

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

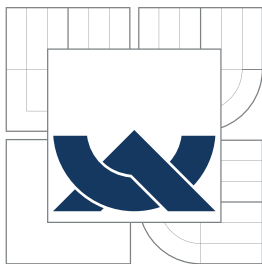
MODELOVÁNÍ PROSTOROVÉ AKUSTIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

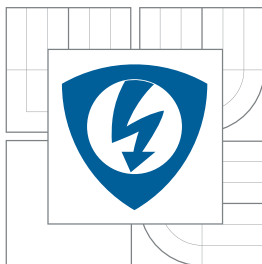
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL BERNÁT

BRNO 2010



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

MODELOVÁNÍ PROSTOROVÉ AKUSTIKY ROOM ACOUSTIC MODELING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

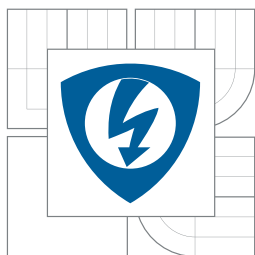
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL BERNÁT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. IVAN MÍČA

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Michal Bernát

ID: 78274

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Modelování prostorové akustiky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Mezi nejrozšířenější metody geometrické akustiky pro modelování zadaného prostoru patří metody zrcadlových zdrojů a sledování paprsku. Porovnejte tyto metody po teoretické stránce a uvažte i hledisko implementační a výpočetní náročnosti. Zvolte jednu ze zmíněných či odvozených metod, vhodnou k simulaci statického zdroje a statického přijímače v zadané místnosti. Tuto metodu pak implementujte ve variantě schopné simulovat alespoň pravoúhlé prostory.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] VIGRAN, T. E. Building Acoustics. Taylor & Francis, 2008. 362 s. ISBN 0-203-93131-9.
- [2] KAHRS, M., BRANDENBURG, K. Applications of digital signal processing to audio and acoustics. Kluwer Academic Publishers, 2002. 538 s. ISBN 0-7923-8130-0.
- [3] BORISH, J. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. Journal of the Acoustical Society of America, 1984, s. 1827-1836. ISSN 0001-4966.

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Ivan Míča

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

Tato práce se zabývá geometrickými modelovacími metodami a jejich implementací v prostředí Octave (Matlab), které je pro praktickou realizaci ideální. V první části je práce zaměřena na velmi zjednodušenou metodu zrcadlových zdrojů, která je schopna vypočítat a vykreslit impulzní odezvu pravoúhlých 2D místností. V další části je věnována pozornost metodě stejné, avšak rozšířené o možnost simulace trojrozměrných místností ve tvaru mnohostěnných hranolů. Nejdříve je vysvětlena z hlediska teoretického a matematického, následně je i podrobně zdokumentována její implementace. Metoda rozšířená dokáže kromě grafického znázornění impulzní charakteristiky také vygenerovat její zvukovou reprezentaci a následně ji využít pro auralizaci, které je dosaženo za pomoci konvoluce definovaného vstupního zvuku s výslednou impulzní odezvou. K oběma metodám je uveden příklad použití včetně vysvětlujících obrazových znázornění.

KLÍČOVÁ SLOVA

zrcadlové zdroje, ray-tracing, akustika, modelování prostoru, auralizace

ABSTRACT

This Master's Thesis deals with geometric modeling methods and their implementation in Octave (Matlab), which is ideal for the practical realization. The first part of the thesis is focused on a very simplified image source method, which is able to calculate and render the 2D impulse response of rectangular rooms. The next part is aimed on the same method, but extended by three-dimensional simulation of polyhedral prism-shaped rooms. There is both an explanation of theoretical and mathematical aspects and a documentation of the implemented source code. Extended image source method is able to generate sound representation of impulse response characteristics, and use it for auralization, which is achieved by using convolution of both the input sound source and the calculated impulse response. At the end there are two practical examples for both methods with explanatory illustrations.

KEYWORDS

image source, ray-tracing, acoustics, room modeling, auralization

BERNÁT, M. *Modelování prostorové akustiky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 43 s., Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce Ing. Ivan Míča.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Modelování prostorové akustiky“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

V této části bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, Ing. Ivanu Míčovi, za poskytnutí cenných rad při psaní a vývoji této práce. Zvláště bych rád také poděkoval své rodině za morální i finanční podporu během celých studií.

OBSAH

Úvod	9
1 Prostorová akustika	10
1.1 Parametry akustických prostorů	10
2 Modelovací metody	13
2.1 Geometrické modelovací metody	13
2.1.1 Metoda zrcadlových zdrojů (image source method)	14
2.1.2 Metoda sledování paprsku (ray-tracing)	16
3 Rozšíření metody zrcadlových zdrojů	17
3.1 Nalezení virtuálního zdroje	17
3.2 Validita zdrojů	19
3.3 Matematické vyjádření	20
4 Implementace	21
4.1 Metoda zrcadlových zdrojů	21
4.2 Příklad a výsledky k metodě	24
4.3 Rozšířená metoda zrcadlových zdrojů	27
4.3.1 Hlavní programová funkce	27
4.3.2 Funkce pro výpočet zrcadlených zdrojů	29
4.3.3 Návrh rekurzivní funkce	31
4.3.4 Doprovodné funkce programu	35
4.4 Příklad a výsledky k rozšířené metodě	36
5 Závěr	40
Literatura	41
Seznam symbolů, veličin a zkratk	42
Seznam příloh	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Způsoby odrazu od povrchu materiálu	14
2.2	Metoda zrcadlových zdrojů – zobrazení principu	15
2.3	Metoda sledování paprsku – zobrazeny přímé paprsky a odrazy prv- ního řádu	16
3.1	Znázornění principu získávání zrcadleného bodu	17
3.2	Získávání matice zrcadlených bodů pro místnost o třech bočních stěnách	18
3.3	Vysvětlení validity zdrojů	19
4.1	Zakreslení zrcadlených zdrojů v okolí původního	25
4.2	Impulzní charakteristika místnosti $6 \times 3,5$ m pro zvolené souřadnice . .	26
4.3	Půdorys simulované místnosti a virtuální zdroje prvního řádu	37
4.4	3D pohled na simulovanou pětibokou místnost s virtuálními zdroji prvního řádu	38
4.5	Impulzní charakteristika pětiboké místnosti s výškou 5 m do osmého řádu odrazu	39

ÚVOD

V následujícím textu je pojednáno o prostorové akustice a parametrech akustických prostorů, jsou zde zmíněny některé aspekty týkající se vlastního návrhu místností. Dále se projekt zabývá geometrickými modelovacími metodami, jejich popisem a v neposlední řadě také praktickou implementací. V první části práce je nejdříve k implementaci zvolena základní metoda zrcadlových zdrojů pro simulování pravoúhlých místností ve dvoudimenzionální soustavě. Vlastní programová část je v příslušné kapitole po částech rozebrána a jsou zde vysvětleny jednotlivé použité algoritmy.

V další části se práce zabývá tématem rozšíření dříve implementované metody, nejdříve po stránce teoretické a matematické, později i z hlediska implementace a praktické simulace. Rozšířená metoda splňuje požadavky na téměř libovolné mnohostěnné místnosti, jen s omezením na vodorovnou rovnoběžnou podstavu se stropem. Pro simulované místnosti pomocí této metody je generována impulzní charakteristika, která je uložena do grafického i zvukového výstupu. Implementovaná metoda taktéž provádí pro modelovaný prostor auralizaci předem definovaného zvukového vstupu.

Tento text je možné považovat také jako ucelenou dokumentaci k programové části diplomové práce, kterou případní zájemci o tuto problematiku mohou využít k pochopení významu a principu zde uvedených metod.

1 PROSTOROVÁ AKUSTIKA

Aby bylo později možné řádně vysvětlit principy modelovacích metod pro simulace prostoru, je třeba nejprve definovat některé pojmy z obecné prostorové akustiky.

Pod samotným pojmem „prostorová akustika“ se dají rozumět činnosti, které souvisí s návrhem interiérů pro budoucí využití v oblasti hudby, řečnictví, projekce filmu apod. V této oblasti je základním požadavkem, aby byl ve výsledně navrženém prostoru neutrální poslech produkovaného zvuku. Ten se odvíjí od tvaru místnosti, materiálu použitém na stěnách, rozestavení nábytku, umístění oken a dalších předmětů. Při návrhu je nutné dbát na všechny ovlivňující faktory, které mohou v negativním smyslu šířený zvuk ovlivnit.

Z důvodu eliminace těchto faktorů se ve zvukové architektuře a technice používá celá řada speciálních materiálů. Těmi se pokrývají stěny místnosti, případně samotný nábytek. Vyrábí se nejčastěji ve formě panelů a plní mimo jiné také dvě základní funkce. Jednou z nich je utlumení, kterého lze docílit pomocí strukturovaného povrchu (např. pomocí malých vzájemně pootočených jehlanů) z pěnových a dalších obdobných materiálů. Princip utlumení spočívá ve tření o povrch těchto panelů a následnou přeměnu na tepelnou energii. Druhou základní funkcí je rozptyl, neboli difuze. Ta vzniká dopadem a odrazem zvukové vlny od nerovného členitého povrchu. Jeho návrhem lze ovlivnit horizontální, vertikální, případně jinak směřovanou difuzi. [3]

Další neméně důležitou částí, kterou je třeba přiblížit, jsou parametry akustických prostor, díky kterým je možné uvažovat matematické modely za realistické.

1.1 Parametry akustických prostorů

Parametry pro hodnocení kvality akustiky v místnostech se liší podle použití požadovaného prostoru. Doba dozvuku nebo pokles hladiny zvuku se vzdáleností od zdroje může být postačující v továrních halách, ale v koncertních sálech a divadlech je třeba počítat s větší množinou parametrů. Měřením impulzních odezev v místnosti a jejich výpočty lze získat celou řadu nových parametrů, které lze srovnat se subjektivním dojmem zvuku.

Akustické prostory pro audiovizuální techniku se musí navrhovat tak, aby odrazy od stěn nebyly příliš zpožděné od přímých vln, a tím nedocházelo k ozvěnám. Doba zpoždění, která je v takových mezích, aby se tento jev neprojevoval, je 50 ms až 100 ms. V důsledku tohoto je předem nutné znát, kde mohou případné odrazy vzniknout. Je stejně důležité počítat jak s odrazy od stěn bočních, tak s odrazy od stropu, případně podlahy. [7]

Rozměry místnosti

Obecné pravidlo při návrhu akustiky určitého prostoru je, aby rozměry místnosti nebyly v soudělitelném poměru. Pokud toho nelze docílit stavebně, řeší se problém například pomocí obkladů a podhledů. Doporučené poměry jsou 2:3:5, 3:4:5 a další. S rozměry také souvisí tvar místnosti, kterým je možné ovlivnit množství odrazů. Většinou se tyto odrazy řeší tak, aby například v přednáškovém sále byly směřovány na posluchače.

Kritická frekvence místnosti

Velikost tohoto kmitočtu (nazývaného též jako Schroederova frekvence) určuje hranici, do které je významně ovlivňován výsledný reprodukováný zvuk (hudba, řeč). Je to z důvodu vybuzení vlastních kmitočtů a vzniku stojatých vlnění. Nad touto frekvencí již signál klesá exponenciálně bez větších odchylek. Kvalita reprodukce zde závisí většinou podílem jen na technice. Nejčastěji je tato hranice v okolí velmi nízkých frekvencí, přibližně do 300 Hz. Výpočet tohoto parametru se vztahuje ke znalosti rozměrů místnosti a předem vypočítané, či odhadnuté doby dozvuku. [6, 7]

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad [\text{Hz}], \quad (1.1)$$

kde T je doba dozvuku a V je objem místnosti.

Doba dozvuku

určuje, za jaký čas poklesne hladina zvuku o 60 dB (tj. na 10^{-6} původní hodnoty). Každý prostor má tuto dobu odlišnou a výpočet probíhá na základě znalosti objemu (resp. rozměrů místnosti), pohltivosti materiálu jednotlivých ploch a u velkých prostorů také na činiteli útlumu. Existují tři základní vztahy pro výpočet doby dozvuku, každý má určité odlišnosti a je vhodný pro jiné použití. Jsou to vztahy podle tří různých autorů – Sabina, Eyringa a Millingtona. V praxi se nejčastěji používá vyjádření od Sabina (rovnice 1.2) a Eyringa (rovnice 1.4). Millingtonovo řešení je výpočetně nejnáročnější, proto zde není ani uvedeno.

$$T_s = 0,164 \frac{V}{\alpha \cdot S} \quad [\text{s}], \quad (1.2)$$

kde V je objem místnosti, α je činitel pohltivosti a S je celkový obsah ploch. V případě odlišných činitelů pohltivosti pro každou stěnu je α definováno pomocí následující rovnice:

$$\alpha = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S}, \quad (1.3)$$

kde α_i udává činitel pohltivosti pro stěnu o obsahu S_i . Sabinovo vyjádření je vhodné pro materiály s $\alpha < 0,2$, Eyringovo pro materiály s $\alpha < 0,8$.

