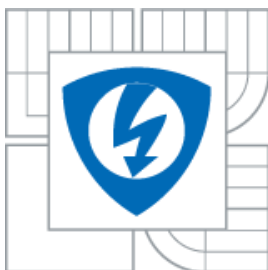




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULACE ŠÍŘENÍ ZVUKOVÉ VLNY V UZAVŘENÉM PROSTORU POMOCÍ PROSTŘEDKŮ GEOMETRICKÉ AKUSTIKY

SIMULATION OF SOUND WAVE PROPAGATION IN CLOSED SPACE,
USING TOOLS OF GEOMETRIC ACOUSTICS.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ HUSÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. KRISTIÁN ORLOVSKÝ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Ondřej Husák

ID: 134318

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Simulace šíření zvukové vlny v uzavřeném prostoru pomocí prostředků geometrické akustiky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je nastudovat metody šíření zvukové vlny v uzavřeném poslechovém prostoru pomocí výpočtů geometrické akustiky. Zejména se jedná o použití Obrazové metody, metody Ray-Tracing a metody Beam-Tracing pro výpočet odrazů zvukových vln od stěn v uzavřeném prostředí bez překážek. Výsledkem bakalářské práce budou algoritmy Obrazové metody a metody Ray-Tracing zrealizovány v prostředí MATLAB a tyto metody budou srovnány na základě provedených simulací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Savioja L.; Manocha D.; Lin M. C., "Use of GPUs in room acoustic modeling and auralization," in Proc. Int. Symp. Room Acoustics, Aug 2010.
- [2] Borish, J., "Extension of the image model to arbitrary polyhedra," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 75, no. 6, pp. 1827– 1836, 1984.
- [3] Krokstad, A.; Strom, S.; Sorsdal, S., "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique," Journal of Sound and Vibration, vol. 8, no. 1, pp. 118–125, 1968.
- [4] Allen, J. B.; Berkley, D. A., "Image method for efficiently simulating small-room acoustics," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 65, no. 4, pp. 943–950, Apr. 1979.

Termín zadání: 11. 2. 2013

Termín odevzdání: 5. 6. 2013

Vedoucí práce: Ing. Kristián Orlovský

Konzultanti bakalářské práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o simulaci šíření zvukové vlny v uzavřeném prostoru pomocí prostředků geometrické akustiky. Zejména se jedná o srovnání a použití Obrazové metody, metody Ray-Tracing a metody Beam-Tracing pro výpočet odrazů zvukových vln od stěn v uzavřeném prostředí bez překážek. Velká část bakalářské práce je zaměřena na algoritmy Obrazové metody a metody Ray-Tracing, které jsou zrealizovány v prostředí Matlab, a jejich výsledky jsou srovnány na základě provedených simulací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Simulace zvukové vlny v uzavřeném prostoru, geometrická akustika, Obrazová metoda, metoda Ray-Tracing, metoda Beam-Tracing, Snellův zákon lomu, Impulzní charakteristika akustického prostoru, řád odrazu, zdroj signálu, posluchač, virtuální zdroj, vzdálenost bodu v rovině, směrníkový tvar přímky, vzdálenost bodu od přímky, směrníkový vektor a normálový vektor.

ABSTRACT

The bachelor thesis focuses on a simulation of sound wave spreading in closed space using tools of geometric acoustics. It mainly concerns on comparison and using of image source method, Ray-Tracing Method, and Beam-Tracing for counting of sound waves rebounds in close environment without obstacles. A big part of the thesis is measured by algorithms of image source method and Ray-Tracing Method. It's realized in Matlab software. The results are compared on based of executed simulations.

KEY WORDS

Simulation of sound waves in a confined space, geometrical acoustics, image source method, Ray-Tracing method, beam-tracing, Snell's law of refraction, impulse response of the acoustic space, the order of reflection, source, listener, virtual source, distance of a point in the plane, Regulatory shape lines, distance of a point from a line, Regulatory vector and normal vector.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Simulace šíření zvukové vlny v uzavřeném prostoru pomocí prostředků geometrické akustiky“ jsem vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Kristiána Orlovského a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a 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.

BRNO

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat panu Ing. Kristiánu Orlovskému, vedoucímu mé bakalářské práce, za pomoc, odborné rady a hlavně trpělivost při průběhu zpracování bakalářské práce.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HUSÁK, O. Simulace šíření zvukové vlny v uzavřeném prostoru pomocí prostředků geometrické akustiky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kristián Orlovský.

OBSAH

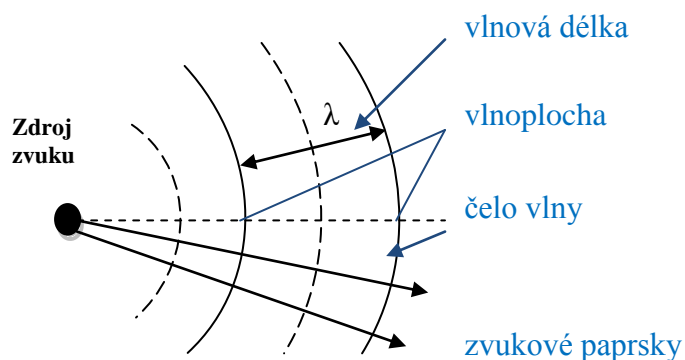
ÚVOD.....	9
1. ŠÍŘENÍ ZVUKU V PROSTORU	10
2. PROSTOROVÁ AKUSTIKA	12
2.1. IMPULZOVÁ CHARAKTERISTIKA PROSTORU.....	12
2.2. DOBA DOZVUKU	13
2.3. KRITICKÝ KMITOČET	14
2.4. KMITOČTOVĚ ZÁVISLÝ ÚTLUM PŘEKÁŽEK.....	15
3. GEOMETRICKÁ AKUSTIKA	16
3.1. OBRAZOVÁ METODA	16
3.2. METODA RAY-TRACING	19
3.3. METODA BEAM-TRACING.....	21
4. IMPLEMENTACE.....	22
4.1. OBRAZOVÁ METODA.....	22
4.1.1. SIMULACE OBRAZOVÉ METODY.....	25
4.2. METODA RAY-TRACING	28
4.2.1. SIMULACE METODY RAY-TRACING	31
5. SROVNÁNÍ OBRAZOVÉ METODY A METODY RAY-TRACING.....	33
ZÁVĚR	36
LITERATURA.....	38
SEZNAM OBRÁZKŮ	40
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK.....	42
SEZNAM PŘÍLOH.....	43

ÚVOD

V následujícím textu je pojednáno o metodách šíření zvukové vlny v uzavřeném poslechovém prostoru pomocí výpočtů geometrické akustiky. Celá tato práce se skládá ze čtyř hlavních částí. Na úvod jsou uvedeny poznatky o šíření zvuku v prostoru a o prostorové akustice. Dozvíte se zde o základních parametrech akustických prostor, kterými jsou impulzní charakteristika, doba dozvuku a kritický kmitočet. Ve druhé části je popsána geometrická akustika a její geometrické metody. Zejména jsou zde zahrnuty geometrické metody Ray-Tracing, Beam-Tracing a Obrazová metoda. Třetí část se zabývá implementací Obrazové metody a metody Ray-Tracing. Zde jsou popsány jednotlivé algoritmy a zveřejněny výsledky vycházející z těchto algoritmů. Ve čtvrté části je porovnána Obrazová metoda s metodou Ray-Tracing na základě výsledků simulací v prostředí Matlab.

1. ŠÍŘENÍ ZVUKU V PROSTORU

Zvukovým polem se nazývá prostor, ve kterém se šíří zvuk. Zvuk je ve své podstatě mechanické vlnění hmotného prostředí zvukového pole. Mechanické vlnění může vzniknout v pevném, kapalném nebo plynném pružném prostředí hmotné podstaty. Na druhu prostředí bude záviset způsob šíření vlnění v prostředí a tedy i zvuku. V našem případě se budeme pohybovat pouze v uzavřených prostorách, proto budeme dále uvažovat pouze plynné prostředí. Šíření zvuku je znázorněno na obrázku 1[5].



Obrázek 1: Šíření zvuku v plynném prostředí [5].

V důsledku pružnosti prostředí se vytváří při kmitání prostředí místa s relativním zhuštěním nebo zředěním tohoto prostředí, které postupují od zdroje kmitání. Předávání kinetické energie částic prostředí určitou rychlostí nazýváme rychlost zvuku c_0 . Při normální teplotě 20 °C a normálním atmosférickém tlaku 101,3 kPa je c_0 zhruba 343 m.s⁻¹. Změna hustoty prostředí vytvořená kmitáním částic prostředí se nazývá zvuková vlna. Plocha představující místa se stejnou fází kmitání částic představuje čelo vlny neboli vlnoplochu [7].

Pokud budeme znát periodu vlnění T (viz rovnice 1) a rychlost zvuku v daném prostředí c_0 , můžeme vypočítat vlnovou délku (viz rovnice 2), která nám určuje vzdálenost mezi sousedními vlnoplochami kmitajícími se stejnou fází kmitání. Lidský sluch je schopen vnímat frekvenční rozsah 20 Hz až 20 kHz. Kmitočty pod 20 Hz se nazývají infrazvukovými a nad 20 kHz se nazývají ultrazvukovými [7].

$$T = \frac{1}{f}$$

(1)

$$\lambda = c_0 \cdot T = \frac{c_0}{f} \tag{2}$$

Vzhledem ke značnému významu vlnové délky se při řešení matematických rovnic pro šíření zvuku používá tzv. vlnové číslo k [7].

$$k = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{3}$$

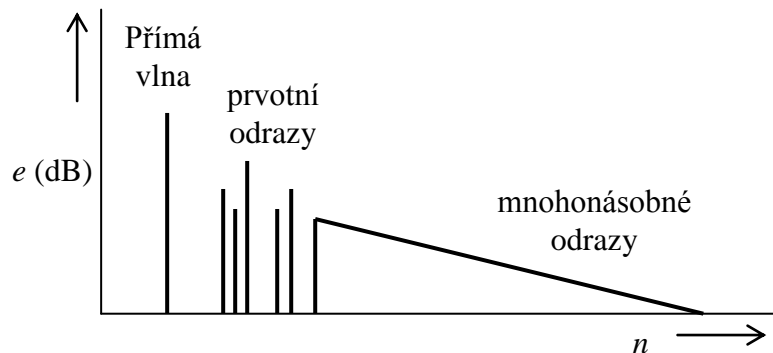
2. PROSTOROVÁ AKUSTIKA

Prostorová akustika se zabývá šířením zvuku a zákonitostmi vztahů akustických veličin v uzavřeném prostoru. V praxi se tento obor akustiky rozděluje na architekturní akustiku a stavební akustiku. Architekturní akustika se zabývá zvukem, který se šíří uvnitř uzavřeného prostoru. Jedním z úkolů je nalezení vztahu mezi objektivním a subjektivním hodnocením akustických prostor. Doba dozvuku i další veličiny jsou objektivními veličinami, které vychází z impulzové charakteristiky prostoru. Mezi nejčastěji používané patří křivka poklesu energie dozvuku, míra jakosti a interaurální koeficient křížové korelace. Stavební akustika se zabývá omezením přenosu zvuku mezi různými prostory ve stavbě a řešení vnitřní akustiky v místnosti [8].

