

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

ZKOUMÁNÍ VLIVU TVARU IMPULSNÍ ODEZVY UZAVŘENÉ MÍSTNOSTI
NA POSLECHOVÝ VJEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

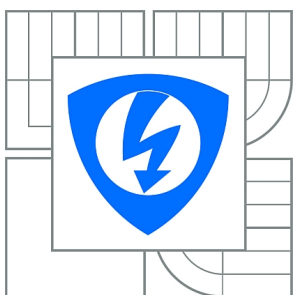
MATEJ KIŠAC

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ZKOUMÁNÍ VLIVU TVARU IMPULSNÍ ODEZVY UZAVŘENÉ MÍSTNOSTI NA POSLECHOVÝ VJEM

RESEARCH FOR ENCLOSED SPACES IMPULSE RESPONSE INFLUENCE ON THE AUDITORY
PERCEPTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MATEJ KIŠAC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KRISTIÁN ORLOVSKÝ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Matej Kišac

ID: 146857

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Zkoumání vlivu tvaru impulsní odezvy uzavřené místnosti na poslechový vjem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je nastudování vlivu tvaru impulsní odezvy místnosti na poslechový vjem v dané místnosti a aplikování těchto poznatků do prostředí Matlab. V práci budou přehledně zpracovány možnosti parametrizace impulsní odezvy do několika vjemových parametrů. Výsledkem práce bude algoritmus, který bude schopen vytvořit impulsní odezvu místnosti na základě zvolených subjektivních parametrů a topologie místnosti. Výstupem pak budou konkrétní simulace impulsních odezev virtuálních místností v prostředí Matlab a srovnání vlastností těchto místností s vlastnostmi místností, kterých impulsní odezva bude vypočtena některou z výpočetních metod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Hameed S., Pakarinen J., Valde K., Pulkki V., Psychoacoustic Cues in Room Size Perception, in Proc. AES 116th Convention, 2004, Germany, Berlin
- [2] Blauert J., Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization, MIT Press, Cambridge, MA, 1997.
- [3] B. Shinn-Cunningham, "Acoustics and perception of sound in everyday environments", Proc. 3rd Int. Workshop Spa. Media, Aisu-Wakamatsu, Japan, March 2003.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 4.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Kristián Orlovský

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá akustikou uzavretých priestorov a psychoakustikou. V prvej časti práce sa prostredníctvom teórie oboznamujeme so základnou štruktúrou akustiky priestorov a zameriame sa konkrétne na impulznú odozvu priestoru. Ďalšia časť je venovaná popisu súvislostí základných parametrov priestoru s impulznou odozvou a ich vlastností. Tieto vlastnosti je možné vyhodnocovať prostredníctvom metód spracovaných v tretej časti. Následne je stručne spracovaná tematika panoramovania zdroja zvuku. Potom prechádzame na časť, ktorá zahrňuje poznatky nadobudnuté pri simuláciách vybraných parametrov (priestorovosť, miera jasnosti a intimita). Záver obsahuje riešenie návrhu algoritmu pre zjednodušenie generovania impulznej odozvy priestoru a porovnanie výsledkov objektívnych parametrov môjho algoritmu s obrazovou metódou.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

akustika uzavretých priestorov, psychoakustika, impulzná charakteristika, subjektívny posluchový vnem, parameter posluchového vnemu

ABSTRACT

This thesis deals with the acoustics of enclosed spaces and psychoacoustics. The first part is based on theoretical information about main structure of room acoustics and we concentrate on impulse response of the room. Next part is directed to the description of connection between basic parameters and room impulse response and their properties. These properties may be evaluated by means of methods processed in the third portion. Then we briefly focus on the panning process. The following section offers the knowledge acquired in the simulations of selected parameters (spacious impression, clarity, intimacy). In conclusion, it contains a solution of algorithm to simplify the generation of impulse response and comparison of objective parameters of my algorithm and the image method.

KEYWORDS

room acoustics, psychoacoustics, impulse response, subjective auditory perception, parameter of auditory perception

KIŠAC, Matej *Zkoumání vlivu tvaru impulsní odezvy uzavřené místnosti na poslechový vnem*: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013/2014. 65 s. Vedúci práce bol Ing. Kristián Orlovský,

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Zkoumání vlivu tvaru impulsní odezvy uzavřené místnosti na poslechový vjem“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/nebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorskom, o právach súvisejúcich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), vo znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval pánovi Ing. Kristiánovi Orlovskému za jeho ochotu a pomoc pri riešení tejto práce.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	10
1 Akustika uzavretých priestorov	11
1.1 Úvod	11
1.2 Štruktúra akustiky uzavretých priestorov	11
1.3 Šírenie vlny v reálnom prostredí	12
1.4 Princípy práce s uzavretými akustickými priestormi	13
1.4.1 Vlnová akustika	13
1.4.2 Geometrická akustika	14
1.4.3 Štatistická akustika	14
1.5 Impulzná odozva priestoru	14
2 Základné parametre akustického priestoru	17
2.1 Doba dozvuku	17
2.2 Hlasitosť (Loudness)	18
2.3 Vnem priestorovosti (Spacious impression)	18
2.4 Živosť (Liveness)	19
2.5 Miera jasnosti (Clarity)	19
2.6 Blízkosť (Intimacy)	20
2.7 Textúra (Texture)	20
2.8 Vrelosť a Brilancia (Warmth and Brilliance)	21
2.9 Obklopenie (Listener envelopment (LEV))	21
2.10 Zdanlivá šírka zdroja zvuku (ASW)	21
2.11 Zreteľnosť (Definition)	22
2.12 Čas ťažiska impulznej odozvy (Center time)	22
2.13 Akustická podpora pódia (Support)	22
3 Psychoakustika	23
3.1 Metóda hodnotenia podnetu	23
3.2 Metóda sémantický diferenciál	24
3.3 Metóda škálovania kategórií	24
3.4 Metóda odhadu veľkosti	25
4 Panoramovanie zdroja zvuku	26
4.1 Interaural Time Difference	26
4.2 Interaural Intensity Difference	27
4.3 Amplitúdové panoramovanie	27

5	Simulácie impulzných charakteristík pre výskum subjektívnych parametrov uzavretého priestoru	28
5.1	Voľba vhodného softwaru	28
5.2	Podmienky simulácie	28
5.3	Posluchové testy	29
5.3.1	Simulácie parametra priestorovosti	29
5.3.2	Simulácie miery jasnosti	32
5.3.3	Simulácie parametra intimity	33
6	Realizácia GUI určeného k porovnávaní rôznych metód generovania impulznej odozvy uzavretého priestoru	35
6.1	Popis základných objektov GUI	35
6.2	Metodika funkcií navrhnutých pre generovanie impulznej odozvy priestoru	36
6.3	Porovnanie metód generovania impulznej odozvy priestoru pomocou objektívnych parametrov	41
6.3.1	Popis základných podmienok pre získanie výstupných hodnôt objektívnych parametrov	42
6.3.2	Zhodnotenie výsledkov meraní	43
7	Záver	50
	Literatúra	52
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	54
	Zoznam príloh	55
A	Obsah priloženého DVD	56
B	Výsledky meraní objektívnych parametrov uzavretých priestorov	57
B.1	Miestnosť s rozmermi 4x2	57
B.2	Miestnosť s rozmermi 5x4	60
B.3	Miestnosť s rozmermi 8x6	63

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Koncept vnímania akustiky priestoru [1].	11
1.2	Reakcia dopadajúcej vlny na pevnú prekážku [1].	12
1.3	Impulzná odozva uzavretého priestoru [3].	15
2.1	Parameter ITDG [6].	20
2.2	a)Pocit vrelosti; b)Pôvodný pocit; c)Pocit brilancie;	21
3.1	Vizualizácia metódy hodnotenia podnetov [11].	24
3.2	Vizualizácia metódy škálovania kategórií [11].	24
4.1	Interaurálna časová diferencia[1].	26
4.2	Interaurálna intenzitná diferencia[1].	27
5.1	Nastavenie rozmerov miestnosti, rádu odrazu, materiálu jednotlivých stien a pozície zdroja zvuku aj poslucháča.	29
5.2	Redukcia časti difúzneho dozvuku na 1/4 dĺžky.	30
5.3	Redukcia časti difúzneho dozvuku na 1/2 dĺžky.	30
5.4	Redukcia časti difúzneho dozvuku na 3/4 dĺžky.	31
5.5	Zväčšenie časti difúzneho dozvuku na dvojnásobok.	31
5.6	Impulzná odozva s redukovanou časovou osou do 50 ms.	32
5.7	Impulzná odozva s rozšírenou časovou osou do 50 ms.	33
5.8	Minimálna hodnota ITDG.	33
5.9	Maximálna hodnota ITDG.	34
6.1	Grafické rozhranie programu.	36
6.2	Schéma programu.	37
6.3	Výpočet vzdialenosti dvoch bodov v rovine pomocou Pytagorovej vety.	38
6.4	Členenie miestnosti na zóny.	39
6.5	Výpočet uhlov dopadu.	41
6.6	Schéma kombinácií rozmiestnenia zdroja zvuku a poslucháča použi- tých pri meraní objektívnych parametrov.	43
6.7	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.1.	45
6.8	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.2.	46
B.1	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.1.	57
B.2	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.2.	57
B.3	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.3.	58
B.4	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.4.	58
B.5	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.5.	59
B.6	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.6.	59
B.7	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.1.	60
B.8	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.2.	60
B.9	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.3.	61

B.10	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.4.	61
B.11	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.5.	62
B.12	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.6.	62
B.13	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.1.	63
B.14	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.2.	63
B.15	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.3.	64
B.16	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.4.	64
B.17	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.5.	65
B.18	Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.6.	65

ÚVOD

Vnímanie je základným procesom pri poznávaní okolia človekom. Pri vnímaní je nutné splňať niektoré vnútorné a vonkajšie podmienky, aby došlo k vzniku vnemu ako takého. Na základe vnemov sme následne schopní rozpoznávať realitu. A preto je skúmanie parametrov jednotlivých vnemov okolia dôležitou súčasťou dnešného rozvoja technológií, kedy sa kladie dôraz na čo najviac realistické zážitky z ponúkaných služieb. Primárny záujem budem venovať sluchovému vnemu, ktorý je vyvolaný mozgom pri spracovaní zvuku. Poznáme veľkú škálu vlastností zvuku, ktoré je možné zmerať, avšak nie vždy dané hodnoty dostatočne reprezentujú to, čo vníma ľudský organizmus. Z toho dôvodu vzniklo odvetvie psychoakustika, ktoré sa vyjadrovaním týchto dejov zaoberá.

V rámci tejto práce sa zameriam najmä na subjektívny vnem prostredia prostredníctvom zvuku, ktorý je spôsobený mechanickým kmitaním častíc v hmotnom prostredí. Konkrétne sa bude jednať o rôzne druhy uzavretých priestorov. Hlavným predmetom môjho výskumu bude skúmanie zákonitostí impulznej odozvy pri jej zmenách, a následne vplyv týchto zákonitostí na vnem konkrétnych vlastností prostredia. Po teoretickom spracovaní základov akustiky uzavretých priestorov a psychoakustiky nutných k danej téme prevediem potrebný počet simulácií pre pochopenie zákonitostí, ktoré nastávajú v rôznych príkladoch akustických priestorov, aby bolo možné pristúpiť k parametrizácii základných vlastností impulznej odozvy do vnemových parametrov. Následne overím pravdivosť zvolených parametrov prostredníctvom simulácií v prostredí Matlab. V poslednej časti sa budem zaoberať vývojom subjektívnej metódy generovania impulznej odozvy priestoru, ktorá bude minimalizovať výpočtovú náročnosť bežne zaužívaných metód generovania. Nakoniec použijem získané znalosti objektívnych a subjektívnych parametrov pre porovnanie mnou navrhutej metódy s obrazovou metódou.

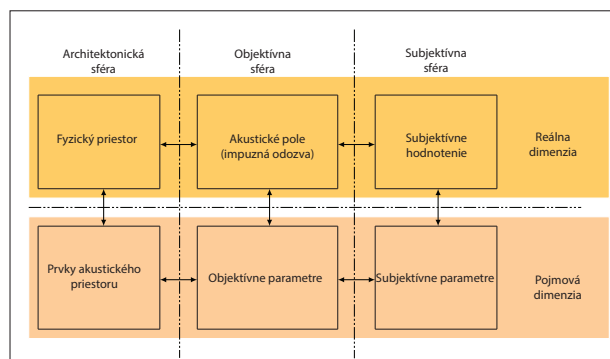
1 AKUSTIKA UZAVRETÝCH PRIESTOROV

1.1 Úvod

Akustika uzavretých priestorov sa riadi základnými zákonitosťami, ktoré vo všeobecnosti platia pre šírenie zvuku. Zvuk je spôsobený kmitaním častíc, ktoré si v hmotnom prostredí predávajú energiu, čo má za následok vznik akustickej (zvukovej) vlny. Tá sa následne šíri prostredím. V našom prípade je dôležitý najmä frekvenčný rozsah 16 Hz až 20 kHz. Tento rozsah definuje oblasť sluchového vnemu človeka. Zložitosť samotného sluchového orgánu dáva podstatný dôvod pre vznik rôznych oblastí akustiky, ktoré sa jednotlivými zákonitosťami bližšie zaoberajú. Medzi tieto patrí aj akustika priestorov prípadne psychologická akustika, ktorými sa budem zaoberať.

1.2 Štruktúra akustiky uzavretých priestorov

Pre zjednodušenie a názornosť prepojenia oblastí akustiky uzavretých priestorov použijeme zobrazenie vid' obr.1.1. V hornej časti obrázku môžeme pozorovať podnety predstavujúce reálne prostredie. Špecifickou vlastnosťou je veľký stupeň voľnosti, ktorý predstavuje obrovské množstvo rozdielov v rámci fyzického priestoru. Uzavretý priestor následne definuje zvukové pole, a tým aj jeho impulznú odozvu v objektívnej sfére. Nakoniec pristupujeme k možnosti vymedzenia subjektívnych hodnotení uzavretého priestoru. Spodná časť znázorňuje potrebu definície subjektívneho hodnotenia do parametrov, ktoré priblížia problematiku človeku s bežnými znalosťami. Z dôvodu korektnosti je však nutné jednotlivým subjektívnym parametrom prideliť merateľné veličiny, ktoré svojou podstatou vystihujú subjektívnu definíciu. Posledným krokom je samotná konštrukcia priestoru, a preto musíme dokázať objektívnym parametrom miestnosti prideliť prvky, ktoré ich uskutočňujú v reálnom svete [1].

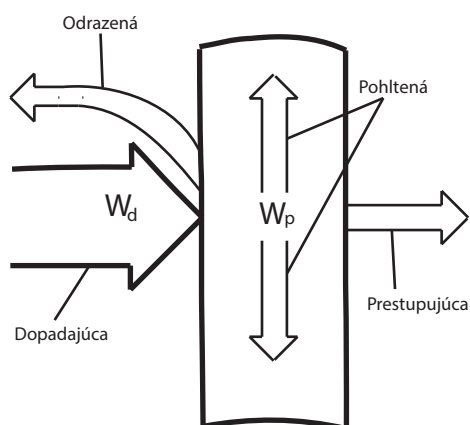


Obr. 1.1: Koncept vnímania akustiky priestoru [1].

1.3 Šírenie vlny v reálnom prostredí

Úlohou akustiky priestorov je hodnotenie kvality priestoru z akustického hľadiska, podľa čoho môžeme usúdiť vhodnosť použitia miestnosti na daný typ reprodukovateľného zvuku. Vychádzame z vlastností šírenia guľovej zvukovej vlny, ktorej energia sa prostredníctvom šírenia pri náraste plochy rozdeľuje a intenzita vlny v danom bode klesá.

Taktiež je nutné brať do úvahy, že v prípade nárazu vlny na reálnu prekážku dôjde k trom základným javom: odrazu, ohybu a pohlteniu vlny. Ktorý z týchto javov bude prevládať, závisí hlavne na veľkosti prekážky, prípadne na materiáli, z ktorého je daná prekážka vyrobená. V prípade, že prekážka má rozmery väčšie, ako je vlnová dĺžka λ , dôjde k odrazu zvukovej vlny od prekážky, zároveň bude časť energie vlny pohltená (vznik tepla). Ak je prekážka porovnateľná s vlnovou dĺžkou, prevláda ohyb zvukovej vlny okolo prekážky. Okrem toho časť energie môže prejsť do priestoru za samotnou prekážkou.



Obr. 1.2: Reakcia dopadajúcej vlny na pevnú prekážku [1].

Veľkosť energie, ktorú daná prekážka pohltí, je definovaná činiteľom zvukovej pohltivosti α . Ten dokážeme určiť ako pomer energie pohltenej W_p v prekážke ku energii dopadajúcej W_d na prekážku [2]:

$$\alpha = \frac{W_p}{W_d}. \quad (1.1)$$

Je nutné dodať, že mäkké materiály pohlcujú lepšie vysoké frekvencie a naopak tvrdé materiály majú väčší činiteľ pohltivosti pre nízke frekvencie. Činiteľ pohltivosti má značný vplyv na vlastnosti akustického priestoru, a to hlavne na dobu dozvuku.

1.4 Princípy práce s uzavretými akustickými priestormi

Rozoznávame tri princípy riešenia akustiky uzavretých priestorov:

- Vlnová akustika (malé priestory, nízke frekvencie)
- Geometrická akustika (veľké sály)
- Štatistická akustika

1.4.1 Vlnová akustika

Vychádza zo základných zákonov mechaniky prostredia, v ktorom sa šíri zvuk. Pri putovaní akustickej vlny prostredím dochádza k jej odrazu od rôznych pevných prekážok. V prípade, že sa jedná o miestnosť s navzájom kolmými stenami, dochádza k interferencii odrazenej vlny s vlnou prichádzajúcou. Vzájomný rozdiel týchto vln je založený hlavne na vlnovej dĺžke. Následná interferencia závisí na fázach akustických vln, v ktorých sa jednotlivé vlny stretnú, a tak môžu vzniknúť miesta s nulovou energiou (protifáza), alebo naopak s energiou dvojnásobnou: akustické módy priestoru (vo fáze).