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha)} \quad [\text{s}], \quad (1.4)$$

U obou rovnic se v praxi ještě přičítá ke jmenovateli člen $4mV$, kterým je navíc udán ještě útlum v prostředí. Proměnná m je závislá například na vlhkosti vzduchu, šířené frekvenci signálu a dalších parametrech. Její hodnota nabývá v rozsahu $\langle 0,001 \div 0,06 \rangle$ a je bezrozměrná. [3]

2 MODELOVACÍ METODY

Existuje několik skupin metod pro modelování akustických prostorů, jako jsou velké koncertní sítě, divadla, hudební kluby, ale i továrny, sklady apod. Mezi tyto skupiny patří metody statistické, vlnové a geometrické. První dvě spočívají ve využití dříve popsaných akustických parametrů. Konkrétněji pro statistickou akustiku je to doba dozvuku T a s ní související činitel pohltivosti α . Pro vlnovou akustiku je to využití vlnové rovnice a kritického kmitočtu f_k , sloužícího pro předcházení vzniku stojatého vlnění. [4, 7]

V současné době je jak na půdě akademické, tak i komerční nejvíce využíváno metod geometrických, pomocí nichž vznikají přesné simulace navrhovaných prostorů. Z tohoto důvodu se zdá být tato metoda ideální, a proto bude dále popisována podrobněji.

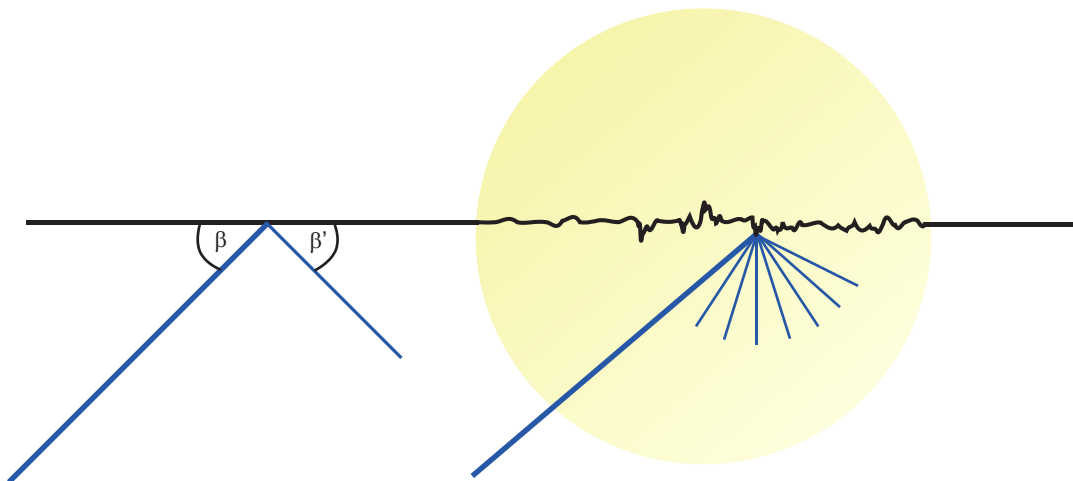
2.1 Geometrické modelovací metody

Pomocí geometrických modelovacích metod lze relativně přesně predikovat chování a šíření zvukových vln. Z důvodu přijatelné přesnosti jsou tyto metody vhodné k auralizaci, tj. aplikaci získaných impulzních odezev na konkrétní zvukové signály. Některé z metod jsou rozebrány a vysvětleny dále a na základě jejich možností a vlastností bude vybrána ta, která bude nejvhodnější pro samotnou pozdější implementaci. Nejpoužívanějšími metodami jsou **metoda zrcadlových zdrojů** a **metoda sledování paprsku**.

Často se používají hybridní metody, které jsou kombinací obou předchozích. Nejčastěji je potom spojení obou metod vytvářeno tak, že se naleznou všechny potřebné zrcadlové zdroje a od nich se sledují zvukové paprsky až do cílové pozice, přičemž se zaznamenávají průchody přes překážky. Poté se testuje, zda tyto „odražené“ paprsky přispějí do celkové energie získávané na přijímači. Použití hybridních metod vychází z požadavku, aby se co nejvíce snížil výpočetní čas. Proto se používá pouze konečné množství zrcadlových zdrojů. [7]

K odrazům v geometrických metodách lze přistupovat dvěma různými způsoby, jedním je zanedbání povrchových nerovností, druhým je naopak vycházení z předpokladu, že povrch je nerovný, a dochází tak k difúznímu odrazu. U prvního způsobu je vždy úhel odrazu roven úhlu dopadu, podobně jako v zákonech optiky. Ve druhém způsobu může z původního paprsku vlivem odrazu vzniknout několik menších, u kterých se již původní úhel změní.

Tohoto jevu se využívá v místech, kde je potřeba akustický signál co nejvíce rozšířit, například koncertní sítě nebo divadla. Jak již bylo zmíněno dříve, existují speciální výrobky – difuzory, které nám tuto vlastnost zajistí.



Obr. 2.1: Způsoby odrazu od povrchu materiálu

Aby bylo možné implementace metod provést, je nutné akustický model zjednodušit. Tohoto zjednodušení je docíleno vypuštěním difrakce (ohybu) zvukových paprsků a vzájemné interference zvukových vln. Veškeré odrazy se uvažují z rovných ploch, čili k difuzi zde nedochází.

2.1.1 Metoda zrcadlových zdrojů (image source method)

Tato metoda je založena na teorii, že veškeré odrazy zvukových paprsků lze uvažovat jako samostatné zdroje, které jsou umístěny za překážkou ve stejné vzdálenosti jako zdroj původní. Odražený paprsek se tak nahrazuje přímým z nového zrcadlového zdroje. Matematicky je relativně jednoduché tyto zdroje najít, ovšem pouze pro místnosti základních tvarů. Ve složitě členěných sálech jich vzniká veliké množství vlivem odrazů a rostou v exponenciálním řádu. Další zdroje se generují v důsledku odrazů od nábytku a jiného vybavení místnosti. Výpočtem této metody získáváme impulzní odezvu prostoru, ve kterém je možné přesně určit, jak bude reprodukován signál znít, včetně relevantních odrazů. Podle rozmístění originálního zdroje a příjemce (člověk, mikrofon), lze určit časy, ve kterých přijdou jednotlivé odrazy. Hodnoty intenzity ve stejných časech se poté sečtou a příslušná část signálu se tím zesílí. [5]

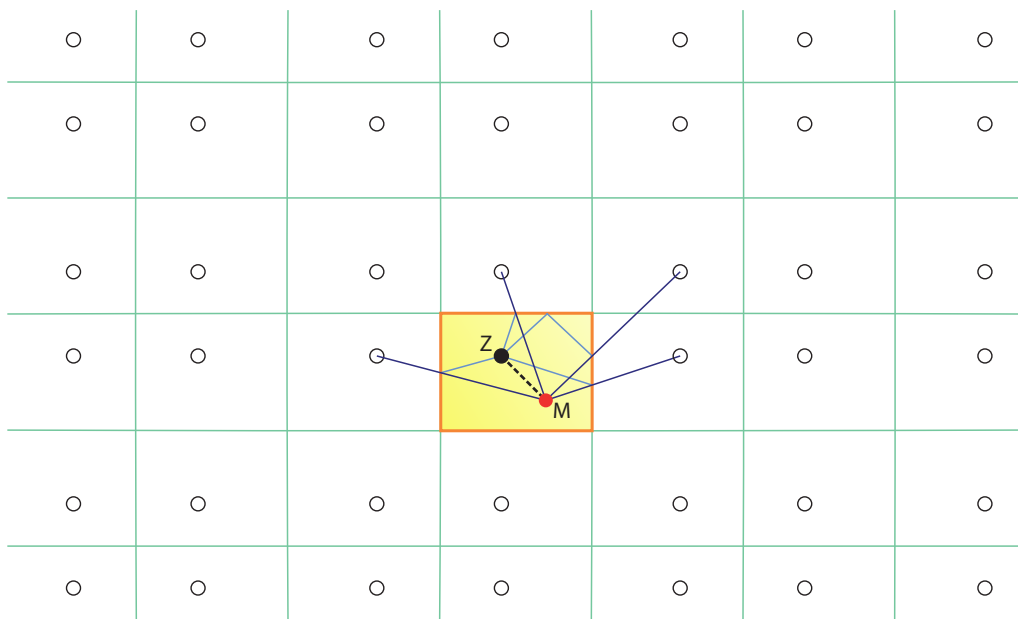
Výhody:

- není nutné počítat odrazy, používá se přímých cest ze zrcadlových zdrojů
- jednodušší implementace než u metody sledování paprsku

Nevýhody:

- náročný výpočet pro místnosti složitějších tvarů (lze je částečně redukovat zjednodušením na tvar kvádrů, který obaluje původní tvar)
- dlouhý výpočetní čas se vzrůstajícím počtem zrcadlových zdrojů - složitost $O(n^2)$

Na následujícím obrázku, je znázorněna místnost s jedním zdrojem Z a jedním mikrofonom M. Světle modrými čarami jsou vykresleny zvukové paprsky, které se odrážejí od stěn místnosti a vedou ze zdroje do mikrofону. Tmavými čarami je vyobrazena přímá cesta vedoucí z virtuálních zdrojů do mikrofону. Pro pochopení postačuje vykreslit jen několik těchto cest, aby jednotlivé odrazy byly ještě viditelné. Celkové vzdálenosti paprsků jsou ekvivalentní, to dokazuje, že předpoklady o principu metody by měly být správné.

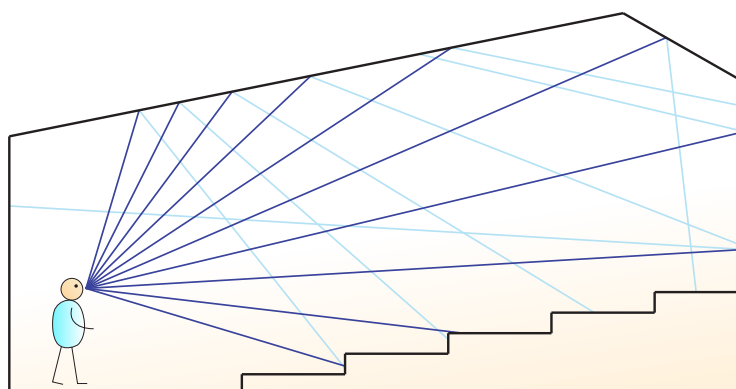


Obr. 2.2: Metoda zrcadlových zdrojů – zobrazení principu

2.1.2 Metoda sledování paprsku (ray-tracing)

Šíření zvuku ve vzduchu má s několika výjimkami obdobné chování jako šíření světelných paprsků, proto se metoda sledování paprsku využívá nejen v odvětví akustiky, ale i v obrazovém zpracování – nejčastěji pro vykreslení světla u 3D prostorů.

