

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DATABÁZE IMPULSOVÝCH ODEZEV AKUSTICKÝCH PROSTORŮ S PARAMETRIZACÍ MNOHONÁSOBNÝCH ODRAZŮ

ACOUSTICAL ROOM IMPULSE RESPONSE DATABASE WITH PARAMETRIZATION OF SUBSEQUENT
REVERBERATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Šiška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Jakub Šiška

ID: 186636

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Databáze impulsových odezev akustických prostorů s parametrizací mnohonásobných odrazů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte metody pro měření impulsových odezev akustických prostor. Metody porovnejte a vyberte metodu vhodnou pro praktické provedení měření. Zdokumentujte aktuální databáze impulsových odezev, které jsou veřejně dostupné. Vytvořte vlastní databázi impulsových odezev pro účely testování různých metod modelování poslechového prostoru. Z částí impulsových odezev odpovídající mnohonásobným odrazům zvukové vlny vytvořte reliéfy doznívající energie EDR. Navrhněte algoritmus pro vhodnou parametrizaci EDR, který poskytne volitelnou sadu parametrů pro modelování dozvuku jak v kmitočtové, tak časové oblasti, které dostatečně popíší kmitočtově závislý průběh doznívání. Vyberte sadu vhodných impulsových odezev z databáze a modelujte je vhodným algoritmem využívajícím parametrizované EDR. Vše realizujte v Matlabu. Provedte poslechové testy, které ověří úspěšnost modelování impulsových odezev.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Stan, G.-B. Embrechts, J.-J. Archambeau, D. Comparison of Different Impulse Response Measurement Techniques. Journal of the Audio Engineering Society, Volume 50, 2002, no. 4, pp. 249-262, ISSN 0004-7554
- [2] Jot, J.-M. An analysis/synthesis approach to real-time artificial reverberation. Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1992. ICASSP-92 Proceedings, IEEE, ISBN 0-7803-0532-9

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

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

Konzultant:

prof. 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

Obsahom teoretickej časti tejto bakalárskej práce je popis impulznej odozvy, echogramu, rozbor rôznych metód pre meranie impulzných odoziev a ich porovnanie. Ďalej sú opísané objektívne parametre akustiky priestoru, analýza zvyškovej energie v impulznej odozve a jej kmitočtovo závislé zobrazenie pomocou reliéfu poklesu energie. Taktiež sú zdokumentované existujúce databázy impulzných odoziev. Praktická časť je tvorená realizáciou vlastnej databázy impulzných odoziev a grafickým vyobrazením rôznych závislostí z týchto odoziev. Ďalej je popísaný algoritmus pre parametrizáciu reliéfu poklesu energie a modelovanie impulzných odoziev podľa tohto algoritmu, realizované v programe Matlab. Poslednou časťou je posluchový test pre overenie modelovania impulzných odoziev.

Kľúčové slová

Impulzná odozva, EDR, doba dozvuku, priestorová akustika, MLS, Matlab

Abstract

Theoretical part of this bachelor's thesis discusses description of impulse response, echogram, various methods of impulse response measurement and their comparison. Next part includes describing objective acoustical parameters, remaining energy analysis and its frequency dependent visualization by energy decay relief. Furthermore, existing databases of impulse responses are documented. The practical part consists of realization of own database of impulse responses and various graphical visualizations computed from these impulse responses. In the next part, algorithm for energy decay relief parameterization and modeling of impulse responses is described and realized in Matlab software. In the last part, a listening test is performed to verify impulse response modeling.

Keywords

Impulse response, EDR, reverberation time, room acoustics, MLS, Matlab

Bibliografická citace:

ŠIŠKA, J. *Databáze impulsových odezev akustických prostorů s parametrizací mnohonásobných odrazů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 52 s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu na tému „Databáze impulsových odezev akustických priestorů s parametrizací mnohonásobných odrazů“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa

.....

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Miroslavovi Balíkovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa

.....
podpis autora

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

1	Úvod	1
2	Impulzná odozva, posluchové priestory	2
2.1	Metódy merania impulznej odozvy	5
2.1.1	Meranie pseudonáhodným signálom	5
2.1.2	Meranie obdĺžnikovým signálom s premennou dĺžkou pulzu	6
2.1.3	Meranie rozmetaným harmonickým signálom	6
2.1.4	Meranie viacnásobným harmonickým signálom s náhodnou fázou	9
2.1.5	Meranie pulzným zdrojom	9
2.1.6	Porovnanie metód merania a ich použitie v praxi	10
2.2	Objektívne parametre akustiky priestoru	12
2.3	Analýza zvyškovej energie v impulznej odozve	14
2.3.1	Rozdelenie signálu do kmitočtových pásiem	14
2.3.2	Aplikovanie reliéfu poklesu energie v závislosti na kmitočte	16
2.4	Databázy impulzných odoziev	17
2.4.1	Prehľad databáz	17
2.4.2	Parametre uvádzané v databázach	18
2.5	Vlastná databáza impulzných odoziev	20
3	parametrizácia a modelovanie impulznej odozvy v kritických pásmach	21
3.1	Vytvorenie reliéfov poklesu energie	21
3.1.1	Úprava impulzných odoziev z vlastnej databázy	21
3.1.2	Reliéf poklesu energie v závislosti na kmitočte	21
3.1.3	Reliéf poklesu energie pri použití kritických pásiem podľa Barkovej stupnice	23
3.2	Krivky dozvuku v pásmach podľa Barkovej stupnice	25
3.2.1	Vytvorenie kriviek dozvuku v pásmach podľa Barkovej stupnice	26
3.3	Modelovanie impulzných odoziev podľa kriviek dozvuku v pásmach podľa Barkovej stupnice	29
3.4	Výsledky modelovania impulzných odoziev	30
4	Záver	31
	Literatúra	32
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	34
	Zoznam príloh	35

Zoznam obrázkov

Obr.1 Aproximácia echogramu posluchového priestoru.....	3
Obr.2 Harmonické skreslenie pred začiatkom impulznej odozvy pri metóde LSS.....	7
Obr.3 Reliéf poklesu energie v závislosti na kmitočte, priestor typingroom.....	23
Obr.4 Reliéf poklesu energie pre pásma podľa Barkovej stupnice, priestor typingroom.....	24
Obr.5 Časti krivky dozvuku, prevzaté z [22]	25
Obr.6 Schröderov integrál a krivka dozvuku, priestor typingroom.....	27
Obr.7 Schröderov integrál a krivka dozvuku, priestor typingroom.....	28
Obr.8 Schröderov integrál a krivka dozvuku, priestor typingroom.....	28
Obr.7 Porovnanie priebehov pôvodnej a namodelovanej impulznej odozvy, priestor typingroom.....	30