2.1. IMPULZOVÁ CHARAKTERISTIKA PROSTORU

Uzavřený prostor, ve kterém se šíří zvuková vlna a dochází k jejím odrazům a ohybu, lze z hlediska zpracování signálu považovat za systém s několika vstupy a výstupy.[6] Pro analýzu v akustickém prostoru využíváme metodu analýzy lineárních časově invariantních systémů, jako je kmitočtová, impulzová nebo přechodová charakteristika a přenosová funkce. Nejčastěji se používá impulzová charakteristika akustického prostoru. Tvar impulzové charakteristiky akustického prostoru (viz obrázek 2) byl na základě poznatků prostorové akustiky a subjektivních sluchových vjemů popsán pomocí logaritmické obálky impulzní charakteristiky [6]. Typický tvar impulzní charakteristiky poslechového prostoru se skládá z:

- přímé vlny, která dorazí k posluchači přímo od zdroje zvukového signálu, bývá nejméně zkreslená,
- prvotních odrazů, což jsou jasně slyšitelné a dobře lokalizovatelné odrazy zvuku přicházející k posluchači přímo po prvním odrazu od stěn akustického prostoru,
- mnohonásobné odrazy, což je směs zvukových signálů přicházejících do místa poslechu po mnohonásobných odrazech od stěn akustického prostoru [6].



Obrázek 2: Aproximace impulzní odezvy poslechového prostoru [6].

2.2. DOBA DOZVUKU

Ve statistické teorii je doba dozvuku T definována jako doba, za kterou klesne hustota zvukové energie nebo intenzita po vypnutí zdroje zvuku na 10^{-6} původní velikosti. K poklesu energie dozvuku dochází vlivem útlumu zvuku při šíření prostředím, zejména díky útlumu překážek. Odvození výrazu pro dobu dozvuku je možno provést za různých zjednodušujících předpokladů o pohlcování zvuku stěnami [6]. Pro výpočet doby dozvuku tedy existuje několik definic:

1. Doba dozvuku podle Sabina:

$$T_s = 0,164 \frac{V}{\alpha S}, \quad (4)$$

kde V je objem místnosti. Sabinův vzorec v praxi vyhovuje pouze pro prostory s malým činitelem zvukové pohltivosti stěn [6].

2. Doba dozvuku podle Eyringa:

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_{stř})}, \quad (5)$$

kde $\alpha_{stř}$ je střední hodnota činitele pohltivosti stěn. Eyringův vzorec nedává uspokojivé výsledky pro činitele zvukové pohltivosti větší než 0,8 [6].

3. Doba dozvuku podle Millingtona:

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)}, \quad (6)$$

kde $\alpha_{stř}$ je střední hodnota pohltivosti stěn. Millingtonův vzorec dává pro $\alpha > 0,8$ přesnější výsledky, ale v praxi se obvykle pro svou složitost nepoužívá [6].

2.3. KRITICKÝ KMITOČET

V reálných malých, málo tlumených místnostech, kde jsou vlastní kmity od sebe značně vzdáleny, je přenosová charakteristika nepravidelná a silně závislá na poloze zdroje zvuku a posluchače. U středních a vyšších kmitočtů je obvykle vzdálenost mezi jednotlivými vlastními kmity již malá, takže každý diskrétní budící signál vybudí řadu blízkých vlastních kmitů. Jejich vzdálenost od budícího kmitočtu má Gaussovské rozložení [6]. Od určitého kmitočtu budícího signálu budou amplitudy a fáze těchto módů rozloženy náhodně. K tomu dojde v rozsahu kmitočtů od dolního kritického kmitočtu f_k pro který platí:

$$f_k = \frac{5000}{\sqrt{V\delta}}, \quad (7)$$

kde V je objem místnosti a $\delta = \sqrt{3}\Delta f_N$ je konstanta tlumení módu (Δf_N je šířka pásma daného módu pro pokles o 3 dB) [6]. Od tohoto kmitočtu lze konstanty tlumení módů s blízkým kmitočtem vyjádřit jejich průměrnou velikostí. Tento kritický kmitočet odvozený Schroederem

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}, \quad (8)$$

kde $T=6,91\delta$ je doba dozvuku a V vnitřní objem prostoru, je předělem mezi oblastmi nezbytného popisu vlastností akustického pole prostoru metodami vlnové a geometrické či statistické akustiky [6].

2.4. KMITOČTOVĚ ZÁVISLÝ ÚTLUM PŘEKÁŽEK

Při dopadu zvukové vlny na překážku se část jejího výkonu odrazí zpět do místnosti, část se dostane skrz bariéru a část bude absorbována překážkou. Neplatí, že by se absorbovalo celé výkonové spektrum rovnoměrně. Podle materiálových a konstrukčních vlastností překážky dojde na různých kmitočtech k více či méně výrazné absorpci. Pro pohlcení zvukové vlny je také důležité kritérium tloušťky bariéry vůči vlnové délce zvuku. Obecně platí, že jestli je vlnová délka zvukové vlny menší než tloušťka překážky, vlna se odrazí. Pokud je vlnová délka srovnatelná, je velké množství energie vlny pohlceno. Při situaci, že tloušťka překážky je menší než vlnová délka zvuku, dojde k průchodu bariérou [6].

Spektrum zvuku obsahuje složky s různými kmitočty, proto se jeho útlum při nárazu nedá vyjádřit jednoduchou funkcí. Schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk charakterizujeme pomocí činitele zvukové pohltivosti α [6].

$$\alpha = \frac{W_p}{W_d}, \tag{9}$$

kde W_p je energie pohlcená určitou plochou a W_d je energie, která na tuto plochu dopadá[6].

Pohltivost jednotlivých povrchů se určuje praktickým měřením v odrazové komoře, kdy se porovná spektrogram vyslaného zvuku se spektrogramem přijatého zvuku, nebo se proti překážce vysílají harmonické zvukové vlny a vyhodnotí se rozdíl jejich intenzit. Nejlepší odrazové vlastnosti, tedy s nejnižším absorpčním útlumem, mají tvrdé materiály s maximálně hladkým povrchem [6].

3. GEOMETRICKÁ AKUSTIKA

Geometrická akustika je analýza akustického pole v uzavřených prostorech za předpokladu, že nedochází k ohybu zvukové vlny. V tomto případě můžeme obdobně jako v geometrické optice zavést pojem zvukový paprsek. Při analýze akustického pole v uzavřeném prostoru se postupuje následovně: paprsek šířící se od zdroje zvuku prochází místností a jeho energie ubývá se vzrůstající vzdáleností tak dlouho, dokud se neutlumí pod zanedbatelnou hodnotu nebo nedorazí k překážce. Pak je jeho chování určeno jeho velikostí. Historie zvukového paprsku se zaznamenává od okamžiku jeho vygenerování do jeho zániku. Z historie můžeme zjistit přehled překážek, ke kterým paprsek postupně dorazil, jejich index odrazu, čas, energii a úhel dopadu. Pro geometrické modely platí, že zanedbávají jevy jako interference nebo chyby vlny [6].

3.1. OBRAZOVÁ METODA

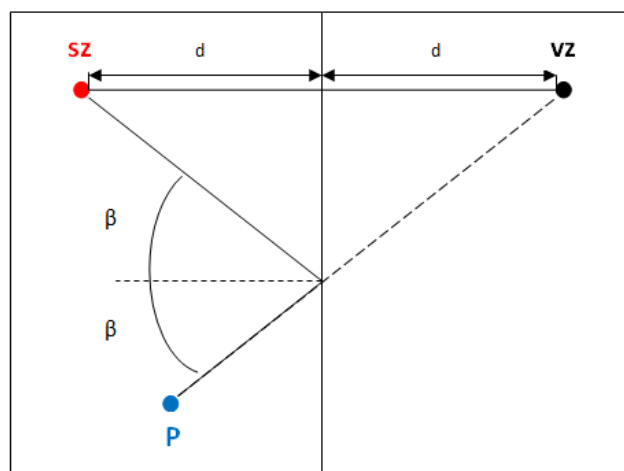
Zvuková vlna vyslaná ze zdroje zvuku dopadá na rozhraní (např. stěna místnosti) pod určitým úhlem dopadu. Ten je definován jako úhel mezi normálou (kolmice na rovinu dopadu) a dopadajícím paprskem. Odražená zvuková vlna se odráží pod úhlem stejné velikosti, ale s opačnou orientací. Vztah mezi vlnou dopadající a odraženou popisuje Snellův princip[6],

$$|\sin\delta_d| = |\sin\delta_o| , \tag{10}$$

$$|\delta_d| = |\delta_o| ,$$

kde δ_d je úhel dopadajícího paprsku a δ_o je úhel odraženého paprsku [6].

Tento poznatek je základním principem Obrazové metody. Veškeré odrazy zvukových paprsků lze uvažovat jako samostatné virtuální zdroje (VZ), které jsou umístěny ve stejné vzdálenosti jako skutečný zdroj (SZ) (viz Obrázek 4). Z teorie o impulzní charakteristice prostoru (viz kapitola 2.1) víme, že zvuková vlna se pohybuje od zdroje k posluchači buď přímočaře, přes prvotní odraz nebo přes mnohonásobné odrazy. Proto zavádíme pojem řád odrazu. Řád odrazu nám určuje, kolikrát se daný paprsek v prostoru odrazí, než doputuje k posluchači (P). Z toho je patrné, že řád odrazu určuje počet virtuálních zdrojů.



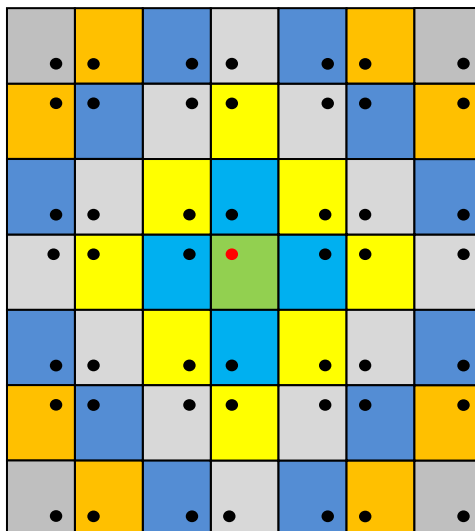
Obrázek 3: Konstrukce zvukového paprsku při odrazu od rovinné stěny [2].

Tato skutečnost nám umožňuje jednoduchým výpočtem zjistit vzdálenost uražené zvukové vlny a úhel jejího dopadu k posluchači i pro několikanásobné odrazy. Je to možné tím, že každá cesta může být vnímána jako přímka spojující posluchače s příslušným virtuálním zdrojem. Vzdálenost mezi virtuálním zdrojem a posluchačem je pro naznačený řád odrazu 1 (viz Obrázek 3) stejná jako vzdálenost, kterou by musela vlna překonat od reálného zdroje zvuku k posluchači. Stejným způsobem se postupuje i pro odrazy vyšších řádů, proto můžeme prohlásit, že algoritmus obrazové metody je rekurzivní. Výpočty jednotlivých pozic virtuálních zdrojů mohou být reprezentovány stromem, protože všechny virtuální zdroje vytváří nové virtuální zdroje, což jsou zdroje pro vyšší řád odrazu. Metoda v podstatě umožňuje výpočet odrazů neomezeného řádu [2].

Druhým kritériem, které musí virtuální zdroj splňovat, je blízká vzdálenost k posluchači. Virtuální zdroje dále od posluchače se vypustí a tím se sníží výpočetní náročnost Obrazové metody. Samozřejmě by bylo možné ukončit šíření na základě jiného kritéria, například nalezením všech virtuálních zdrojů až do určitého řádu odrazu. Kriterium blízkosti nám zajišťuje, že každý virtuální zdroj má vzdálenost od posluchače menší než zadaná maximální vzdálenost. To je důležité pro přesné charakterizování chování paprsku v místnosti během určité doby [2].