Základem této metody pro akustické výpočty je bodový zdroj zvuku, který vysílá velké množství paprsků, jejichž směr se liší o určitý konstantní úhel. Je možné si je představit jako výseče ze zvukové kulové vlny, v teoretickém modelu se ale uvažují jako přímky. Tyto paprsky se šíří místností rychlostí zvuku a jejich směr je ovlivňován odrazy od stěn a jiných překážek. Paprsky se nechají prostorem šířit a sledují se tak dlouho, dokud nenarazí na absolutně pohltivé těleso (např. člověk nebo hlediště koncertní síně). Při svém šíření prostorem ztrácí na síle (intenzitě), a tak se může stát, že se ke svému cíli nedostanou. Ovšem důležitějším nedostatkem je, že paprsek sám o sobě je uvažován jako přímka o téměř nulové tloušťce. Tím velice často nastává situace, kdy není cíle dosaženo. Problém se obchází tím, že se uvažuje mnohem větší přijímající prvek, který je schopen určitě procento paprsků zachytit, případně se přidává více počátečních paprsků. [5]



Obr. 2.3: Metoda sledování paprsku – zobrazeny přímé paprsky a odrazy prvního řádu

Výhody:

- velmi dobrá přesnost při měření vyšších frekvencí
- vlivem zjednodušení je výpočet velmi rychlý

Nevýhody:

- téměř nulová tloušťka paprsku, velká většina jich nedosáhne cílového bodu
- s počtem použitých paprsků roste výpočetní čas, avšak tuto nevýhodu lze potlačit využitím paralelního zpracování programu

3 ROZŠÍŘENÍ METODY ZRCADLOVÝCH ZDROJŮ

Z obecného hlediska byla dříve popsána metoda zrcadlových zdrojů brána ve velmi zjednodušených případech, aby bylo možné snadno vysvětlit hlavní myšlenky. Potenciál metody je ovšem mnohem větší, a je proto třeba odpoutat pozornost od zcela pravoúhlých obdélníkových místností a věnovat se složitějším tvarům. Mnohostěnné místnosti v oblasti hudby a akustiky se budou objevovat častěji než pravoúhlé, aby bylo v akustickém prostoru zamezeno vzniku stojatého vlnění.

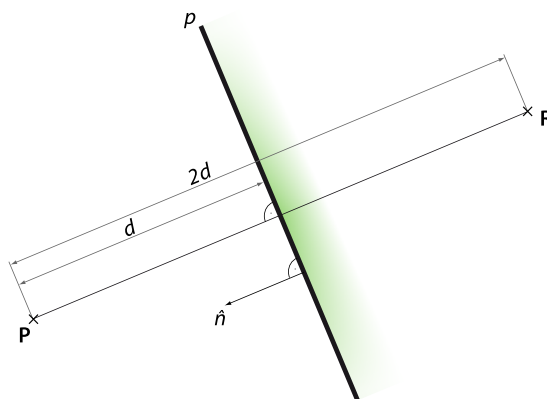
3.1 Nalezení virtuálního zdroje

Je-li v místnosti znám jakýkoliv bodový zdroj a odrazná plocha s libovolnou orientací, je nutné nalézt výraz pro vyjádření souřadnice virtuálního zdroje (obrazu). Poloha a orientace roviny odrazné plochy je popsána dvěma parametry $\rightarrow$ normálou roviny $\hat{n}$ a vzdáleností zdroje d od roviny p . Obraz může být nalezen ve vzdálenosti $2d$ od reálného zdroje ve směru normály k rovině p . Pohled na tuto situaci vyjadřuje obrázek 3.1. Vzdálenost d je pak dána obecně tímto vztahem:

$$d = p - \mathbf{P} \cdot \hat{n} \quad [\text{m}], \quad (3.1)$$

kde p je rovina, $\mathbf{P}$ je bod, od kterého hledáme vzdálenost a $\hat{n}$ je normála roviny. Poloha obrazu $\mathbf{R}$ je vyjádřena pomocí původního bodu a dvojnásobné vzdálenosti zdroje od roviny ve směru normálového vektoru:

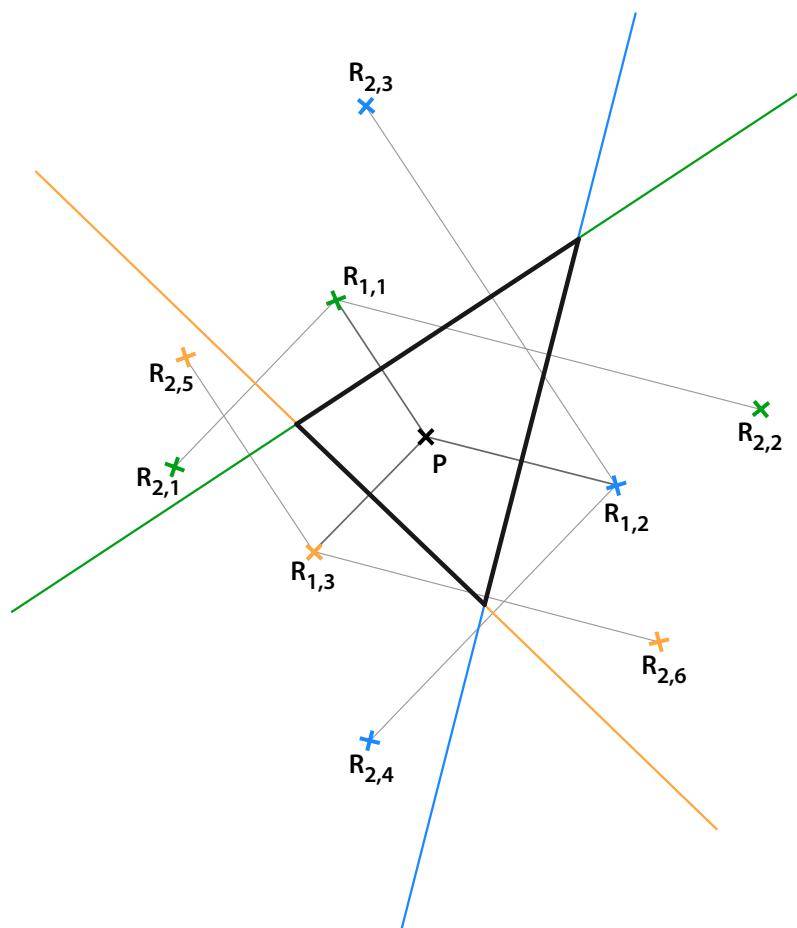
$$\mathbf{R} = \mathbf{P} + 2d\hat{n} \quad [\text{m}]. \quad (3.2)$$



Obr. 3.1: Znáznornění principu získávání zrcadleného bodu

Ve srovnání s prostou obdélníkovou místností, kde je k nalezení souřadnic virtuálního zdroje potřeba pouze několik základních matematických operací, je výpočet v mnohostěnné místnosti podstatně složitější. Zcela obecný algoritmus tedy bude vyžadovat mnohem více výpočtů. [1]

Jelikož k poměrně přesnému vymodelování akustického prostoru je třeba znát velké množství zdrojů, je nutné z teoretické znalosti výpočtu jednoho virtuálního zdroje odvodit výpočty celé matice dalších zdrojů. Toho lze dosáhnout tak, že bude nejprve zrcadlen originální zdroj přes všechny stěny, čímž vzniknou virtuální zdroje prvního řádu. Tyto zdroje jsou dále zrcadleny přes stěny, které příslušný zdroj nevytvořily, a mohou tak vzniknout virtuální zdroje řádu druhého. V této neustále se rozvíjející řadě se dále pokračuje s výpočty až do zvoleného počtu opakování. Tuto situaci je možné nastínit obrázkem 3.2.



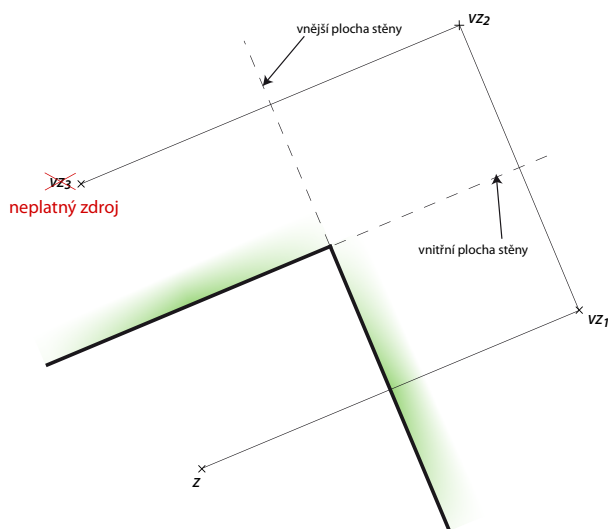
Obr. 3.2: Získávání matice zrcadlených bodů pro místnost o třech bočních stěnách

V obrázku je u každého zrcadleného bodu vyznačen pomocí první číslice řád odrazu a pomocí barevného odlišení i zdroj, který svého „potomka“ vytvořil. Naznačeny jsou pouze odrazy druhého řádu, aby byly jednotlivé body snadno rozeznatelné.

3.2 Validita zdrojů

Nyní je nutné vysvětlit, co je to validita zdroje. Jiným slovem lze validitu vyjádřit jako platnost. Toto kritérium, na základě kterého se rozhoduje, zda bude nově vygenerovaný zrcadlový zdroj platný, je možné určit podle výsledné orientované vzdálenosti bodu od roviny.

Stěny místnosti mohou být vždy rozděleny podle ploch na lícové (vnitřní) a rubové (vnější). Je-li zdroj zrcadlen přes plochu lícovou, je zdroj platný. V opačném případě není. Za předpokladu, že by byly veškeré zrcadlené zdroje uznány jako platné, se bude v průběhu výpočtů generovat stále více identických bodů. Prakticky je možné si tuto situaci představit na příkladu jednoho bodu a jedné stěny. V první fázi by se správně vygeneroval virtuální zdroj přes vnitřní plochu a ve fázi druhé by se zrcadlil tento nový zdroj přes plochu vnější. Tím by vzniknul zdroj se stejnými souřadnicemi jako zdroj originální. Takto by mohl výpočet teoreticky probíhat donekonečna. Názorné vysvětlení je na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Vysvětlení validity zdrojů

Jak již bylo zmíněno, k rozhodování se využívá orientované vzdálenosti (její výpočet je vysvětlen v následující podkapitole 3.3). Z kladnosti či zápornosti vzdálenosti je možné přesně určit, zda odraz probíhá přes vnější či vnitřní plochu. Bude-li kladná, zrcadlení je prováděno ze strany lícové, a tedy zdroj je platný. Je-li naopak tato vzdálenost záporná, bylo by zrcadlení bodu prováděno ze strany rubové, zdroj by tedy nebyl platný. Poslední možností je vzdálenost nulová, která nastane za situace, kdy originální zdroj je umístěn na jedné ze zdí. V takovém případě nemá smysl přes tuto stěnu zdroj vůbec zrcadlit, jelikož by nový zdroj vznikl na totožném umístění. [1]

3.3 Matematické vyjádření

Jelikož je rozšířená metoda zrcadlových zdrojů matematicky náročnější, je vhodné zde vysvětlit jednotlivé prováděné výpočty důkladněji. K praktickému výpočtu souřadnic virtuálního zdroje poslouží analytická geometrie, která se v této situaci zdá nejpraktičtější. Příslušné vzorce je možné nalézt mimo tento text i v [2]. V prostоровé kartézské soustavě souřadnic je každý bod vyjádřen třemi souřadnicemi, které označují vzdálenost bodu od příslušné osy. Stěny místnosti je možné analyticky vyjádřit pomocí rovnice roviny, a to buď parametrické, nebo obecné. V tomto případě bude využito rovnice obecné, která má tvar:

$$ax + by + cz + e = 0, \quad (3.3)$$

kde čísla a , b a c vyjadřují normálový vektor $\hat{n} = [a, b, c]$ a e vyjadřuje posunutí od počátku soustavy souřadnic. Písmeno e je použito proto, aby nedocházelo k záměně se vzdáleností bodu od roviny.

Stěny místnosti si lze představit jako roviny v prostoru, které vzájemně obklopují zadaný bod (akustický zdroj). Tyto roviny mohou být vyjádřeny vždy pomocí tří bodů¹. Z těchto tří bodů již jde snadno zjistit obecnou rovnici roviny, a to následujícím postupem:

1. tři rohy místnosti příslušné stěny označme **A**, **B**, **C**
2. směrové vektory $\vec{u}$ a $\vec{v}$ získáme pomocí rozdílů $\mathbf{A} - \mathbf{B}$ a $\mathbf{A} - \mathbf{C}$
3. vektorovým součinem $\vec{u} \times \vec{v}$ vypočteme normálový vektor $\hat{n} = (a, b, c)$
 $\hat{n} = (u_2v_3 - u_3v_2, u_1v_3 - u_3v_1, u_1v_2 - u_2v_1)$
4. dosazením normálového vektoru $\hat{n} = (a, b, c)$ a jednoho bodu roviny (např. $A = [x, y, z]$) do obecné rovnice získáme zbývající neznámou e

Ze známosti rovnice roviny a souřadnic zdroje (**S**) je nyní možné vyčíslit jejich vzájemnou polohu a následně spočítat souřadnice zrcadleného zdroje (**VS**). Rovnice pro výpočet orientované vzdálenosti je následující:

$$d = \frac{ax + by + cz + e}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad [\text{m}]. \quad (3.4)$$

Zbývá tedy zjistit přesnou polohu výsledného bodu. Toho je možné dosáhnout za pomoci promítnutí zdroje na rovinu (tento průmět označme **P**) a následného výpočtu podle vzorce:

$$\mathbf{VS} = 2 \cdot \mathbf{P} - \mathbf{S} \quad [\text{m}]. \quad (3.5)$$

¹tyto body odpovídají rohům místnosti na příslušné stěně

4 IMPLEMENTACE

Celou kapitolu věnovanou implementaci je možné rozdělit do několika dílčích sekcí. Hlavními opěrnými body v kapitole jsou podrobná vysvětlení principů většiny částí programu (algoritmu). Implementovány byly v rámci práce dvě srovnatelné metody, které jsou obě založeny na principu zrcadlových zdrojů.