Zoznam tabuliek

Tab.1 Hodnoty hladín akustického tlaku zvuku v mieste mikrofónu použiteľné podľa [3]	10
Tab.2 Hodnoty odstupu signálu od šumu použiteľné podľa [3]	10
Tab.3 Barkove pásma a ekvivalentná šírka ERB pásiem k stredným kmitočtom	15
Tab.4 Výber z databáz a ich parametre	19

1 ÚVOD

Akustické vlastnosti každého uzavretého priestoru sú odlišné. Impulzná odozva je jednou z týchto vlastností a opisuje výstup systému pri známom vstupe. Existuje viacero dôvodov na meranie impulznej odozvy, napríklad sa z nej dajú získať parametre na objektívne hodnotenie priestoru a zistenie jeho vhodného využitia. Tiež sa dá uskutočniť proces auralizácie za účelom simulovania priestoru, čo sa môže využiť pri spracovaní signálu v hudbe alebo pre vytváranie algoritmov pre sluchové pomôcky na zmenšenie dozvuku pre lepšie vnímanie reči.

V teoretickej časti tejto bakalárskej práce je popis impulznej odozvy, uzavretých priestorov, echogramu. Ďalej sú zhrnuté rôzne metódy merania impulzných odoziev a ich porovnanie. Nasleduje popis objektívnych parametrov akustiky priestoru, ako sú napríklad doba dozvuku, miera hlasitosti, zreteľnosť, a ich využitie. Ďalšia časť obsahuje analýzu zvyškovej energie v impulznej odozve, spôsoby rozdelenia kmitočtových pásiem a získanie reliéfu poklesu energie. V závere teoretickej časti sú zdokumentované databázy impulzných odoziev a informácie o parametroch uvádzaných v databázach.

Praktická časť spočíva vo vytvorení vlastnej databázy impulzných odoziev, vhodnej úprave týchto odoziev pre využitie pri zobrazení reliéfu poklesu energie a parametrizácii reliéfu poklesu energie pre modelovanie dozvuku, ktorá popíše kmitočtovo závislý priebeh doznievania. Po vytvorení namodelovaných impulzných odoziev je vykonaný posluchový test za účelom zistenia presnosti vytvorených odoziev oproti pôvodným odozvám.

2 IMPULZNÁ ODOZVA, POSLUCHOVÉ PRIESTORY

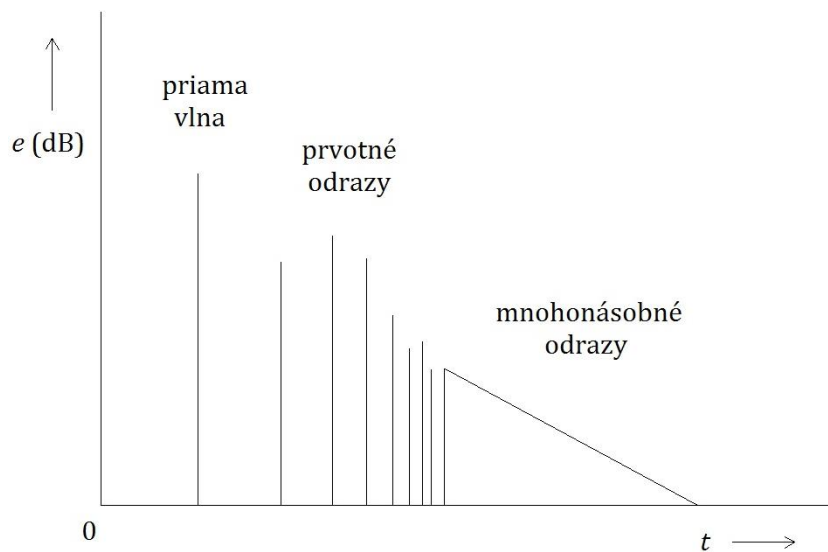
Impulzná odozva posluchovej priestory je jedna z jej najdôležitejších vlastností. Impulznú odozvu môžeme chápať ako charakteristiku systému, ktorý simuluje šírenie zvukových vln v posluchovom priestore s daným počtom vstupov a výstupov. Vstupy sú pre tento systém zdroje zvukového signálu, výstupy sú prijímače zvukového signálu, teda mikrofóny alebo uši. Základným prípadom je snímanie monofónneho zdroja zvuku jedným mikrofónom. Ide o systém s jedným vstupom a jedným výstupom. Pri viackanálovej reprodukcii zvuku pomocou I kanálov a snímaním zvuku počtom O mikrofónov sa jedná o systém s I vstupmi a O výstupmi.

Pre označenie miesta, v ktorom prebieha meranie impulznej odozvy sa používa pojem posluchová priestora. Pod pojmom priestora sa predstavuje prostredie ohraničené dvoma alebo tromi rozmermi alebo vymedzené iným spôsobom, zatiaľ čo priestor môže byť miesto vymedzené aj nevymedzené [1]. Preto priestora je presnejší pojem pre toto využitie.

Ak je priestora posluchová, znamená to uzavreté prostredie, v ktorom poslucháč vníma zvukový signál. V tomto prostredí sa berie do úvahy jeho charakteristika, napríklad vplyv stojatých vln, ktorý sa prejavuje najviac na nízkych kmitočtoch; vzájomná interferencia stojatých vln; umiestnenie reproduktorov; rozmiestnenie plôch spôsobujúcich difúziu zvukových vln, napríklad steny, okná, rôzne výklenky, klenby, materiály s väčšou pohltivosťou a iné; tvar a rozmery priestoru.

Tvar impulznej odozvy posluchového priestoru bol na základe poznatkov priestorovej akustiky a subjektívnych sluchových vnemov popísaný pomocou logaritmického obálky impulznej charakteristiky e (dB) - echogramu [2]. Typický tvar impulznej odozvy posluchovej priestory sa skladá z

- priamej vlny, ktorá dorazí k poslucháčovi priamo od zdroja signálu,
- prvotných odrazov (early reflections), sú to jasne počuteľné a lokalizovateľné odrazy zvuku prichádzajúceho k poslucháčovi po prvom odraze od stien posluchovej priestory,
- mnohonásobné odrazy, čo je zmes zvukových signálov prichádzajúcich do miesta posluchu po viacnásobných odrazoch od stien posluchovej priestory.