Pri reálnych povrchoch taktiež vznikajú minimá a maximá, avšak vplyvom útľmu dosahujú menších hodnôt. Pre výpočet módov priestoru a taktiež frekvencií, kde sa nachádzajú, použijeme nasledujúce vzťahy [2]:

$$f_N = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (1.2)$$

kde f_N je frekvencia pre danú kombináciu indexov, c_0 je rýchlosť zvuku, n_x, n_y, n_z sú kladné celé čísla a l_x, l_y, l_z sú rozmermi miestnosti.

Potom pre výpočet módov použijeme vzťah [2]:

$$N(f) = \frac{4\pi V}{3c_0^3} f^3 + \frac{\pi S}{4c_0^2} f^2 + \frac{L}{8c_0} f, \quad (1.3)$$

kde V je objem miestnosti, S je plocha stien miestnosti a L je dĺžka všetkých hrán.

Módy delíme na: osovú (vznikajú odrazom od dvoch stien), tangenciálne (odraz cez štyri steny v rovine) a šikmé módy (viacej stien v sklonenej rovine). Úlohou vlnovej akustiky je zabezpečenie kvality posluchovej miestnosti, preto je nutné dbať na pomer strán z dôvodu eliminácie degenerovaných módov, ktoré spôsobujú koncentráciu energie na kmitočtoch, kde sa nachádzajú.

1.4.2 Geometrická akustika

Predpokladá šírenie zvuku prostredníctvom odrazov, pričom nedochádza k ohybu. To nám poskytuje možnosť definovať akustickú vlnu ako akustický lúč, pozdĺž ktorého sa šíri akustická energia obdobne ako v optike. Princíp odrazu lúča od rozhrania, na ktoré dopadá, hovorí: Uhol, ktorý zvierajú dopadajúci lúč s kolmicou dopadu, je rovný uhlu, ktorý s kolmicou dopadu zvierá odrazený lúč, avšak s opačnou orientáciou [2]. Vzťahy medzi vlnou dopadajúcou a odrazenou popisuje Snellov zákon:

$$\alpha = \alpha', \quad (1.4)$$

kde α je uhol dopadu a α' je uhol odrazu.

1.4.3 Štatistická akustika

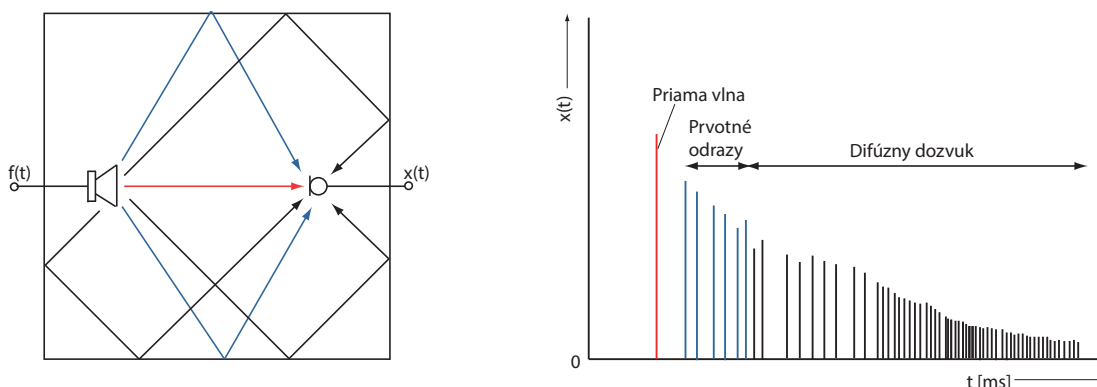
Poskytuje najhodnotnejšie informácie pre posudzovanie kvality akustiky uzavretých priestorov. Rieši vznik, chovanie a zánik akustických vln pri veľkom množstve odrazov. Pri štatistickej akustike vychádzame z predpokladu, že pre vznik akustického poľa v určitom mieste priestoru je potrebné veľké množstvo odrazov od stien a rôznych druhov prekážok. K popisu používame energetické veličiny. Pre použitie štatistickej akustiky je nutné splniť tri predpoklady [2]:

- Veľkosť zvukovej energie v ľubovoľnom bode v uzavretom priestore je daná súčtom stredných hodnôt energie, ktorá do uvedeného bodu dospela prostredníctvom odrazov.
- Hustota zvukovej energie je vo všetkých bodoch priestoru rovnako veľká.
- Všetky uhly dopadu zvukových vln v uvažovanom bode sú zastúpené s rovnakou pravdepodobnosťou.

Priestor, ktorý spĺňa všetky tri tieto predpoklady, nazývame difúznym akustickým poľom.

1.5 Impulzná odozva priestoru

Zameriame sa na priestorové počutie, v spojení s akustickým poľom obsahujúcim viac zdrojov zvuku, ktoré je najdôležitejšie pri použití v praxi. Primárne je sústrediť sa na impulznú odozvu priestoru s čiastočne alebo ideálne odrazovými stenami. Vychádzame z predpokladu, že v istom bode priestoru je vygenerovaný krátky akustický impulz, ktorého zdrojom môže byť napr. pištoľ. Tento impulz je v inom bode priestoru zachytávaný najčastejšie mikrofónom. Úpravou v podobe dekonvolúcie získavame výslednú impulznú odozvu priestoru (echogram) obrázok 1.3 [3].



Obr. 1.3: Impulzná odozva uzavretého priestoru [3].

Jej tvar popisujeme nasledujúcim spôsobom: Do bodu, kde sa nachádza meracie zariadenie prípadne poslucháč, dorazí ako prvá priama vlna (direct sound). Charakteristicky malé skreslenie priamej vlny, ktoré je dané útlmom, spôsobeným len prostredníctvom šírenia vlny v priestore, zapríčiňuje vznik Haasovho efektu (law of the first wavefront). V prípade, že časový rozdiel medzi dvoma prichádzajúcimi akustickými vlnami je menší než 30 ms, poslucháč považuje smer zdroja zvuku za súhlasný so smerom priamej vlny. Aj napriek tomu, že sa prejavuje Haasov efekt, a tým pádom nemôžeme detekovať smer jednotlivých veľmi skorých odrazov (15–40 ms), ktoré sú pohltené (maskované) priamou vlnou, vplyvajú však na celkovú hlasitosť v priestore. Je nutné, aby priama vlna mala vysokú energiu, najmä v prípade reči, kde sa prejavuje v podobe lepšej jasnosti počutia jednotlivých slov. Využitie vidíme napr. pri premene mono-stereo transformácií [3].

Priama vlna je nasledovaná skupinou odrazov, ktoré vznikli prvou vzájomnou interakciou akustickej vlny s prekážkami v priestore, taktiež známe ako prvotné odrazy (early reflections: 50–80 ms). Prvotné odrazy sú základom pri lokalizácii zdroja zvuku, a taktiež ovplyvňujú farbu tónu (timbre) tým, že sú prvotným kontaktom s priestorom, ktorý vstupuje do sluchového orgánu, stávajú sa zaujímavým faktorom pri dojme o veľkosti miestnosti [3].

Ako posledné k bodu merania zvuku dorazia vlny, ktoré prišli do kontaktu s viacerými prekážkami v uzavretom priestore (mnohonásobné odrazy), je to čas nazývaná difúzna dozvuk (reverberation). Impulzná charakteristika má tvar klesavej logaritmickkej obálky, čo určuje postupný útlm akustickej vlny buďto zvyšujúcou sa vzdialenosťou od zdroja zvuku, alebo odrazmi od reálnych prvkov miestnosti so špecifickým činiteľom zvukovej pohltivosti. Neustálym nárastom času sa jednotlivé odrazové zložky navzájom prekrývajú, čo vedie k nutnosti riešiť časť difúzneho dozvuku len za pomoci štatistickej akustiky. Hustotu odrazov za jednotku času, ktorá uplynie po tom, ako zdroj zvuku vyžiari zvukový impulz, je možno určiť [3]:

$$N_R = \frac{4\pi c_0^3}{V} t^2. \quad (1.5)$$

2 ZÁKLADNÉ PARAMETRE AKUSTICKÉHO PRIESTORU

Poznáme veľké množstvo parametrov, ktoré bližšie špecifikujú vlastnosti priestoru. Tieto parametre reprezentujú vhodný pomer medzi objektívnym a subjektívnym vnímaním akustiky priestoru. V súčasnosti jedným z najsmereodajnejších parametrov je doba dozvuku (reverberation time), ktorá je jedným zo základných pilierov pri návrhu akustiky priestoru. Ďalšími veličinami sú napr. miera jasnosti (Clarity–C), sila zvuku (Sound strenght–G), akustická priestorovosť (Spaciousness), vrelosť (Warmth) atď. Vyjadrenie týchto veličín najčastejšie vyplýva z impulznej odozvy priestoru.

2.1 Doba dozvuku

Pri návrhu uzavretej miestnosti je dôležité brať do úvahy energiu, ktorá sa šíri priestorom aj po vypnutí zdroja zvuku prostredníctvom odrazov od stien a prekážok. Túto energiu nazývame dozvuk.

Pri vyjadrovaní množstva tejto energie využívame pomenovanie doba dozvuku, ktorá je definovaná ako doba, za ktorú poklesne hustota zvukovej energie, alebo intenzita po vypnutí zdroja zvuku na 10^{-6} pôvodnej veľkosti. Pre výpočet doby dozvuku môžeme použiť viacero definícií, ktoré vychádzajú z výpočtu doby dozvuku podľa Sabina [2]:

$$T = 0,164 \frac{V}{\alpha S}, \quad (2.1)$$

kde V je objem miestnosti, S je plocha všetkých stien a α je činiteľ pohltivosti stien.

Sabinova definícia naznačuje závislosť doby dozvuku na objeme a ploche miestnosti, avšak do výpočtov je nutné zaviesť aj hodnotu činiteľa pohltivosti jednotlivých stien, v opačnom prípade by mohlo dôjsť k situácii, kedy proporcionálne rozdielne miestnosti budú mať rovnakú dobu dozvuku.

Hodnoty doby dozvuku ovplyvňujú odhad človeka o veľkosti danej miestnosti, a taktiež určujú kvalitu posluchu v danej miestnosti. Na základe meraní [4] zisťujeme, že čím väčšia je doba dozvuku, tým považujeme miestnosť za rozlohovo väčšiu. Pre dodržanie kvality posluchovej miestnosti existujú rôzne normy, ktoré definujú maximálnu dobu dozvuku vhodnú ku konštrukcii priestorov určených pre rôzne použitie napr.[5].

2.2 Hlasitosť (Loudness)

Hlasitosť je jednou z charakteristických vlastností zvuku, ktorú dokáže človek postrehnúť prostredníctvom subjektívneho vnemu. Ako veličina je úzko spätá s intenzitou zvuku, ktorá predstavuje jej množstevné vyjadrenie. Určenie veľkosti hlasitosti je však veľmi zložitá preto, že hodnota intenzity zvuku neberie do úvahy interpretáciu hlasitosti pre každý subjekt samostatne. Z toho dôvodu sa k vyjadrovaniu veľkosti hlasitosti začali používať tzv. „Krivky zhodnej hlasitosti“, ktoré pochádzajú z komparácie hlasitostí pri referenčnej frekvencii 1 kHz. Zaviedla sa tiež definícia hladiny hlasitosti.

Pri zachytávaní zvuku človekom v reálnom živote má hlasitosť podstatný vplyv na vnímanie vzdialenosti zdroja zvuku, pretože dochádza k útlmu jeho hlasitosti počas šírenia prostredím. Účinok, ktorý má uzavretá miestnosť na subjektívne hodnotenie hlasitosti, je taktiež mimoriadne dôležitý. Veľkosť straty hlasitosti je podmienená zvoleným materiálom jednotlivých odrazových prekážok. V rámci uzavretých priestorov je možné subjektívnu hlasitosť vyjadriť objektívnym parametrom, ktorý sa opiera o tvar a hodnoty impulznej odozvy priestoru. Tento parameter sa nazýva „miera hlasitosti“ (G)[dB] a udáva pomer medzi celkovou energiou impulznej odozvy priestoru a energiou priamej vlny zachytenej vo vzdialenosti 10 m. Je možné ho vyjadriť nasledujúcou definíciou [1]:

$$G = 10 \log \left(\frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{t_{\text{priam}}} p_{10}^2(t) dt} \right), \quad (2.2)$$

kde $p^2(t)$ je impulzná odozva priestoru a $p_{10}^2(t)$ je impulzná odozva vo vzdialenosti 10 m.

2.3 Vnem priestorovosti (Spacious impression)

Koncept parametra priestorovosti je založený na prezentácii akustického poľa subjektu, ktorý spontánne určuje typ a veľkosť skutočného alebo simulovaného priestoru.

Priestorovosť je úzko spojená s difúznym dozvukom. V prípade, kedy nevnímame dozvuk, nie je možné považovať miestnosť za priestrannú. Za najdôležitejšie pritom považujeme postranné odrazy. Keď nie je nábehový čas ovplyvnený postrannými odrazmi, nadobúdame dojem ostrého zvuku. V prípade, že odrazená energia dorazí v priebehu 50 ms po ukončení akustického javu, získavame pocit malej miestnosti. Pocit priestrannosti získavame až v momente, kedy je energia oneskorená viac ako 50 ms [3].

Postranné odrazy (odrazy šíriace sa v horizontálnej rovine), ktorých frekvencia sa nachádza pod hranicou 3 kHz, rozširujú u poslucháča pocit hĺbky. Nad 3 kHz hranicou vnímame pocit rozšírenia miestnosti. Predné a stropné odrazy nehrajú žiadnu rolu pri určovaní priestrannosti. Priame využitie je možné vidieť v pseudostereofónnych systémoch, ktoré vytvárajú dva stereo kanály z jedného mono, aby zabezpečili väčší pocit priestrannosti záznamu. Prieskumy však ukazujú, že parameter priestorovosti sa podieľa najmä na kladnom hodnotení koncertných hál [3].

2.4 Živosť (Liveness)

Parameter, ktorý sa vzťahuje hlavne na veľkosť miestnosti a z toho vyplývajúcu dĺžku impulznej charakteristiky. V prípade dlhej impulznej charakteristiky a doby dozvuku hovoríme o väčšej „živosti“ akustiky priestoru. Naopak miestnosť s krátkou impulznou odozvou môže byť označená za „suchú“ alebo „mŕtvu“. Podľa výskumu vedeného Schultzom je úzko spätá s objektívnym parametrom „miera doznievania“ (H)[dB], ktorý je daný pomerom plochy difúzneho dozvuku k ploche prvotných odrazov [1]:

$$H = 10 \log \left(\frac{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50ms} p^2(t) dt} \right). \quad (2.3)$$

Zmena je dosiahnuteľná prostredníctvom úpravy rozmerov miestnosti alebo zmenou odrazového materiálu.

2.5 Miera jasnosti (Clarity)

Použitie sa nachádza najmä v koncertných halách, kde hodnota veličiny špecifikuje buď to pozitívny alebo negatívny dopad na čitateľnosť hudby alebo hovoreného slova. Reichardtova definícia parametra „clarity“ (C_t)[dB] vychádza z podielu energie prvotných odrazov, konkrétne do doby t ms po príchode priamej vlny a energie mnohonásobných odrazov ($>t$ ms) [1]:

$$C_t = 10 \log \left(\frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^{\infty} p^2(t) dt} \right). \quad (2.4)$$

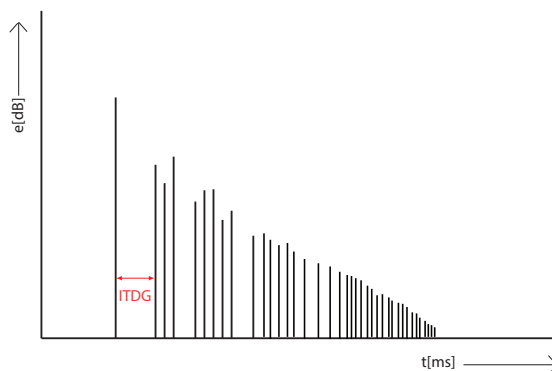
Podľa zvoleného hraničného času t rozoznávame:

- Mieru priameho zvuku (C_7), kde $t=7$ ms
- Mieru zreteľnosti (C_{50}), kde $t=50$ ms
- Mieru jasnosti (C_{80}), kde $t=80$ ms

Z toho vyplýva, že pri miestnostiach s krátkym dozvukom dosiahneme vysokých kladných hodnôt C_t , ktoré spôsobia kvalitnejšie a jasnejšie počutie rýchlo hovoreného textu, a taktiež detailnejšie počutie rýchlejších častí hudby. Naopak nízke až záporné hodnoty sú vhodné pre hudbu pomalšieho charakteru.

2.6 Blízkosť (Intimacy)

Vychádza z času, ktorý rozdeľuje priamu vlnu a prvú výraznú hodnotu z oblasti vln odrazených. Akustická merná veličina parametra intimacy sa nazýva ITDG (initial time delay gap)viď obr.2.1. Výskum Lea Beranka [6] určuje, že čas musí nadobúdať hodnoty do 20 ms, aby sme pocítovali blízkosť (intimitu) zdroja zvuku.



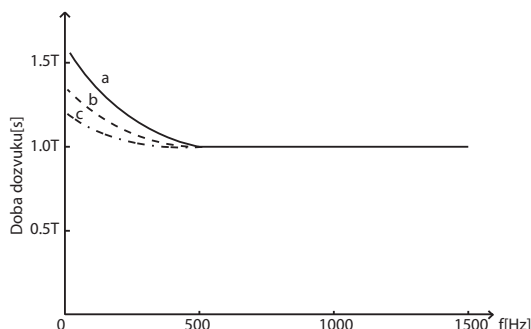
Obr. 2.1: Parameter ITDG [6].

2.7 Textúra (Texture)

Predstavuje model pre jednotlivé prvotné odrazy v priestore, vzťahujúci sa na dobu medzi príchodom priamej vlny a prvotných postranných odrazov. Tento model je vnímaný ľudským ušom, a tým podnecuje špecifický subjektívny vnem. Pre vyvážené hodnoty textúry je nutné, aby jednotlivé odrazy prichádzali rovnomerne a bez intenzitne výrazných odrazov v difúznom dozvuku. Impulzná charakteristika by teda mala mať monotónne klesajúci charakter [7].

2.8 Vrelosť a Brilancia (Warmth and Brilliance)

Vlastnosti vyplývajúce najmä z frekvenčnej závislosti doby dozvuku. Pri počutí nízkych frekvencií subjekt pociťuje tzv. „vrelosť“. Pociť vrelosti teda prevláda, keď zachytávame dlhú dobu dozvuku u frekvencií nepresahujúcich 500 Hz. V prípadoch, kedy dĺžka doby dozvuku ostáva konštantná, hovoríme o tzv. „brilancii“ priestoru [8].