Nejprve se práce i funkce samotná zaměřují na pravoúhlé místnosti, dále pak i na prostory, které mají tvar nepravidelných mnohostěnných hranolů. Ke každé implementované metodě je uveden vypočtený praktický příklad, který by měl ověřovat správnost programu.

4.1 Metoda zrcadlových zdrojů

Bylo vycházeno ze základních poznatků o generování obrazů původního zdroje. Celá metoda je naprogramována v rámci jedné funkce v Octave (resp. Matlabu). Hlavička funkce `mirror(src,mic,room,radius)` udává jednotlivé vstupní parametry, s kterými je volána. Jelikož je funkce připravena pro 2D výpočty, jsou veškeré souřadnice uvažovány v osách x a y . Je předpokládán pohled shora. Jako jednotky jsou použity metry.

Prvním parametrem je `src`. Ten udává souřadnice umístění původního zdroje v místnosti. Druhým parametrem (`mic`) jsou souřadnice přijímajícího mikrofону. Jako třetí se zadávají rozměry místnosti – šířka a délka. Jako poslední je požadován `radius` vzdálenosti, pro který se bude počítat impulzní charakteristika. První tři parametry musí být vepsány jako vektory v hranatých závorkách. Příklad volání může vypadat takto:

```
mirror([3 2],[5 7],[6 8],50)
```

Výpočet, který je nutné provést jako první, je generování souřadnic všech možných zdrojů. Ty jsou získávány pomocí dvou cyklů využívajících parametry: `room`, `src` a doplňkové souřadnice zdroje `src_`, které jsou vypočteny rozdílem dvou předchozích parametrů. Je to tedy umístění zdroje z pohledu od opačného rohu místnosti. Zmiňovaný algoritmus se nachází v následující části textu.

```
for i = 1:nx
    if mod(i,2) == 1
        xPlus(i) = (i-1)*room(1)+src(1);
    else
        xPlus(i) = (i-1)*room(1)+src_(1);
    end
    xMinus(nx+1-i) = -xPlus(i);
end
```

```

for i = 1:ny
    if mod(i,2) == 1
        yPlus(i) = (i-1)*room(2)+src(2);
    else
        yPlus(i) = (i-1)*room(2)+src_(2);
    end
    yMinus(ny+1-i) = -yPlus(i);
end

x = [xMinus, xPlus];
y = [yMinus, yPlus];

```

Proměnné `nx` a `ny` jsou čísla, která udávají požadovaný počet zdrojů v každé ose, a tedy jejich součinem je dán celkový počet zdrojů. Tyto hodnoty se nastavují na počátku zdrojového kódu. Mohly by být zadávány také jako vstupní parametr při volání funkce, avšak jejich velikost je dostatečně naddimenzována, a tak postačuje statický zápis. Výstupem předchozí části získáváme vektory `x` a `y`, ve kterých jsou uloženy příslušné souřadnice. Celková matice všech možných kombinací se generuje v další části a je vytvořena pomocí cyklu.

```

l_x = length(x);
l_y = length(y);

for i = 1:l_x
    for j = 1:l_y
        image_source(:,(i-1)*l_y+j) = [x(i);y(j)];
    end
end

```

Délky vektorů `x` a `y` budou dále ještě používány, proto je vhodné jejich uložení do vlastních proměnných (`l_x`, `l_y`). Dva vnořené cykly prochází jednotlivé prvky od začátku do konce, to je definováno dříve zmiňovanými proměnnými. Do pole `image_source` se zapisují po sloupcích jednotlivé hodnoty z již definovaných polí `x` a `y`. Postupně tak vznikne dvouřádková matice, ve které jsou kombinace každého čísla s každým z těchto dvou polí. Tato komplexní matice `image_source` už nyní postačuje k dalšímu chodu programu.

Dalším krokem je výpočet vzdáleností všech zdrojů k mikrofonu, přičemž jsou ponechávány pouze ty, které leží v požadovaném okruhu tak, jak bylo zadáno v parametru `radius` při volání funkce. Vzdálenost je získána pomocí Pythagorovy věty, v případě 3D zobrazení by se pouze rozšířila o další prvek.

V dále uvedeném algoritmu se nejprve vypočítávají vzdálenosti, které se předem porovnají se zadaným rádiem. Pokud vyhovují této podmínce, jsou uloženy. Pokud podmínku nesplňují, jsou místo nich uloženy hodnoty nulové. Při tomto postupu je zároveň zapisováno pořadí těchto uložených vzdáleností v celkovém vektoru do pole `indexes`. To je použito proto, aby bylo později možné získat pouze užitečné zdroje a počítat pouze s nimi. Toho je docíleno procházením indexovaných prvků

a kopírováním do pole `useful_source`. Na závěr jsou přebývající nulové hodnoty vymazávány. To v praxi znamená, že jsou nahrazovány prázdným řetězcem, který se ve výsledném výpisu již neprojeví.

```
for i = 1:2:2*count
    tmp = sqrt((abs(image_source(i)-mic(1)))^2 + (abs(image_source((i+1))-mic(2)))^2);
    if (tmp < radius)
        distance_image(round(i/2)) = tmp;

        % ulozeni indexu pouzitelneho zdroje
        indexes(round(i/2)) = i;
    end
end

distance_image(:, find(abs(distance_image) == 0)) = [];

useful_source = [image_source(indexes); image_source(indexes+1)];
```

Aby mohly být šířící se zvukové paprsky považovány za reálné, bylo nutné přidat dva hlavní utlumující faktory. Jedním z nich je útlum při odrazu od stěny a druhý je útlum v závislosti na vzdálenosti od zdroje.

Jako další mohl být brán v úvahu útlum vzduchem v závislosti na frekvenci a na relativní vlhkosti vzduchu tak, jak je definováno v normě ČSN ISO 9613-1. Toto pravidlo nebylo uvažováno, avšak není složité jej v budoucnu doprogramovat.

Útlum při šíření prostorem v závislosti na vzdálenosti vychází z nepřímé úměry. Bude-li uvažováno šíření jako kulová vlna ve 3D prostoru, bude intenzita ubývat kvadraticky. Jelikož se v tomto případě uvažuje prostor pouze 2D, energie by se při kvadratickém úbytku vytrácela příliš rychle. Proto bylo částečně ustoupeno tomuto předpokladu a byl zvolen pokles intenzity lineární.

Úbytek při odrazech od stěn byl vypočítán pomocí následujícího kódu.

```
for i = 1:2:2*length(indexes)
    a = abs(floor(useful_source(i)/room(1)));
    b = abs(floor(useful_source(i+1)/room(2)));
    walls([i;i+1]) = [a ; b];

    sum_walls(round(i/2)) = walls(i) + walls(i+1);
    sound_level(round(i/2)) = power(0.9,sum_walls(round(i/2)))*sound_level(round(i/2));

    % otaceni faze
    if (mod(sum_walls(round(i/2)),2) == 1)
        sound_level(round(i/2)) = -1*sound_level(round(i/2));
    end
end
```

Tímto algoritmem je získáván počet zdí, které stojí jednotlivým zvukovým paprskům v cestě. Každá zeď zde utlumí intenzitu zvuku na 90 % původní hodnoty. To odpovídá činiteli pohltivosti $\alpha = 0,1$, bude-li uvažován materiál jako standardní omítnutá zeď. Podle počtu zdí se počítá s mocninou hodnoty 0,9, což je dáno z předpokladu podle Eyringa o postupném utlumování při odrazech. Do této části programu byla

ještě později dopsána podmínka, pomocí které je při odrazu od stěny otáčena fáze zvuku. Kontroluje se sudost (resp. lichost) počtu stěn stojících zvuku v cestě. Je-li počet lichý, fáze se obrací, pokud je počet zdí sudý, fáze zůstává.

Z důvodu pozdějšího výpočtu impulzní charakteristiky bylo nutné provést převod spojitého času na diskrétní. Toho je dosaženo tak, že do proměnné `samples` jsou ukládány zaokrouhlované hodnoty časů podělené vzorkovací periodou `ts`. Ta je vypočtena ze vzorkovací frekvence zadané na počátku funkce (staticky na 96 kHz). Místo původních spojitých časů jsou poté ukládány již hodnoty diskrétní. Jelikož se některé kombinace zdrojů vždy nachází ve stejných vzdálenostech od mikrofonu, je nutné tyto společné hodnoty sečíst. Dochází tak k zesílení některých vzorků. Výsledné hodnoty jsou uloženy ve vektoru `sound_sum`.

```
% navzorkovani se vzorkovaci periodou ts
samples = floor(time_image ./ ts);
time_image = samples.*ts;

%% SOUCET ZVUKU, KTERE DOPADNOU VE STEJNY CAS
% v tmp jsou ulozeny indexy prvku se stejnými hodnotami
for i = 1:2:2*l_i
    tmp = find(time_image == time_image(round(i/2)));
    sound_sum(round(i/2)) = sum(sound_level(tmp));
end
```

Prakticky je v uvedeném kódu použit ještě jeden ústupek, díky kterému je možné sečíst hodnoty i velmi podobných časů dopadu. U těchto časových hodnot je rozdíl tak minimální, že by nebyl zachycen dvěma vzorky, a tak jsou tyto velmi blízké časy zaokrouhleny na stejnou spodní hranici. Tím je docíleno sloučení hodnot, které se později projeví ve výsledné impulzní charakteristice.

Na závěr se vypíše výsledky z matice `results` do konzolového okna a vykreslí se graf impulzní charakteristiky pomocí matlabovské funkce `stem()`, která je volána pro vektory `time_image` a `sound_sum`.

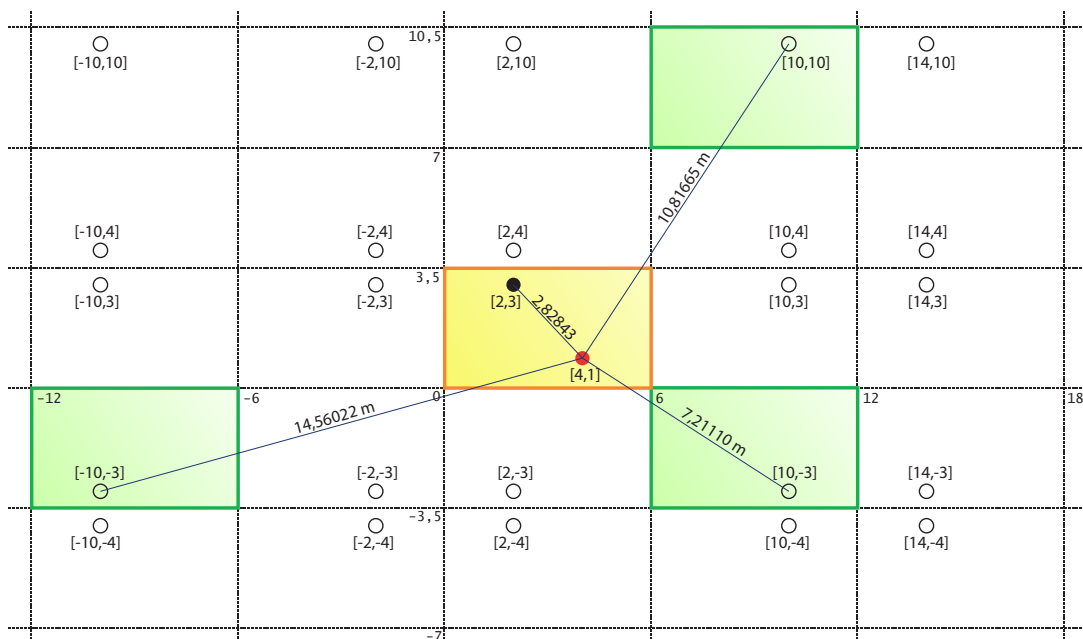
4.2 Příklad a výsledky k metodě

Jako příklad použití pro simulaci byla zvolena 2D místnost o rozměrech 6×3,5 m s rozmístěním zdroje na souřadnicích [2,3] m a mikrofonu na pozici [4,1] m. Požadovaný radius vzdáleností, pro který se budou počítat zdroje, byl zvolen 60 m. Volání funkce tedy proběhlo příkazem `mirror([2 3],[4 1],[6 3.5],60)`. Po proběhnutí výpočtů se do obrazovky vypíše následující údaje (kvůli přehlednosti je zde výpis jen pro tři náhodně vybrané zdroje a zdroj původní):

souradnice zdroje - X [m]:	2.00000	10.00000	10.00000	-10.00000
souradnice zdroje - Y [m]:	3.00000	-3.00000	10.00000	-3.00000
vzdalenost zdroje od mikrofonu [m]:	2.82843	7.21110	10.81665	14.56022

