú jednotky metrov je vhodné implementovať blok simulácie mnohonásobných odrazov. Takisto je potrebné pomocou objektívnych metód nájsť

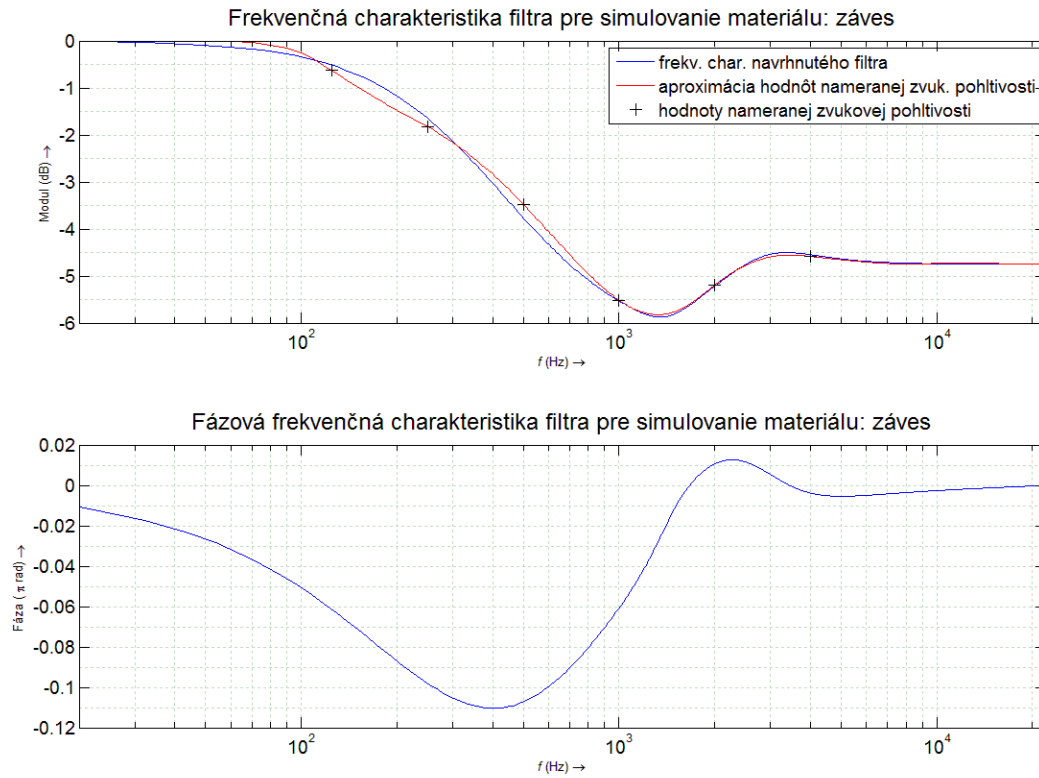
vhodné kombinácie absorpčných filtrov, ktoré budú schopné vierohodnej simulácie šírenia zvukových vln a súčasne budú v minimálnej miere ovplyvňovať spektrum pôvodného signálu.