Obr. 2.2: a) Pocit vrelosti; b) Pôvodný pocit; c) Pocit brilancie;

2.9 Obklopenie (Listener envelopment (LEV))

Primárna závislosť vychádza z mnohonásobných postranných odrazov oblasti difúzneho dozvuku impulznej charakteristiky, ktorých príchod je väčší ako 50-80 ms po priamej vlne [9]. Poslucháč nadobúda pocit obklopenia akustickým poľom. Výrazný vplyv tohto parametra zažívajú návštevníci koncertných hál, kde je LEV nutnou súčasťou kvalitného počutia. Táto vlastnosť je úzko spätá s ďalším parametrom, a tým je zdanlivá šírka zdroja zvuku (ASW). So stúpajúcou hodnotou LEV sa zvyšuje aj hodnota ASW.

2.10 Zdanlivá šírka zdroja zvuku (ASW)

Vlastnosť slúžiaca k popisu šírky akustického poľa, vyprodukovaného v priebehu pôsobenia akustického zdroja. ASW sa vzťahuje najmä na čas veľmi skorých odrazov a prvotných odrazov. Typicky sa jedná o rozmedzie od 50 ms do 80 ms po priamom impulze. Taktiež je žiadúca v koncertných halách, kde platí, že s väčšou hodnotou ASW stúpa kvalita koncertnej haly [9].

2.11 Zreteľnosť (Definition)

V situáciách, kedy zrozumiteľnosť hovoreného slova nie je ovplyvnená hlukom pozadia, hovoríme o „zreteľnosti“ (D_{50})[-] uzavretého priestoru. Tá je definovaná ako pomer prijatej energie do 50 ms a celkovej energie [10]:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt}. \quad (2.5)$$

2.12 Čas ťažiska impulznej odozvy (Center time)

Je parametrom využívaným k určeniu rovnováhy medzi prvotnými odrazmi a odrazmi časti difúzneho dozvuku. Výpočet času ťažiska (T_S)[s] je daný nasledujúcim vzorcom [10]:

$$T_S = \frac{\int_0^{\infty} tp^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt}. \quad (2.6)$$

V prípade nízkych hodnôt parametra prevláda jasný a zreteľný zvuk, naopak pri vyšších hodnotách je zjavný vplyv mnohonásobných odrazov.

2.13 Akustická podpora pódia (Support)

Predstavuje podporu hlavne pre hudobníkov, u ktorých určuje schopnosť vnímať a reagovať na svojich spoluhráčov na pódii alebo v miestnosti. Neadekvátne hodnoty parametra môžu spôsobiť chyby v rytmike, intonácii alebo nerovnovážne rozloženie energie jednotlivých nástrojov. Pre vyjadrenie hodnoty akustickej podpory pódia (ST)[dB] využívame nasledujúci zápis [10]:

$$ST = 10 \log \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t)dt}{\int_0^{10ms} p^2(t)dt} \right). \quad (2.7)$$

Vzhľadom k zisťovanému pomeru energií môžeme diferencovať tri základné druhy:

- ST_{Early} , kde $t_1=20$ ms a $t_2=100$ ms
- ST_{Late} , kde $t_1=100$ ms a $t_2=1000$ ms
- ST_{Total} , kde $t_1=20$ ms a $t_2=1000$ ms

3 PSYCHOAKUSTIKA

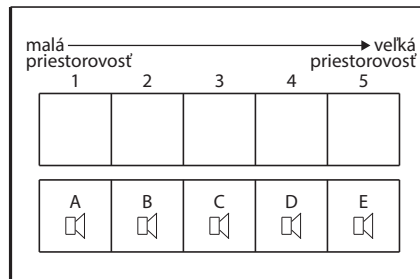
V minulosti akustika nadobudla rozvoj, ktorý smeroval k neustálemu zdokonaľovaniu elektromechanických princípov audio technológií. Táto skutočnosť zabezpečila nové možnosti ozvučenia, lepšie frekvenčné odozvy, hladiny akustického tlaku, atď. Avšak nevyužívala celý potenciál ľudského sluchu ako symbiózy sluchového orgánu s mozgom. Preto boli možnosti ozvučenia v rámci realistickej reprodukcie značne limitované. To dáva podstatný impulz k vzniku vedy, ktorá sa bližšie zaoberá princípmi vnímania zvuku sluchovým systémom. Psychoakustika poskytuje možnosti pre štúdium týchto princípov. Zaoberá sa psychologickými reakciami a fyziologickým dopadom na ľudský nervový systém. Poskytuje teda možnosť implementácie týchto poznatkov do reprodukčného reťazca, čo vnáša do počutia realistické pocity.

Kvalitu zvuku je možné určovať pomocou psycho-fyzických metód, ktoré sa využívajú pri testovaní vnemu subjektu na konkrétny podnet. Medzi najpoužívanejšie metódy patria:

- Metóda hodnotenia podnetu (Random Access)
- Metóda sémantického diferenciálu (Schematic Differential)
- Metóda škálovania kategórií (Category Scaling)
- Metóda odhadu veľkosti (Magnitude Estimation)

3.1 Metóda hodnotenia podnetu

Subjekt získava pevný počet rôzne kvalitných zvukových stôp, ktoré si môže ľubovoľne prehrávať v neobmedzenom časovom úseku. Jeho úlohou je subjektívne ohodnotiť jednotlivé stopy a podľa toho ich usporiadať do poradia, ktoré je definované skúšajúcim typicky od najmenej kvalitnej po najkvalitnejšiu. Výsledné hodnotenie dosahuje subjekt v momente, kedy nadobudne pocit ideálneho usporiadania na základe jeho vnemov (obr.3.1). Táto metóda sa javí ako ideálna pre hodnotenie pocitu priestorovosti, kedy by sme subjektu ponúkali viac nahrávok s rôznymi úpravami difúzneho dozvuku. Subjekt by mal za úlohu prehrať si jednotlivé ukážky a následne ich ohodnotiť na základe svojich pocitov o veľkosti priestoru. V prípade väčšieho množstva subjektov by bolo nutné urobiť štatistické spracovanie všetkých meraní, a z toho vyvodiť závery [11].



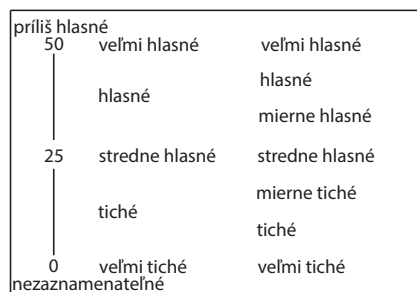
Obr. 3.1: Vizualizácia metódy hodnotenia podnetov [11].

3.2 Metóda sémantický diferenciál

Pri použití sémantického diferenciálu ponúkame subjektu súbor bipolárnych slovných pomenovaní daného javu najčastejšie v sedem bodovej škále. Úlohou subjektu je vyjadriť svoj názor prostredníctvom voľby špecifických pocitov z určených dimenzií, na základe čoho sa metóda vyhodnotí. Metódu je možné využiť pri hodnotení miery jasnosti zvukových nahrávok, kedy subjekt dostáva súbor nahrávok, z ktorých si vo viacbodovej stupnici volí hodnoty od zreteľného počutia jednotlivých tónov po splývavé a nezreteľné tóny. V niektorých prípadoch sa za opak miery jasnosti považuje subjektívny parameter „fullness“ [11].

3.3 Metóda škálovania kategórií

Metóda výrazne používaná pri určovaní hlasitosti akustických zdrojov a pri subjektívnom hodnotení hluku. Pozostáva z päť prípadne sedem stupňového rozsahu, z ktorých každý krok je podškálovaný desiatimi bodmi. Z toho nám vzniká celkovo päťdesiat stupňový rozsah, z ktorého subjekt definitívne vyberá hodnotu hlasitosti (obr.3.2) [11].



Obr. 3.2: Vizualizácia metódy škálovania kategórií [11].

3.4 Metóda odhadu veľkosti

Postup je nasledovný: máme dve vzorky zvukov, z ktorých jeden označíme ako fundamentálny a nemenný. Druhý zvuk je považovaný za testovaný a premenlivý. Hlavnému zvuku pridáme hodnotu 100. Úlohou subjektu je stanoviť číselnú hodnotu testovanému zvuku, podmienenú subjektívnym vnemom. Hodnota by mala vytyčovať pomer medzi hlavným a testovaným zvukom. Výhoda pozostáva v prakticky nekonečnom rozlíšení presnosti tejto metódy. Táto metóda sa často využíva pri subjektívnom hodnotení výšky tónu [11].

4 PANORAMOVANIE ZDROJA ZVUKU

Pri panoramovaní zdroja zvuku vychádzame zo základných špecifík ľudského sluchu, ktoré sú podmienené fyziologickými vlastnosťami sluchových orgánov. Akustické pole uzavretého priestoru ovplyvňuje ľudské ucho v širokom rozsahu, kedy dochádza k príjmu a spracovaniu jednotlivých akustických vln ako celku, čo má za následok vznik sluchového vnemu. Ľudský organizmus je schopný na základe týchto vnemov vydedukovať polohu pomyselného zdroja zvuku v priestore. Z toho vyplýva schopnosť určiť vzdialenosť zdroja zvuku, a najmä polohu v horizontálnej (azimut) a mediálnej rovine (elevácia). Definujeme tzv. binaurálne podnety, ktoré vyplývajú z rozdielnej vzdialenosti od sluchových orgánov [1]:

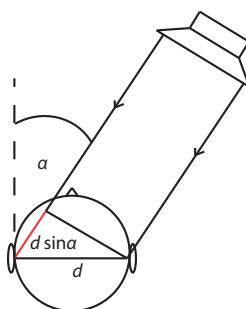
- Interaural Time Difference (ITD)
- Interaural Intensity Difference (IID)

4.1 Interaural Time Difference

Je podmienená rozdielom časov, v ktorých dopadá zvuk na jednotlivé uši. Z obrázku 4.1 je zrejmé, že v prípade bližšieho pravého ucha poslucháča zvuková vlna prekoná kratšiu vzdialenosť, ktorá značí kratší časový úsek. V prípade odvráteného ucha môžeme časový rozdiel vypočítať nasledujúcou rovnicou[1]:

$$\Delta t = \frac{d \sin \alpha}{c}, \quad (4.1)$$

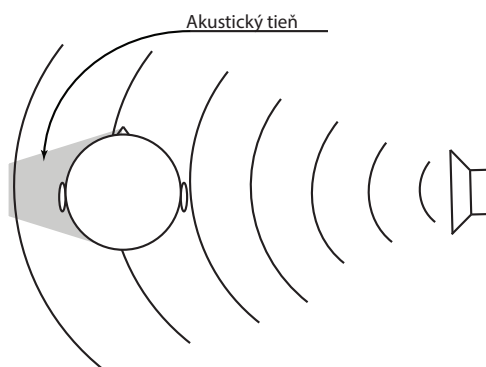
kde d je vzdialenosť medzi ušami, α je azimut a c je rýchlosť zvuku.



Obr. 4.1: Interaurálna časová diferencia[1].

4.2 Interaural Intensity Difference

Vzniká prostredníctvom poklesu intenzity akustickej vlny šírením v priestore, ale len v prípade blízkeho zdroja zvuku. Dôležitejší je však rozdiel, ktorý nastáva v prípade zainteresovania akustického tieňa hlavy 4.2. V tomto prípade je rozdiel intenzít závislý hlavne na frekvencii zvuku. Pokles intenzít sa však prejaví len v prípade vyšších frekvencií, ktorých vlnová dĺžka je menšia ako priemer hlavy [1].



Obr. 4.2: Interaurálna intenzitná diferencia[1].

4.3 Amplitúdové panoramovanie

Je najbežnejšou metódou panoramovania zdroja zvuku, ktorá spočíva v aplikovaní zvukových signálov s rôznymi amplitúdami do jednotlivých reproduktorov. Metóda vychádza z definovania tzv. zisku, ktorý je použitý na špecifický kanál sústavy. Rôznorodosť ziskov reproduktorov sa tak priamo podieľa na schopnosti poslucháča stanoviť smer zdroja zvuku.

5 SIMULÁCIE IMPULZNÝCH CHARAKTERIS- TÍK PRE VÝSKUM SUBJEKTÍVNYCH PA- RAMETROV UZAVRETÉHO PRIESTORU

Kapitola pojednávajúca o voľbe simulačného prostredia (jeho stručný popis), vzorových hudobných nahrávok, rozmeroch uzavretého priestoru a spôsobu editácie impulznej odozvy pre získanie nadhľadu a pochopenie vplyvu týchto zmien na subjektívny vnem človeka. Simulácie budú prebiehať v prostredí Matlab.

5.1 Voľba vhodného softwaru

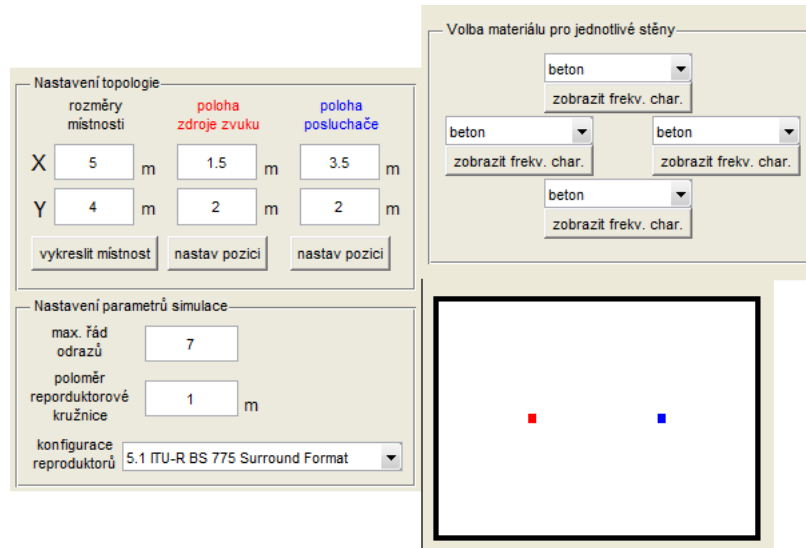
Pre overenie teoretických poznatkov, ktorými sme sa zaoberali v predchádzajúcich kapitolách, som zvolil aplikáciu „Simulace impulzní odezvy uzavřeného prostoru“ realizovanú v prostredí Matlab. Aplikácia na základe definovaných parametrov uzavretého priestoru, ako je topológia (2D), materiál stien, činiteľ zvukovej pohltivosti a maximálny stupeň odrazu, vygeneruje výslednú impulznú odozvu priestoru. Pre výpočet používa obrazovú metódu. Výhodou je taktiež možnosť editovať výslednú impulznú odozvu v rozmedzí určených intervalov, a tak meniť rozloženie časovej osi v týchto rozsahoch. Určené parametre priestoru a zmeny v odozve dokáže implementovať do zvolenej zvukovej nahrávky, ktorá musí mať jednokanálový zvukový formát wav. Zvuková nahrávka je upravovaná a filtrovaná do podoby, kedy získame jednotlivé zvukové vlny šíriace sa prostredím. Vektorová metóda VBAP transformuje jednokanálový vstupný signál do viackanálovej formy podľa určenej konfigurácie reproduktorov.

5.2 Podmienky simulácie

V predchádzajúcej časti som uviedol, že je nutné zvoliť jednokanálovú nahrávku formátu wav. Pri pohľade na široké spektrum kmitočtových pásiem, konkrétne rozsah (50 Hz-17 KHz), je zvolená zvuková nahrávka vhodná pre skúmanie vplyvu tvaru impulznej odozvy miestnosti na dané frekvencie.

Simulácia zvukovej nahrávky bude prebiehať v prázdnej miestnosti stredných rozmerov, ktoré som určil na 5x4 m. Rozdielnu dĺžku stien som zvolil najmä z dôvodu eliminácie stojateho vlnenia, ktoré spôsobuje vznik degenerovaných módov v priestore. Simulátor považuje jednotlivé steny za ideálne odrazivé. Hodnotu maximálneho rádu odrazu som určil na 7, čo je pre dané podmienky dostačujúce. Pre jednoduchosť sú všetky steny zostrojené z betónu. Rozloženie sústavy poslucháča

a zdroja zvuku som zvolil tak, aby ich pozícia bola v dostatočnej vzdialenosti od odrazových stien (obr.5.1). Na základe týchto nastavení je vstupný súbor prevedený do viackanálovej formy.



Obr. 5.1: Nastavenie rozmerov miestnosti, rádu odrazu, materiálu jednotlivých stien a pozície zdroja zvuku aj poslucháča.

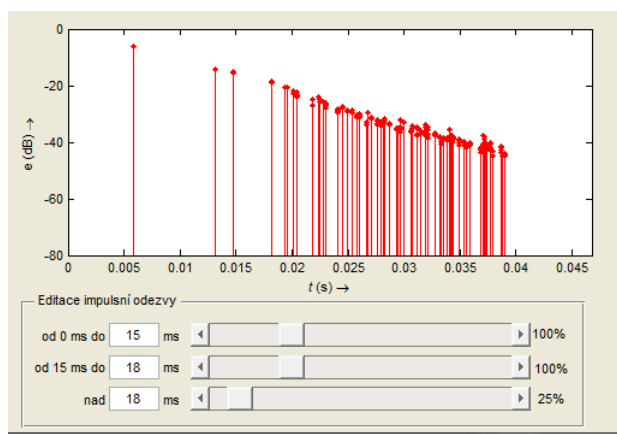
Zvukový záznam bude prezentovaný pokusnému subjektu, ktorý vplyvom svojich subjektívnych vnemov určí rozdiel medzi jednotlivými nahrávkami s rôznymi úpravami impulznej odozvy priestoru. Pre reprodukciu použijem slúchadlá značky KOSS a priestor, v ktorom bude prezentácia zvuku prebiehať, nie je špeciálne upravený a odhlučnený od vonkajších vplyvov, čo môže mať za následok drobné nezhody s teoretickými poznatkami, ktoré boli definované v priestoroch na to určených.