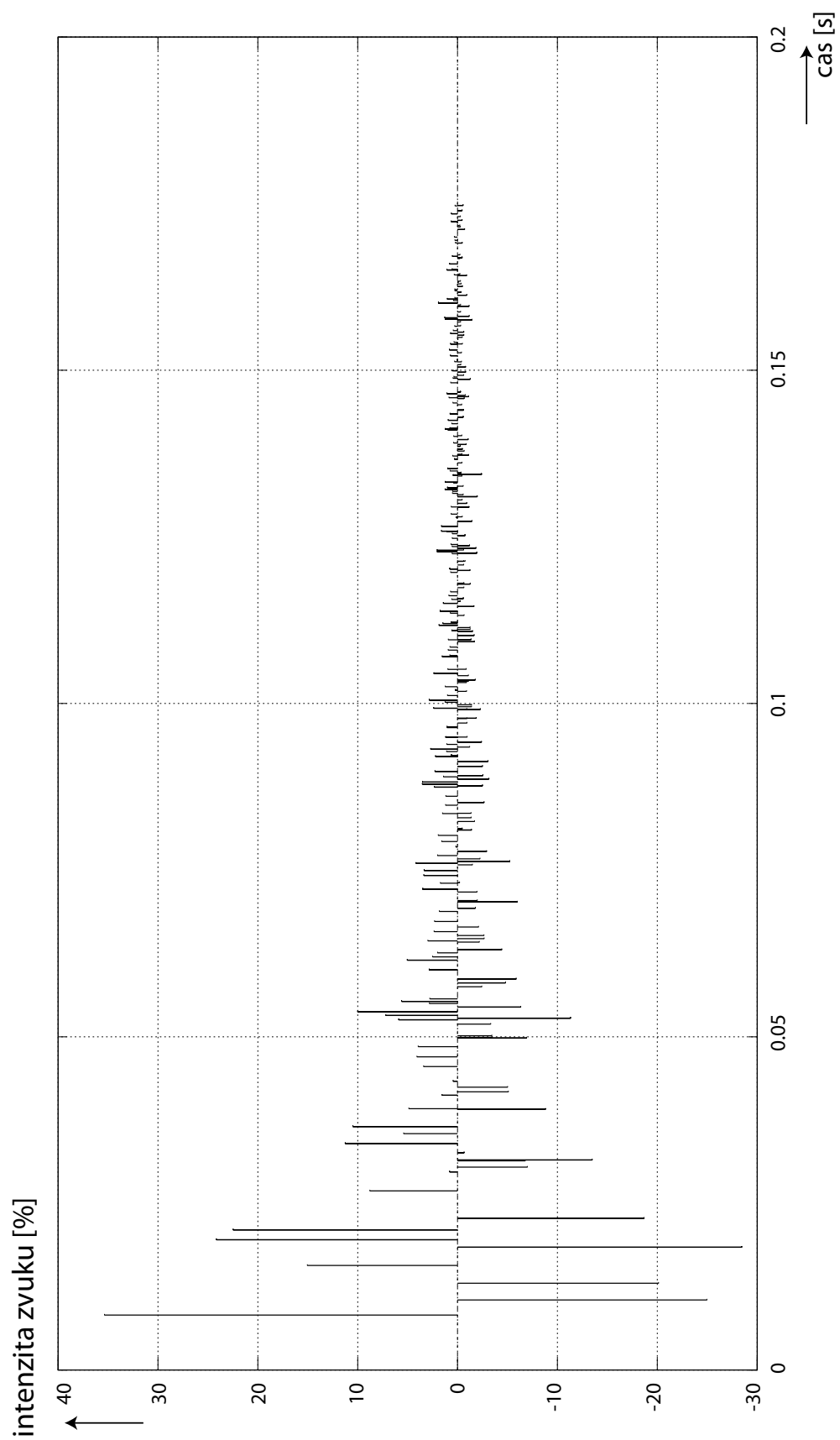
intenzita zvuku [%]:	35.35534	11.23268	-6.73961	-5.00679
pocet zdi v ceste - smer X [-]:	0.00000	1.00000	1.00000	2.00000
pocet zdi v ceste - smer Y [-]:	0.00000	1.00000	2.00000	1.00000
doba cesty od zdroje k mikrofonu [s]:	0.00824	0.02102	0.03153	0.04245

Z uvedených výsledků lze mimo jiné zjistit počet stěn, které stojí zvukovému paprsku v cestě a podle nichž je vždy signál příslušně utlumen. Tedy zdroj na souřadnicích [10,-3] má v dráze jednu zeď ve směru vertikálním a jednu v horizontálním. Zbývající dva zobrazené zdroje mají v cestě stěny celkem tři. Důkazem může být obr. 4.1, na kterém jsou tyto zdroje rozkresleny včetně virtuálních místností, ve kterých se nachází.



Obr. 4.1: Zakreslení zrcadlených zdrojů v okolí původního

Jak tedy může být patrné, některé zdroje mají stejnou vzdálenost od mikrofonu, tedy i stejný čas, kdy dorazí k přijímači. Intenzity zvuku pocházející z těchto zdrojů se tedy sčítají a ve výsledku mohou zvuk v určitém bodě částečně zesílit, případně vynulovat (závisí na fázi). Ve výsledku to vypadá tak, že i ze vzdálenějších zdrojů dopadne signál silnější, než ze zdroje bližšího. To je právě možné pozorovat na vykreslené impulzní charakteristice na další straně na obrázku 4.2. Z grafu je dále patrné, že přímý signál má nejvyšší intenzitu, jelikož je od mikrofonu vzdálen nejméně a v cestě mu nebrání žádná stěna. Čím vzdálenější od přijímače jsou zrcadlené zdroje, tím je v globálním měřítku intenzita menší. Nejmasivnější úbytek intenzity je tedy způsoben převážně vzdáleností, sekundárním hlediskem je pak implementovaný úbytek při odrazu od stěny.



Obr. 4.2: Impulzní charakteristika místnosti $6 \times 3,5$ m pro zvolené souřadnice

4.3 Rozšířená metoda zrcadlových zdrojů

Jak již bylo dříve naznačeno, rozšířená metoda se bude věnovat modelování akustických prostorů složitějších tvarů. Obecně lze tato „tělesa“ nazývat mnohostěny. Počet stěn takové místnosti prakticky není omezen, ovšem je třeba mít na paměti, že se vzrůstajícím množstvím stěn uzavřeného prostoru také roste výpočetní náročnost algoritmu.

Z důvodu časové úspory při výpočtu je algoritmus navržen tak, že neposkytuje maximální svobodu ve tvaru místnosti, ale je omezen na tvar hranolu, kde strop a podlaha jsou horizontální a vzájemně rovnoběžné. Postupováno je tedy při výpočtu obdobně jako v základní metodě pro 2D, kde se zdroje rozvíjely pouze do bočních stran, jen je po výpočtu celá matice zdrojů rozšířena pro další vertikální rozměry.

4.3.1 Hlavní programová funkce

Stejně jako u předchozí metody je implementace prováděna v prostředí Octave (resp. Matlab). Celý předem navržený algoritmus je vhodné rozdělit do několika dílčích funkcí, které budou postupně volány. Důvody pro to mohou být dva, a to zprehlednění celé aplikace a také úspora kódu, jelikož jsou dílčí funkce vícenásobně volány. Vytvořením hlavního souboru funkce s hlavičkou `extended_mirror(ground, height, src, mic)` jsou jasně specifikovány parametry, které jsou při volání požadovány. Parametr `ground` označuje dvojrozměrné pole souřadnic rohů v místnosti, kde jeden roh je zvolen jako počátek `[0,0]` a zbývající body jsou zadávány po směru hodinových ručiček. Zadáním těchto souřadnic je jasně definována podstava. Druhým parametrem `height` je zadána výška místnosti, pomocí které je již přesně určen celkový tvar (mnohostěnný hranol). Zbývajících parametry jsou již ze základní metody známé proměnné `src` a `mic`, které udávají trojrozměrné souřadnice zvukového zdroje a snímacího mikrofону.

V prvním bloku kódu, který je uveden pod tímto textem, jsou ošetřeny vstupní podmínky při volání hlavní funkce.

```
corners = length(ground)
if corners < 3
    error('Ze dvou rohu nelze sestavit mistnost, minimalni pocet jsou tri');
end
if height == 0
    error('Vyska mistnosti musi byt nenulova');
end
height = height * ones(1, corners);
room = [ground ground ; zeros(1, corners) height]
```

Zmiňované podmínky kontrolují, aby v parametru `ground` nebyly zadány méně než tři hodnoty a výška `height` nebyla nulová. Tím je zaručeno, že akustický prostor

bude uzavřený. Nebude-li některá z těchto podmínek splněna, bude do konzolového okna vypsáno informační hlášení a program bude předčasně ukončen. Po provedení této kontroly je sestaveno pole (proměnná `room`), ve kterém jsou uloženy souřadnice všech rohů místnosti, se kterými se bude dále počítat.

Po provedení úvodní části programu je ihned zavolána rekurzivní funkce, která je dále kompletně vysvětlena v podkapitole 4.3.3.

V další části hlavní funkce, která začne probíhat až po provedení všech dílčích skriptů v rekurzivní funkci, se musí vypočítat hodnoty pro přímý zvuk. Aby impulzní charakteristika nebyla ochuzena o první impuls z originálního zdroje, je třeba postupně zjistit vzdálenost tohoto zdroje od mikrofonu, dobu putování zvukového paprsku a nakonec intenzitu zvuku s uvažovaným vzdálenostním útlumem.

```
% vypocty pro originalni zdroj
src_mic_dist = norm(src - mic);
direct_time = src_mic_dist / c;
sound_level_orig = 100 / (src_mic_dist * src_mic_dist)
```

Po výpočtu přímé složky jsou obdobným způsobem jako v základní metodě sečteny intenzity zvuku pro složky, které dorazí k mikrofonu ve stejný časový okamžik. V proceduře je tato část řešena pomocí funkce `find()`, díky které se přesně naleznou stejné hodnoty a vrátí se jejich indexy. Hodnoty intenzit na těchto pozicích se sečtou a uloží do proměnné `sound_sum`. Aby nedocházelo k opakovanému sčítání stejných hodnot, jsou vždy již jednou sečtené hodnoty vynulovány.

```
sound_level_b = sound_level;
for i = 1:length(VS)
    tmp = find(image_time == image_time(i));
    sound_sum(i) = sum(sound_level(tmp));
    sound_level(tmp) = 0;
end
```

Po předchozím výpočtu konečně mohou být vypsány celkové výsledky uložené v proměnné `results`, a to postupně v řádcích v pořadí: souřadnice zdroje (`x`, `y`, `z`), vzdálenost zdroje od mikrofonu, čas, intenzita zvuku v příslušných časech a nakonec počet stěn v dráze zvuku (0 je zde vypsána pro originální zdroj, kterému žádná stěna nebrání). Celý výpis výsledků je ihned po vypsání uložen do textového souboru `results.txt`, aby ho bylo možné procházet i po ukončení prohlížení.

```
% celkove vysledky
info = ['x' ; 'y' ; 'z' ; 'vzdalenost' ; 'cas' ; 'intenzita' ; 'pocet sten']
results = [src VS ; src_mic_dist vsrc_mic_dist ; direct_time image_time ;
           sound_level_orig sound_level_b; 0 walls]
id_result = fopen('results.txt', 'w');
fdisp(id_result, results);
fclose(id_result);
```

Jsou-li již všechny výpočty provedeny a algoritmus téměř u svého konce, zbývá samotné vytvoření impulzní charakteristiky. Pro grafické zobrazení je stejně jako v případě základní metody využita funkce `stem()`, kterou není třeba dále popisovat. Je pouze vhodné zmínit, že její výstup je dále exportován do grafického vektorového formátu.