Během rekurzivní generace virtuálních zdrojů můžeme neplatné virtuální zdroje ignorovat. Nicméně i tyto neviditelné virtuální zdroje musíme považovat za vyšší řád odrazu a také mohou generovat další virtuální zdroje. Pokud budeme uvažovat 2D pohled jednoduché pravoúhlé místnosti s rozměry a , b v osách x , y (pro 3D pohled by

se pole buněk rozšířilo do osy z), která má všechny stěny rovinné, vznikne nám pole buněk (viz Obrázek 4), kde každá buňka obsahuje jeden odraz určitého řádu odrazu.

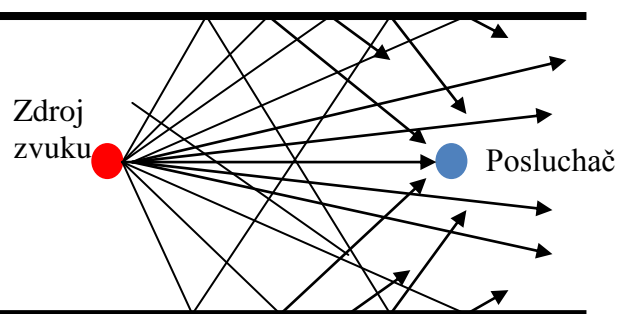


Obrázek 4: Vytváření nových virtuálních zdrojů pomocí zrcadlení původního zdroje nebo od virtuálního zdroje předešlého řádu odrazu. Zelenou barvou s červenou tečkou je reprezentována původní místnost se skutečným zdrojem. Světle modrá barva zastupuje prvotní odrazy a další barvy pak určují mnohonásobné odrazy zvukového paprsku v prostoru [2].

Hlavní výhodou Obrazové metody je její robustnost. Zaručuje, že jsou nalezeny všechny zrcadlové cesty. Nicméně základní zdrojový model Obrazové metody je pouze reflexe a její složitost výpočtu roste exponenciálně. Obecně platí, že musí být $O(n^r)$ virtuálních zdrojů generovaných pro odrazy r v prostorech s povrchovými rovinami n . Nejjednodušším prostředím je pravoúhlá místnost, u které Obrazová metoda dosahuje nejlepších výsledků. Vzhledem k výpočetní náročnosti je Obrazová metoda praktická pro modelování jen několika zrcadlových odrazů v jednoduchém prostoru [4].

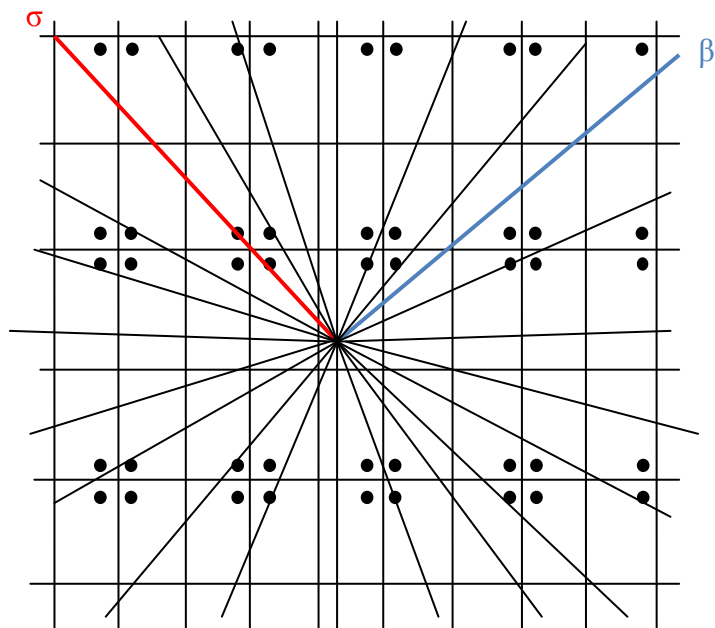
3.2. METODA RAY-TRACING

Základem metody Ray-Tracing pro akustické výpočty je bodový zdroj zvuku, který vysílá konstantní množství paprsků do všech směrů pod určitým konstantním úhlem. Tyto paprsky se šíří po prostoru rychlostí zvuku 343 m/s při normální teplotě 20 °C a normálním atmosférickém tlaku 101,3 kPa a jejich směr je ovlivňován odrazy od stěn a jiných překážek [7]. Paprsky se šíří po prostoru tak dlouho, dokud nedorazí k posluchači nebo dokud jejich intenzita neklesne pod stanovenou hladinu (viz Obrázek 5).



Obrázek 5: Šíření zvukového paprsku v metodě Ray-Tracing [2].

Tato metoda má dva hlavní problémy (viz Obrázek 6). Prvním problémem je, že vzdálenější virtuální zdroj je zakryt za bližším virtuálním zdrojem. Tudíž paprsek σ je vyzářen zdrojem tak, že cestuje nejkratší vzdáleností k virtuálnímu posluchači. V tomto bodě končí rozšiřování paprsku a ponecháváme si pouze paprsek s nejkratší cestou. Skutečným problémem je fakt, že neexistuje žádný způsob, jak určit paprsky, které vedou ke vzdálenějšímu posluchači přes bližšího virtuálního posluchače. Druhý problém u metody Ray-Tracing je znázorněn paprskem θ , který při své cestě nenarazí na žádného virtuálního posluchače. Řešení těchto problémů jde v principu proti sobě, protože tento problém řešíme zvětšením prostoru posluchače, čímž se zvýší pravděpodobnost výskytu prvního problému. Například vliv vynechání těchto částečných ozvěn obvykle může být zřetelně slyšitelný při simulaci koncertních sálů. Výběrem malé posluchačské zóny, která zachycuje velmi velký počet paprsků, se minimalizuje chybovost metody Ray-Tracing. Toto omezení může vysvětlovat pozorování anomálií při použití analýzy k vlastnostem odrazu [2].



Obrázek 6: Zobrazení dvou hlavních problémů v metodě Ray-Tracing.

První je znázorněn paprskem σ , který protíná dva virtuální zdroje.

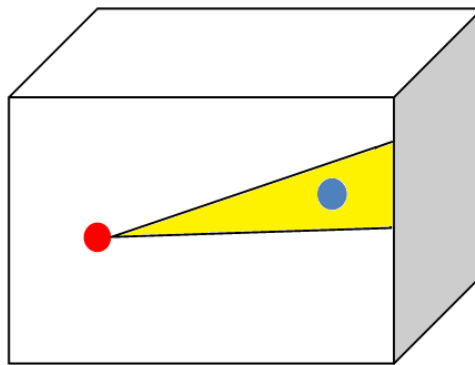
Druhý je znázorněn paprskem β , který neprotíná ani jeden virtuální zdroj [2].

Všechny odrazy nalezené metodou Ray-Tracing zcela souhlasí s odrazy nalezenými Obrazovou metodou. Kromě případů, kdy Obrazová metoda nalezne paprsky, které metoda Ray-Tracing přehlédla a naopak, metoda Ray-Tracing nalezne množství paprsků, které leží mimo interval zvolený Obrazovou metodou. Tyto dva případy lze minimalizovat pomocí vysokého počtu vyslaných paprsků a malé zóny posluchače. Vynechání časné ozvěny může obvykle být zřetelně slyšitelné v simulaci koncertních sálů. Je možné minimalizovat chyby metody Ray-Tracing zvolením velmi malé oblasti posluchače, vysláním velkého počtu paprsků a uchováním pouze nejkratší cesty. Skutečným problémem je, že neexistuje žádný způsob, jak zjistit, zda vyzářený paprsek minul všechny zóny virtuálních posluchačů (viz Obrázek 6). Toto omezení může vysvětlovat pozorování anomálií při použití analýzy vlastností zvukových odrazů [2].

Existuje mnoho variant metody Ray-Tracing pro pozorování vyzářeného paprsku, ale nemění konečný závěr, například metoda pánů Waymana a Walshe, kteří uvažovali posluchače jako bod a měnili průřez vyzářeného paprsku. Je také možné, aby ukončení šíření paprsků proběhlo na základě jejich celkové délky jako u Obrazové metody [2].

3.3. METODA BEAM-TRACING

Metoda Beam-Tracing je klasifikována reflexní cestou ze zdroje do rekurzně sledovacích pyramidových paprsků (tj. sada paprsků) neboli od zdroje je vysílána sada pyramidových paprsků, které zcela pokrývají prostor. Pro každý paprsek jsou polygony považovány za křížení v pořadí zředu dozadu. Protínající polygony jsou detekovány, jejich přenos paprsku je postaven odpovídající stínové oblasti a odraz paprsku je konstruován zrcadlením přenosu přes polygon roviny (Obrázek 7). Hlavní výhodou je, že se využívá geometrické soudržnosti, protože každý paprsek představuje nekonečný počet možných vyzařovacích cest pocházející ze zdroje zvuku. Nevýhodou je nutnost geometrické operace sledovat pomocí 3D modelu, protože každý paprsek se může projevovat anebo být zablokovaný na několika stěnách [4].



Obrázek 7: Šíření zvukového paprsku v metodě Beam-Tracing[4].

Klíčovou myšlenkou této metody je předpočítávání parametrů prostředí a ukládání prostorových datových struktur, které zahrnují všechny možné sekvence povrchů a hrany rozptylu zvuku vyzařovaného z každého zdroje zvuku a pak používat tyto datové struktury tak, aby výpočet šíření cesty k libovolným pozorovatelům z hlediska reálného času byl co nejkratší. Konkrétně používáme předpočítávání mnohostěnných buněk k urychlení svazku trasování a předpočítávání údajů paprsku ve stromové struktuře k urychlení generování šířících cest [4].

Ve srovnání s Obrazovou metodou je použito méně virtuálních zdrojů a může se využívat v libovolném prostředí. Vzhledem k těmto okolnostem představuje každý paprsek oblast prostoru, který odpovídá viditelnému virtuálnímu zdroji (vrchol paprsku) [4].

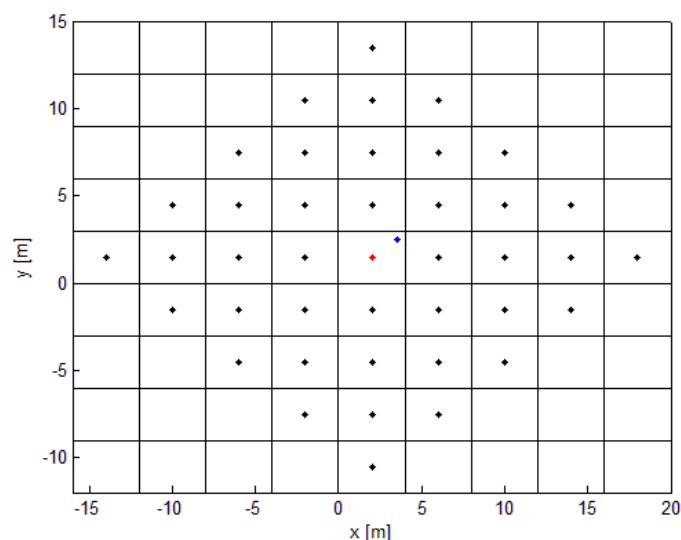
4. IMPLEMENTACE

Vlastní implementace byla realizována v programu Matlab, který je na vývoj geometrických metod nejvhodnější. Pro níže zmíněné výsledky se nebylo použito standardních algoritmů, ale algoritmy, které jsem na základě funkcí daných metod vyvinul, ale které byly vyvíjeny na základě praktických realizací. Celá kapitola se zabývá podrobným vysvětlením principů většiny částí algoritmu a můžeme ji rozdělit do dvou podskupin. Podskupinu tvoří algoritmy Obrazové metody a metody Ray-Tracing pro 2D prostor.