Obr.1 Aproximácia echogramu posluchového priestoru

Priama vlna dorazí od zdroja zvuku k poslucháčovi ako prvá. Má najmenšie skreslenie a šíri sa priamočiarno. Na pokles intenzity medzi poslucháčom a zdrojom zvuku má vplyv iba atmosférický útlm a charakter zdroja zvuku, to znamená aký druh vlnenia zdroj vyžaruje. S tým súvisí pokles akustického tlaku a intenzity zvuku s narastajúcou vzdialenosťou, ktorú zvukový signál prešiel. V echograme je vyjadrená ako prvý impulz najbližšie nulovej časovej polohe s najväčšou amplitúdou.

Prvotné odrazy tvoria v echograme blok impulzov, medzi ktorými je stredne veľký odstup a dajú sa rozoznať jednotlivé impulzy, ktoré vyjadrujú dopad jednotlivých odrazených lúčov. Ak je povrch, na ktorý vlna dopadá, ideálne odrazový, odrazená vlna je kópiou dopadajúcej vlny. Odrazená vlna je však na výstupe oneskorená a zoslabená, čo je dôsledkom dlhšej trajektórie šírenia a taktiež pohltivosťou materiálu povrchu. V tejto časti echogramu nastáva s pribúdajúcim časom lineárny pokles energie.

Mnohonásobne odrazené vlny sú kvôli dlhšej trajektórie ešte viac oneskorené a viac utlmené v dôsledku pohlcovaniu energie prekážkami. Jednotlivé impulzy sú natoľko zahustené, že splyývajú, čoho dôsledkom sa znázorňujú ako spojité spektrum klesajúcej energie v čase.

Na meranie impulzných odoziev sa používa niekoľko metód:

- Meranie pseudonáhodným signálom - medzi ne patrí stacionárny náhodný signál s Gaussovským rozložením (Maximum Length Sequence) a opakovaná inverzná sekvencia (Inverse Repeated Sequence);

- meranie obdĺžnikovým signálom s premennou dĺžkou pulzu (Time-Stretched Pulse);
- meranie rozmetaným harmonickým signálom – zahŕňa metódy logaritmicky rozmetaného harmonického signálu (Logarithmic Sine Sweep) a lineárne rozmetaného harmonického signálu (Time-Delay Spectrometry);
- meranie viacnásobným harmonickým signálom s náhodnou fázou (Random Phase Multisine).

Za predpokladu, že zdroj a prijímač budú stacionárne, posluchový priestor v ktorom sa budú nachádzať možno považovať za lineárny a časovo konštantný systém charakterizovaný impulznou odozvou $h(t)$. V priestorovej akustike je dôležité presné meranie impulznej odozvy, pretože sa z nej dá odvodiť veľa parametrov akustiky priestoru. Hlavnou používanou objektívnou veličinou je doba dozvuku, no z impulznej odozvy sa dajú vypočítať aj ďalšie veličiny opísané v 2.2. Okrem toho sa často aplikuje auralizácia, čo je konvolúcia získanej impulznej odozvy s ďalším zvukovým signálom. Pre získanie čo najlepšej kvality procesu auralizácie, zmeraná impulzná odozva by mala mať veľký odstup signálu od šumu, ideálne nad 80 dB [3].

Bežnou metódou pre meranie impulznej odozvy tohto akustického systému je použiť známy vstupný signál a zmerať výstup systému. K tomu sa používa dekonvolúcia, čo je inverzná operácia ku konvolúcii.

Konvolúcia je matematická funkcia, ktorá vyjadruje interakciu signálu a systému popísaného impulznou odozvou. Ľubovoľný vzorkovaný signál $x[-n], \dots, x[-1], x[0], x[1], \dots, x[n]$ sa dá vyjadriť ako postupnosť posunutých jednotkových pulzov vynásobených príslušnou funkčnou hodnotou. Vzťah pre diskretnú konvolúciu je

$$y[n] = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h[i] \cdot x[n - i], \quad (1)$$

kde $h[i]$ je impulzná charakteristika systému. Pri praktickej realizácii sa pre výpočet konvolúcie často používa algoritmus pre rýchlu Fourierovu transformáciu (FFT), ktorý je optimalizovaný z hľadiska výpočtovej rýchlosti [4].

Výber vstupného signálu a techniky dekonvolúcie pre získanie impulznej odozvy zo zmeraného výstupu má niekoľko dôležitých zásad: Vyžarovaný signál musí byť plne reprodukovateľný; Budiaci signál a technika dekonvolúcie musia zachovať čo najväčší odstup signálu od šumu zmeranej impulznej odozvy; Budiaci signál a technika dekonvolúcie musia umožniť odstránenie nežiadúcich nelineárnych prvkov skreslenia (artefaktov) pri dekonvolúcii impulznej odozvy.

Vo všeobecnosti sa odstup signálu od šumu dá zlepšiť získaním viacerých spriemerovaných meraného výstupného signálu pred začiatkom dekonvolúcie impulznej odozvy.

2.1 Metódy merania impulznej odozvy

Meranie akustickej impulznej odozvy pomocou MLS techniky bolo prvýkrát navrhnuté v roku 1979 a používa sa doteraz. O niečo neskôr bola navrhnutá technika merania impulzných odoziev IRS ako alternatíva, ktorá umožňovala teoreticky znížiť skreslenie prítomné pri použití MLS techniky. Po pár rokoch bol predstavený nový návrh na meranie impulzných odoziev, ktorý vyústil do techniky merania obdĺžnikovým signálom s premennou dĺžkou pulzu. Jedna z najnovších techník merania impulzných odoziev rozmetaným harmonickým signálom bola navrhnutá, aby sa predišlo limitáciám obsiahnutých v ostatných technikách, ako sú napríklad time-aliasing chyba, špičky skreslenia, vplyv dekonvolučného filtra.

2.1.1 Meranie pseudonáhodným signálom

Meranie impulznej odozvy pomocou sekvencie s maximálnou dĺžkou (Maximum Length Sequence, MLS) je založené na excitácii posluchového priestoru periodickým pseudonáhodným signálom, ktorý má takmer rovnaké stochastické vlastnosti ako biely šum. Počet vzoriek v jednej perióde pri N -tom ráde signálu je

$$L = 2^N - 1. \quad (2)$$

Impulzná odozva sa získa cyklickou vzájomnou koreláciou medzi meraným výstupným signálom a stanoveným vstupom (teda MLS signálom). Kvôli použitiu cyklickej operácie pre dekonvolúciu impulznej odozvy, MLS technikou dostaneme periodickú impulznú odozvu $h'[n]$, ktorá súvisí s lineárnou impulznou odozvou rovnicou

$$h'[n] = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} h[n + tL]. \quad (3)$$

Táto rovnica uvažuje aj so známym problémom, ktorý sa vyskytuje v MLS technike, a to tzv. chyba time-aliasing. Táto chyba je závažná, ak dĺžka periódy L je menšia ako dĺžka meranej impulznej odozvy, a preto rád MLS sekvencie musí byť dostatočne veľký nato, aby sa predišlo time-aliasing chybe [4].