Důležitější je ovšem zvukové vyjádření, které bude dále využito pro auralizaci. Jelikož jsou hodnoty intenzity uloženy v různém pořadí (funkce `stem()` se s touto situací vypořádá sama), je třeba je nejdříve seřadit podle času. K tomu je využita interní funkce `sort`, která vrací seřazené hodnoty a přesné pořadí těchto hodnot. Toto pořadí, v kódu uloženo do proměnné `ii`, je využito pro vypsaní a uložení hodnot intenzit přesně podle seřazených časů v dvourozměrném poli hodnot `h`. Poté již nic nebrání v zavolání funkce provádějící auralizaci, která bude popsána dále v kapitole 4.3.4.

```
h = [[direct_time image_time]; [sound_level_orig sound_sum]];

% je nutne seradit impulzy podle casu
[time, ii] = sort(h(1,:));
hh = h(2,ii);

auralize(hh,'impulse.wav','impulse.txt','five.wav','auralized.wav');
```

Výstupem celého programu je tedy několik samostatných souborů. Je to textový soubor s výsledky výpočtů `results.txt`, grafický soubor s impulzní charakteristikou `figimp.eps`, textový soubor s časově seřazenými hodnotami intenzity `impulse.txt`, zvukový soubor s impulzní charakteristikou ve formátu WAV `impulse.wav` a nakonec auralizovaný zvukový soubor `auralized.wav` (tj. reprezentace zvuku přímo v simulovaném prostředí).

4.3.2 Funkce pro výpočet zrcadlených zdrojů

Hlavním smyslem této funkce je využití při vlastním výpočtu zrcadlených zdrojů. Při návrhu bylo prakticky vycházeno z analytických předpokladů, které byly rozebrány v kapitole 3.3. V záhlaví funkce `[VS] = getCoords(coords,ref_point)` je opět nutné stanovit některé předávané parametry. Prvním z nich je `coords`, kam je obvykle při volání ukládán obsah proměnné `room`, ovšem aby parametr nebyl zavádějící a funkce mohla být používána univerzálněji, je zvoleno odlišné pojmenování. Druhým parametrem je `ref_point`, který označuje referenční bod, pro něhož bude počítáno zrcadlení. Takový bod je v rámci této funkce vždy pouze jeden.

Celá procedura obsahuje jeden velký cyklus, kterým zaručíme provedení výpočtu vždy pro všechny boční stěny uzavřeného prostoru. Před samotným definováním cyklu je nutné nastavit obsah proměnné `corners` na polovinu délky pole `coords`. To

je prováděno proto, že `coords` obsahuje souřadnice rohů jak u podlahy, tak i stropu místnosti, výpočty ovšem probíhají pro stěny. Těch je tedy přesně polovina.

```
x = coords(:,i);
y = coords(:,i+1);
z = coords(:,i+corners);

xy = y-x;
xz = z-x;
u(:,i) = cross(xy,xz); % normalovy vektor roviny (steny)
e(i) = -dot(u(:,i),x); % vyjadreni promenne d z obecne rovnice roviny
n(:,i) = [u(:,i); e(i)]; % normalovy vektor doplneny o hodnotu e
denominator = norm(u(:,i)); % normovany normalovy vektor
nominator = dot(u(:,i),ref_point) + e(i); % skalarni soucin normaloveho vektoru a bodu
fraction(i) = nominator / denominator; % orientovana vzdalenost bodu od roviny
```

Výše vypsaná část funkce přesně koresponduje s matematickým popisem uvedeným dříve, jen je zde pro rychlejší výpočet využito implicitních funkcí Octave. Jsou to funkce `cross()`, `dot()` a `norm()`, které zastupují matematické operace: vektorový součin, skalární součin a normování vektoru, tj. převod normály roviny na jednotkový vektor.

V další části, která je pro tento algoritmus stěžejní, se před samotným vygenerováním souřadnic nového bodu kontroluje validita. Princip kontroly byl popsán v podkapitole 3.2. Aby bylo možné vyhnout se případným chybám ve výpočtu, nejsou neplatné zdroje nulovány, ale je jim nastavena velmi vysoká hodnota, která se při běžném výpočtu prakticky nemůže objevit. V případě, že by se takové hodnoty objevily, je velmi snadné hodnotu v kódu nastavit na vyšší. Tato vysoká čísla jsou poté v rekurzivní funkci odmazávána a není s nimi dále počítáno.

```
% vypocet bodu promitnuteho na rovine (stene)
if (fraction(i) < 0)
    % validita resena nastavenim velmi vysokeho cisla
    VS(:,i) = [10e5 10e5 10e5];
else
    for j = 1:3
        projection(j,i) = ref_point(j) - (u(j,i)/denominator) .* fraction(i);
    end
    % vypocet virtualniho zdroje
    VS(:,i) = 2 * projection(:,i) - ref_point';
end
```

Po úspěšném proběhnutí algoritmu je vrácen přesně takový počet virtuálních zdrojů, kolik bočních stěn místnost má. Pokud byl již některý zdroj přes danou stěnu zrcadlen, je označen za neplatný. Jelikož bývá v rodičovské funkci tento podprogram volán v cyklu podle aktuálního počtu zdrojů některého řádu, je možné si představit, že výpočetní náročnost nebude malá. Např. sedmý řád odrazu pro šestibokou místnost probíhá řádově v minutách, záleží však na výkonnosti procesoru.

4.3.3 Návrh rekurzivní funkce

Nejpodstatnější částí, na které je prakticky celý program postaven, je návrh rekurzivní funkce řešící výpočty zdrojů a jejich akustické intenzity do nastavené hloubky odrazu. Volání je poprvé provedeno z hlavní funkce programu pomocí této hlavičky:

```
[VS,vsrsrc_mic_dist,image_time,sound_level,level,walls,original] =  
= recurse(corners,room,VS,mic,height,level,tmp_l,walls,original),
```

kde je funkci jako parametr předáváno několik proměnných. Zmiňovány zatím nebyly: `level`, `tmp_l`, `walls` a `original`. První dva jmenované parametry jsou ostatní před samotným zavoláním funkce `recurse` nastaveny na jedna. V proměnné `level` je v uchovávána hloubka výpočtu (řád odrazu), do `tmp_l` je v průběhu práce programu ukládána předchozí délka vektoru `VS` a `walls` obsahuje počet stěn, kterými zvuk při „odrazech“ prochází. Kromě tohoto účelu je `walls` také používána k určování fáze zvuku, a to podle sudosti (resp. lichosti) hodnot (podobně tomu bylo v implementaci základní metody). Proměnná `original` slouží pouze jako paměť souřadnic originálního zdroje.

Parametr `VS` slouží jako referenční bod, pro který se počítají zrcadlené zdroje. Z toho vyplývá, že ve `VS` je při prvním volání stejný obsah jako v proměnné `original` a v dalších opakování rekurze jsou již místo něj automaticky zadávány souřadnice nově vzniklých virtuálních zdrojů.

Při definování jakékoliv rekurzivní funkce je velmi důležité stanovit výstupní podmínku, za které se prováděný cyklus ukončí, a tak program nepoběží donekonečna. V tomto případě byl hlavním rozhodujícím hlediskem řád odrazu, tedy proměnná `level`. Celé tělo rekurzivní funkce je uzavřeno v podmínce, která rozděluje kód do tří hlavních bloků.

```
if (level == 1)  
    %% vypocet prvnioho radu  
elseif (level == 7)  
    %% vypocet posledniho radu -> zde 7  
    %% a ukoncení behu  
else  
    %% vypocet vseh ostatnich radu  
end
```

První blok nastává za situace, kdy řád odrazu `level == 1`. Za takového stavu je do proměnné `original` převeden originální zdroj a poté je zavolána již v minulé kapitole rozebraná funkce `getCoords(...)`. Její využití spočívá v samotném analytickém výpočtu zrcadlených zdrojů. Jejím výstupem se tedy získají virtuální zdroje prvního řádu odrazu. Nakonec je do vektoru `walls` uložen počet stěn pro první řád odrazu (řádek kódu, který se během celé rekurze opakuje pro všechny tři hlavní podmínky, je vypsán níže).

Není-li první podmínka splněna, přejde program na kontrolu druhou, ve které se zjišťuje, zda řád odrazu `level` odpovídá zadanému maximu. V kladném případě se provede několik následujících bloků kódu, které budou postupně vysvětleny.

```
l_VS = length(VS);
for i = tmp_l+1:l_VS
    tmp = getCoords(room,VS'(i,:));
    VS = [VS tmp];
end
walls = [walls level*ones(1,length(VS))];
```

Zpočátku je do proměnné `l_VS` uložena aktuální délka matice `VS`, tedy počet již vytvořených virtuálních zdrojů. Poté se v cyklu od hodnoty uložené v `tmp_l` do délky `VS`, tedy pouze pro nově vytvořené virtuální zdroje, zavolá opět `getCoords(...)`. Následně se do proměnné `VS` uloží k již dříve vypočítaným souřadnicím zdroje nové. Jakmile jsou všechny zdroje vygenerovány, provede se výpočet všech stěn, které se vyskytují mezi příslušným virtuálním zdrojem a přijímačem. Této informace se dosáhne jednoduše pomocí řádu odrazu, tedy pro první řád je počet stěn jedna, pro druhý dva atd.

Protože jsou zatím v matici `VS` uloženy na některých pozicích i nevalidní souřadnice, je nutné je při dalším postupu eliminovat. K tomu je opět využita funkce `find()`, která vyhledá definované vysoké hodnoty v celé matici a vytvoří dvojrozměrné pole pouze z použitelných zdrojů (`useful_VS`). Nakonec jsou tyto použitelné zdroje přiřazeny přímo do proměnné `VS`. Vzhledem k tomu, že se na stejných pozicích jako byly zdroje nevalidní nachází i již zmiňované počty stěn, jsou ve stejném cyklu příslušné počty stěn odstraněny.

```
% reseni validity zdroje
ind = find(VS(1,:) == 10e5 | VS(2,:) == 10e5 | VS(3,:) == 10e5)
useful_VS = [];
useful_walls = [];
for i = 1:length(VS)
    if (ind != i)
        useful_VS = [useful_VS VS(:,i)];
        useful_walls = [useful_walls walls(:,i)];
    end
end
VS = useful_VS;
walls = useful_walls;
```

Až doposud celý program počítal prakticky jen 2D výpočty, aby bylo šíření zvuku uvažováno prostorově, je nutné vypočítané souřadnice rozšířit do třetího rozměru. K tomuto účelu je použit algoritmus implementovaný již v základní metodě zrcadlových zdrojů, který generuje matici souřadnic na jednotlivých osách. Zde je tedy podle maximálního řádu odrazu vytvořen vektor s výškami zdroje zrcadlenými přes strop a podlahu.

```

%% vypocet pro 3D zobrazeni
zCoord_VS = VS(3,1);
height = height(1);
zCoord_VS_ = height-zCoord_VS;

% vytvoreni souradnic Z
for i = 1:level
    if mod(i,2) == 1
        zPlus(i) = (i-1)*height+zCoord_VS;
    else
        zPlus(i) = (i-1)*height+zCoord_VS_;
    end
    zMinus(level+1-i) = -zPlus(i);
end
zCoord_VS = [zMinus zPlus]

```

K vytvořeným zdrojům ve třetím rozměru je nutné opět spočítat příslušný počet zdí. To je provedeno v níže definovaném cyklu pomocí pomyslných pater, se kterými tato množství stěn přesně korespondují. Tyto hodnoty ve vektoru `walls` na závěr poslouží k výpočtu útlumu na zdech při odrazu a ke zjištění fáze zvuku.

```

l_zC = length(zCoord_VS);
for i = -1*l_zC/2:(l_zC/2)-1
    zCoord_walls = [zCoord_walls abs(i)];
end