Práce i funkce samotná se zaměřuje na výpočet odrazů zvukových vln od stěn v uzavřeném prostředí bez překážek. Ke každé implementaci jsou dále uvedeny výsledky simulace a geometrické zpracování.

4.1. OBRAZOVÁ METODA

Obrazová metoda je základní geometrická metoda pro výpočet odrazů zvukových vln od stěn v uzavřeném prostředí. Nejčastěji se používá pro pravoúhlé místnosti, u kterých dosahuje nejlepších výsledků. Využívá se poznatku (viz kapitola 3.1), že veškeré odrazy zvukových paprsků lze uvažovat jako samostatné zdroje zvuku.



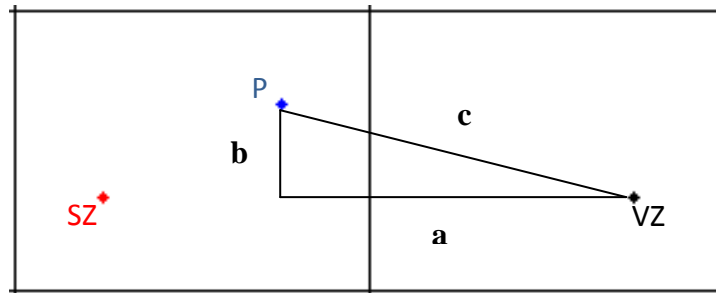
Obrázek 8: Rozmístění virtuálních zdrojů v prostředí Matlab.

Červená tečka znázorňuje skutečný zdroj zvuku, modrá tečka znázorňuje posluchače a černé tečky znázorňují virtuální zdroje

Daný algoritmus pracuje na principu řetězového výpočtu, kde se z každého zdroje zvuku vypočítá poloha dalších čtyř virtuálních zdrojů až do určeného řádu odrazu. Protože se každý zdroj zvuku objevuje při daném výpočtu několikrát, musí nutně za

daným řetězovým výpočtem následovat algoritmus na uložení pouze jedné polohy každého virtuálního zdroje. Vzdálenost mezi virtuálním zdrojem zvuku a posluchačem se tak bude vypočítávat pro každou polohu pouze jednou, čímž zkrátíme dobu výpočtu.

Po zjištění všech poloh virtuálních zdrojů byla aplikována na simulaci Pythagorova věta, kterou vypočítáme vzdálenost virtuálního zdroje od posluchače.



Obrázek 9: Doplnění trojúhelníku před aplikací Pythagorovy věty, SZ – skutečný zdroj, P – posluchač a VZ – virtuální zdroj

$$c^2 = a^2 + b^2, \tag{11}$$

Poté už simulace přechází k výpočtu samotné impulzní odezvy. Impulzní odezva je závislost odezvy systému na jednotkový impuls. Na základě poznatků prostorové akustiky (viz kapitola 2.1) je popsána pomocí logaritmické obálky impulzní charakteristiky e (dB).

Protože se plocha kulové vlny se vzdáleností zvětšuje, musí se vzdáleností od zdroje ubývat intenzity zvuku. Avšak v každé vzdálenosti musí mít vlnoplocha stejný činný výkon zvukového vlnění P [7]:

$$P = 4\pi r_1^2 \cdot I_1 = 4\pi r_2^2 \cdot I_2, \tag{12}$$

kde I_1 , I_2 jsou intenzity zvuku v radiálních vzdálenostech r_1 a r_2 . Z rovnice plyne, že intenzita zvuku u kulové vlny klesá se čtvercem vzdálenosti [7]:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}. \tag{13}$$

Intenzita zvuku je energetická veličina, proto se při výpočtu jejích hladin nepoužívají její druhé mocniny [7].

$$L = 10 \cdot \log \frac{I_2}{I_1} = 10 \cdot \log \frac{r_2^2}{r_1^2} = 20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1} \quad (14)$$

Pomocí tohoto výrazu simulujeme šíření zvukové vlny v prostoru. Jako vztažná vzdálenost r_1 je zvolena vzdálenost 1 m. Abychom získali pokles hladiny intenzity zvuku pro daný odraz, tak na místo vzdálenosti r_2 dosadíme vzdálenost, kterou musí zvuková vlna překonat k posluchači v metrech. Pak můžeme pozorovat, že při dvojnásobení jakékoliv vzdálenosti se nám útlum zvýší o 6 dB.

$$L = 20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1} = 20 \cdot \log \frac{2}{1} = -6dB \quad (15)$$

Hladina intenzity zvuku klesá dále při odrazech od stěn z důvodu pohltivosti materiálu.

Časové úseky jednotlivých paprsků zjistíme pomocí upraveného vzorečku pro výpočet vzdálenosti:

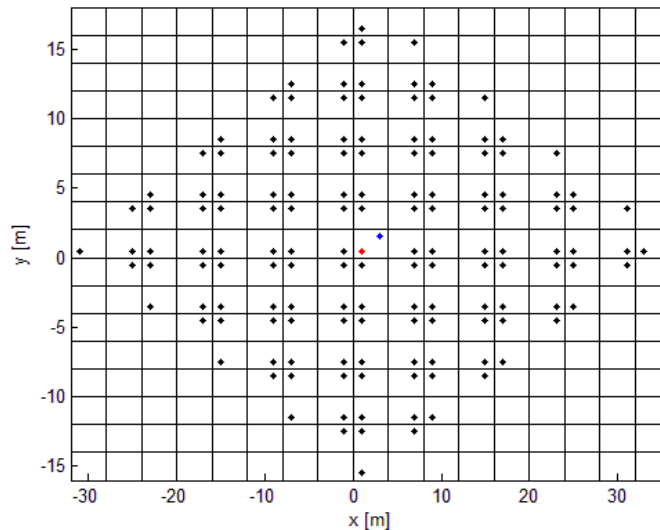
$$t = \frac{s}{c}, \quad (16)$$

kde c je rychlost zvuku 340 m/s při normální teplotě 20 °C a normálním atmosférickém tlaku 101,3 kPa, s je jednotlivá vzdálenost virtuálních zdrojů od posluchače v metrech [7].

Pro urychlení Obrazové metody je zavedeno do algoritmu omezení vzdálenosti, kterou zadáváme jako další vstupní proměnnou a je hlavním kritériem pro uložení virtuálního zdroje. Omezená vzdálenost nám zajišťuje, že daný paprsek nezanikne cestou k posluchači.

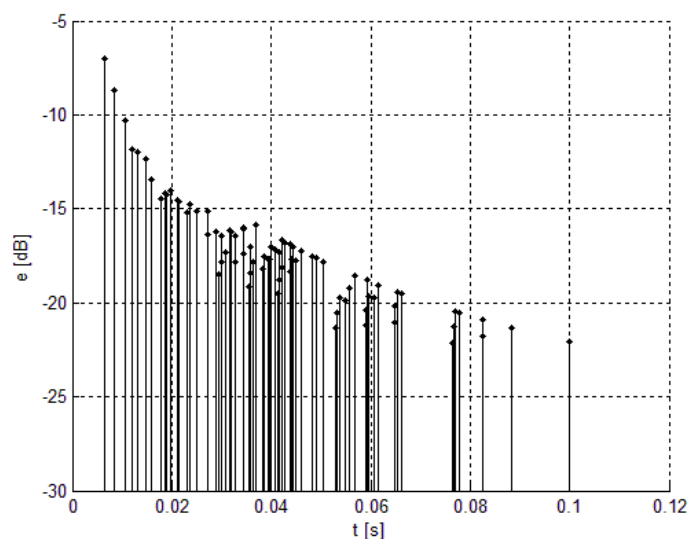
4.1.1. SIMULACE OBRAZOVÉ METODY

Obrazová metoda je nejvhodnější pro pravoúhlé místnosti, proto se simulace především zabývá pravoúhloú místností. Na Obrázku 10 můžeme vidět názorné rozestavení virtuálních zdrojů pro různé řády odrazu.



Obrázek 10: Rozmístění virtuálních zdrojů pravoúhlé místnosti 4 x 2 m pro řád odrazu 8, poloha skutečného zdroje [1 0.5] m a poloha posluchače [3 1.5] m.

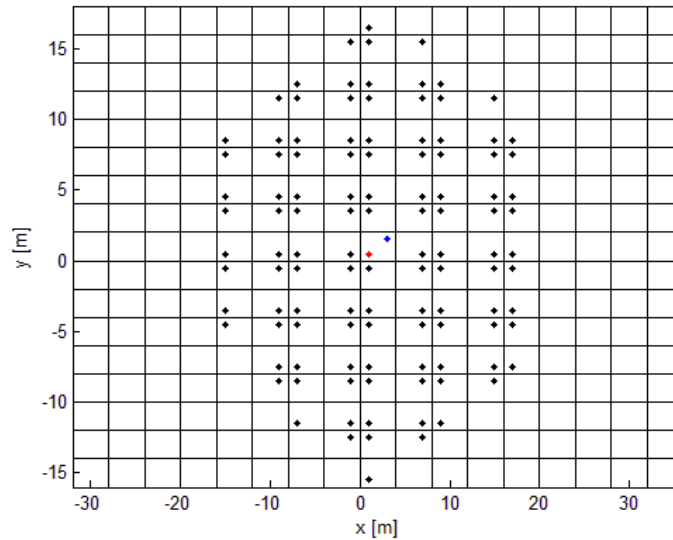
Výsledkem simulace je impulzní odezva, což je odezva systému na jednotkový impulz. Na základě poznatků prostorové akustiky (viz kapitola 2) je popsána pomocí logaritmické obálky impulzní charakteristiky e (dB).



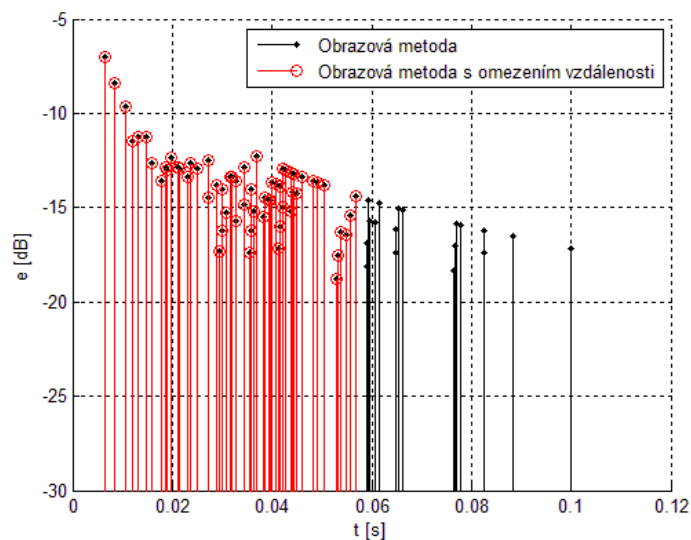
Obrázek 11: Impulzní odezva pravoúhlé místnosti 4 x 2 m pro řád odrazu 8, poloha skutečného zdroje [1 0.5] m a poloha posluchače [3 1.5] m.

Impulzní odezva není čistě exponenciální z důvodu náhodného generování pohltivosti materiálu na základě intervalu pohltivosti běžných materiálů.