5.3 Posluchové testy

5.3.1 Simulácie parametra priestorovosti

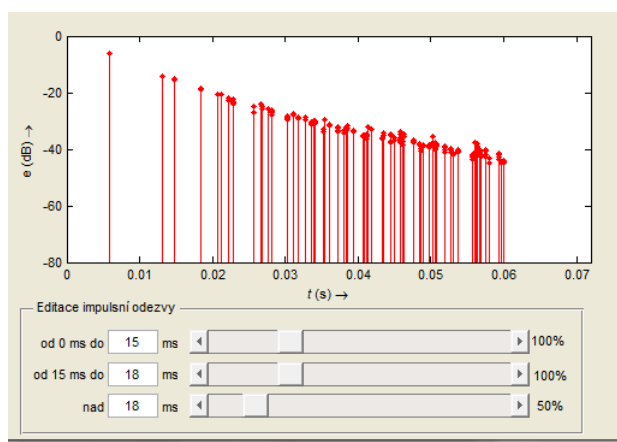
Teoretické poznatky uvedené v kapitole 2, je potrebné overiť prostredníctvom simulácií a editácií impulznej odozvy priestoru. V prvej časti testovania bola impulzná odozva priestoru rozdelená na časti, a to priama vlna, prvotné odrazy a difúzny dozvuk. Po vyčlenení jednotlivých oblastí bolo možné editovať dané rozsahy samostatne. Ako prvá bola editovaná časť difúzneho dozvuku >18 ms. Pomocou editačnej časti simulátora som postupne menil mierku časovej osi impulznej charakteristiky a zaznamenával upravené zvukové súbory. Pri viacnásobnom skúmaní reprodukováných nahrávok som zachytil výrazný vplyv zmien v časti difúzneho dozvuku na subjektívny pocit o veľkosti priestoru:

1. V prípade, keď bola pôvodná doba difúzneho dozvuku zmenšená na $\frac{1}{4}$ (obr.5.2), zaznamenávam nízke ovplyvnenie zvuku odrazenými vlnami, a to zapríčiňuje výraznú ostrosť zvuku. Taktiež nemám pocit priestorovosti, tým pádom sa miestnosť javí ako rozmerovo menšia v porovnaní s jej skutočnou veľkosťou. Výraznými sa stávajú nízke frekvencie veľkého bubna, ktoré sa prejavujú zvýšením hlasitosti.



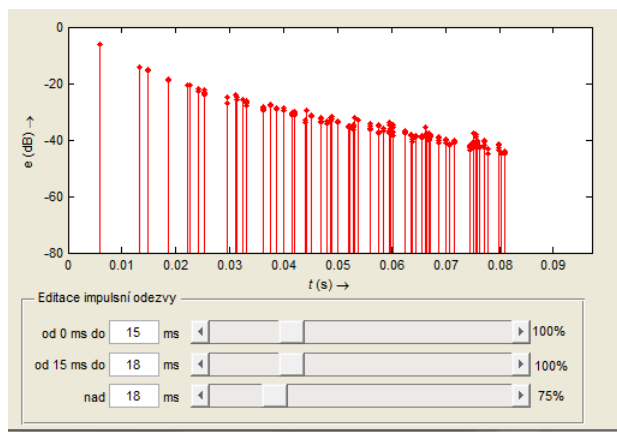
Obr. 5.2: Redukcia časti difúzneho dozvuku na 1/4 dĺžky.

2. Redukovanie časovej osi difúzneho dozvuku na $\frac{1}{2}$ (obr.5.3) predstavuje teoretickú hranicu, kedy sa subjektívny postoj k posudzovaniu veľkosti miestnosti z malej mení na stredne veľkú. V tomto prípade sú ešte počuteľné pasáže s vyššou frekvenciou bez výrazného ovplyvnenia odrazenými vlnami. Ostrosť zvuku v porovnaní s predošlým prípadom zaniká. V tomto prípade dĺžka doby difúzneho dozvuku vyhovuje aj nižším frekvenciám, ktoré v porovnaní s $\frac{1}{4}$ zmenou nepôsobia prebudeným dojmom.



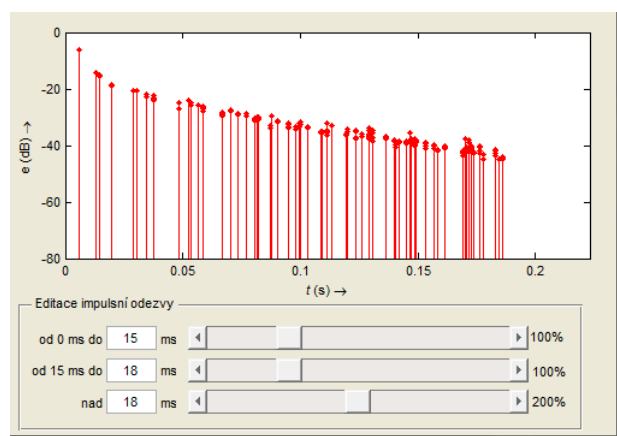
Obr. 5.3: Redukcia časti difúzneho dozvuku na 1/2 dĺžky.

3. Difúzny dozvuk o dĺžke $\frac{3}{4}$ (obr.5.4) pôvodnej veľkosti poskytuje zmeny len vo vnímaní rýchlych frekvencií, a to najmä vplyvom odrazených vĺn, ktoré vyvolávajú subjektívny dojem prepojenia samostatných tónov do súvislého celku.



Obr. 5.4: Redukcia časti difúzneho dozvuku na 3/4 dĺžky.

4. Naopak pri zväčšovaní dĺžky difúzneho dozvuku na dvojnásobok a viac (obr.5.5) vnímam veľký nárast času príchodu odrazov, čo má za následok pocitové zväčšenie priestoru a taktiež zvýšenie vzdialenosti medzi subjektom a zdrojom zvuku. V takom prípade je badateľná výhoda použitia nástroja generujúceho nízke frekvencie, kde nedochádza k postrehnuteľnému skresleniu. U vysokých frekvenciách je situácia veľmi odlišná, kedy už vnímam len súvislý šum v pozadí, spôsobený prekryvaním odrazov.

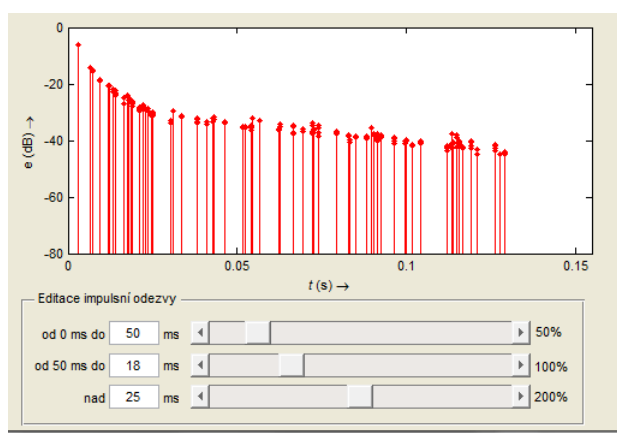


Obr. 5.5: Zväčšenie časti difúzneho dozvuku na dvojnásobok.

5.3.2 Simulácie miery jasnosti

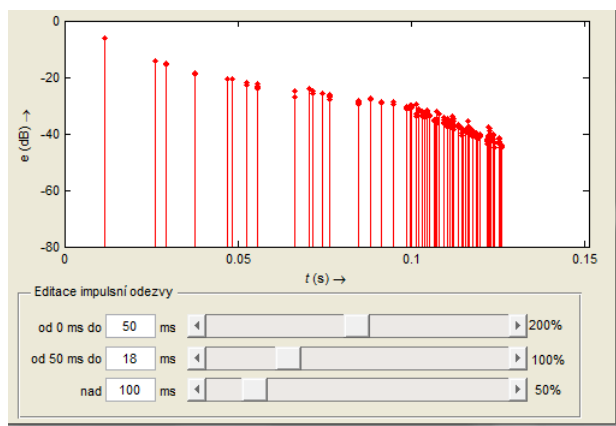
Simulácia miery jasnosti vyplývala z pomeru v podkapitole 2.5, ale v tomto prípade sa jedná o meranie s nižším rádom odrazu. Z toho dôvodu som impulznú charakteristiku v časti editácie rozdelil na dva intervaly do 50 ms a nad 50 ms:

1. V prvom prípade bol interval do 50 ms zmenšený na $\frac{1}{2}$ svojej dĺžky a interval nad 50 ms bol rozšírený na dvojnásobok (obr.5.6). Pre druhú nahrávku boli zmeny inverzné. Skúmaním nahrávok je postrehnuteľný jasný vplyv predĺženia časti mnohonásobných odrazov, ktorý zapríčiňuje zhoršenie vnímania hudby v rámci jednotlivých tónov. Priestoru však dodáva živosť a taktiež priestorovosť.



Obr. 5.6: Impulzná odozva s redukovanou časovou osou do 50 ms.

2. Obrátením zmien (obr.5.7) je badateľné zníženie vplyvu difúzneho dozvuku a predĺženie časti prvotných odrazov, čo nám dáva možnosť detailnejšieho a hlavne jasnejšieho vnímania rôzne rýchlych tónov. Z poznatkov nadobudnutých skúmaním parametra miery jasnosti je zrejmé, že väčšia hodnota veličiny je vhodná pre hudbu s rýchlejším tempom a tiež pre hovorené slovo, pri ktorom je nutné kvalitné počutie bez rušivých elementov. Naopak pre pomalšie hudobné prechody je vhodné zvoliť nižšiu hodnotu tejto veličiny.

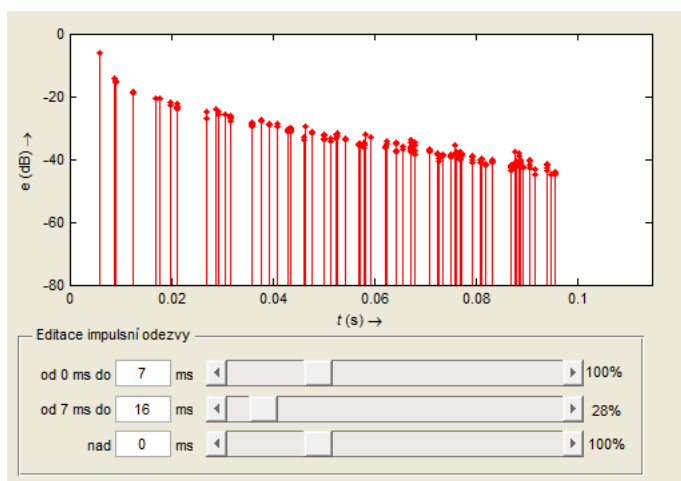


Obr. 5.7: Impulzná odozva s rozšírenou časovou osou do 50 ms.

5.3.3 Simulácie parametra intimity

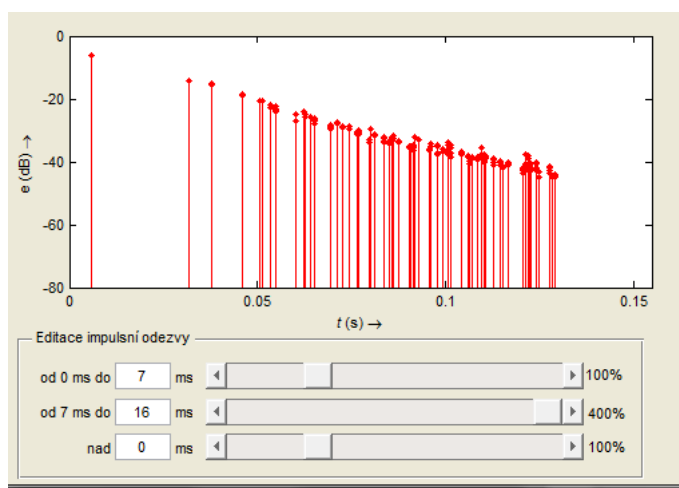
Skúmanie vplyvu parametra intimity na akustický vnem prebiehalo pomocou editácie časti impulznej charakteristiky v rozsahu medzi priamou vlnou a prvotnými odrazmi. Pri jednotlivých testoch som musel pristúpiť k rapídnejmu zväčšeniu a následne zmenšeniu časti ITDG z dôvodu, že pri minimálnych zmenách nebolo možné postrehnúť zmenu v prehrávaných záznamoch:

1. V prípade redukcie ITDG (obr.5.8) zisťujem v zvukovej nahrávke zvýšenie účinku priamej vlny, ktorá znie ohraničene a nezávisle na následných odrazoch. Tým sa stupňuje pocit blízkosti k zdroju zvuku, čím je možné špecifikovať parameter intimity.



Obr. 5.8: Minimálna hodnota ITDG.

2. Pri zvýšení hodnoty ITDG (obr.5.9) je citelný nárast počutelných odrazov, a preto je predstava o vzdialenosti zdroja zvuku väčšia oproti predchádzajúcemu testu. Parameter intimity sa však viac prejavuje u miestností väčších rozmerov, kde sa v niektorých prípadoch jedná o dĺžku ITDG väčšiu ako mnou dosiahnutých 30 ms. Preto je z hľadiska kvalitného vnemu z hudby nutné, aby hodnoty ITDG nepresahovali hranicu 20 ms.



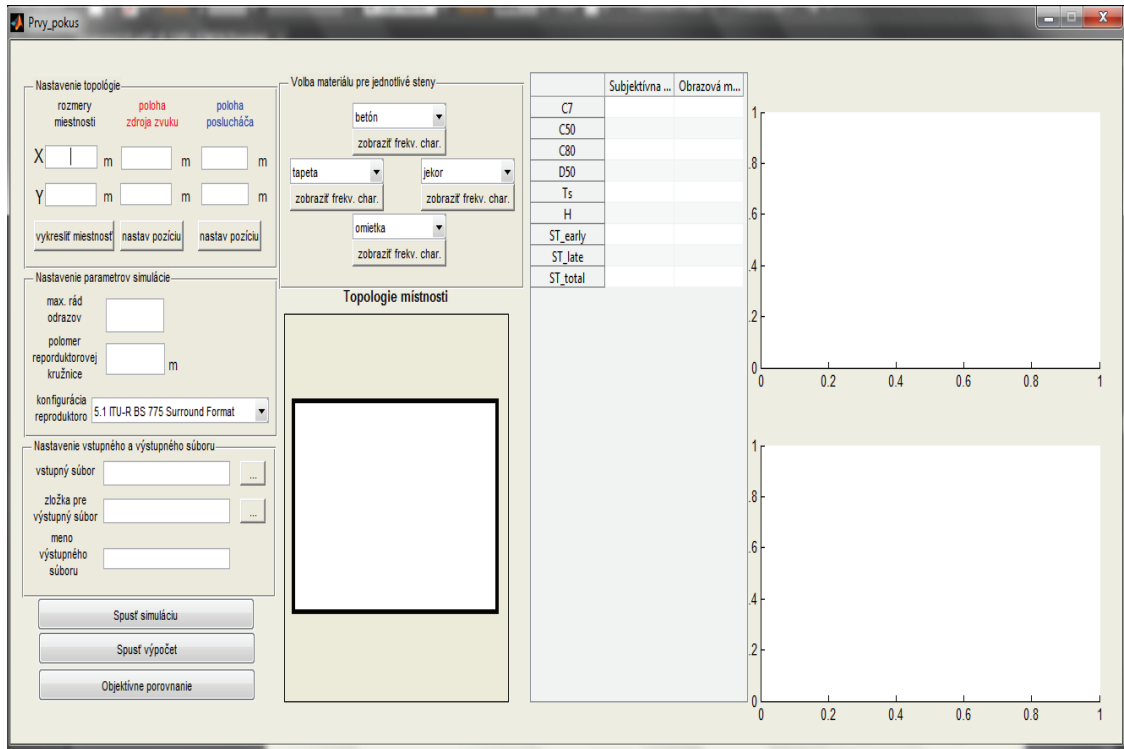
Obr. 5.9: Maximálna hodnota ITDG.

6 REALIZÁCIA GUI URČENÉHO K POROVNÁVANIU RÔZNYCH METÓD GENEROVANIA IMPULZNEJ ODOZVY UZAVRETÉHO PRIESTORU

Kapitola je zameraná na detailný popis voľby jednotlivých objektov, fungovanie týchto objektov a funkcií použitých pre výpočet impulznej odozvy uzavretého priestoru. Samotná realizácia programu bude prebiehať v programovacom prostredí Matlab, ktorý poskytuje dostatočné zázemie pre riešenie pomocou implementovaných matematických funkcií, skĺbené s možnosťami programovacích jazykov. Úlohou vytvorenej aplikácie je poskytnúť užívateľovi možnosť komparácie obrazovej metódy generovania impulznej odozvy pravouhlej miestnosti a zjednodušenej metódy, ktorá vychádza iba zo základných výpočtov a následných úprav podmienených rozmiestnením styčných bodov, ktorými sú poloha poslucháča a zdroja zvuku.

6.1 Popis základných objektov GUI

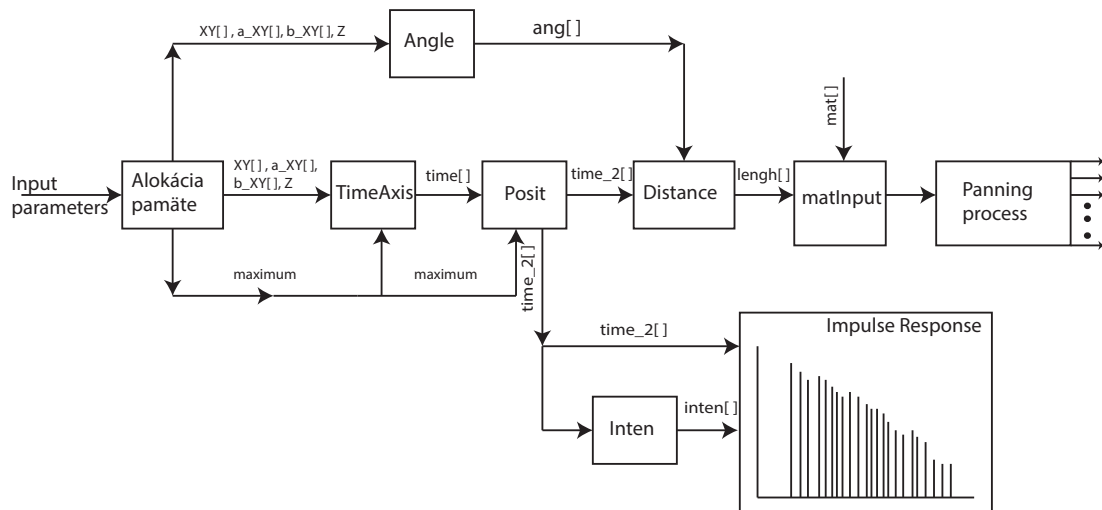
Riešenie projektu prostredníctvom grafického rozhrania je zásadným prvkom uľahčenia práce s aplikáciou. Prostredie Matlabu umožňuje jednoduchý spôsob editácie objektov grafického rozhrania a umožňuje objektom priradovať funkcie, na základe ktorých dochádza k editácii a prispôbovaniu výstupných objektov aplikácie. Z obrázku 6.1 je badateľné, že grafické rozhranie môžeme rozdeliť na dve základné časti. Prvá časť je zložená z objektov slúžiacich k získaniu vstupných údajov, ktoré budú použité pre generovanie parametrov impulznej odozvy a následne aplikované na nahrávku. Môžeme tak zvoliť základné rozmery priestoru, polohu zdroja zvuku a poslucháča, maximálny rád odrazov, materiály, z ktorých sú steny vyrobené a ďalšie parametre súvisiace s ovplyvnením nahrávky impulznou odozvou. Základ druhej časti tvoria objekty, vhodné pre zobrazenie výstupných charakteristík a znázornenia topológie miestnosti. Výzor samotného grafického rozhrania je podmienený požiadavkou na zachovanie vizuálnej stránky programu „Simulace impulzní odezvy uzavřeného prostoru“ s vhodnými úpravami pre možnosť porovnávania rôznych metód generovania impulznej odozvy priestoru.