Najväčší problém MLS metódy zohráva prítomnosť skreslenia nazývaného špičky skreslenia (distortion peaks). Tieto artefakty sú viac-menej rovnomerne rozložené po dekonvolvovanej impulznej odozve. Pôvod špičiek skreslenia sa

nachádza v nelinearitách vlastných meraciemu systému a hlavne reproduktoroch. Toto skreslenie produkuje charakteristický praskajúci zvuk, keď sa meraná impulzná odozva konvolvuje s bezodrazovým signálom pri realizácii procesu auralizácie. Špičky skreslenia môžu byť utlmené použitím vhodnej metódy merania, napríklad technikou opakovanej inverznej sekvencie (Inverse Repeated Sequence, IRS); alebo optimalizáciou niektorých meraných parametrov – v praxi je amplitúda excitačného signálu kompromis medzi zväčšujúcim sa skreslením pri vysokej úrovni a znižovaním odstupe signálu od šumu pri nízkych úrovniach.

Optimalizácia je časovo náročná kvôli obtiažnosti, ktorú predstavuje nájdenie vhodnej úrovne zosilnenia signálu. Zároveň musí byť vybratá vhodná úroveň signálu pre každý priestor, v ktorom sa meranie uskutočňuje.

Metóda inverznej opakovanej sekvencie využíva dve MLS sekvencie, pričom jedna z nich je inverzná k druhej,

$$x[n] = \begin{cases} mls[n], & \text{ak } n \text{ je párne, } 0 \leq n < 2L, \\ -mls[n], & \text{ak } n \text{ je nepárne, } 0 < n < 2L, \end{cases} \quad (4)$$

kde $mls[n]$ je pôvodná MLS sekvencia a n je číslo vzorky vo vzorkovacej perióde $2L$. Zároveň sa zdvojnásobuje čas, ktorý je potrebný na vykonanie merania. Proces dekonvolúcie je rovnaký ako pri MLS technike, cyklickou koreláciou.

Pseudonáhodný signál má v každom kmitočte rovnakú amplitúdu a náhodnú fázu.

2.1.2 Meranie obdĺžnikovým signálom s premennou dĺžkou pulzu

Táto metóda je založená na rozťahovaní a zužovaní impulzového signálu v čase. Dôvodom procesu rozťahovania excitačného signálu je, aby sa zväčšila hodnota vyžarovaného akustického výkonu pri stálom rozsahu tohto signálu, a vďaka tomu sa zväčší odstup signálu od šumu bez zosilnenia nelinearít spôsobených použitým meracím systémom [4].

Po odmeraní impulznej odozvy týmto signálom je použitý kompresný filter, aby sa vykompenzovali privedené zmeny dĺžok pulzu a získala dekonvolvovaná impulzná odozva. U impulznej odozvy meranej touto technikou špičky skreslenia absentujú, no iné artefakty nie sú kompletne zanedbateľné, ktoré vznikajú vplyvom dekonvolučného filtra.

2.1.3 Meranie rozmetaným harmonickým signálom

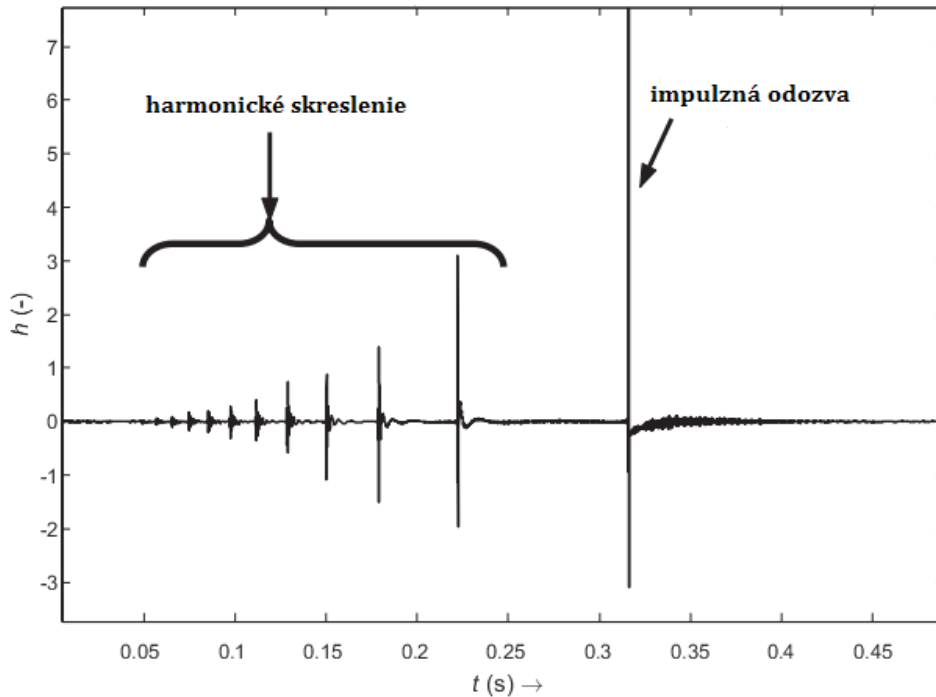
Pre použitie tejto metódy existujú dva druhy rozmetaných harmonických signálov – logaritmicke rozmetaný harmonický signál (Logarithmic Sine Sweep, LSS)

a lineárne rozmetaný harmonický signál (Time-Delay Spectrometry, TDS). Predošlé metódy sa opierali o predpoklad LTI systému u posluchového priestoru, a ak nebol splnený, dochádzalo k vytváraniu nežiadúcich artefaktov v dekonvolvovanej impulznej odozve.

Technika LSS toto obmedzenie prekonáva. Je založená na predstave, že pri použití LSS signálu s kmitočtom rastúcim od ω_1 pri $n = 0$ až po ω_2 pri $n = L - 1$ [5]

$$x(n) = \sin\left(\frac{\omega_1 \cdot (L - 1)}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)}\right) \cdot \left(e^{\frac{n}{L-1} \log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} - 1\right), \quad (5)$$

kde L je dĺžka meracieho signálu, je možné dekonvolvovať lineárnu impulznú odozvu systému a zároveň rozložiť impulznú odozvu na zložky s korešpondujúcimi rádmi uvažovaného harmonického skreslenia.