Literatúra

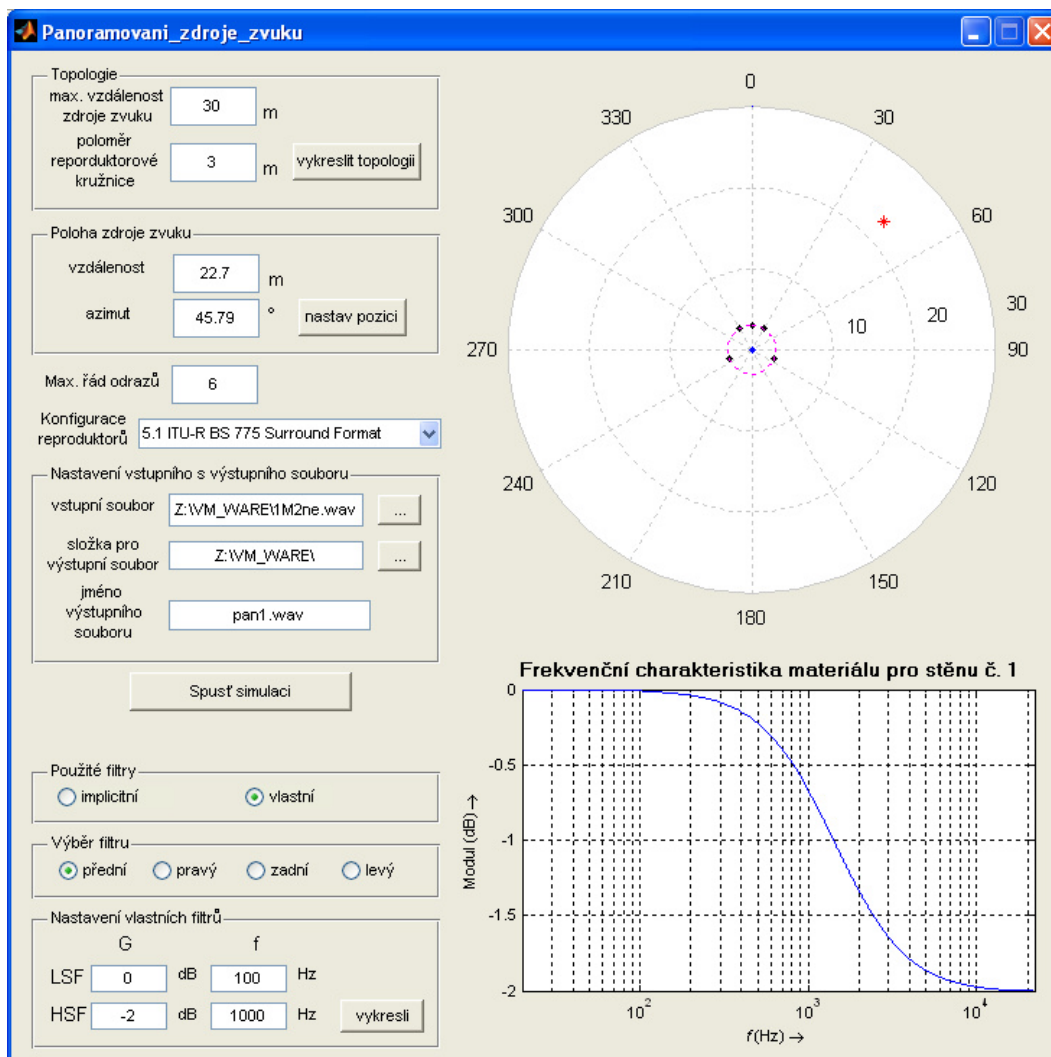
- [1] Pulkki, V.: *Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning*, J. Audio Eng. Soc. , 1997, vol. 45, no. 6, pp. 456-466
- [2] Pernaux J.M., Boussard P., Jot J.M.: *Virtual Sound Source Positioning and Mixing in 5.1 Implementation on the Real-Time System Genesis*. In Proc. Conf. Digital Audio Effects (DAFx-98),1-5,1998, ISBN 84-88042-24-8
- [3] Gerzon M. A.: *Periphony: With-Height Sound Reproduction*, J. Audio Eng. Soc., vol. 21, pp. 2-10 (1973 Jan./Feb.).
- [4] Wiggins B.: *An investigation into the real -time manipulation and control of free- dimensional sound fields*, University of Derby, 2004
- [5] Blauert, J. *Spatial Hearing, The Psychophysics of Human Sound Localization, Revised edition*. The MIT Press, 1997. ISBN 0-262-02413-6.
- [6] 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.
- [7] Jonathan B., Allen A., David A.: *Image method for efficiently simulating small-room acoustics*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65:943–950, Berkley, 1979.
- [8] 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. Dost
- [9] BORISH, J.: *Extension of the image model to arbitrary polyhedra*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1984, vol. 75, is. 6, s. 1827-1836
- [10] Krokstad A., Strom S., Sorsdal S.: *Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique*, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 8, Issue 1, July 1968, s. 118-125, ISSN 0022-460X, DOI: 10.1016/0022-460X(68)90198-3.
- [11] ČSN EN ISO 354 *Akustika- Měření zvukové pohltivosti v dozvukové komoře*
- [12] Everest, F. A.: *The master handbook of acoustic*. 4, USA : McGraw-Hill. 2001, 615 s.

Príloha A Frekvenčné charakteristiky filtrov realizujúcich simuláciu frekvenčne závislej odrazivosti stien





Príloha B GUI aplikácie navrhutej pre panoramovanie zdroja zvuku



Odkaz na stiahnutie aplikácie:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40618

Príloha C Príklad impulzových odoziev pre konkrétnu simuláciu

Simulácia pre nastavené parametre:

Max. vzdialenosť zdroja zvuku:	30m
Polomer reproduktorovej kružnice:	2,3m
Poloha zdroja zvuku:	$azimut = 68,2^\circ$ 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 - pravá strana poslucháča: omietka - za poslucháčom: sadrokartón - ľavá strana poslucháča: omietka