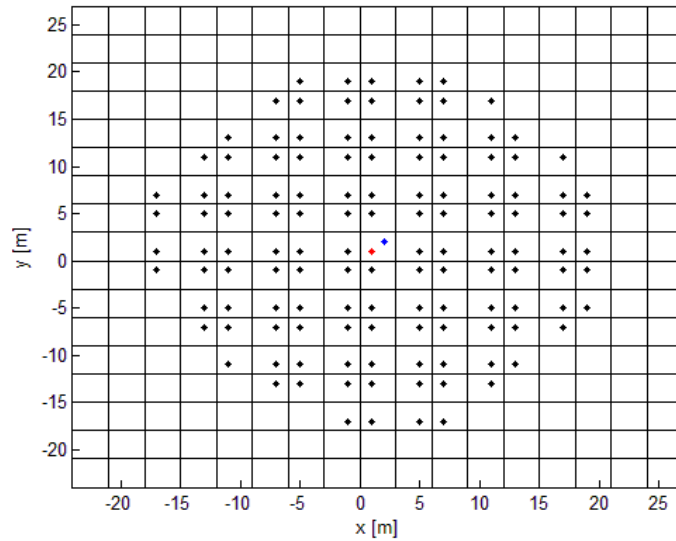
Pro urychlení Obrazové metody je zavedeno do algoritmu omezení vzdálenosti, které můžeme vidět na Obrázku 12 a 14. Omezená vzdálenost nám zajišťuje, že se pro vzdálenější paprsek nebudou provádět výpočty z důvodu zániku paprsku cestou k posluchači.



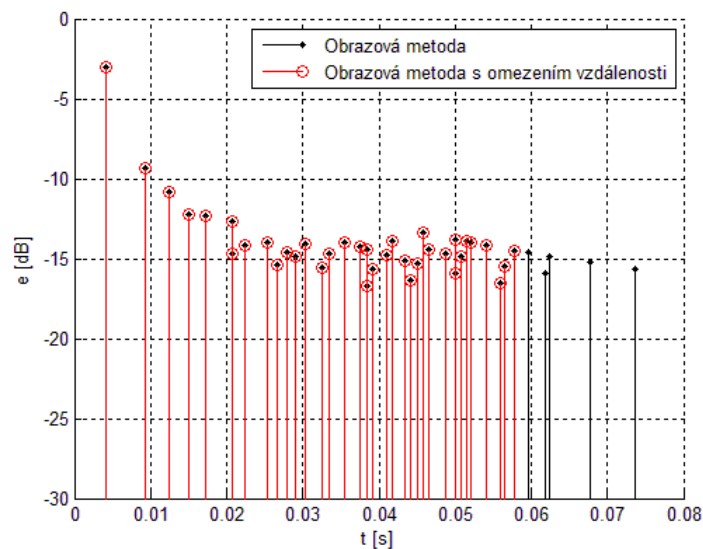
Obrázek 12: Rozmístění virtuálních zdrojů pravoúhlé místnosti 4 x 2 m pro řád odrazu 8, poloha skutečného zdroje [1 0.5] m a poloha posluchače [3 1.5] m s omezením vzdálenosti na 20 m.



Obrázek 13: Impulzní odezva pravoúhlé místnosti 4 x 2 m pro řád odrazu 8, poloha skutečného zdroje [1 0.5] m a poloha posluchače [3 1.5] m.



Obrázek 14: Rozmístění virtuálních zdrojů pravoúhlé místnosti 3 x 3 m pro řád odrazu 8, poloha skutečného zdroje [1 1] m a poloha posluchače [2 2] m s omezením vzdálenosti na 20 m



Obrázek 15: Impulzní odezva pravoúhlé místnosti 3 x 3 m pro řád odrazu 8, poloha skutečného zdroje [1 1] m a poloha posluchače [2 2] m.

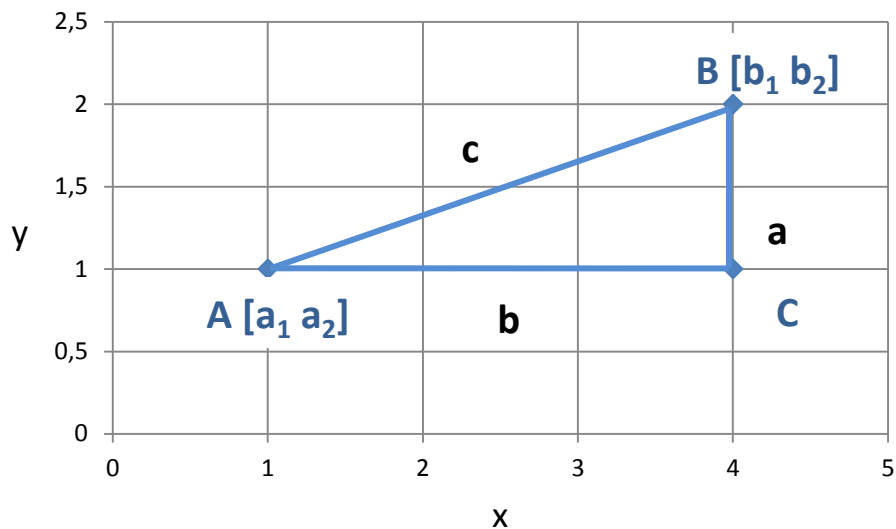
Algoritmus pro omezení vzdálenosti se především uplatňuje v pravoúhlých místnostech tvaru protáhlého obdélníku, kde se omezení vzdálenosti projevuje již při nízkých řádech odrazu. Při menších rozměrech pravoúhlých místností s nízkým řádem odrazu se s omezením vzdálenosti nemusíme zabývat.

4.2. METODA RAY-TRACING

Algoritmus pro metodu Ray-Tracing je poněkud složitější. Využívá se zde matematických poznatků z analytické geometrie. Především se používá výpočet vzdálenosti bodů v rovině, směrnice tvar přímky a vzdálenost bodu od přímky.

- VZDÁLENOST BODŮ V ROVINĚ

Vzdálenost bodů v rovině spočítáme pomocí doplnění na pravoúhlý trojúhelník.



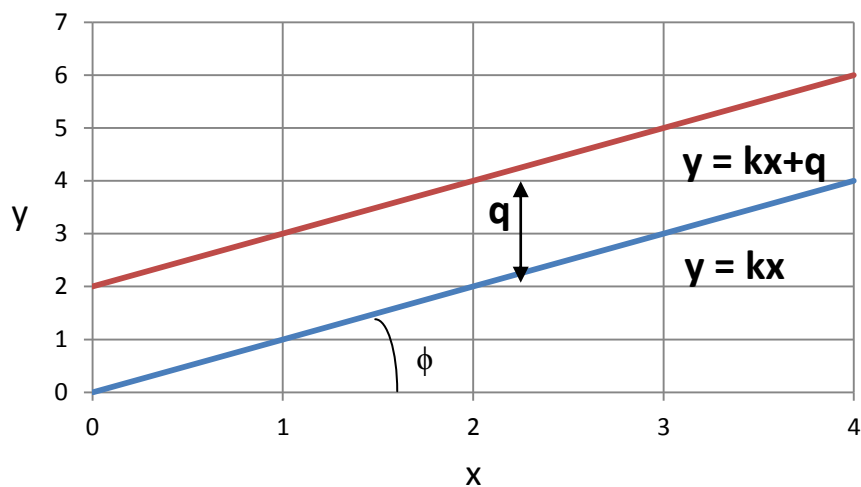
Obrázek 16: Ukázka postupu při zjišťování vzdálenosti dvou bodů [12].

Nyní můžeme říci, že úsečky $|AC|=|b_1-a_1|$ a $|BC|=|b_2-a_2|$ jsou odvěsnami pravoúhlého trojúhelníku, a proto lze spočítat velikost přepony pomocí Pythagorovy věty, což je vzdálenost bodů v rovině:

$$|AB| = \sqrt{|AC|^2 + |BC|^2}, \quad (17)$$

kde $|AB|$ je vzdálenost dvou bodů v rovině a $|AC|$, $|BC|$ jsou odvěsny pravoúhlého trojúhelníku [12].

- SMĚRNICOVÝ TVAR PŘÍMKY

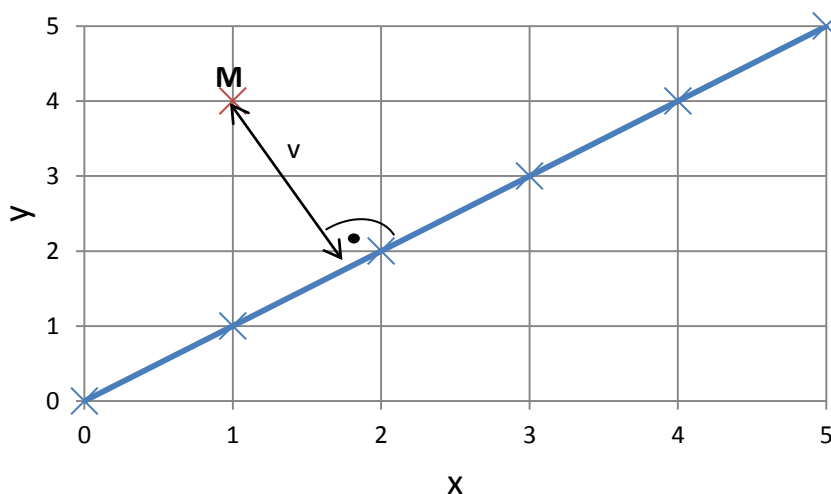


Obrázek 17: Ukázka různých směrnicových tvarů rovnic přímek [12].

Rovnice $y = kx + q$ se nazývá směrnicový tvar rovnice přímky. Číslo k je směrnice přímky, která se rovná $tg \phi$, kde ϕ je odchylka přímky od kladné poloosy x [12].

- VZDÁLENOST BODU OD PŘÍMKY

Pro výpočet vzdálenosti musíme znát bod $M [X_M, Y_M]$ a obecnou rovnici přímky $ax+by+c = 0$ [12].



Obrázek 18: Vzdálenost bodu od přímky [12]

$$v = \frac{|ax_M + by_M + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

(18)

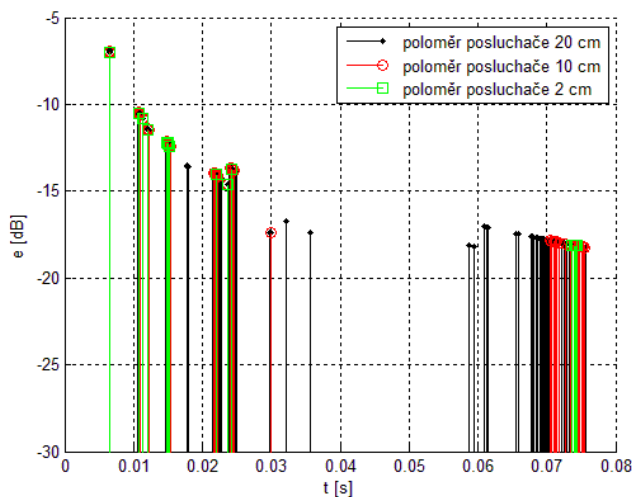
Jedná se zde o jednoduché pravoúhlé místnosti, abychom na závěr mohli oba algoritmy porovnat. Po spuštění algoritmu dojde k vytvoření čtyř bodů, které představují rohy místnosti. Tyto body nám poslouží k výpočtu jednotlivých směrnic daných stěn. Dané čtyři směrnice nám vytvářejí ohraničení prostoru, kde se bude pohybovat vyslaný paprsek.