Obr.2 Harmonické skreslenie pred začiatkom impulznej odozvy pri metóde LSS

Proces dekonvolúcie impulznej odozvy sa realizuje pomocou lineárnej konvolúcie zmeraného výstupu s inverzným filtrom vytvoreným podľa pôvodného signálu

$$x^{-1}(n) = x(L - 1 - n) \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{\frac{-n}{L-1}}. \quad (6)$$

Ak má analýza časového priebehu rovnakú dĺžku ako vyžarovaný LSS signál, koncová časť impulznej odozvy sa môže stratiť, preto sa v praxi na koncovú časť LSS signálu pridáva ticho s dostatočnou dĺžkou.

Inverzný filter sa generuje nasledujúcim spôsobom: Rozmetaný signál sa dočasne invertuje a oneskorí, aby sa získal neurčitý signál. Táto zmena spôsobí zmenu polaritu fázového spektra. V takomto prípade konvolúcia obráteného signálu s pôvodným bude viesť k signálu s rovnakou fázou, ale amplitúda signálu sa zväčší na kvadrát pôvodnej hodnoty. Amplitúda výsledného signálu sa následne vydolí kvadrátom amplitúdy pôvodného LSS signálu.

Aby sa znížil účinok prechodných javov nadobudnutých z meracieho systému a nachádzajúcich sa na začiatku a na konci vyžarovania excitačného signálu, koncové časti rozmetaného harmonického signálu sú upravené - počiatočná časť má exponenciálny nárast amplitúdy, konečná časť má amplitúdu exponenciálne klesajúcu.

Pre vykonanie akustických meraní v celom počuteľnom rozsahu musí byť excitačný signál rozmetaný v rozmedzí 20 – 20000 Hz. Zároveň sa musia prechodné zložky nachádzať mimo počuteľného rozsahu, preto sa volí o niečo širšia kmitočtová oblasť 10 – 22000 Hz, kde 10 Hz je počiatočný kmitočet rozmetaného signálu a 22000 Hz koncový kmitočet.

Ďalšou metódou merania impulznej odozvy je meranie pomocou lineárne rozmetaného harmonického signálu (TDS). Táto metóda bola najskôr realizovaná s analógovými zariadeniami a zakladala sa na využití sledovacieho filtra v kmitočtovej oblasti. Neskôr sa ukázalo, že tento postup má limitácie a navrhlo sa, že priamou dekonvolúciou sa tieto limitácie obídu a výsledkom bude ideálna impulzná odozva, nezávislá na rýchlosti rozmetania signálu [6].

Cieľom pôvodnej TDS metódy bolo meranie iba počiatočnej časti impulznej odozvy, ideálne iba priameho signálu bez odrazov. Získanie takéhoto signálu sa dá dosiahnuť vytvorením filtra pásmovej priepuste nastaveného na daný kmitočet, nechať ho zapnutý počas trvania šírenia vlny k mikrofónu, a potom ho vypnúť. Následne sa reproduktor a filter preladí na ďalšiu frekvenciu a proces sa opakuje.

Pre meranie odozvy systému v nejakom kmitočtovom rozsahu by bolo nutné opakovať meranie pre každý kmitočet v danom rozsahu. Preto bola potrebná praktická metóda pre meranie všetkých kmitočtov v takomto pásme.

Jednou z možností je použitie lineárne rozmetaného harmonického signálu ako vstupného signálu. Takýto signál je vyjadrený

$$s(t) = \sin(k \cdot t^2), \quad (7)$$

kde k je rýchlosť rozmetania signálu (jednotka Hz/s). Signál začína na nulovom kmitočte a lineárne sa zvyšuje teoreticky až po polovičnú hodnotu vzorkovacieho kmitočtu.

Pretože je vstupný signál rozmetaný, filter sa musí tiež rozmetať rovnakou rýchlosťou, no rozmetanie filtra nastane s oneskorením oproti vstupnému signálu. Toto oneskorenie je rovné trvaniu šírenia vlny z reproduktora do mikrofónu a väčšinou je konštantné, pokiaľ sa nemení ich vzájomná poloha.

Lineárne rozmetaný harmonický signál má spektrum podobné bielemu šumu v jednotlivých kmitočtoch, no odstup signálu od šumu je pre nízke kmitočty o niečo horší. Preto sa začal používať spôsob, pri ktorom sa meranie rozdelilo na dva rozsahy kmitočtov. Prvá časť merania spočívala v odmeraní nízkych kmitočtov, pričom rýchlosť rozmetania bola o niečo nižšia. Následne druhá časť merania pokrývala stredné a vysoké kmitočty s vyššou rýchlosťou rozmetania. Táto metóda sa často využívala v Japonsku od 90. rokov minulého storočia.

2.1.4 Meranie viacnásobným harmonickým signálom s náhodnou fázou

Viacnásobný harmonický signál s náhodnou fázou (RPMS) je periodický signál, ktorého spektrum má presne určenú amplitúdu a náhodnú fázu [7]. Podľa [8] je definovaný ako signál skladajúci sa zo súčtu sínusoid

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A \cdot \cos(\omega_i t + \varphi_i). \quad (8)$$

Takýto signál má stochastické vlastnosti ako biely šum. Pri meraní akustických parametrov je lepšou voľbou použiť signál so zafarbením, konkrétne s vlastnosťami, aké má ružový šum.

Amplitúda signálu má normálne rozdelenie a činiteľ výkyvu (crest factor, pomer medzi maximálnou a efektívnou hodnotou signálu) má hodnotu 12 až 13 dB, pričom ďalším spracovaním môže byť znížený na hodnoty menšie ako 6 dB [7].

2.1.5 Meranie pulzným zdrojom

Ako excitátory signálu sa v tejto metóde používali napríklad prasknutie balónika alebo výstrel z pištole. Nahrávky týchto zvukov boli zväčša použiteľné bez ďalších úprav. Spektrá takýchto odoziev miestnosti mali nerovnomerné kmitočtové spektrum a nízky odstup signálu od šumu [6]. Akustické parametre ako dĺžka dozvuku alebo jasnosť sa dali z týchto nahrávok vypočítať, no nahrávky neboli použiteľné ako číslicové filtre v konvolučných reverboch.

2.1.6 Porovnanie metód merania a ich použitie v praxi

Porovnanie jednotlivých metód merania impulznej odozvy je opísané v [3], [5], [6], [7], [8].

V [3] sú porovnané metódy MLS, IRS, signál s premennou dĺžkou pulzu a LSS. Porovnanie týchto metód sa uskutočnilo v bezodrazovej miestnosti, aby sa docielila regulácia radu parametrov, ktoré mali významný vplyv na meranie, a tým sa umožnilo porovnanie metód z objektívneho hľadiska.