Obr. 6.1: Grafické rozhranie programu.

6.2 Metodika funkcií navrhnutých pre generovanie impulznej odozvy priestoru

Na základe teoretických poznatkov a simulácií, ktoré som využil pri návrhu funkcií určených pre zjednodušenie výpočtového procesu impulznej odozvy uzavretého priestoru, môžeme štruktúru aplikácie rozdeliť do základných častí, viď obr. 6.2. Schématické znázornenie funkcií, ktoré je na obrázku, predstavuje časť generovania impulznej odozvy na základe zjednodušenej metódy, ktorá v GUI vystupuje pod tlačítkom „Spust' simuláciu“. Podstatu následných výpočtov tvorí vstupná časť programu, kde dochádza k získaniu vstupných parametrov. Primárne parametre použité pri výpočtoch sú: rozmery miestnosti, poloha zdroja zvuku a poslucháča a maximálny rád odrazu. Ostatné parametre, ako polomer a konfigurácia reproduktorovej sústavy, slúžia najmä procesu panoramovania, ktorý následne pracuje so získanými hodnotami impulznej odozvy priestoru a implementuje ich do načítanej nahrávky. Aplikácia taktiež disponuje funkciou, ktorá sa stará o prípady, kedy užívateľ neposkytne dostatok informácií, alebo zadá nepovolené hodnoty jednotlivých parametrov pre nasledovný postup v rámci hlavného programu. Takéto počínanie je ošetrené množstvom varovných okien, ktoré majú užívateľa upozorniť na chyby zadania.



Obr. 6.2: Schéma programu.

V ďalších častiach priebehu aplikácie vychádzame z predpokladu, že najväčší vplyv na vnem človeka má hlavne priama vlna a prvotné odrazy. Časť difúzneho dozvuku preto neprechádza žiadnymi výpočtovými funkciami, ktoré by sa podieľali na presnej špecifikácii uhla alebo momentu dopadu odrazených zvukových vln na polohu poslucháča.

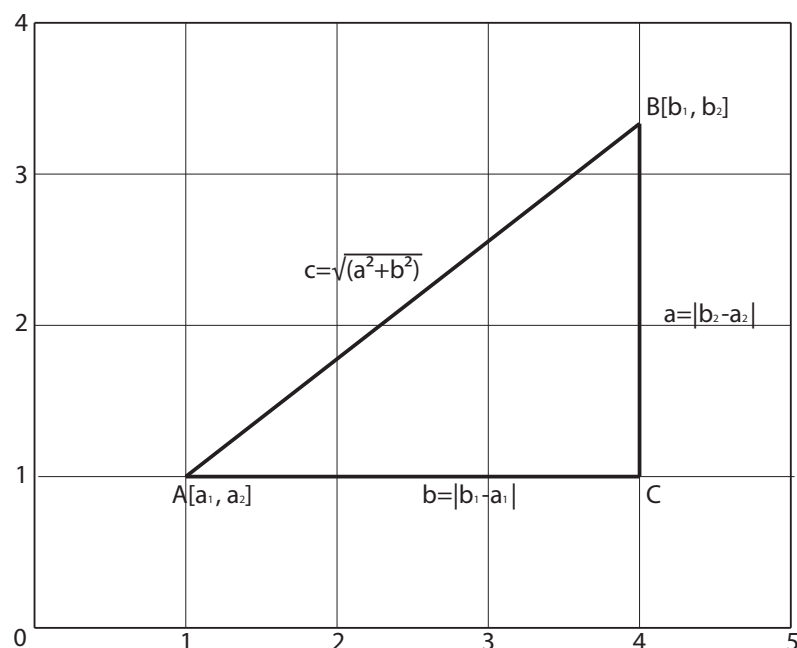
Nadobudnuté parametre potom vstupujú do funkcií, ktoré sa podieľajú na generovaní impulznej odozvy. Vo funkcii generovania základnej časovej osy „TimeAxis“ využívam hlavne rozmery miestnosti, polohu zdroja a poslucháča. Funkcia pokrýva použitie základných matematických teorém a parciálne aj obrazovú metódu hľadania virtuálnych zdrojov. V prvej časti získavame vzdialenosť zdroja zvuku od poslucháča s využitím Pytagorovej vety (obr. 6.3):

$$c^2 = a^2 + b^2. \quad (6.1)$$

Z výslednej vzdialenosti je možné vydedukovať časové oneskorenie priamej vlny pri šírení prostredím. Pre prevod vzdialenosti do časovej oblasti použijem nasledujúci vzorec:

$$t = \frac{s}{c}, \quad (6.2)$$

kde s je vzdialenosť udávaná v metroch a c je rýchlosť zvuku 340 m/s.



Obr. 6.3: Výpočet vzdialenosti dvoch bodov v rovine pomocou Pytagorovej vety.

Následne dôjde k výpočtu polôh tzv. virtuálnych zdrojov zvuku, z ktorých je opätovne možno vyvodit vzdialenosti, ktoré prekonajú jednotlivé odrazy od každej zo stien miestnosti. V predchádzajúcej časti som uviedol, že pre časť difúzneho dozvuku nie sú použité žiadne výpočty, a preto využijem len znalosť maxima impulznej odozvy, ktoré vychádza z výpočtu:

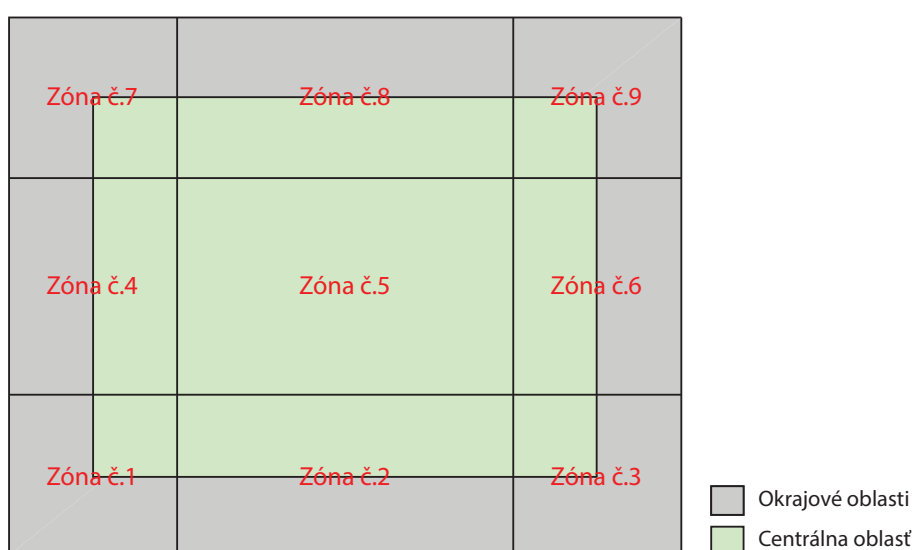
$$maximum = \frac{XY(1)Z}{c} [s], \quad (6.3)$$

kde $XY(1)$ je rozmerovo dlhšia strana definovaného priestoru v metroch, Z je maximálny rád odrazu a c predstavuje rýchlosť zvuku.

Pole hodnôt difúzneho dozvuku je z toho dôvodu generované prostredníctvom generátora náhodných hodnôt so štandardným rovnomerným rozložením, ktoré je limitované na definovanom intervale. Výstupom danej funkcie je špecifické pole časových hodnôt, ktoré určuje body, kedy každý z vyslaných impulzov dorazí do polohy poslucháča.

Časová základňa, ktorá je vygenerovaná prostredníctvom predchádzajúcich výpočtov však úplne nezahrňuje použitie dvoch dôležitých parametrov, ktorými sú poloha zdroja zvuku a poslucháča v rámci určenej miestnosti. Z toho dôvodu je potrebné pristúpiť k dodatočnému ovplyvneniu časovej základne, a to najmä v prípadoch, kedy sa poslucháč a zdroj zvuku nachádzajú v bezprostrednej blízkosti

odrazovej plochy, ktorou je v našom prípade jedna zo stien definovanej miestnosti. Lokalizácia v blízkosti hraníc určeného priestoru tak zapríčiní koncentráciu veľkého množstva impulzov v krátkom časovom intervale. Tento predpoklad vychádza hlavne z rozmiestnenia virtuálnych zdrojov danej miestnosti. Výsledkom ovplyvnenia časovej základne týmito poznatkami je funkcia „Posit“. Funkcia pozostáva z podmienkového delenia, ktoré určuje v akých oblastiach sa nachádza zdroj zvuku a poslucháč. Preto každá miestnosť pozostáva z deviatich základných oblastí tzv. zón a jednej doplnkovej, slúžiacej na oddelenie centralizovaných oblastí od okrajových 6.4.



Obr. 6.4: Členenie miestnosti na zóny.

Z hľadiska výraznejších rozdielov v impulznej odozve priestoru nepredstavujú polohy v centrálnych oblastiach výrazný problém, ktorý by bolo nutné riešiť zmenami pôvodnej časovej základne. Dôvodom je hlavne nedokonalosť ľudského sluchu, ktorý jednotlivé drobné zmeny nedokáže postrehnúť. Vo väčšine prípadov sa teda zaoberám riešením výhradne polohových kombinácií, ktoré minimálne jedným prvkom zasahujú do okrajových oblastí pravouhlého priestoru. Zmeny vykonané na časovej základni impulznej odozvy vychádzajú zo subjektívneho vnemu a najmä z umiestnenia zdroja zvuku a poslucháča do špecifických zón. Formovanie časovej základne tak prebieha v dvoch krokoch. V prvom kroku dochádza k redukovaniu časovej osy, následkom čoho vzniká možnosť riešenia situácie pomocou zásobníka, ktorého úlohou je dodržanie maximálnej časovej hodnoty akustickej vlny. Priestor, ktorý sa v zá-

sobníku nahromadí, je dodatočne využitý pre generovanie časových medzier, vznikajúcich dôsledkom nerovnomerného rozloženia virtuálnych zdrojov pri zobrazení celkovej mapy zrkadlenia virtuálnych zdrojov. Rozsah medzier typicky definujem na základe vzdialenosti medzi zdrojom a poslucháčom, v niektorých prípadoch sú do výpočtu zahrnuté aj rozmery miestnosti. Výsledkom funkcie je finálna podoba poľa časových hodnôt.

Pre potrebu zobrazenia výslednej impulznej odozvy priestoru prostredníctvom výstupných objektov GUI je vhodné pristúpiť k výpočtu intenzity akustických vln. Hladinu energetických veličín získavame z nasledujúcich vzťahov:

$$L = 10 \log \frac{r_2^2}{r_1^2} = 20 \log \frac{r_2}{r_1} [dB]. \quad (6.4)$$

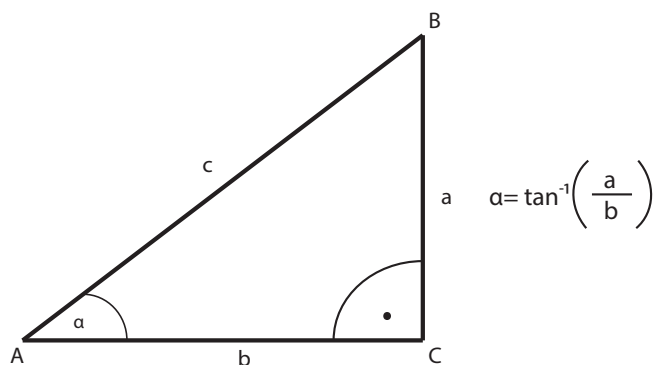
V našom prípade môžeme pokles hladiny zvukovej energie pri šírení definovať ako podiel vzdialenosti, ktorú vlna prekoná pri šírení v priestore (r_2), k referenčnej vzdialenosti $r_1=1$ meter. Potom každé navýšenie vzdialenosti o dvojnásobok predstavuje pokles akustickej hladiny o 6 dB. Do výslednej hodnoty poklesu akustickej hladiny vstupuje aj hodnota koeficienta pohltivosti stien, od ktorých sa vlna odrazí.

Prepojením časového a intenzitného poľa hodnôt, získaných v predchádzajúcich funkciách, je možné vykresliť výslednú impulznú charakteristiku priestoru, určeného vstupnými parametrami definovanými užívateľom aplikácie.

S ohľadom na nadchádzajúce panoramovanie je taktiež nutné zistiť uhly, z ktorých prichádzajú jednotlivé odrazy do bodu, kde sa nachádza poslucháč. V tomto mieste aplikácie sa zameriam opäť na výpočet uhla priamej vlny a prvotných odrazov. Presný výpočet uhla priamej vlny je kritický predovšetkým v zmysle implementácie smeru, z ktorého sa vlnenie šíri. Tvorí tak nevyhnutnú možnosť lokalizácie zdroja zvuku v priestore. Riešením týchto výpočtov sa zaoberá funkcia „Angle“, ktorá k samotným výpočtom využíva predovšetkým polohu zdroja zvuku a poslucháča. Tieto parametre prechádzajú procesom výpočtu prostredníctvom goniometrických funkcií. V prvej fáze výpočtu získavam z rozdielu medzi počiatočným bodom (poloha zdroja) a koncovým bodom (poloha poslucháča), odvesny pravouhlého trojuholníka, ktorého preponou je vzdialenosť medzi týmito bodmi (obr. 6.3). Dĺžky odvesien pravouhlého trojuholníka vstupujú do vzorca pre výpočet hodnoty arcus tangens (obr. 6.5). Prevzatá časť aplikácie určená na panoramovanie zdroja zvuku však nevychádza z uhlov určených v oblúkovej miere, a preto je nutné pristúpiť k prepočtu na stupne:

$$s = \frac{180r}{\pi}, \quad (6.5)$$

kde s značí hodnotu v stupňoch a r hodnotu v radiánoch. Popísaný spôsob je využitý tiež pre výpočet uhlov prvotných odrazov. Smer vln časti mnohonásobných odrazov podlieha opäť generovaniu hodnôt so štandardným rozložením v definovaných



Obr. 6.5: Výpočet uhlov dopadu.

intervaloch. Výsledné hodnoty generovania obsahujú celú škálu stupňov jednotkovej kružnice. Jedná sa tak o snahu zachovať pocit priestorovosti a obklopenia zvukovým polom.

Hodnoty následne podliehajú panoramovacím princípom, ktorých úlohou je získané informácie implementovať do vstupnej mono nahrávky a ich vplyvom získať viackanálový výstup. Nasledujúce funkcie spojené s behom hlavného programu sú prispôbené už navrhnutému princípu panoramovania zdroja zvuku metódou VBAP, ktorý bol implementovaný v aplikácii „Simulace impulzní odezvy uzavřeného prostoru“ (viď [12]). Z toho dôvodu sa vyhnem podrobnejšiemu popisu funkcií, ktoré panoramovací proces obsahuje.

6.3 Porovnanie metód generovania impulznej odozvy priestoru pomocou objektívnych parametrov

Hlavnou úlohou aplikácie je poskytnúť užívateľovi možnosť porovnania mnou navrhnutej metódy a jednej zo štandardne využívaných metód pre výpočet impulznej odozvy priestoru. V tomto prípade je k porovnaniu zvolená základná geometrická metóda hľadania odrazov akustických vln. Jedná sa o obrazovú metódu. Metóde podlieha samotná časť programu v užívateľskom GUI vystupujúca pod objektom s názvom „Spuť výpočet“, ktorej výstup podobne ako v prvom prípade vstupuje do zhodnej časti panoramovacieho procesu.

Výsledné viackanálové nahrávky je možné hodnotiť prostredníctvom poslucho- vých testov, ktoré však poskytujú vierohodné výsledky až pri zainteresovaní väčšieho množstva subjektov s dostatočnými znalosťami danej problematiky a následným šta-

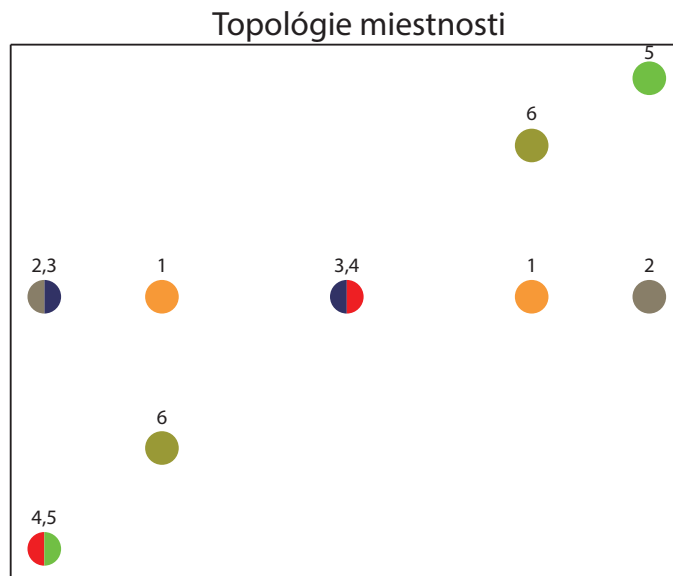
tistickým spracovaním. Preto bude finálne porovnanie metód vyhodnotené pomocou použitia objektívnych kritérií priestorovej akustiky.