Při rozebírání geometrické akustiky a jejích metod jsme se o metodě Ray-Tracing dozvěděli (viz kapitola 3.2), že daná metoda vysílá konstantní počet paprsků pod konstantním úhlem. Tato základní podmínka je řešena následujícím postupem. Nejdříve ze zadaného počtu paprsků uděláme jednotlivé velikosti úhlů, pod kterými se dané paprsky budou vysílat do místnosti. Jelikož známe polohu zdroje a úhel daného paprsku, můžeme sestavit směrnicovou rovnici přímky:

$$y = kx + q. \tag{19}$$

Po nalezení všech čtyř směrnic stěn a dané směrnicové rovnice přímky paprsku lze jednoduchým výpočtem zjistit průsečík dané přímky s některou ze čtyř možných stěn. Tento průsečík slouží algoritmu jako další bod zdroje pro vyšší řád odrazu a pro následný výpočet vzdálenosti přímky od posluchače.

Zjištění vzdálenosti mezi paprskem a posluchačem nám určuje uložení daného paprsku do paměti. Tuto zmíněnou vzdálenost zjistíme pomocí rovnice 18. Další faktor, který rozhoduje o uložení paprsku je námi vložený poloměr posluchače (viz Obrázek 19).



Obrázek 19: Impulzní odezva pro místnost 4 x 3 m, s polohou zdroje [1 1] m, s polohou posluchače [3 2] m, počtem vyslaných paprsků 3600 a řádem odrazu 6 pro různé velikosti posluchače.

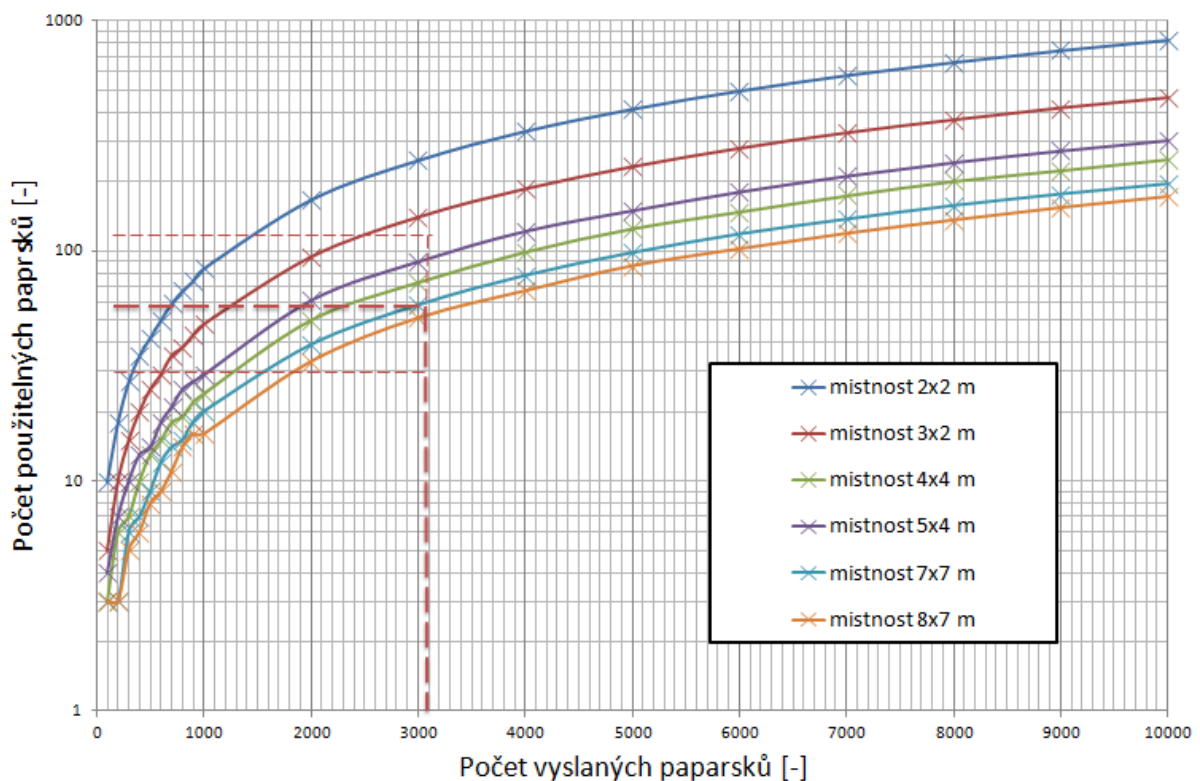
Z impulzní odezvy na Obrázku 19 si lze povšimnout, že při větších poloměrech posluchače při větším počtu vyslaných paprsků dochází ke shlukům nalezených paprsků téměř ve stejný čas. Dále nám tato impulzní odezva ověřuje poznatek o problémech

u metody Ray-Tracing (viz kapitola 3.2), jelikož při malém poloměru posluchače je nalezeno malé množství vyslaných paprsků a při velkém poloměru se tvoří shluky nalezených paprsků s přibližně stejnou vzdáleností zdroje zvuku od posluchače. Tím vzniká druhý problém metody Ray-Tracing, tzv. překrývání zdrojů zvuku.

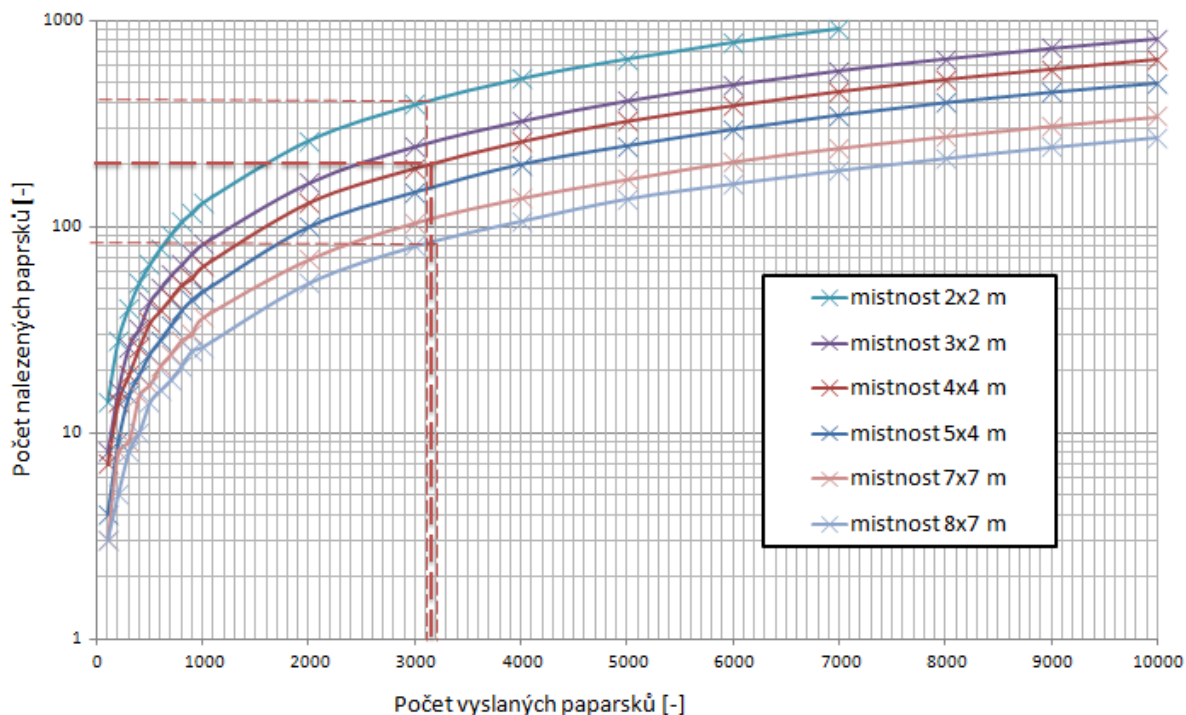
Po celou cestu paprsku k posluchači se zaznamenává jeho uražená vzdálenost do paměti. Pomocí této vzdálenosti zjistíme časový úsek, za který paprsek urazí danou trasu k posluchači a použijeme ji i k výpočtu útlumu. Útlum je opět popsán pomocí logaritmické obálky impulzní charakteristiky e (dB). Dané výpočty jsou stejné jako u Obrazové metody.

4.2.1. SIMULACE METODY RAY-TRACING

Simulace metody Ray-Tracing je uvedena pro pravoúhlé místnosti z důvodu následovného porovnání metod. V metodě Ray-Tracing je několik rozhodovacích faktorů: počet vyslaných paprsků, řád odrazu a velikost posluchače. Pro následující simulace je nastavena velikost posluchače na poloměr 0.1 m, což představuje poloměr lidské hlavy. Simulace byla provedena pro několik rozměrů místnosti při zvětšování vyslaných paprsků. Na vytvoření těchto grafických závislostí se provedlo 230 simulací metody Ray-Tracing.



Obrázek 20: Grafická závislost počtu nalezených paprsků na počtu vyslaných paprsků pro řád odrazu 1

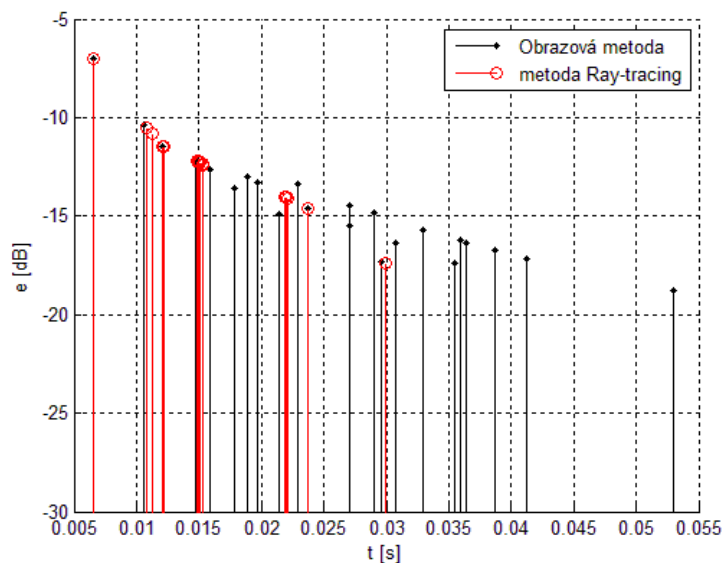


Obrázek 21: Grafická závislost počtu nalezených paprsků na počtu vyslaných paprsků pro řád odrazu 2

Z grafických závislostí lze vyčíst, že optimální počet vyslaných paprsků v metodě Ray-Tracing je 3000 paprsků. K tomuto závěru se dospělo při zjištění, že hodnota 3000 vyslaných paprsků prochází průměrnými hodnotami nalezených paprsků při různých velikostech místnosti a při různých řádech odrazu. Toto množství paprsků nám zaručí důkladné pokrytí pro dané místnosti. Při pohledu do grafické závislosti si tento závěr můžeme ověřit, protože nad touto hodnotou už je minimální nárůst nalezených paprsků. Z toho faktu lze říci, že použití vyššího počtu paprsků nám zbytečně zvedá výpočetní náročnost metody Ray-Tracing. Grafické závislosti se samozřejmě mění v závislosti na poloze zdroje a posluchače.