Použité parametre sú nasledovné: vzorkovacia frekvencia 44100 Hz; rád MLS a IRS signálov 16; hodnota výstupného zosilnenia signálu podľa Tab.1; doba trvania pulzu 1,5 s; počiatočné a koncové kmitočty pre rozmetaný signál 10 Hz a 22 kHz; doba trvania rozmetaného signálu 1,5 s; žiadne použité spriemerovanie hodnôt; úroveň šumu prostredia 30 dB.

Pre vykonanie objektívneho porovnania bolo potrebné určiť vhodný odstup signálu od šumu pre každú techniku. Najlepší pomer signálu od šumu má metóda LSS (tab.1), vďaka neprítomnosti žiadnych prvkov skreslenia v koncovnej časti impulznej odozvy. Maximálny odstup signálu od šumu pre 16 bitovú kvantizáciu signálu je 98 dB. Táto hodnota však nikdy nie je dosiahnuteľná, a to kvôli nežiadúcim vplyvom, ako sú akustický šum, elektrický šum meracieho systému, chyby kvantizácie alebo skreslenie spôsobené reproduktorom.

Tab.1 Hodnoty hladín akustického tlaku zvuku v mieste mikrofónu použiteľné podľa [3]

MLS	IRS	Signál s premennou šírkou pulzu	LSS
75,5 dB	75,5 dB	83,9 dB	92,5 dB

Výskum z roku 1995 ukázal [3], že odstup signálu od šumu MLS sekvencie sa zvýši o 3 dB, keď sa dĺžka periódy sekvencie zdvojnásobí. Kvôli tomu je odstup signálu od šumu IRS techniky o približne 3 dB vyšší ako MLS technika (tab.2), keďže dĺžka IRS sekvencie je dvojnásobná ako MLS sekvencia rovnakého rádu.

Značný nárast odstup šumu od signálu pre metódu signálu s premennou dĺžkou pulzu od IRS metódy je spôsobený použitím vyššej optimálnej hodnoty akustického tlaku a taktiež zánikom rušivých špičiek skreslenia. Najlepší odstup signálu od šumu má LSS signál vďaka absencii akýchkoľvek nelinearití skreslenia.

Tab.2 Hodnoty odstup signálu od šumu použiteľné podľa [3]

MLS	IRS	Signál s premennou šírkou pulzu	LSS
60,5 dB	63,2 dB	77,0 dB	80,1 dB

Metódy merania pseudonáhodným signálom sú najvhodnejšie pre rušné miestnosti alebo exteriéry vďaka žiadnemu vplyvu od ostatných šumov, nízkemu

optimálnemu akustickému tlaku a ich farbe zvuku. Nevýhodou je dlhá doba kalibrácie pre získanie optimálnych parametrov a prítomnosť špičiek skreslenia.

Signál s premennou dĺžkou pulzu nevytvára špičky skreslenia, no iné nelinearity sú prítomné. Farba signálu a vysoká hodnota optimálneho výstupného akustického tlaku robí túto metódu nepoužiteľnú pre miestnosti s prítomnosťou nezanedbateľných ruchov.

LSS signál poskytuje najlepší odstup signálu od šumu a žiadne skreslenie, a preto je vhodný pre meranie impulzných odoziev v prázdnych a tichých miestnostiach. Taktiež nepotrebuje zdĺhavú kalibráciu pre optimálne meranie.

V [5] boli porovnané metódy MLS, LSS a TDS. Metóda MLS má nízke požiadavky na výpočtový výkon, ako vytvorenie signálu pre meranie, tak aj vzájomná korelácia používajú efektívne algoritmy. LSS signál poskytuje lepšiu presnosť pre nízke kmitočty na úkor vysokých kmitočtov, čo môže mať väčší úžitok, keďže to lepšie vystihuje ľudské vnímanie zvuku. Nevýhoda tejto metódy je nenulová najnižšia hodnota frekvencie, pod ktorou nie je možné zmerať impulznú odozvu. Nároky na výpočty sú vyššie, hlavne na konvolúciu, ktorú je potrebné vypočítať. U metódy TDS nie je pri dekonvolúcii potrebná korelácia, iba násobenie meracím signálom. Nevýhodou je možnosť merania iba krátkych impulzných odoziev, keďže pri meraní dlhších odoziev nastávajú problémy a preto nemá táto metóda ďalšie výhody oproti ostatným.

V [6] sa porovnávali metódy pulzných zdrojov, MLS, TDS, LSS signálov. Autor považuje používanie metódy LSS za najvhodnejšiu na meranie impulzných odoziev, ako aj na charakterizáciu prenosových funkcií nelineárnych a v čase premenných zariadení ako sú kompresory alebo flangery.

Autori v [7] porovnávali metódy MLS, RPMS s charakteristikami bieleho a ružového šumu a LSS. Výsledky ukázali, že pri vyššom odstupe signálu od šumu sa javí ako najlepšia metóda LSS a pri nižšom odstupe signálu od šumu bol najvhodnejší signál RPMS s charakteristikou ružového šumu.

V [8] autor porovnal MLS a RPMS metódy. MLS metóda je oproti RPMS lepšia, keď merací systém je širokospektrálny a lineárny. RPMS signál je výhodnejší, ak sú v systéme prítomné nelinearity, čo nastáva pri takmer všetkých meraniach impulznej odozvy. Metóda RPMS je jednoduchá na realizáciu, pretože všetko spracovanie, tvorba signálu a odhad impulznej odozvy sa dá realizovať použitím FFT.

V zásade, najpoužívanejšie meracie metódy sú LSS a MLS. V praxi sa na meranie impulzných odoziev používajú aj pulzné zdroje, no ich kmitočtová charakteristika je nevyhovujúca, ak má byť meranie čo najpresnejšie. Z tohto pohľadu ponúkajú ostatné metódy - IRS, signál s premennou dĺžkou pulzu, TDS,

RPMS - parametre budiaceho signálu podobné ako pri LSS a MLS, no pri meraniach v dnešnej dobe sa takmer nepoužívajú.

2.2 Objektívne parametre akustiky priestoru

Počas evolúcie oboru architektonickej akustiky vznikla potreba pre vytvorenie skupiny parametrov popisujúcich akustickú odozvu miestnosti. Je známe, že ľudské vnímanie zvuku je subjektívne, preto tieto parametre musia byť objektívne merateľné. Najdôležitejšie parametre sú uvedené v norme ISO 3382 [9].