Podstatným bodom porovnávania impulzných charakteristík je voľba objektívnych parametrov, ktoré sú podmienené rozložením energie v určených časových intervaloch samotnej impulznej charakteristiky. Objektívne parametre, ktoré som zvolil na základe splnenia predchádzajúcej podmienky, sú: Miera priameho zvuku (C_7), Miera zreteľnosti (C_{50}), Miera jasnosti (C_{80}), Zreteľnosť (D_{50}), Čas ťažiska impulznej odozvy (T_S), Miera doznievania (H) a Akustická podpora pódia (ST). Bližší popis parametrov je obsiahnutý v kapitole 2.

Definície objektívnych parametrov následne aplikuje funkcia „Obj_compar“, ktorá je previazaná s výstupnou tabuľkou aplikácie. V prípade potreby tak slúži tabuľka pre zobrazenie objektívnych parametrov aktuálne zobrazených charakteristík, avšak len v prípade postupného odsimulovania oboch metód a až následného vyvolania hodnôt tlačidlom aplikácie „Objektívne porovnanie“. Mechanizmus funkcie daného tlačidla má však vstavané aj samotné generovanie impulzných odoziev priestoru pomocou subjektívnej aj obrazovej metódy, ktorý však slúži len pre urýchlenie možnosti porovnávania jednotlivých metód bez potreby grafického zobrazenia impulzných charakteristík priestoru. Uvedený princíp je možné využiť najmä v prípade potreby spracovania veľkého počtu meraní generovaných charakteristík, ktoré budú následne štatisticky spracované. Túto možnosť využijem aj v prípade generovania impulznej charakteristiky subjektívnou metódou, kde dochádza k určitým odchýlkam objektívnych parametrov, ktoré vznikajú vplyvom generovania časti difúzneho dozvuku spôsobom popísaným v predchádzajúcich kapitolách.

6.3.1 Popis základných podmienok pre získanie výstupných hodnôt objektívnych parametrov

Z hľadiska vierohodných výsledkov zisťovania objektívnych parametrov je nutné pristúpiť k voľbe vhodného počtu simulácií impulzných charakteristík a k zisťovaniu ich objektívnych parametrov. Preto každá hodnota objektívneho parametra vychádza z celkového počtu tisíc meraní, pričom výsledná hodnota je získaná pomocou aritmetického priemeru všetkých výsledkov. Tento princíp merania má za úlohu eliminovať kolísajúce výsledky jednotlivých výstupov výpočtovej funkcie. Simulácia impulzných charakteristík prebiehala v prázdnych miestnostiach s rozmermi 4×2 m, 5×4 m a 8×6 m, ktoré považujem za štandardné v rámci bytových domov. Príslušné rozmiestnenia zdroja zvuku a poslucháča je možné vidieť vedľa tabuliek výsledných parametrov. V rámci miestnosti som zvolil šesť kombinácií rozmiestnenia. Jednotlivé páry umiestnení tak pokrývajú centrálnu oblasť miestnosti, ale aj lokácie v blízkosti pevných prekážok (obr. 6.6).



Obr. 6.6: Schéma kombinácií rozmiestnenia zdroja zvuku a poslucháča použitých pri meraní objektívnych parametrov.

Pevné prekážky v podobe stien majú vo výpočtoch svoje miesto, a preto som zvolil pre každú stenu rozdielny materiál. Konkrétne pre severnú stenu betón, južnú stenu omietku, západnú stenu tapetu a východnú stenu jekor. Steny pohlcujú rozdielne množstvo energie, ktoré je určené činiteľom zvukovej pohltivosti daného materiálu [5]. Posledným vstupným parametrom pre generovanie impulzných odoziev je maximálny rád odrazu, ktorý špecifikuje maximálne množstvo odrazov, ktoré môže vlna putujúca priestorom realizovať. Rád odrazu sa v priebehu simulácií menil a pre každé rozostavenie polohových bodov tak boli získané hodnoty objektívnych parametrov uzavretého priestoru pre rády odrazov 4, 6, 8, 12 a 15. Z hľadiska vyjadrenia hodnoty objektívnych parametrov predstavuje rád odrazu 15 najdôležitejší prvok z dôvodu väčšej koncentrácie impulzov, následkom čoho je jednoduchšie špecifikovať obálku impulznej odozvy a aj energiu jednotlivých častí. Každá z tabuliek, uvedených v prílohe, predstavuje sadu meraní pre jednu konkrétnu realizáciu rozmiestnenia zdroja zvuku a poslucháča.

6.3.2 Zhodnotenie výsledkov meraní

V nasledujúcich porovnaníach hodnôt meraní sa opieram o kombinácie rozmiestnenia zdroja zvuku a poslucháča, ktoré sú naznačené a očíslované na obrázku 6.6. Ako hodnotiaci faktor výsledkov som zvolil výskumy minimálnej postrehnuteľnej zmeny veľkosti podnetu (JND), ktorých hodnoty je možné vidieť v tabulke 6.1.

Tab. 6.1: Objektívne parametre priestoru a ich hodnoty minimálnej postrehnuteľnej zmeny (JND).

Parameter	Popis	JND
Akustická podpora pódia	$ST = 10 \log \left(\frac{\int_0^{t_2} p^2(t) dt}{\int_0^{t_1} p^2(t) dt} \right)$ [dB]	2 dB [13]
Čas ťažiska impulznej odozvy	$T_S = \frac{\int_0^{\infty} tp^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$ [s]	10 ms [13]
Miera jasnosti	$C_t = 10 \log \left(\frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right)$ [dB]	1–3 dB [14]
Zreteľnosť	$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$	0.05 [13]

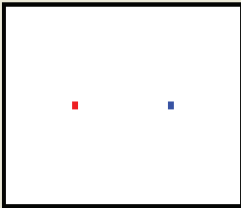
Pre podrobný popis porovnania metód som zvolil miestnosť s rozmermi 5×4 m. U zvyšných meraní sa zameriam na popis zhody alebo prípadných odlišností metód v zostručnenej forme:

V prípade stredne veľkej miestnosti s rozmermi 5×4 m hodnoty získaných objektívnych parametrov naznačujú, že pri rozmiestneniach 2 (obr.6.8), 4 (obr.B.10), 5 (obr.B.11) a 6 (obr.B.12) nie je možné vyjadriť hodnotu C_7 . Dôvodom je to, že priama vlna dorazí do bodu poslucháča v čase väčšom ako 7 ms. V prípadoch 1 (obr.6.7) a 3 (obr.B.9) dochádza k poklesu hodnoty C_7 na základe nárastu dĺžky difúzneho dozvuku pri stúpajúcej hodnote maximálneho rádu odrazu. Merania pri rozmiestnení 1 (obr.6.7) ukázali, že v porovnaní s obrazovou metódou je maximálna odchýlka pomeru priamej vlny a difúzneho dozvuku rovná $\pm 0,8387$ dB. Tá bola dosiahnutá pri ráde odrazu 15. Najpresnejšie rozloženie impulznej charakteristiky bolo dosiahnuté pri ráde odrazu 8. Kombinácia 3 (obr.B.9) dosahuje veľmi podobné výsledky s maximálnou odchýlkou ± 1 dB, dosiahnutou pri ráde odrazu 4, naopak najbližšie hodnoty predstavuje rád odrazu 15. Rozdiely, ktoré určujú maximálne odchýlky, však neznamenajú problém z hľadiska subjektívneho vnemu človeka. Dôvodom je skutočnosť, že človek nedokáže postrehnúť zmenu veľkosti C_7 pri zmene v rozmedzí 1–3 dB (viď 6.1) v závislosti na kmitočte.

Ďalším skúmaným a následne porovnávaným parametrom je miera zreteľnosti. Opäť následkom pomeru, definovaného v tabuľke 2.5, majú hodnoty klesajúci charakter so zvyšujúcim sa rádom odrazu. Pri porovnaní s obrazovou metódou bola vyjadrená maximálna odchýlka 2,43 dB, a to v prípade kombinácie 2 (obr.6.8) s rá-

dom odrazu 4. Táto odchýlka je na hranici schopnosti človeka rozdiel postrehnúť. Vo všeobecnosti majú jednotlivé odchýlky v prípade rádu odrazu 4 kolísavý charakter. Výpočty ostatných kombinácií poskytujú rozdielne chovanie z hľadiska veľkosti odchýlky. V prípadoch hraničných rozmiestnení v rohoch alebo veľkých vzdialenostiach zdroja zvuku a poslucháča, ako pri 2 (obr.6.8), 4 (obr.B.10) a 5 (obr.B.11), je postrehnutelný nárast odchýlky so zvyšujúcim sa rádom odrazu. To môže byť spojené so špecifickým zhlukujúcim chovaním vln, ktoré dospeli do bodu poslucháča. Naopak pri kombináciách 1 (obr.6.7), 3 (obr.B.9) a 6 (obr.B.12) je zjavný pokles veľkosti odchýlky. V konečnom porovnaní obrazovej a subjektívnej metódy tak usudzujem, že vo všetkých prípadoch rozmiestnenia zdroja zvuku a poslucháča odchýlka nepresahuje maximálnu hodnotu uvedenú v JND tabuľke, a preto hodnotím rozloženie energií s hranicou 50 ms za uspokojivé.

Topológia miestnosti 5x4 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C_7 [dB]	0,1800	-0,3812	-0,3466	-0,5988	-0,7005	-0,6444	-1,2207	-0,6680	-1,5109	-0,6722
C_{50} [dB]	20,9513	21,3607	17,0050	14,6204	16,1817	13,8779	15,6605	13,5439	15,5550	13,5020
C_{80} [dB]	Inf	Inf	27,0514	23,3837	22,2972	19,6660	20,6291	18,5463	20,1978	18,4224
D_{50}	0,9916	0,9927	0,9803	0,9666	0,9763	0,9607	0,9734	0,9576	0,9728	0,9573
T_s [s]	0,0130	0,0141	0,0142	0,0156	0,0149	0,0161	0,0158	0,0165	0,0163	0,0165
H [dB]	-20,9513	-21,3607	-17,0050	-14,6204	-16,1817	-13,8779	-15,6605	-13,5439	-15,5550	-13,5020
ST_early[dB]	-4,1090	-4,1422	-3,1781	-3,5477	-2,5996	-3,4883	-1,9319	-3,4813	-1,5768	-3,4822
ST_late[dB]	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-24,1721	-21,9411	-19,6750	-18,8085	-18,7319	-18,5361
ST_total[dB]	-4,1090	-4,1422	-3,1781	-3,5477	-2,5688	-3,4267	-1,8588	-3,3558	-1,4935	-3,3486


Obr. 6.7: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.1.

Hodnoty miery jasnosti (C_{80}) v miestnosti 5x4 m je možné vyjadriť až od rádu odrazu 6. Vyplýva to z dôvodu hranice 80 ms, kedy sa v prípade rádu odrazu 4 nachádzajú jednotlivé impulzy pod touto hranicou. Pomer energií vyjadrený v definícii je v porovnaní s obrazovou metódou najpresnejší pri 4 kombinácii (obr.B.10), kedy odchýlka dosahuje maximálnu hodnotu 0,59 dB. Najvýraznejšie rozdiely je možno vidieť pri rozmiestnení 5 (obr.B.11), ktoré takmer dosahujú hranice vnímania subjektom s hodnotou odchýlky 2,61 dB. Veľkosti rozdielov ostatných rozmiestnení, ako 1 (obr.6.7), 2 (obr.6.8), 3 (obr.B.9) a 6 (obr.B.12), ležia v predošlom intervale. Zapadajú tak do rozdielovo nedetekovateľnej oblasti, ktorá je určená intervalom 1–3 dB.

Ďalším vypočítaným parametrom je zreteľnosť (D_{50}), ktorej špecifikácia je obsiahnutá v podkapitole 2.11. Hodnota minimálnej postrehnutelnej zmeny, získaná

z tabulky (6.1), je stanovená na hodnotu 0.05. Pre tento parameter môžeme hodnoty meraní všetkých kombinácií rozmiestnení a rádoz odrazu hodnotiť ako približne rovnaké s hodnotami obrazovej metódy. Maximálny rozdiel jednotlivých meraní nepresahuje hodnotu 0.05 v žiadnom prípade. Z toho usudzujem, že z hľadiska vyváženia energetického pomeru impulznej odozvy je mnou navrhnutá metóda schopná konkurovať obrazovej metóde.

Topológia miestnosti 5x4 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C_7 [dB]	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf
C_{50} [dB]	16,0965	19,5402	13,2063	12,4642	13,1518	11,6986	13,1487	11,3510	13,0946	11,3141
C_{80} [dB]	Inf	Inf	22,6924	21,0147	19,2005	17,3736	18,3549	16,2616	18,3043	16,1370
D_{50}	0,9759	0,9890	0,9540	0,9463	0,9536	0,9366	0,9557	0,9317	0,9581	0,9312
T_s [s]	0,0198	0,0213	0,0210	0,0234	0,0215	0,0242	0,0221	0,0248	0,0223	0,0249
H [dB]	-16,0965	-19,5402	-13,2063	-12,4642	-13,1518	-11,6986	-13,1487	-11,3510	-13,0946	-11,3141
ST_{early} [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_{late} [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_{total} [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. 6.8: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.2.

Zhodnotenie výsledkov času ťažiska impulznej odozvy (T_s) sa tiež opiera o hodnoty z tabulky 6.1. Z výsledkov usudzujem, že na čas ťažiska má vplyv vzdialenosť zdroja zvuku od poslucháča, kedy v prípadoch 1 (obr.6.7), 3 (obr.B.9) a 4 (obr.B.10) sa priemerné hodnoty pohybujú okolo 15–16 ms, pre rozmiestnenie 6 (obr.B.12) sú hodnoty 20 ms a pri kombináciách 2 a 5 údaje dosahujú bodu 24 ms. Taktiež je možné odvodiť, že so zvyšujúcim sa rádom odrazu mierne stúpajú aj hodnoty času ťažiska. Pri porovnávaní hodnôt času ťažiska subjektívnej a obrazovej metódy konštatujem, že rozdiely v hodnotách metód nepresahujú veľkosť normovaného minimálneho rozdielu postrehnuteľnej zmeny, a to v žiadnom prípade zvolených rôznorodých rádoz odrazov ani topológie.

Výsledné hodnoty parametra miera doznievania (H) je možné brať za inverzné v súvislosti s výsledkami výpočtu miery zreteľnosti (C_{50}). Preto sa pri porovnávaní metód nebudem zaoberať hodnotením výsledkov tohto parametra.

Nakoniec som zisťoval hodnoty akustickej podpory pódia (ST), ktorá predstavuje vzájomný prenos zvuku medzi hudobníkmi. Z definície tohto parametra 2.13 je možné vyvodiť príčinu nemožnosti aplikovať daný výpočet na rozmiestnenia 2 (obr.6.8) a 5 (obr.B.11), ktorých vzdialenosť zapríčinila prekročenie limitu 10 ms pri putovaní priamej vlny priestorom. Preto využijem k porovnaniu iba kombinácie 1 (obr.6.7),

3 (obr.B.9), 4 (obr.B.10) a 6 (obr.B.12). Tieto kombinácie majú zhodné výsledky ST_{early} a ST_{total} pri voľbe nízkeho rádu odrazu do hodnoty 8. Až následne sa prejaví rád odrazu v podobe väčšej dĺžky časti difúzneho dozvuku, čo má za následok mierne výkyvy parametra ST_{total} smerom nahor. Odchýlky pri porovnaní metód sú preto takmer zhodné s parametrom ST_{early} . Odchýlka v prípade ST_{early} dosahuje maximum pri použití polohy 6 (obr.B.12) s rádom odrazu 15, konkrétne 2,12 dB. Z hľadiska vyčíslených odchýlok môžeme kombinácie polôh rozdeliť opäť na centrálné a okrajové. Pri centrálné umiestnených styčných bodoch, ako u 1 (obr.6.7) a 6 (obr.B.12), má veľkosť odchýlky potenciál rásť so zvyšujúcim sa rádom odrazu. Prípady okrajových rozmiestnení 3 (obr.B.9), 4 (obr.B.10) sa potom chová inverzne. Ďalší parameter ST_{late} je možné vyjadriť až pri rádoch odrazu 8, 12 a 15, kedy časť difúzneho dozvuku prekračuje hranicu 100 ms. Kombinácie 1 (obr.6.7), 3 (obr.B.9), 4 (obr.B.10) a 6 (obr.B.12) majú v tomto prípade rovnaké pohyby hodnôt, kde v prípade rádu odrazu 8 dochádza k odchýlke presahujúcej 3 dB, najmä pri centrálnych kombináciách 1 (obr.6.7) a 6 (obr.B.12). Umiestnenia 3 (obr.B.9) a 4 (obr.B.10) v tomto smere nedisponujú tak výraznou odchýlkou. So zvyšujúcim rádom odrazu sa však rozdiel metód v rámci meraných rozmiestnení stáva zanedbateľným. Minimálny detekovateľný rozdiel je daný hodnotou 2 dB pre všetky typy ST , preto usudzujem, že rozdiely medzi subjektívnou a obrazovou metódou zapadajú pod túto hraničnú hodnotu až na výnimky pri kombináciách 1 (obr.6.7) a 6 (obr.B.12). Testovaný subjekt by tak nemal byť schopný poznať rozdiel medzi týmito metódami. Miestnosť s rozmermi 5×4 m je príliš malá na využitie pre umiestnenie pódia a na hudobné účely. Tabuľky s výsledkami meraní miestnosti 5×4 m a príslušnou topológiou, ktorá bola použitá pri ich získaní, je možné vidieť v prílohe B.2.

Miestnosť s rozmermi 8×6 m poskytuje výsledné údaje rádovo nižšie ako stredne veľká miestnosť. Miera zreteľnosti tak dosahuje nižších hodnôt, čo je opodstatnené dlhšou časťou difúzneho dozvuku. Odchýlky medzi metódami sú však takmer totožné s hodnotami dosiahnutými v predchádzajúcej miestnosti. Nachádzajú sa tak tesne pod hranicou detekcie zmeny subjektom.