```

Po výpočtu souřadnic třetího rozměru a příslušného počtu stěn uložených ve vektorech `zCoord_VS` a `zCoord_walls` se v závislosti na délce vektoru `zCoord_VS` několikrát zkopíruje obsah `VS` za sebe a na pozici souřadnic z se použijí postupně všechny vygenerované výšky. Aby byly zdroje kompletní, musí se vzít v potaz i virtuální zdroje přesně nad a pod originálním zdrojem, tedy se stejnými souřadnicemi v osách x a y . Algoritmus níže je navíc doplněn o podmínku, díky které se znovu nekopíruje zdroj hlavní (zadaný již při volání funkce). K příslušným souřadnicím jsou následně opět vypočteny stěny stojící mezi zdrojem a mikrofonom.

```

for i = 1:l_zC
    tmp = [VS(1:2,:) ; zCoord_VS(i)*ones(1,length(VS))];
    VS_z = [VS_z tmp];

    % rozsireni originalnich zdroju do vysky
    if (zCoord_VS(i) != original(3))
        tmp_o = [original(1:2) ; zCoord_VS(i)];
        VS_orig_z = [VS_orig_z tmp_o];
        walls_orig_z = [walls_orig_z zCoord_walls(i)];
    end

    walls_VS = [walls_VS walls];
    walls_z = [walls_z zCoord_walls(i)*ones(1,length(VS))];
end
VS = [VS_orig_z VS_z];

```

Jelikož je v této fázi hlavní podmínky již průchod rekurzivní funkce prakticky u svého konce, provádí se v následujícím bloku výpočet vzdáleností všech virtuálních zdrojů od mikrofону. Z těchto hodnot je dále získána informace časová (uložena v poli `image_time`), která udává dobu potřebnou pro zvuk k tomu, aby dorazil od virtuálního zdroje k mikrofону. Tato doba bude později využita při získávání impulzní charakteristiky. Nakonec je v rámci tohoto bloku, obdobně jako při implementaci základní metody, signál navzorkován, tentokrát s periodou 48 kHz.

```
for j = 1:length(VS)
    vsrc_mic_dist(:,j) = norm(VS(:,j) - mic');
end
image_time = vsrc_mic_dist / c;

% navzorkovani s periodou 1/fs
samples = floor(image_time ./ ts);
image_time = samples.*ts;
```

V posledním bloku je nejdříve definována plná intenzita zvuku jednotlivých zdrojů a poté je snížena v závislosti na vzdálenosti. Po této redukci je dále aplikován útlum při odrazech ode zdí, pro který byly po celou dobu běhu programu ukládány do vektoru `walls` příslušná množství stěn. Princip tohoto útlumu je stejný jako v metodě základní a je opět využito činitele útlumu $\alpha = 0,1$. Parametru `walls` je využit ještě ke zjišťování fáze zvukové vlny. Rozhodování je opět totožné jako v nerozšířené metodě. Poslední řádek s příkazem `break`; pak zastává činnost ukončení cyklu rekurze a návrat do hlavní funkce.

```
sound_level = 100*ones(1,length(VS));
sound_level = sound_level ./ (vsrc_mic_dist .* vsrc_mic_dist);

%utlum pri odrazu od steny - cinitel odrazu alfa = 0.1 a otoceni faze pri odrazu
for i = 1:length(VS)
    sound_level(i) = power(0.9,walls(i))*sound_level(i);
    if (mod(walls(i),2) == 1)
        sound_level(i) = -1*sound_level(i);
    end
end

break;
```

Po tomto vysvětlení postupu při závěrečném průchodu rekurzivní funkce je třeba se vrátit k tělu hlavní podmínky, které nastane ve všech ostatních případech. Tedy není-li proměnná `level` rovna ani jedné, ani zvolenému maximálnímu řádu.

Z programového hlediska zastává tento blok práci obdobnou jako předchozí, ovšem s tou výjimkou, že nejsou v této sekci dále počítány vzdálenosti zdrojů, čas potřebný pro zvukový paprsek k dosažení mikrofónu a není prováděno ani vzorkování signálu.

Taktéž je nutné pro situaci, kdy proměnná `level == 2`, nastolit speciální podmínku, pomocí které zaručíme bezproblémovou funkčnost algoritmu. Prakticky je

třeba ošetřit ten problém, kdy je k dispozici zatím pouze jediný zdroj. Rozdíl je také v závěru, kde je ukládána do dříve uváděné proměnné `tmp_1` délka vektoru `VS`, která se použije pro následující cyklus. Rovněž je také zvýšen počet rohů (proměnná `corners`) umocněním na druhou. Popisovaný kód je vypsán níže.

```
l_VS = length(VS);
if (level == 2)
    tmp_1 = tmp_1-1;
end

for i = tmp_1+1:l_VS
    tmp = getCoords(room,VS'(i,:));
    VS = [VS tmp];
end
walls = [walls level*ones(1,length(VS))];
tmp_1 = l_VS;

corners = power(corners,2);
```

Na závěr rekurzivní funkce je mimo hlavní podmínku už pouze řád odrazu `level` zvýšen o jedna a poté je sama sebou zavolána celá funkce znovu, což je hlavní podstata rekurze. Parametry musí být při tomto volání totožné a výstup také.

Aby bylo možné porovnávat časovou náročnost výpočtů jednotlivých řádů, je prakticky celý program uzavřen do dvou příkazů – `tic` a `toc`. Po kompletním proběhnutí je tedy přesně znám čas výpočtu.

4.3.4 Doprovodné funkce programu

Mimo hlavních funkcí, které již byly vysvětleny, jsou v tomto projektu vytvořeny další dvě doprovodné funkce. Jedna již byla dříve zmíněna, a to procedura pro auralizaci: `auralize(h,impulse_wav_output,impulse_txt_output,wav_input,wav_output)`, které se jako parametry předávají seřazené hodnoty impulzní charakteristiky, vstupní zvukový soubor pro auralizování a dále se definují názvy výstupních souborů ve formátu WAV.

```
%normalizace
h = h ./ abs(max(abs(h)));
wavwrite(h',48000,impulse_wav_output)
```

Po zavolání auralizační funkce je nejdříve vstupní vektor s hodnotami intenzit normalizován, jelikož pro pozdější zápis do zvukového formátu WAV by hodnoty větší než jedna byly ořezány. Normalizace je prováděna tak, že se provede vyhledání největší hodnoty z vektoru `h` a tou jsou všechny hodnoty vyděleny. Ve výsledku to vypadá tak, že hodnota, která byla nejvyšší, je nyní rovna jedné a ve stejném poměru jsou redukovány hodnoty zbývající. Poté je teprve charakteristika se vzorkováním 48 kHz uložena do definovaného výstupního souboru.

Ve druhé části funkce je pak načten do proměnné `x1` vstupní zvuk, který je určen k auralizaci a je konvolvován s impulzní charakteristikou. Výsledný signál musí být opět normalizován a pak opět uložen jako samostatný zvukový soubor. Při ukládání by měla být dodržena vzorkovací frekvence původního zvuku, aby si rychlosti vzájemně odpovídaly.

```
x1 = wavread(wav_input);
aur = conv(x1',h);

%vystupni normalizace
aur = aur ./ abs(max(abs(aur)));
wavwrite(aur',48000,wav_output);
```

V tomto momentu je tedy program schopen vygenerovat impulzní charakteristiku včetně její zvukové simulace. Zvuk je ovšem pouze jednokanálový (mono). Aby bylo možné získat například dvoukanálový stereosignál, je nutné manuálně provést některé operace. Především musí být spuštěn hlavní program se stejnými parametry stěn a zdroje pro dva rozdílné přijímače (vzájemně posunuty přibližně o 0,20 m). Toto posunutí by mělo simulovat levé a pravé ucho hlavy. Mezi jednotlivými voláními musí být zazálohovány auralizované výstupní zvuky pro oba definované přijímače. Je-li toto splněno, je možné zavolat druhou doprovodnou funkci, a to `mono2stereo(wav_input_a,wav_input_b,wav_output,fs)`, za pomoci které složíme ze dvou jednokanálových stop jednu dvoukanálovou.

```
a = wavread(wav_input_a);
b = wavread(wav_input_b);
wavwrite([a b],fs,wav_output);
```

Princip je velmi jednoduchý. Podle parametrů funkce jsou načteny dva vstupní zvuky a s definovanou vzorkovací frekvencí jsou uloženy na výstup tak, že je v každém kanálu jeden.

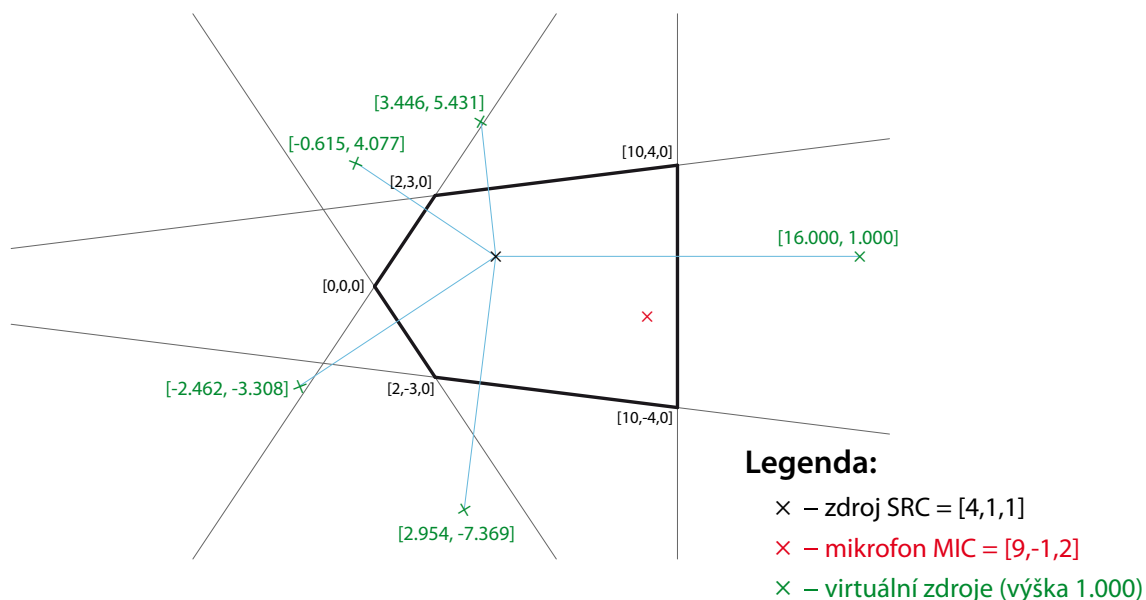
4.4 Příklad a výsledky k rozšířené metodě

Pro praktické otestování druhé implementované metody byla zvolena místnost ve tvaru osově souměrného pětibokého hranolu o výšce 5 m, jehož půdorys je možné spolu s prvními odrazy zhlédnout na obrázku 4.3. Ze zakreslených bodů podstavy je možné vyčíst některé parametry předávané funkci při jejím volání. Zápis vypadá následovně:

```
extended_mirror([0 2 10 10 2;0 3 4 -4 -3],5,[4 1 1],[9 -1 2])
```

Souřadnice rohů při podstavě jsou tedy zadávány postupně ve směru hodinových ručiček a díky zadané výšce je utvořena celá matice všech deseti rohů. Zbývající dva

parametry, které definují originální zvukový zdroj (na souřadnicích $[4,1,1]$ m) a mikrofon (souřadnice $[9,-1,2]$ m), jsou v obrázku odlišeny barvami. Tvar této místnosti byl zvolen z důvodu, aby byly odzkoušeny různé situace (např. místnost není pravoúhlá, místnost není čtyřboká, existuje zde jedna kolmá stěna, souřadnice nemají pouze kladný charakter, zdroj s mikrofonem nejsou ve stejné výšce apod.).