Doba dozvuku (Reverberation Time) je najznámejší parameter, definovaný ako čas potrebný na pokles akustického tlaku o 60 dB po vypnutí zvukového zdroja. Rýchlosť poklesu je určená priamkou preloženou poklesom hladiny dozvuku v úseku od -5 dB po -35 dB od počiatočnej hodnoty pre T_{30} . Ak sa zmení koncová hodnota poklesu na -25 dB, získa sa T_{20} . Rýchlosť poklesu je teda iba v rozsahu 30 (respektíve 20) dB, no doba dozvuku sa uvádza vždy ako čas poklesu o 60 dB (T_{60}). Ak je pokles v týchto medziach lineárny, potom $T_{30} = T_{20} = T_{60}$.

Počiatočná doba dozvuku (Early Decay Time) sa tiež získava z priamky preloženej poklesom hladiny dozvuku, no v rozmedzí 0 až -10 dB od počiatočnej hladiny akustického tlaku dozvuku. Následne sa vypočíta ako doba poklesu o 60 dB. EDT je dôležitejšie zo subjektívneho hľadiska a súvisí s vnímaným dozvukom priestoru, zatiaľ čo RT sa týka fyzikálnych vlastností posluchového priestoru [10].

Nasledujúce parametre sa týkajú priestorovosti zvukového zdroja. Pre získanie priestorových informácií musí systém obsahovať mikrofóny s všesmerovou a osmičkovou charakteristikou. Následne je možné vypočítať parametre ako postranná časť energie (Lateral Energy Fraction)

$$LF = \frac{\int_{5\text{ ms}}^{80\text{ ms}} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80\text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (9)$$

Tento parameter vyjadruje pomer postrannej časti energie $p_L(t)$ voči celkovej energii $p(t)$, ktorá putuje k poslucháčovi. Zložka $p_L(t)$ je časť signálu, ktorú zachytí osmičkový mikrofón otočený tak, aby došlo k minimalizovaniu snímania priameho signálu. $p(t)$ je celkový signál snímaný všesmerovým mikrofónom [9]. Podobný parameter je kosínus postrannej časti energie (Lateral Fraction Cosine)

$$LFC = \frac{\int_{5\text{ ms}}^{80\text{ ms}} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_0^{80\text{ ms}} p^2(t) dt}, \quad (10)$$

ktorý vyplýva z toho, že osmičková charakteristika zachytáva každú odrazenú vlnu s postrannou energiou rovnou druhej mocnine kosínusu uhla dopadu odrazenej vlny vzhľadom na os najväčšej citlivosti mikrofónu.

Priestorový efekt sa dá zmerať parametrom neskorá postranná časť energie (Late Lateral Sound Energy), definovaná

$$LG_{80,\infty} = 10 \log \frac{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p_L^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt}, \quad (11)$$

kde $p_{10}(t)$ je okamžitý akustický tlak impulznej odozvy meraný vo vzdialenosti 10 m vo voľnom poli (priestor bez odrazov). Tento parameter súvisí s vnímanou priestrannosťou posluchovej miestnosti.

Miera hlbokých tónov (Bass Ratio, BR) opisuje podporu hlbokých tónov doznievania v miestnosti. Určí sa z pomeru sčítania dĺžok dozvuku v oktávových pásmach 125 a 250 Hz voči dobám dozvuku v pásmach 500 a 1000 Hz. Miera vysokých tónov (High Frequency Ratio) je podobná BR, no oktávové pásma v čitateli vzťahu sú 500 a 1000 Hz namiesto 125 a 250 Hz, a v menovateli 2000 a 4000 Hz namiesto 500 a 1000 Hz.

Zrozumiteľnosť (Clarity, C_T), zreteľnosť (Definition Index, D_{50}) a stredový čas (Center Time, T_s) sú parametre vyjadrujúce vyváženie medzi zložkami energie, ktoré k poslucháčovi dorazia skôr alebo neskôr. Sú dôležité na zisťovanie subjektívnej zrozumiteľnosti zvuku. C_T je definovaná ako pomer zvukovej energie, ktorá dorazí k poslucháčovi do času T k energii, ktorá dorazí po tomto čase. D_{50} je pomer zvukovej energie prichádzajúcej do času 50 ms voči celkovej energii signálu. Používa sa menej často než C_T . T_s je čas ťažiska impulznej odozvy a vypovedá o priestorovom dojme a jasnosti zvukového signálu [10].

Miera hlasitosti (Sound Strength, G) súvisí so subjektívnym vnímaním hlasitosti. Je to pomer akustického tlaku impulznej odozvy voči akustickému tlaku impulznej odozvy vo vzdialenosti 10 m od zdroja zvuku vo voľnom poli.

Miera doznievania (Reberberance Measure, H) súvisí s dojmom dozvukového priestoru. Je vyjadrená ako inverzná hodnota parametra C_T , keď T je 50 ms.

Činiteľ interaurálnej vzájomnej korelácie (InterAural Cross correlation Coefficient, IACC) súvisí s priestorovým dojmom, je definovaný ako maximálna hodnota vzájomnej korelácie medzi dvoma signálmi, ktoré putujú do binaurálneho mikrofónu, respektíve uší, a tým sa zistí miera priestorovosti [9].

Akustická podpora pódia (Stage Support Factor, ST) charakterizuje prenos zvuku na pódiu medzi hudobníkmi. Je definovaná ako pomer energii zvuku v intervaloch 0 až 10 ms a 20 až 100 ms.

Ďalšie parametre nie sú uvedené v norme ISO 3382 alebo sa nepoužívajú. Počiatočné oneskorenie (Initial Time Delay Gap) je oneskorenie prvých odrazov od stien za priamym signálom. ITDG sa určuje pre celú miestnosť z impulznej odozvy v strede miestnosti na jej pozdĺžnej ose. Echo kritérium (Echo Criterion) je interpretované ako prítomnosť vnímateľnej ozveny. Index difúzie povrchu (Surface Diffusion Index) zisťuje rozptýlenosť a pohltivosť miestnosti. Namiesto neho sa dnes používa IACC.

2.3 Analýza zvyškovej energie v impulznej odozve

Zvyšková energia v impulznej odozve má odlišnú charakteristiku pre každý meraný priestor. Znázornenie tejto energie sa nazýva reliéf poklesu energie (Energy Decay Relief) a zobrazuje zmeny poklesu energie v čase v jednotlivých kmitočtových pásmach. Doba dozvuku sa získa z krivky poklesu energie (Energy Decay Curve), ktorá sa rovná zvyškovej energii v impulznej odozve $h(t)$ po čase t [11]

$$EDC(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau. \quad (12)$$

Výpočet EDC cez $h(t)$ má výhodu, keď ho chceme zistiť pre nejaké kmitočtové pásmo, pretože stačí jedno meranie impulznej odozvy a pred výpočtom EDC sa filtruje pásmovou priepusťou, teda až po ukončení merania. V tom prípade nie je potrebné vykonať sériu meraní klasickou metódou s pásmovou priepusťou pre každé pásmo, takéto meranie je časovo náročné.