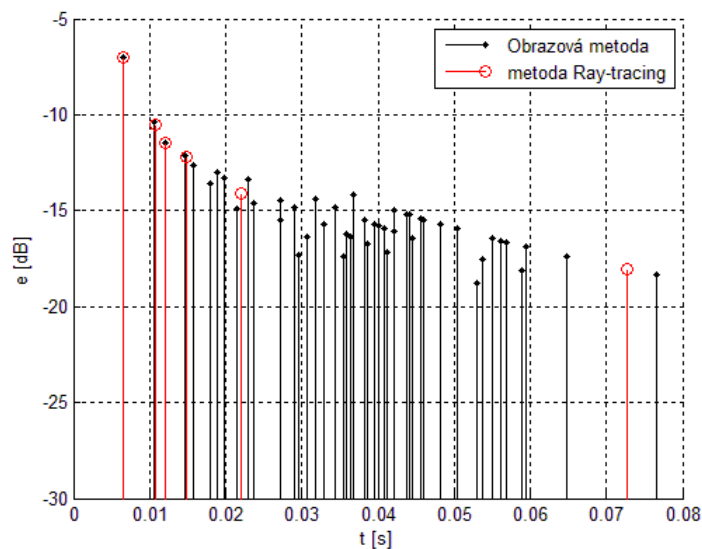
5. SROVNÁNÍ OBRAZOVÉ METODY A METODY RAY-TRACING

Při srovnávání Obrazové metody a metody Ray-Tracing jsem se zaměřil na nesrovnalosti v impulzní odezvě pro 2D prostor. Pro toto srovnání jsem vytvořil simulaci na místnosti 4 x 3 m, s polohou zdroje [1 1] m a s polohou posluchače [3 2] m pro řád odrazu 4. Pro metodu Ray-Tracing byly dále přidány vstupní hodnoty: počet vyslaných paprsků 3000 a poloměr posluchače 5 cm. Výsledek simulace je znázorněn v Obrázku 22.



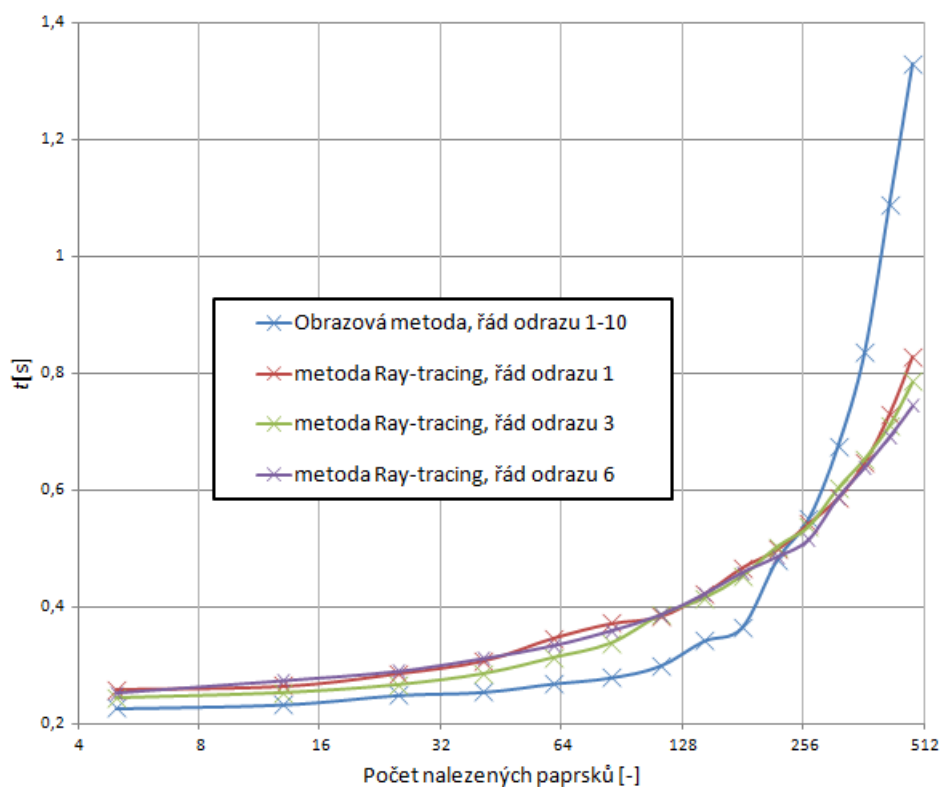
Obrázek 22: Srovnání Obrazové metody a metody Ray-Tracing v impulzní odezvě dané místnosti.

Z výsledků simulace lze vyčíst, že Obrazová metoda nalezne více paprsků než metoda Ray-Tracing. Rozdíl výsledků nám ovlivňují dva faktory: počet vyslaných paprsků ze zdroje zvuku a poloměr posluchače v metodě Ray-Tracing. Na simulaci je zřejmý jeden z hlavních problémů metody Ray-Tracing (viz kapitola 3.2). Počet vyslaných paprsků se nerovná počtu paprsků, které doputovaly k posluchači. Obrazová metoda nám zaručuje nalezení všech vyslaných paprsků ze zdroje zvuku. V dané simulaci si lze ověřit, že metody fungují obdobně (shoda v prvních několika výsledcích impulzní odezvy). Ostatní výsledky metody Ray-Tracing jsou způsobeny zvětšením poloměru posluchače. Tento nedostatek je zdůrazněn na Obrázku 23, kde do obou metod byl vyslán stejný počet paprsků pro řád odrazu 6. Můžeme pozorovat, že při Obrazové metodě jsou nalezeny všechny vyslané paprsky. U metody Ray-Tracing je nalezena pouhá desetina vyslaných paprsků.



Obrázek 23: Zdůraznění při srovnávání Obrazové metody a metody Ray-Tracing kdy do obou algoritmů byl zadán stejný počet vyslaných paprsků (85). Tato simulace byla provedena s řádem odrazu 6.

Následovné srovnávání jsem převedl do časové oblasti, jak je znázorněno na Obrázku 24. Grafická závislost vychází z 60 běhů simulace, kde jsem si ověřoval časovou náročnost algoritmu jak Obrazové metody, tak i metody Ray-Tracing. Z grafické závislosti lze vyčíst, že výpočetní náročnost Obrazové metody roste exponenciálně daleko rychleji než u metody Ray-Tracing.



Obrázek 24: Grafická závislost časové náročnosti programů na počtu nalezených paprsků

Průsečík charakteristik nám opět ověřil získaný výsledek u metody Ray-Tracing, protože počet vyslaných parsků se u daného průsečíku pohybuje kolem hodnoty 3000. Dále nám tento průsečík ověřuje, že opravdu Obrazová metoda dosahuje nejlepších výsledků pro pravoúhlé místnosti bez překážek pro nízký řád odrazu.

Z daných výsledků (jak impulzní odezvy, tak i časové náročnosti) je zřejmé, že metoda Ray-Tracing dopadla hůře než Obrazová metoda. Tento výsledek je zapříčiněn výběrem simulovaného prostředí. Z kapitoly 3.1 víme, že u Obrazové metody dochází k nejlepším výsledkům pro pravoúhlé místnosti bez překážek. Metoda Ray-Tracing se používá pro složitější tvary místností většinou s překážkami, kde má méně náročný výpočet než Obrazová metoda.

ZÁVĚR

Bakalářská práce seznamuje čtenáře se základy prostorové akustiky. Zejména se zabývá geometrickou akustikou a jejími metodami. Jednotlivé geometrické metody mají různé specifikace. Obrazová metoda je vhodná pro pravoúhlé místnosti. Její hlavní výhodou je vysoká preciznost výpočtu. Další velkou výhodou je fakt, že polohy virtuálních zdrojů neovlivňuje poloha přijímače. Nevýhody Obrazové metody jsou vysoké nároky na výpočetní prostředky a čas. Vždy musíme volit řád odrazů s ohledem na členitost místnosti a výpočetní kapacitu, neboť nárůst počtu možných odrazů je pro klasickou Obrazovou metodu exponenciální. Tato výpočetní náročnost je zjednodušená v metodě Ray-Tracing, kde při nekonečném počtu vysílaných paprsků získáme stejné výsledky jako při Obrazové metodě, neboť žádný důležitý paprsek není opomenut. Nevýhodou je skutečnost, že ne všechny trasy paprsků musí být nutně nalezeny. Další nevýhodou metody Ray-Tracing i Obrazové metody je neschopnost řešit vlnové jevy. Například difrakci paprsků okolo překážek konečných rozměrů, či interference. V metodě Beam-Tracing je hlavní výhodou geometrická soudržnost, protože každý paprsek představuje nekonečný počet možných vyzařovacích cest pocházející ze zdroje zvuku. Nevýhodou je nutnost geometrické operace sledovat pomocí 3D modelu, protože každý paprsek se může projevit anebo být zablokovan na několika stěnách.

Hlavní výsledek bakalářské práce je srovnání Obrazové metody a metody Ray-Tracing na základě simulací v prostředí Matlab. Algoritmy daných metod jsou sestrojeny a naprogramovány na základě matematické geometrie. Především se jedná o Pythagorovu větu, vzdálenost bodu v rovině, směrníkový tvar přímky a vzdálenost bodu od roviny.

Simulace Obrazové metody se pohybuje ve 2D prostoru a umí nalézt virtuální zdroje pro určený řád odrazu, vypočítat vzdálenost virtuálního zdroje od posluchače a vypočítat impulzní odezvy daného prostoru. Dále je do simulace přidáno omezení vzdálenosti virtuálního zdroje od posluchače pro urychlení Obrazové metody. Toto urychlení je výhodné pro obdélníkové místnosti, jelikož několik virtuálních zdrojů je natolik vzdáleno, že dojde k zániku signálu.

Simulace metody Ray-Tracing se pohybuje rovněž ve 2D prostoru a umí vypočítat směrníkový tvar daného paprsku, odrazy paprsků od jednotlivých zdí a vzdálenost paprsku od posluchače. Z analýzy výsledků dané metody můžeme konstatovat, že na pokrytí jednoduché místnosti stačí 3000 vyslaných paprsků. Dané výsledky nám rovněž ovlivňuje poloměr posluchače. Při většině simulací byl poloměr posluchače nastaven na 10 cm, což odpovídá poloměru lidské hlavy.

Při srovnávání Obrazové metody a metody Ray-Tracing jsem si ověřil poznatky jednotlivých metod. U impulzní odezvy bylo zřejmé, že Obrazová metoda našla všechny

vyslané paprsky, zatímco metoda Ray-Tracing našla jen zlomek vyslaných paprsků (viz Obrázek 23), což je jeden z problémů metody Ray-Tracing. Tento problém jsem částečně odstranil pomocí zvětšení poloměru posluchače. U grafické závislosti (viz Obrázek 24) jsem si ověřil poznatek, že výpočetní náročnost Obrazové metody roste exponenciálně mnohem rychleji, než u metody Ray-Tracing. Z celkových výsledků lze říci, že metoda Ray-Tracing dopadla hůře než Obrazová metoda. Tudíž jsme si především ukázali přednosti Obrazové metody, jelikož se jednalo o pravoúhlou místnost bez překážek, u kterých dosahuje nejlepších výsledků.