Vplyvom zväčšenia rozmerov miestnosti boli údaje miery jasnosti počítané už od rádu odrazu 4. Veľkosti odchýlok subjektívnej metódy od obrazovej metódy v prípadoch 1 (obr.B.13) a 6 (obr.B.18) presiahli hodnotu 3 dB hlavne pri použití nízkeho rádu odrazu. Zvyšovaním rádu odrazu sa hodnoty priblížili hranici, ktorú subjekt nie je schopný postrehnúť. Odchýlky kombinácií 2 (obr.B.14), 3 (obr.B.15), 4 (obr.B.16) a 5 (obr.B.17) majú približne zhodné hodnoty s tými, čo boli namerané v stredne veľkej miestnosti. Hodnota zreteľnosti pre tento prípad klesla s väčšou rozlohou priestoru a priniesla tak aj výraznejšie odchýlky metód, a to v prípadoch, kedy je vzdialenosť medzi zdrojom zvuku a poslucháčom väčšia, ako v prípade kombinácií 2 (obr.B.14), 5 (obr.B.17) a 6 (obr.B.18). Odchýlky tak presahujú nerozlišiteľnú

hranicu medzi metódami.

Čas ťažiska impulznej odozvy je aj v tomto prípade veľmi blízky pre obe metódy. Odchýlky tak nepresahujú hodnotu 10 ms.

Na základe použitia miestnosti s väčšími rozmermi, a tým pádom aj vzdialenosťami medzi zdrojom zvuku a poslucháčom, nie je možné vyjadriť hodnoty parametrov, ktoré sú závislé na energii prichádzajúcej do 10 ms. Preto nedokážeme určiť parametre C_7 a ST . Kompletné výsledky s príslušnými topológiami k miestnosti 8×6 m sú obsiahnuté v prílohe B.3.

Merania miestnosti s rozmermi 4×2 m nám poskytujú nasledujúce informácie: Miera priameho zvuku vyjadrená v prípadoch 1 (obr.B.1), 3 (obr.B.3), 4 (obr.B.4) a 6 (obr.B.6) zaznamenáva zlepšenie v porovnaní s obrazovou metódou so zvyšujúcim sa rádom odrazu, následkom čoho klesá veľkosť odchýlky. Pri použití kombinácie 3 (obr.B.3) však zaznamenávam nesprávne rozloženie energie do 7 ms. Následkom tejto skutočnosti sú výsledné kladné hodnoty parametra, ktoré by ovplyvnili aj výsledný dojem pri porovnávaní oboch metód.

Pozitívne hodnotím mieru zreteľnosti vo všetkých prípadoch kombinácií pri použití rádu odrazu väčšieho ako 4, kde odchýlka metód nepresahuje 1,5 dB, a tak je pod hranicou minimálnej postrehnuteľnej zmeny.

U miery jasnosti dosahujem uspokojivých hodnôt v prípade nízkeho rádu odrazu 8, ktorý je zároveň prvým merateľným z hľadiska objektívnych parametrov. So zvyšujúcim rádom odrazu však rastie aj veľkosť odchýlky metód. Pri použití kombinácie 3 (obr.B.3) tak odchýlka presahuje 3 dB. Až na túto výnimku však rozdiely nepresahujú hranicu 6.1, a preto by mal byť rozdiel metód nepostrehnuteľný.

Rozdiely pri porovnávaní zreteľnosti oboch metód sú takmer totožné. Maximálna odchýlka v žiadnej zo zvolených kombinácií nespôsobuje zaznamenateľné zmeny vo vneme priestoru.

Tiež vyhodnotenie času ťažiska impulznej odozvy je zhodné s rozsiahlejšími miestnosťami, kde odchýlka metód nepresahuje 10 ms.

Parameter akustickej podpory pódia bol vyjadrený pre kombinácie 1 (obr.B.1), 3 (obr.B.3), 4 (obr.B.4) a 6 (obr.B.6). Pre hodnoty ST_{early} platí, že pri zainteresovaní centrálnych kombinácií 1 (obr.B.1) a 6 (obr.B.6) klesá veľkosť odchýlky metód so zvyšujúcim sa rádom odrazu. Naopak u kombinácií 3 (obr.B.3) a 4 (obr.B.4) odchýlka stúpa. Vo všetkých prípadoch sa však maximálne odchýlky pohybujú na rozmedzí možnosti detekcie. Výpočty ST_{late} , ktoré bolo možno získať až od rádu odrazu 12, hodnotím negatívne. Odchýlky metód pri kombináciách 1 (obr.B.1), 3 (obr.B.3), 4 (obr.B.4) a 6 (obr.B.6) presahujú hodnotu JND a s nárastom rádu odrazu sa rozdiel ešte zvyšuje. Ako som však už spomínal pri hodnotení stredne veľkej miestnosti, je priestor s rozmermi 4×2 m nevhodný na použitie pre hudobné účely. Obrázky s výslednými hodnotami a rozmiestneniami pre miestnosť 4×2 m sa nachádzajú v prí-

lohe B.1.

Z výsledných rozdielových hodnôt objektívnych parametrov mnou navrhnutej metódy a obrazovej metódy je zrejmé, že metóda, ktorú som navrhol, je vhodná na generovanie impulznej charakteristiky malých až stredne veľkých priestorov, kde dosahuje uspokojivé výsledky. Vo väčšine prípadov by rozdiely metód nemali byť spozorovateľné testovacím subjektom. U miestností s väčšími rozmermi by však rozdiely mohli spôsobiť odlišné vnímanie jednotlivých metód subjektom.

7 ZÁVER

Cieľom mojej bakalárskej práce bolo naštudovanie a skúmanie vplyvu impulznej odozvy uzavretého priestoru na vnem človeka.

V prvej kapitole práce som sa zaoberal štúdiom a teoretickým spracovaním základných zákonitostí šírenia zvuku v uzavretom priestore, a s tým spojenými princípmi riešenia. Tie sa používajú pri získavaní impulznej odozvy priestoru, ktorej vlastnosti a popis som tiež zakomponoval do mojej práce.

Druhá kapitola práce pojednáva o parametroch spojených so subjektívnym a objektívnym hodnotením priestorov. Tieto parametre je možné vyvodiť z formy impulznej odozvy priestoru, kedy pozorujeme tvar celého priebehu odozvy, dĺžku odozvy, intenzitu jednotlivých odrazov odozvy, obálku charakteristiky a rozloženie hlavných častí odozvy, a to priamu vlnu, prvotné odrazy a difúzny dozvuk. Teoretické poznatky som následne overoval simuláciami v prostredí Matlab a tie som aplikoval pri riešení algoritmu na generovanie impulznej odozvy uzavretého priestoru.

Tretia kapitola práce je venovaná psychoakustike ako vede, ktorá sa zaoberá spôsobom vnímania akustických javov a ich dopadom na ľudský organizmus. Popisuje tiež metódy, prostredníctvom ktorých je možné subjektívny vnem testovať a následne vyhodnocovať.

Štvrtá kapitola má za úlohu stručne ozrejmiť problematiku panoramovania zdroja zvuku, ktoré je aplikované na výstupné dáta algoritmu, ktorý som navrhoval.

Piata kapitola má overiť platnosť teoretických poznatkov vybraných parametrov definujúcich vnem v uzavretom priestore. Prostredníctvom editácie impulznej charakteristiky priestoru sa tak potvrdilo previazanie jednotlivých parametrov so špecifickými časťami impulznej odozvy. Na skúmaný parameter priestorovosti má najväčší vplyv dĺžka časti difúzneho dozvuku, najmä v prípade zainteresovania postranných odrazov. U miery jasnosti sa jedná o vplyv rozloženia energií v definovaných medziach impulznej charakteristiky. Intimita uzavretého priestoru podlieha veľkosti časovej medzery ITDG.

Hlavný výstup bakalárskej práce však tvorí algoritmus generovania impulznej odozvy pravouhlej miestnosti v šiestej kapitole, u ktorého sa kladie dôraz na zjednodušenie výpočtovej náročnosti, s čím je spojená aj časová úspora. Návrh algoritmu vychádza zo subjektívneho vnemu človeka, ktorý je ovplyvnený nedokonalosťami vo vnímaní sluchového orgánu. Implementuje tak iba jednoduché výpočty pre získanie styčných bodov impulznej charakteristiky. Tieto výpočty vychádzajú z informácií ako rozmery miestnosti, poloha zdroja zvuku a poslucháča a maximálny rád odrazu. Časť difúzneho dozvuku je definovaná na základe týchto bodov a nevyžaduje presné výpočty polohy v čase, kedy dorazí akustická vlna k poslucháčovi. Tento algoritmus bol následne použitý pre rozšírenie aplikácie „Simulace impulzní odez-

vyuzavřeného prostoru“. Aplikáciu som upravil pre možnosť porovnávania rôznych metód generovania impulznej odozvy priestoru. V aplikácii bolo obsiahnuté riešenie generovania impulznej odozvy priestoru pomocou obrazovej metódy a panoramovanie zdroja zvuku pre generovanie výstupných nahrávok. Z tohto dôvodu som upravil mnou navrhnutý algoritmus pre možnosť použitia zabudovaného princípu panoramovania zdroja zvuku. Zmenou vizuálnej stránky aplikácie som dosiahol možnosti porovnania mnou navrhnutej metódy a obrazovej metódy, kde jednotlivým metódam pripadá samostatná časť výstupných objektov aplikácie. Taktiež som implementoval časť pre výpočet objektívnych parametrov z impulznej odozvy priestoru. Výpočty parametrov majú základ v pomere energií, ktoré sú určené v daných časových intervaloch impulznej charakteristiky. Každá z metód následne prechádza výpočtom objektívnych parametrov, ktorých výsledné hodnoty vychádzajú z priemeru tisícky vygenerovaných impulzných charakteristík. Samotné vyhodnotenie výsledkov vychádza z porovnania hodnôt obrazovej metódy a mnou navrhnutého algoritmu, pričom je výsledná odchýlka porovnávaná s tabulkovými hodnotami najmenej detekovateľnej zmeny subjektom.

Výsledky porovnania potvrdzujú, že odstránenie výpočtov časti difúzneho dozvuku je správnou cestou k zrýchleniu a zjednodušeniu procesu generovania impulznej odozvy pri zachovaní objektívnych parametrov v medziach nedetekovateľných zmien. Na základe meraní usudzujem, že mnou navrhnutý algoritmus dosahuje najpresnejšie výsledky v prípade malých až stredne veľkých miestností. Zväčšovaním rozmerov miestnosti dochádza k zvyšovaniu odchýlky od obrazovej metódy. Budúcnosť riešenia by sa mala uberať cestou subjektívneho testovania za vhodných podmienok a väčšieho množstva znalých subjektov, ktoré by definitívne potvrdilo výsledky objektívnych skúmaní.

LITERATÚRA

- [1] ROSSING, T. *Springer Handbook of Acoustics*. USA: Springer, 2007. ISBN 0387304460.
- [2] SCHIMMEL, J. *Akustika uzavřených prostorů*. Brno: VUT v Brně, 2008.
- [3] BLAUERT, J. *Spatial Hearing: the psychophysics of human sound localization*. England: The MIT Press, 1996. ISBN 0-262-02413-6.
- [4] HAMAMEED, S.; PAKARINEN, J.; VALDE, K.; PULKKI V. *Psychoacoustic Cues in Room Size Perception*. [online]. Germany, Berlin: in Proc. AES 116th Convention, 2004. Dostupné z URL: <<http://www.acoustics.hut.fi/research/cat/psychoac/papers/hameedaes116.pdf>>.
- [5] ČSN EN ISO 354: *Akustika – Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti*. Česká technická norma, Český normalizační institut, prosinec 2003.
- [6] BERANEK, L. *Music, Acoustics and Architecture*. England: John Wiley & Sons, June 1962. ISBN 0471068675.
- [7] HIDAKA, T. *On the objective parameter of texture*. [online]. Japan: Takenaka R&D Institute, 2008. Dostupné z URL: <<http://webistem.com/acoustics2008/acoustics2008/cd1/data/fa2002-sevilla/forumacusticum/archivos/rba01002.pdf>>.
- [8] BERANEK, L. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. USA: Springer, 2003. ISBN 0387955240.
- [9] NOWAK, J.; LIEBERTAU, J.; SPORER, T. *On The perception of apparent source width and listener envelopment in wave field synthesis*. [online]. Germany: Ilmenau University of Technology, 2013. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6603215&tag=1>>.
- [10] BALLOU, G. *Handbook for Sound Engineers*. 4. vyd. England: Focal Press, 2008. ISBN 0240809696.
- [11] FAST, H. *Psychoacoustics and Sound Quality*. [online]. Munich: Technical University of Munich, 2005. Dostupné z URL: <<http://www.mmk.ei.tum.de/publ/pdf/05/05fas1.pdf>>.
- [12] ORLOVSKÝ, K. *Panoramování zvuku ve vícekanálových ozvučovacích systémech*. Brno, 2009. 49 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Balík PhD.

- [13] HAK, C.C.J.M.; WENMAEKERS, R.H.C.; LUXEMBURG, L.C.J. van. *Measuring Room Impulse Responses: Impact of the Decay Range on Derived Room Acoustic Parameters*. Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2012.
- [14] VIGEANT, M.; CELMER, R. *Effect of Experimental Design on the Results of Clarity-Index Just-Noticeable-Difference Listening Tests*. [online]. USA: Ilmenau University of Hartford, 2010. Dostupné z URL: <http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ICA2010/papers/p425.pdf>.

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

α	činitel zvukovej pohltivosti
λ	vlnová dĺžka
ASW	apparent source width
C	miera jasnosti
c_0	rýchlosť zvuku
dB	decibel
f	frekvencia
f_N	frekvencia N módu
f_{vz}	vzorkovací kmitočet
G	miera hlasitosti
GUI	graphical user interface
Hz	hertz
ITDG	initial time delay gap
JND	just noticeable difference
L	dĺžka hrán
LEV	envelopment
ms	milisekunda
N_R	počet odrazov za čas
S	obsah
T	doba dozvuku
V	objem
VBAP	vektorovo-základňové panoramovanie
W_d	energia dopadajúca na prekážku
W_p	energia pohltená prekážkou

ZOZNAM PRÍLOH

A	Obsah priloženého DVD	56
B	Výsledky meraní objektívnych parametrov uzavretých priestorov	57
B.1	Miestnosť s rozmermi 4x2	57
B.2	Miestnosť s rozmermi 5x4	60
B.3	Miestnosť s rozmermi 8x6	63

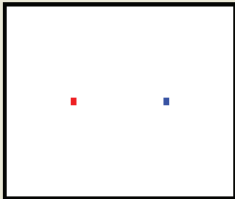
A OBSAH PRILOŽENÉHO DVD

- Elektronická verzia bakalárskej práce v PDF (xkisac01.pdf)
- Funkcie pre simululáciu uzavretých priestorov (štart pomocou Prvy_pokus.m)
- Funkcia realizujúca výpočet objektívnych parametrov (Obj_compar.m)

B VÝSLEDKY MERANÍ OBJEKTÍVNYCH PARAMETROV UZAVRETÝCH PRIESTOROV

B.1 Miestnosť s rozmermi 4x2

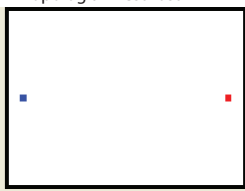
Topológia miestnosti 4x2 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C_7 [dB]	-2,3601	-4,2707	-2,7612	-4,3811	-3,0601	-4,4062	-3,5056	-4,4122	-3,7506	-4,4116
C_{50} [dB]	Inf	Inf	19,8530	18,2195	18,1792	17,1000	17,3603	16,8064	17,2000	16,7915
C_{80} [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	26,9121	27,1614	22,8235	24,8978	22,0474	24,7807
D_{50}	1,0000	1,0000	0,9896	0,9852	0,9849	0,9809	0,9819	0,9796	0,9812	0,9795
T_s [s]	0,0114	0,0129	0,0124	0,0137	0,0130	0,0140	0,0138	0,0141	0,0142	0,0141
H [dB]	Inf	Inf	-19,8530	-18,2195	-18,1792	-17,1000	-17,3603	-16,8064	-17,2000	-16,7915
ST_{early} [dB]	-7,0388	-5,2691	-6,0755	-4,7286	-5,5755	-4,6114	-5,0540	-4,6053	-4,8088	-4,6099
ST_{late} [dB]	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-23,2732	-26,6497	-21,9009	-26,2975
ST_{total} [dB]	-7,0388	-5,2691	-6,0755	-4,7286	-5,5755	-4,6114	-4,9885	-4,5789	-4,7242	-4,5812

Obr. B.1: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.1.

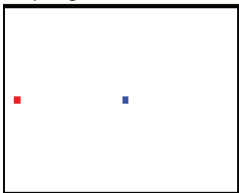
Topológia miestnosti 4x2 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C_7 [dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf
C_{50} [dB]	Inf	Inf	17,4808	17,0304	16,7286	15,9008	16,7221	15,5888	16,6779	15,5672
C_{80} [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	25,3839	25,0135	22,1629	23,0005	21,7027	22,8962
D_{50}	1,0000	1,0000	0,9823	0,9806	0,9791	0,9749	0,9792	0,9731	0,9803	0,9730
T_s [s]	0,0147	0,0164	0,0155	0,0174	0,0158	0,0178	0,0161	0,0180	0,0163	0,0180
H [dB]	- Inf	- Inf	-17,4808	-17,0304	-16,7286	-15,9008	-16,7321	-15,5888	-16,9779	-15,5672
ST_{early} [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_{late} [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_{total} [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. B.2: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.2.

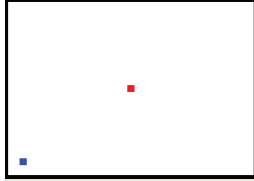
Topológia miestnosti 4x2 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C_7 [dB]	1,5289	-1,7150	1,2201	-1,8298	0,9810	-1,8501	0,6339	-1,8653	0,4014	-1,8593
C_{50} [dB]	Inf	Inf	20,0630	19,0076	18,3747	17,9145	17,4667	17,6417	17,1962	17,6224
C_{80} [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	27,2473	28,7134	22,9532	26,1858	22,2339	26,0538
D_{50}	1,0000	1,0000	0,9901	0,9876	0,9856	0,9841	0,9823	0,9831	0,9812	0,9830
T_s [s]	0,0095	0,0110	0,0104	0,0117	0,0110	0,0119	0,0118	0,0120	0,0122	0,0120
H [dB]	-Inf	-Inf	-20,0630	-19,0076	-18,3747	-17,9145	-17,4667	-17,6417	-17,1962	-17,6224
ST_early[dB]	-7,5121	-7,6901	-6,6263	-7,1424	-6,0864	-7,0288	-5,3686	-7,0197	-4,9588	-7,0206
ST_late [dB]	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-25,0276	-29,5540	-23,6979	-29,1512
ST_total[dB]	-7,5121	-7,6901	-6,6263	-7,1424	-6,0864	-7,0288	-5,3216	-6,9956	-4,9008	-6,9941

Obr. B.3: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.3.