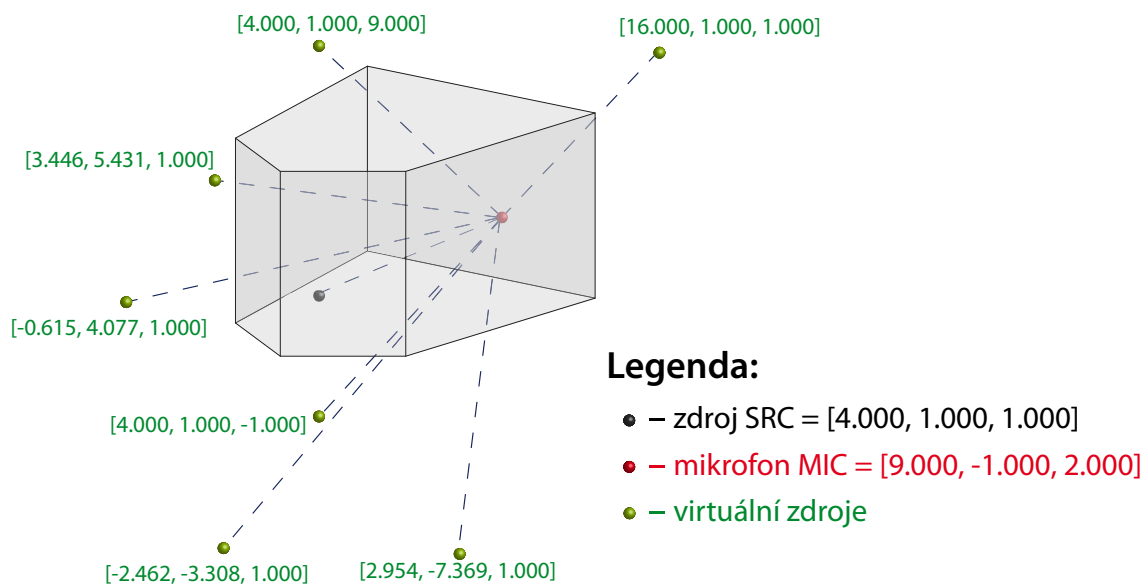
Obr. 4.3: Půdorys simulované místnosti a virtuální zdroje prvního řádu

Správnost výpočtů souřadnic virtuálních zdrojů byla při implementaci kontrolována grafickou metodou, a to pro dva řády. Jelikož všechny výpočty souhlasily, dalo se již předpokládat, že i řády vyšší budou správné. Pro pořádek je nutné podotknout, že v obrázku jsou souřadnice zaokrouhleny na tři desetinná místa.

Jelikož je u této metody generováno velmi mnoho virtuálních zdrojů, nejsou zde číselné výsledky funkce vypsány pro všechny řády, ale jsou zde pouze pro kontrolu vloženy hodnoty pro první řád.

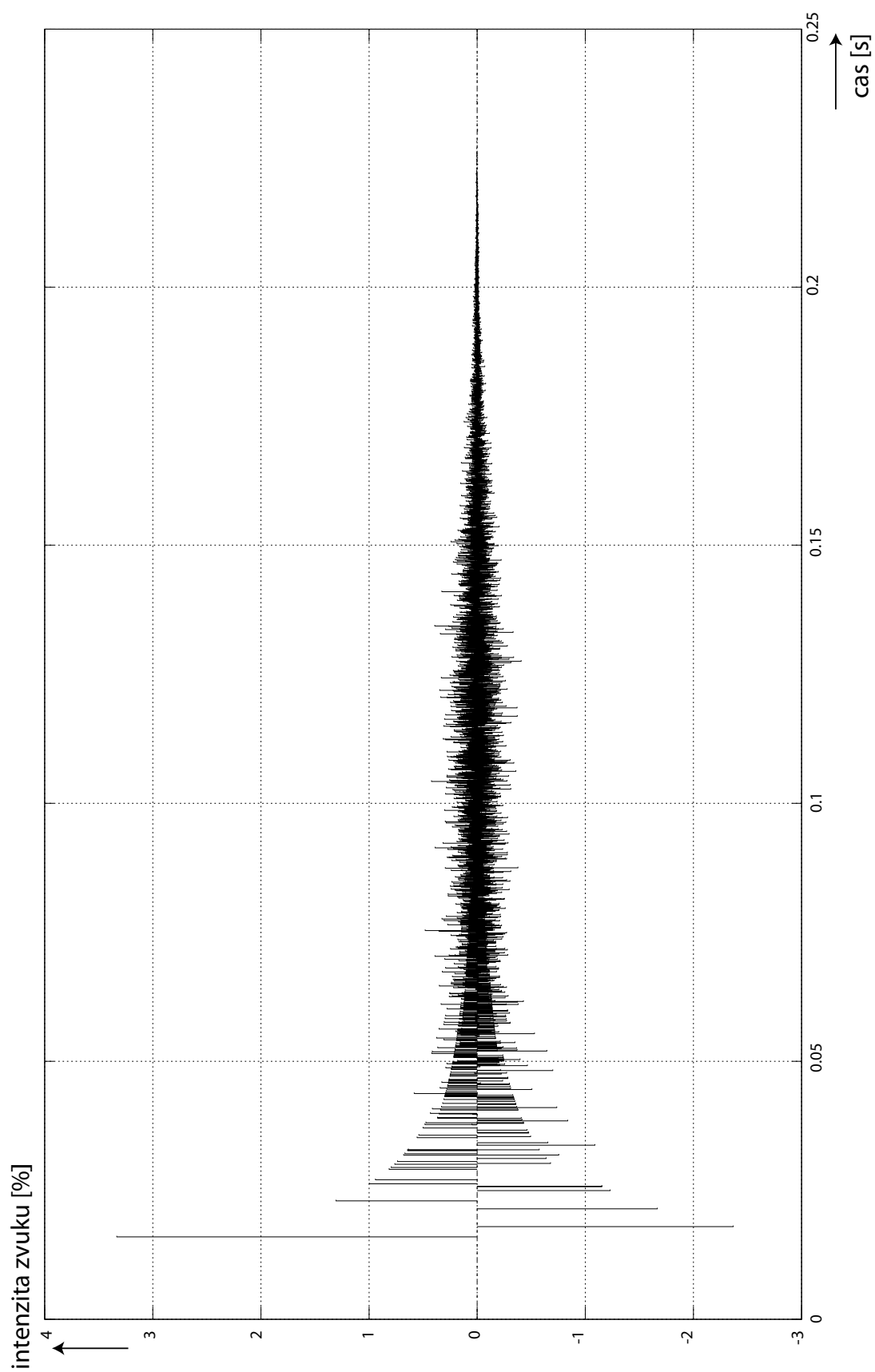
souřadnice x [m]:	-0.61538	3.44615	16.00000	2.95385	-2.46154
souřadnice y [m]:	4.07692	5.43077	1.00000	-7.36923	-3.30769
souřadnice z [m]:	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
vzdálenost [m]:	10.919284	8.555700	7.348469	8.838726	11.734237
cas [s]:	0.031833	0.024937	0.021417	0.025760	0.034208
intenzita [%]:	0.838710	1.366120	1.851852	1.280032	0.726257

Pro lepší představu je dále zobrazen 3D pohled (4.4), ze kterého je zcela zřetelné, jak uzavřený simulovaný prostor vypadá. I zde jsou vyobrazeny virtuální zdroje prvního řádu, u kterých je navíc vyznačena jejich přímá cesta k mikrofonu.



Obr. 4.4: 3D pohled na simulovanou pětibokou místnost s virtuálními zdroji prvního řádu

Závěrem je uvedena na následující straně výsledná impulzní charakteristika simulované místnosti pro osmý řád odrazu, na níž je možné nejen pozorovat kvadratický úbytek intenzity se vzrůstajícím časem (vzdáleností), ale také otáčení fáze zvuku, útlum při odrazech a nakonec i součty intenzit u impulzů stejných časových momentů. Příslušné zvukové soubory, které byly spolu s příkladem vygenerovány, je možné najít na optickém médiu v příloze, stejně jako všechny zdrojové kódy a potřebné soubory.



Obr. 4.5: Impulzní charakteristika pětiboké místnosti s výškou 5 m do osmého řádu odrazu

5 ZÁVĚR

V rámci teoretické přípravy semestrální práce byla rozebrána témata, která se týkají akustických prostorů a jejich simulací. Z předchozí teoretické úvahy vyplynulo, že se dále projekt bude zaměřovat na geometrické modelovací metody, které v daném okruhu témat přinášejí nejspokojivější výsledky.

V realizační části byla jako úvodní metoda pro praktické seznámení s problematikou zvolena metoda zrcadlových zdrojů, kterou se podařilo implementovat pro základní pravoúhlý akustický 2D prostor tak, aby rychlost a složitost výpočtu nebyla příliš vysoká. Samotná programová část byla v práci detailně popsána. K této metodě byla provedena simulace 2D modelu řezu místností s rozměry $(6 \times 3,5 \text{ m})$ s danou pohltivostí stěn. Z výsledků je možné se domnívat, že po rozšíření modelu na 3D, bude impulzní charakteristika realisticky vystihovat akustiku místnosti při zjednodušeném modelu akustických vlastností stěn.

Pro přiblížení se reálným podmínkám byla v další části práce rozmyšlena možná proveditelná rozšíření základní metody. Po této analýze bylo dosaženo závěru, že bude vhodné další práci směřovat na obecné nepravoúhlé místnosti. V kapitole věnované tomuto problému byly popsány hlavní myšlenky tohoto rozšíření, a to i po stránce matematické.

Pro implementaci bylo z důvodů časové a výpočetní náročnosti zcela obecné místnosti částečně ustoupeno. Ve výsledku jsou simulované prostory uvažovány jako mnohostěnné hranoly, tzn. libovolné místnosti s vodorovnou rovnoběžnou podstavou a stropem. Tato sorta akustických prostorů již umožňuje pojmout velké množství místností, které mohou být k simulaci požadovány.

Velmi podrobně byly dále zdokumentovány jednotlivé implementované funkce, takže by neměl být problém je případně doplnit. Ná závěr byla opět provedena simulace akustického prostoru, tentokrát pětiboké místnosti, která by mohla připomínat divadelní sál. Pro tento prostor byla v rámci výpočtu vygenerována impulzní charakteristika až do osmého řádu odrazu. Výpočet tohoto prostoru pro osmý řád trval necelých 65 minut a na jeho výstupu byl mimo charakteristiky získán i auralizovaný zvuk, jehož originální zdroj byl zaznamenán v mrtvé komoře. Za účelem auralizace byla vytvořena ještě sedmiúrovňová simulace pro dvojici přijímačů, které jsou vzájemně posunuty přibližně jako levé a pravé ucho na hlavě člověka. Z těchto dvou simulací byl následně složen jeden dvoukanálový zvukový soubor, který je připojen v příloze.

Celkově lze o práci říci, že se podařilo splnit zadání a navíc také implementovat rozšířenou metodu pro akustické prostory tvaru mnohostěnného hranolu, kde je mimo grafického výstupu namodelován i výstup zvukový, který by měl korespondovat se simulovanou místností a jejími parametry.

LITERATURA

- [1] BORISH, J. *Extension of the image model to arbitrary polyhedra*. Journal of the Acoustical Society of America, 1984, s. 1827-1836. ISSN 0001-4966.
- [2] BARTSCH, H. J. *Matematické vzorce*. Třetí, revidované vydání. Praha: Mladá fronta, 2000. 832 s. ISBN 80-204-0607-7.
- [3] CPE, s. r. o. *Prostorová akustika* [online]. [cit. 10-12-2009]. Dostupné z URL: <<http://cpe.by1.cz/clanky/pakust/pakust.htm>>
- [4] EKOSOFT. *Matematické modely popisující šíření hluku* [online]. [cit. 10-12-2009]. Dostupné z URL: <<http://ekosoft.by1.cz/clanky/modely.htm>>
- [5] ELORZA, D. O. *Ray-Tracing Thesis*. University of Turku. 2005. 116 s. Dostupné z URL: <<http://www.ttl.fi/NR/rdonlyres/6E2C64C0-0F24-4050-B783-BC9B15401DBC/0/H8.pdf>>
- [6] SVOBODA, V. *AudioCity - Základy akustiky (3. díl)* [online]. Ze dne 22. 9. 2003. [cit. 9-12-2009] Dostupné z URL: <<http://www.audiocity.cz/clanek.php?id=72>>
- [7] VIGRAN, T. E. *Building Acoustics*. Taylor & Francis, 2008. 362 s. ISBN 0-203-93131-9

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

2D	dvojrozměrný
3D	trojrozměrný
ČSN	česká státní norma
WAV	zvukový formát Wave

α	činitel pohltivosti materiálu
f_k	kritický kmitočet
f_s	vzorkovací kmitočet
m	činitel útlumu prostředím
S	obsah plochy
T	doba dozvuku
T_S	doba dozvuku definovaná podle Sabina
T_E	doba dozvuku definovaná podle Eyringa
V	objem místnosti

SEZNAM PŘÍLOH

1. DVD obsahující elektronickou verzi této práce, zdrojové kódy implementovaných metod a výsledky praktických příkladů