LITERATURA

- [1] Savioja L.; Manocha D.; Lin M. C., "Use of GPUs in room acoustic modeling and auralization," in Proc. Int. Symp. Room Acoustics, Aug 2010.
- [2] Borish, J., "Extension of the image model to arbitrary polyhedra," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 75, no. 6, pp. 1827– 1836, 1984.
- [3] Allen, J. B.; Berkley, D. A., "Image method for efficiently simulating small-room acoustics," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 65, no. 4, pp. 943– 950, Apr. 1979.
- [4] T.A. Funkhouser, N. Tsingos, I. Carlbom, G. Elko, M. Sondhi, J. West, G. Pingali, P. Min, and A. Ngan. A beam tracing method for interactive architectural acoustics. J. Acoust. Soc. Am., 115(2):739–756, February 2004.
- [5] Káňa L., Elektroakustika, VUT v Brně, Brno, 2002
- [6] Schimmel J., 5. přednáška z elektroakustika – Akustika uzavřených prostor, VUT v Brně, Brno, 2011
- [7] Schimmel J., 1. přednáška z elektroakustika – Šíření zvuku, VUT v Brně, Brno, 2011
- [8] EKOSOFT. Matematické modely popisující šíření hluku [online]. [cit. 10-12-2009]. Dostupné z URL: <http://ekosoft.byl.cz/clanky/modely.htm>
- [9] CPE, s. r. o. Prostorová akustika [online]. [cit. 10-12-2009]. Dostupné z URL: <http://cpe.byl.cz/clanky/pakust/pakust.htm>
- [10] M.R.Schroeder, "Digital simulation of sound transmission in reverberant spaces", J. Acoust. Soc. Am. 47, pp. 424-431, 1970
- [11] J.L. Wayman, "Computer simulation of sound fields using ray methods", PH.D. thesis, University of California, Santa Barbara, July 1980
- [12] Boček L., Kočandrle M., Matematika pro gymnázia Analytická geometrie, Prometheus, pp. 220, 2009

- [13] Ray tracing algorithm [online], Dostupné z URL:
http://www.ee.ed.ac.uk/~dil/thesis_mosaic/section2_9_7.html

- [14] Heckbert P., Hanrahan P., "Beam tracing polygonal objects", vol. 81, no. 3, pp. 119-127, July 1984

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Šíření zvuku v plynném prostředí. [5]	10
Obrázek 2: Aproximace impulzní odezvy poslechového prostoru. [6]	13
Obrázek 3: Konstrukce zvukového paprsku při odrazu od rovinné stěny.[2]	17
Obrázek 4: Vytváření nových virtuálních zdrojů pomocí zrcadlení původního zdroje nebo od virtuálního zdroje předešlého řádu odrazu. Zelenou barvou s červenou tečkou je reprezentována původní místnost se skutečným zdrojem. Světle modrá barva zastupuje prvotní odrazy a další barvy pak určují mnohonásobné odrazy zvukového paprsku v prostoru.[2]	18
Obrázek 5: Šíření zvukového paprsku v metodě Ray-Tracing [6].....	19
Obrázek 6: Zobrazení dvou hlavních problémů v metodě Ray-Tracing.	20
Obrázek 7: Šíření zvukového paprsku v metodě Beam-Tracing[4]	21
Obrázek 8: Rozmístění virtuálních zdrojů v prostředí Matlab.	22
Obrázek 9: Doplnění trojúhelníku před aplikací Pythagorovy věty,	23
Obrázek 10: Rozmístění virtuálních zdrojů pravoúhlé místnosti 4 x 2 m	25
Obrázek 11: Impulzní odezva pravoúhlé místnosti 4 x 2 m	25
Obrázek 12: Rozmístění virtuálních zdrojů pravoúhlé místnosti 4 x 2 m	26
Obrázek 13: Impulzní odezva pravoúhlé místnosti 4 x 2 m	26
Obrázek 14: Rozmístění virtuálních zdrojů pravoúhlé místnosti 3 x 3 m	27
Obrázek 15: Impulzní odezva pravoúhlé místnosti 3 x 3 m pro řád odrazu 8, poloha skutečného zdroje [1 1] m a poloha posluchače [2 2]m.....	27
Obrázek 16: Ukázka postupu při zjišťování vzdálenosti dvou bodů. [12]	28
Obrázek 17: Ukázka různých směrníkových tvarů rovnic přímek [12].....	29
Obrázek 18: Vzdálenost bodu od přímky [12].....	29
Obrázek 19: Impulzní odezva pro místnost 4 x 3 m, s polohou zdroje [1 1] m, s polohou posluchače [3 2] m, počtem vyslaných paprsků 3600 a řádem odrazu 6 pro různé velikosti posluchače.	30
Obrázek 20: Grafická závislost počtu nalezených paprsků na počtu vyslaných paprsků pro řád odrazu 1	31
Obrázek 21: Grafická závislost počtu nalezených paprsků na počtu vyslaných paprsků pro řád odrazu 2	32

Obrázek 22: Srovnání Obrazové metody a metody Ray-Tracing v impulzní odezvě dané místnosti..	33
Obrázek 23: Zdůraznění při srovnávání Obrazové metody a metody Ray-Tracing kdy do obou algoritmů byl zadán stejný počet vyslaných paprsků (85). Tato simulace byla provedena s řádem odrazu 6.	34
Obrázek 24: Grafická závislost časové náročnosti programů na počtu nalezených paprsků ..	34

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

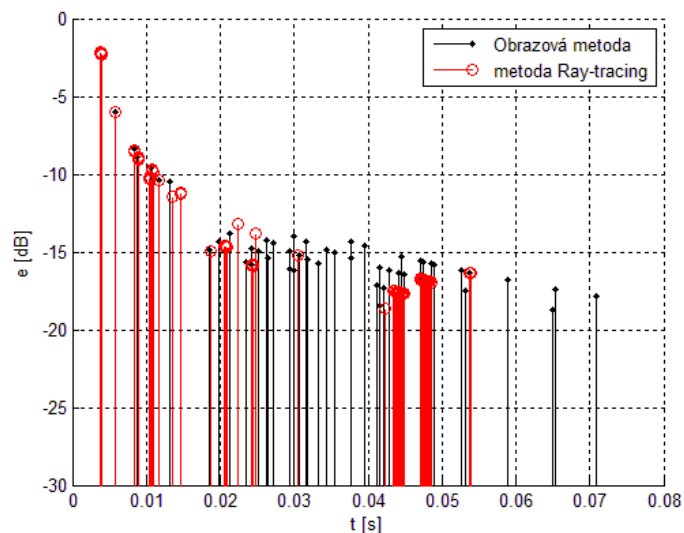
2D	dvojměrný pohled
3D	trojměrný pohled
SZ	skutečný zdroj zvuku
VZ	virtuální zdroj zvuku
P	posluchač
T	perioda
f	frekvence
f_k	kritická frekvence
λ	vlnová délka
k	vlnové číslo
T_S	doba dozvuku podle Sabina
T_E	doba dozvuku podle Eyringa
T_M	doba dozvuku podle Millingtana
α	pohltivost materiálu

SEZNAM PŘÍLOH

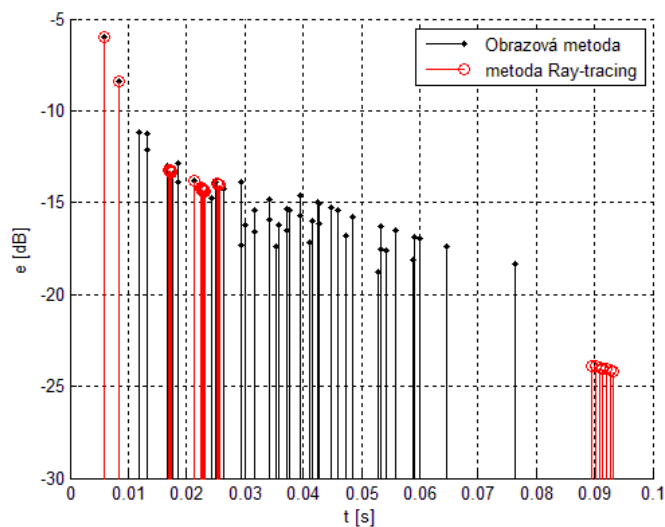
Příloha A Srovnávací impulzní odezvy pro různé polohy zdroje zvuku a posluchače....	44
Příloha B Obsah přiloženého CD.....	46

Příloha A Srovnávací impulzní odezvy pro různé polohy zdroje zvuku a posluchače

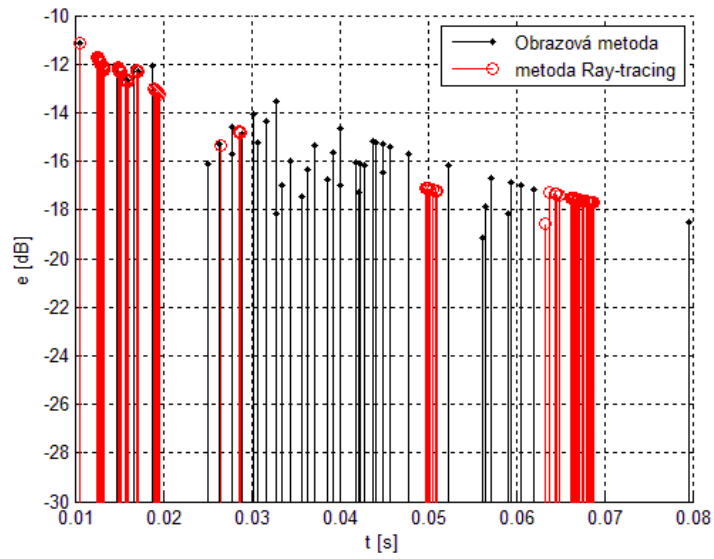
V příloze jsou uvedeny některé impulzní odezvy pro různé polohy zdroje zvuku a posluchače u místnosti 4x3 m pro řád odrazu 6. U metody Ray-Tracing je vysíláno 3000 paprsků a poloměr posluchače je nastaven na 10 cm.



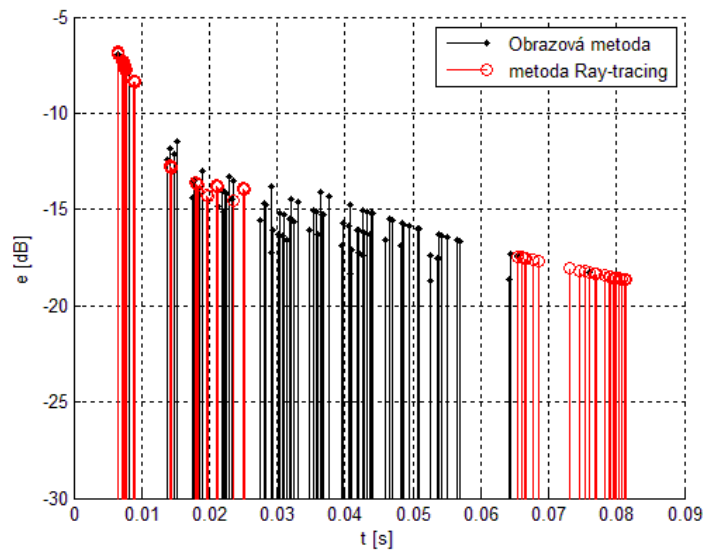
Poloha zdroje [1 0.5] m a poloha posluchače [1 2.5] m



Poloha zdroje [1 1] m a poloha posluchače [3 1] m



Poloha zdroje $[0.5 \ 0.5]$ m a poloha posluchače $[3.5 \ 2.5]$ m



Poloha zdroje $[2 \ 1.5]$ m a poloha posluchače $[3.8 \ 2.8]$ m

Příloha B Obsah přiloženého CD

- Elektronická verze bakalářské práce ve formátu PDF
- Algoritmus Obrazové metody
- Algoritmus Obrazové metody s omezením vzdálenosti
- Algoritmus metody Ray-Tracing