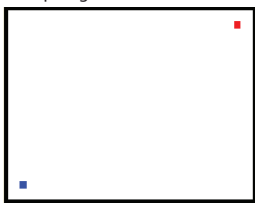
Topológia miestnosti 4x2 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C_7 [dB]	-0,0340	-1,3804	-0,1239	-1,4938	-0,9211	-1,5144	-1,8991	-1,5284	-2,4038	-1,5328
C_{50} [dB]	Inf	Inf	19,0644	18,8651	18,5995	17,8485	18,5394	17,5778	18,5058	17,5543
C_{80} [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	25,8278	28,3959	23,2283	26,0143	23,0699	25,8861
D_{50}	1,0000	1,0000	0,9877	0,9872	0,9863	0,9839	0,9865	0,9828	0,9870	0,9827
T_s [s]	0,0095	0,0112	0,0104	0,0119	0,0107	0,0121	0,0111	0,0122	0,0112	0,0122
H [dB]	-Inf	-Inf	-19,0644	-18,8651	-18,5995	-17,8485	-18,6394	-17,5778	-18,8058	-17,5543
ST_early[dB]	-9,8579	-6,8645	-9,1077	-6,3751	-8,9889	-6,2771	-8,9257	-6,2723	-8,9466	-6,2581
ST_late[dB]	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-24,1621	-29,2227	-23,0867	-28,8248
ST_total[dB]	-9,8579	-6,8645	-9,1077	-6,3751	-8,9889	-6,2771	-8,7971	-6,2504	-8,7819	-6,2341

Obr. B.4: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.4.

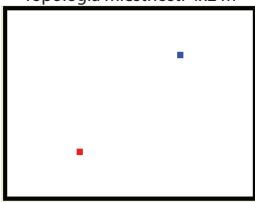
Topológia miestnosti 4x2 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C ₇ [dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf
C ₅₀ [dB]	Inf	Inf	18,2403	16,3433	16,9614	15,3395	16,4208	15,0695	16,2730	15,0550
C ₈₀ [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	25,9521	24,9780	21,5677	22,9997	21,5581	22,9068
D ₅₀	1,0000	1,0000	0,9850	0,9773	0,9802	0,9716	0,9777	0,9698	0,9798	0,9697
Ts [s]	0,0148	0,0167	0,0153	0,0177	0,0157	0,0181	0,0161	0,0182	0,0164	0,0182
H [dB]	- Inf	- Inf	-18,2403	-16,3433	-16,9614	-15,3395	-16,4208	-15,0695	-16,8730	-15,0550
ST_early[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_late[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_total[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. B.5: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.5.

Topológia miestnosti 4x2 m

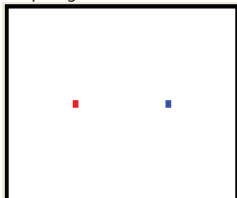


Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C ₇ [dB]	- 3,2299	- 5,2725	- 3,6499	- 5,3824	- 3,9450	- 5,3998	- 4,3644	- 5,4113	- 4,6091	- 5,4137
C ₅₀ [dB]	Inf	Inf	19,4715	17,5269	17,7929	16,5540	16,9626	16,2935	16,8051	16,2810
C ₈₀ [dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	26,5747	26,8964	22,3876	24,7381	21,6521	24,6312
D ₅₀	1,0000	1,0000	0,9887	0,9826	0,9835	0,9784	0,9802	0,9771	0,9795	0,9770
Ts [s]	0,0121	0,0134	0,0132	0,0142	0,0138	0,0145	0,0146	0,0147	0,0150	0,0147
H [dB]	- Inf	- Inf	-19,4715	-17,5269	-17,7929	-16,5540	-16,9626	-16,2935	-16,8051	-16,2810
ST_early[dB]	- 6,3982	- 4,8571	- 5,4019	- 4,3349	- 4,9387	- 4,2176	- 4,4138	- 4,2124	- 4,1789	- 4,2155
ST_late[dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- 22,7031	- 26,1600	- 21,3516	- 25,8271
ST_total[dB]	- 6,3982	- 4,8571	- 5,4019	- 4,3349	- 4,9387	- 4,2176	- 4,3493	- 4,1848	- 4,0959	- 4,1856

Obr. B.6: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.6.

B.2 Miestnosť s rozmermi 5x4

Topológia miestnosti 5x4 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C_7 [dB]	0,1800	-0,3812	-0,3466	-0,5988	-0,7005	-0,6444	-1,2207	-0,6680	-1,5109	-0,6722
C_{50} [dB]	20,9513	21,3607	17,0050	14,6204	16,1817	13,8779	15,6605	13,5439	15,5550	13,5020
C_{80} [dB]	Inf	Inf	27,0514	23,3837	22,2972	19,6660	20,6291	18,5463	20,1978	18,4224
D_{50}	0,9916	0,9927	0,9803	0,9666	0,9763	0,9607	0,9734	0,9576	0,9728	0,9573
T_s [s]	0,0130	0,0141	0,0142	0,0156	0,0149	0,0161	0,0158	0,0165	0,0163	0,0165
H [dB]	-20,9513	-21,3607	-17,0050	-14,6204	-16,1817	-13,8779	-15,6605	-13,5439	-15,5550	-13,5020
ST_early[dB]	-4,1090	-4,1422	-3,1781	-3,5477	-2,5996	-3,4883	-1,9319	-3,4813	-1,5768	-3,4822
ST_late[dB]	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-24,1721	21,9411	-19,6750	-18,8085	-18,7319	-18,5361
ST_total[dB]	-4,1090	-4,1422	-3,1781	-3,5477	-2,5688	-3,4267	-1,8588	-3,3558	-1,4935	-3,3486

Obr. B.7: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.1.

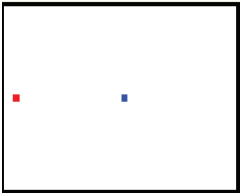
Topológia miestnosti 5x4 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C_7 [dB]	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf
C_{50} [dB]	16,0965	19,5402	13,2063	12,4642	13,1518	11,6986	13,1487	11,3510	13,0946	11,3141
C_{80} [dB]	Inf	Inf	22,6924	21,0147	19,2005	17,3736	18,3549	16,2616	18,3043	16,1370
D_{50}	0,9759	0,9890	0,9540	0,9463	0,9536	0,9366	0,9557	0,9317	0,9581	0,9312
T_s [s]	0,0198	0,0213	0,0210	0,0234	0,0215	0,0242	0,0221	0,0248	0,0223	0,0249
H [dB]	-16,0965	-19,5402	-13,2063	-12,4642	-13,1518	-11,6986	-13,1487	-11,3510	-13,0946	-11,3141
ST_early[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_late[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_total[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. B.8: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.2.

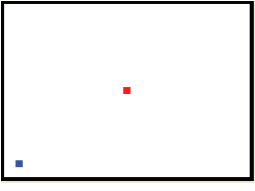
Topológia miestnosti 5x4 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C ₇ [dB]	-0,6284	-1,5999	-0,9307	-1,7972	-1,1646	-1,8363	-1,4907	-1,8571	-1,6908	-1,8579
C ₅₀ [dB]	19,8080	17,6439	16,0624	13,4511	15,2584	12,8841	14,6644	12,6179	14,5053	12,5889
C ₈₀ [dB]	Inf	Inf	26,2428	23,1075	21,5858	19,5891	19,8765	18,5277	19,4314	18,4047
D ₅₀	0,9893	0,9831	0,9756	0,9568	0,9709	0,9510	0,9669	0,9481	0,9657	0,9478
T _s [s]	0,0127	0,0139	0,0140	0,0154	0,0148	0,0159	0,0158	0,0163	0,0164	0,0163
H [dB]	-19,8080	-17,6439	-16,0624	-13,4511	-15,2584	-12,8841	-14,6644	-12,6179	-14,5053	-12,5889
ST_early[dB]	-5,3087	-3,7818	-4,5277	-3,2861	-3,9946	-3,2316	-3,3271	-3,2252	-2,9387	-3,2298
ST_late	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-24,7236	-23,0376	-20,3007	-19,7214	-19,5021	-19,4309
ST_total	-5,3087	-3,7818	-4,5277	-3,2861	-3,9573	-3,1864	-3,2403	-3,1268	-2,8436	-3,1268

Obr. B.9: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.3.


Topológia miestnosti 5x4 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C ₇ [dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf
C ₅₀ [dB]	17,4497	16,1932	14,1718	13,0342	14,1442	12,3967	14,0511	12,1512	14,0272	12,1236
C ₈₀ [dB]	Inf	Inf	22,8202	23,6520	19,3872	19,2570	18,7121	18,2123	18,7981	18,1016
D ₅₀	0,9821	0,9765	0,9630	0,9526	0,9628	0,9455	0,9645	0,9426	0,9659	0,9422
T _s [s]	0,0144	0,0156	0,0157	0,0169	0,0164	0,0176	0,0172	0,0179	0,0176	0,0180
H [dB]	-17,4497	-16,1932	-14,1718	-13,0342	-14,1442	-12,3967	-14,0511	-12,1512	-14,0272	-12,1236
ST_early[dB]	-5,8235	-3,7772	-4,4616	-3,3515	-4,2807	-3,2887	-3,6135	-3,2814	-3,2315	-3,2877
ST_late[dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	-21,7261	-22,0351	-18,7360	-19,2295	-18,2423	-18,9889
ST_total[dB]	-5,8235	-3,7772	-4,4616	-3,3515	-4,2025	-3,2311	-3,4815	-3,1724	-3,0961	-3,1724

Obr. B.10: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.4.

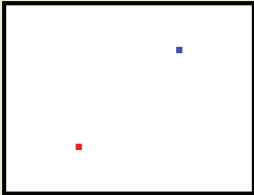
Topológia miestnosti 5x4 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C ₇ [dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf
C ₅₀ [dB]	14,5484	15,4134	13,0603	11,0282	12,8081	10,3733	12,8016	10,1279	12,7830	10,0988
C ₈₀ [dB]	Inf	Inf	23,0842	19,3939	19,1490	16,2746	17,8969	15,4432	17,4834	15,3414
D ₅₀	0,9648	0,9720	0,9526	0,9268	0,9501	0,9159	0,9507	0,9115	0,9509	0,9109
T _s [s]	0,0213	0,0228	0,0218	0,0250	0,0222	0,0260	0,0227	0,0265	0,0230	0,0266
H [dB]	-14,5484	-15,4134	-13,0603	-11,0282	-12,8081	-10,3733	-12,0616	-10,1279	-12,7830	-10,0988
ST_early[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_late[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_total[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. B.11: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.5.

Topológia miestnosti 5x4 m

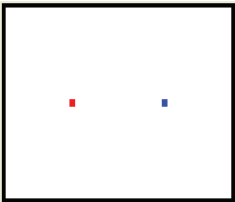


Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C ₇ [dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf
C ₅₀ [dB]	19,2553	17,4789	15,4082	12,7278	14,7006	12,0072	14,2080	11,7615	14,1679	11,7184
C ₈₀ [dB]	Inf	Inf	25,4724	22,4963	20,8557	18,3240	19,2577	17,3664	18,8651	17,2410
D ₅₀	0,9877	0,9824	0,9717	0,9493	0,9670	0,9407	0,9633	0,9375	0,9630	0,9369
T _s [s]	0,0165	0,0175	0,0179	0,0193	0,0187	0,0200	0,0197	0,0204	0,0201	0,0205
H [dB]	-19,2553	-17,4789	-15,4082	-12,7278	-14,7006	-12,0072	-14,2080	-11,7615	-14,1679	-11,7184
ST_early[dB]	-0,7158	-1,6490	0,2759	-1,0006	0,8983	-0,9181	1,6592	-0,9268	2,0745	-0,9236
ST_late[dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	-21,0159	-17,9102	-16,6353	-15,5239	-15,6852	-15,2640
ST_total[dB]	-0,7158	-1,6490	0,2759	-1,0006	0,9268	-0,8322	1,7235	-0,7787	2,1469	-0,7665

Obr. B.12: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.6.

B.3 Miestnosť s rozmermi 8x6


Topológia miestnosti 8x6 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C_7 [dB]	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf
C_{50} [dB]	11,6687	8,9599	10,7212	8,0906	10,4603	7,8321	10,3220	7,7387	10,2554	7,7234
C_{80} [dB]	20,3602	17,6351	16,3923	13,7074	15,6847	12,9081	15,2565	12,6413	15,1701	12,6091
D_{50}	0,9351	0,8873	0,9211	0,8656	0,9168	0,8586	0,9146	0,8559	0,9134	0,8555
T_s [s]	0,0241	0,0268	0,0261	0,0289	0,0272	0,0300	0,0285	0,0306	0,0291	0,0307
H [dB]	-11,6687	-8,9599	-10,7212	-8,0906	-10,4603	-7,8321	-10,3220	-7,7387	-10,2554	-7,7234
ST_early[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_late[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_total[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. B.13: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.1.

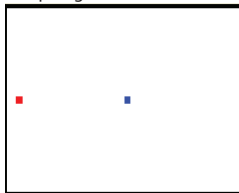
Topológia miestnosti 8x6 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C_7 [dB]	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf
C_{50} [dB]	9,8814	7,4307	9,2601	6,5697	9,2488	6,2973	9,5488	6,1932	9,7051	6,1858
C_{80} [dB]	16,1979	15,9987	13,1162	12,2449	13,0706	11,4369	13,2275	11,1563	13,4336	11,1322
D_{50}	0,9057	0,8469	0,8930	0,8195	0,8929	0,8100	0,8997	0,8063	0,9030	0,8060
T_s [s]	0,0313	0,0344	0,0329	0,0370	0,0335	0,0384	0,0343	0,0392	0,0347	0,0393
H [dB]	-9,8814	-7,4307	-9,2601	-6,5697	-9,2488	-6,2973	-9,5488	-6,1932	-9,7051	-6,1858
ST_early[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_late[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_total[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. B.14: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.2.

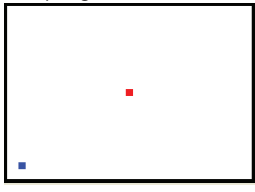
Topológia miestnosti 8x6 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C ₇ [dB]	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf
C ₅₀ [dB]	11,1689	9,6921	10,2002	8,8011	9,7662	8,5653	9,3924	8,4768	9,2774	8,4655
C ₈₀ [dB]	20,1635	17,6691	16,3727	14,0416	15,5388	13,3480	14,9776	13,1075	14,8122	13,0781
D ₅₀	0,9282	0,9030	0,9123	0,8835	0,9041	0,8778	0,8964	0,8756	0,8940	0,8754
Ts [s]	0,0203	0,0226	0,0222	0,0245	0,0235	0,0254	0,0251	0,0259	0,0259	0,0259
H [dB]	-11,1689	-9,6921	-10,2002	-8,8011	-9,7662	-8,5653	-9,3924	-8,4768	-9,2774	-8,4655
ST_early[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_late[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_total[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. B.15: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.3.


Topológia miestnosti 8x6 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C ₇ [dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf
C ₅₀ [dB]	10,7362	9,9008	9,8736	8,8204	10,1177	8,5579	10,2933	8,4714	10,3566	8,4625
C ₈₀ [dB]	17,7865	16,9116	14,4996	13,2490	14,5282	12,6301	14,7416	12,4150	14,8938	12,3959
D ₅₀	0,9218	0,9072	0,9064	0,8840	0,9111	0,8777	0,9144	0,8755	0,9155	0,8753
Ts [s]	0,0224	0,0243	0,0244	0,0265	0,0254	0,0275	0,0266	0,0280	0,0272	0,0281
H [dB]	-10,7362	-9,9008	-9,8736	-8,8204	-10,1177	-8,5579	-10,2933	-8,4714	-10,3566	-8,4625
ST_early[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_late[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_total[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. B.16: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.4.

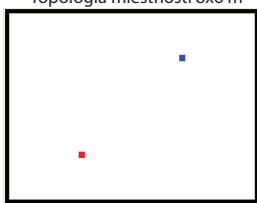
Topológia miestnosti 8x6 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C ₇ [dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf
C ₅₀ [dB]	6,9431	5,6468	7,2076	5,0265	7,3862	4,8457	7,6921	4,7530	7,8489	4,7421
C ₈₀ [dB]	15,2768	13,1136	13,5246	10,8228	13,4419	10,2534	13,3959	9,9969	13,3613	9,9670
D ₅₀	0,8310	0,7858	0,8397	0,7608	0,8451	0,7532	0,8542	0,7492	0,8587	0,7487
Ts [s]	0,0326	0,0366	0,0333	0,0392	0,0337	0,0404	0,0342	0,0414	0,0346	0,0415
H [dB]	- 6,9431	- 5,6468	- 7,2076	- 5,0265	- 7,3862	- 4,8457	- 7,6921	- 4,7530	- 7,8489	- 4,7421
ST_early[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_late[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_total[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. B.17: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.5.

Topológia miestnosti 8x6 m



Objektívny parameter	Maximálny rád odrazu									
	4		6		8		12		15	
	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda	Subj. metóda	Obraz. metóda
C ₇ [dB]	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf	- Inf
C ₅₀ [dB]	10,6176	8,0563	9,7581	7,1999	9,4328	6,9761	9,2705	6,8771	9,3235	6,8654
C ₈₀ [dB]	19,3808	14,9576	15,5301	12,0477	14,7770	11,4580	14,3820	11,2259	14,3370	11,2042
D ₅₀	0,9187	0,8647	0,9034	0,8399	0,8968	0,8329	0,8936	0,8297	0,8949	0,8293
Ts [s]	0,0275	0,0299	0,0296	0,0323	0,0308	0,0334	0,0321	0,0341	0,0326	0,0342
H [dB]	-10,6176	- 8,0563	- 9,7581	- 7,1999	- 9,4328	- 6,9761	- 9,2705	- 6,8771	- 9,3235	- 6,8654
ST_early[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_late[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ST_total[dB]	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

Obr. B.18: Hodnoty objektívnych parametrov pre rozmiestnenie č.6.