2.3.1 Rozdelenie signálu do kmitočtových pásiem

EDC je možné zistiť pre rôzne kmitočtové pásma pomocou filtrovania impulznej odozvy. Podľa [13] existuje niekoľko metód rozdelenia kmitočtových pásiem:

- Lineárne delenie – frekvenčný rozsah sa rovnomerne rozdelí do rovnako veľkých pásiem (konštantná šírka pásma).
- Logaritmické delenie - patria sem oktávové, tretinovo- a šestinovooktávové kmitočtové delenia (lineárne rastúca šírka pásma), používajú sa v kmitočtových pásmových filtroch. Pri oktávovom filtri má nasledujúce pásmo dvojnásobnú šírku a dvojnásobný stredný kmitočet, podobne to je aj u tretinovo- a šestinovooktávovom delení. Hranice pásiem sú presne definované.
- Klasické kritické kmitočtové pásma (Critical Band), Barkove pásma – pásma zistené experimentálne a najviac sa približujúce subjektívnemu vnímaniu. Kritické pásmo je definované ako najširšie frekvenčné pásmo, v ktorom je hlasitosť pásma zvuku s konštantnou hladinou akustického

tlaku nezávislá na šírke pásma. Pre kmitočty do 500 Hz je delenie pásiem lineárne, na vyšších kmitočtoch sa pásma delia logaritmicky. Nevýhodou je nedostatočné delenie na nízkych kmitočtoch, a z toho vyplývajúce nízke rozlíšenie.

- Kritické kmitočtové pásma ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth) – na nízkych kmitočtoch majú vyššie rozlíšenie; ERB je korešpondujúca šírka pásma pre stredný kmitočet f (kHz) [13]. Definuje sa vzťahom

$$ERB = 6,23f^2 + 93,39f + 28,52, \quad (13)$$

Tab.3 Barkove pásma a ekvivalentná šírka ERB pásiem k stredným kmitočtom

Barkova stupnica (bark)	Stredný kmitočet (Hz)	Šírka pásma (Bark)		Šírka pásma (ERB) (Hz)
		(Hz)	(%)	
1	50	100	200	33
2	150	100	67	43
3	250	100	40	52
4	350	100	29	62
5	450	110	24	72
6	570	120	21	84
7	700	140	20	97
8	840	150	18	111
9	1000	160	16	130
10	1170	190	16	150
11	1370	210	15	170
12	1600	240	15	200
13	1850	280	15	220
14	2150	320	15	260
15	2500	380	15	300
16	2900	450	16	350
17	3400	550	16	420
18	4000	700	18	500
19	4800	900	19	620
20	5800	1100	19	780
21	7000	1300	19	990
22	8500	1800	21	1300
23	10500	2500	24	1700
24	13500	3500	26	2400

2.3.2 Aplikovanie reliéfu poklesu energie v závislosti na kmitočte

Samotné rozdelenie impulznej odozvy na kmitočtové pásma je nedostatočné pre analýzu a syntézu impulznej odozvy. Preto boli vymyslené príslušné metódy pre spracovanie impulznej odozvy a ich vhodné použitie do grafu EDR.

Za predpokladu, že časovo-kmitočtová distribúcia $\rho(t, f)$ popisuje časovú zmenu energie na každom kmitočte, sa navrhuje vykonať spätná integrácia tejto distribúcie pre získanie EDC každého kmitočtu. Distribúcia $\rho(t, f)$ má niekoľko rôznych podôb s odlišnými vlastnosťami (STFT, Wigner-Villova distribúcia) [12]. Podľa teórie Schröderovho integrálu sa impulzná odozva najprv spracuje s vhodným kmitočtovým filtrom, vypočíta sa Schröderov integrál a z neho je možné zistiť ďalšie parametre akustiky priestoru. Tento postup sa opakuje pre každé kmitočtové pásmo [9].

Pre ρ sú kladené niektoré vlastnosti:

- Kvadrát impulznej odozvy sa získa sčítaním $\rho(t, f)$ každého kmitočtu;
- Kvadrát Fourierovej transformácie $h(t)$ sa získa sčítaním $\rho(t, f)$ v každom časovom okamihu;
- Upravenie h dátovým oknom v kmitočtovej oblasti je rovné aplikovaniu rovnakého okna na každé okamžité energetické spektrum $\rho(t, f)$;
- Nastavenie $h(t)$ v čase od 0 do τ je ekvivalentné nastaveniu $\rho(t, f)$ v čase od 0 do τ .

Z týchto obmedzení sa EDR dá vyjadriť

$$EDR(t, f) = \int_t^{+\infty} \rho(\tau, f) d\tau, \quad (14)$$

z čoho je $EDR(t, f)$ definovaný ako kmitočtová distribúcia zvyškovej energie v impulznej odozve po čase t [11].

Jedným zo spôsobov distribúcie ρ je spektrogram (krátkodobé spektrum). Tento spôsob má realizáciu výpočtov cez FFT a výsledok výpočtu EDR závisí na dĺžke a type použitého okna.

Pre EDR v nadväznosti na EDC a spektrogram sú podľa [12] kladené vlastnosti:

- Integrácia $EDR(t, f)$ podľa kmitočtu sa musí rovnať krivke $EDC(t)$ impulznej odozvy;
- Integrácia $EDR(t, f)$ podľa času sa musí rovnať kvadrátu absolútnej hodnoty Fourierovej transformácie impulznej odozvy;

- Spektrálne rozloženie energie je definované EDR reliéfom v čase 0, rozšírenie na akýkoľvek čas vyžaduje orezanie impulznej odozvy vynásobením $h(t)$ jednotkovým skokom posunutým v čase.

Distribúcia $\rho(t, f)$ potom odpovedá Pageovej distribúcii $P^+(t, f)$ [11]

$$EDR(t, f) = \int_t^{+\infty} P^+(\tau, f) d\tau = \left| \int_t^{+\infty} h(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \right|^2. \quad (15)$$

EDR sa dá získať priamo z druhej mocniny STFT s časovým oknom dostatočne dlhým na zobrazenie celej impulznej odozvy. Výsledkom bude graf s veľkým rozlíšením vo frekvenčnej oblasti za cenu vysokého výpočtového výkonu, ktoré bude treba decimovať (znižovanie počtu vzoriek vzorkovaného signálu) pred vykreslením EDR.

Pri absencii meracieho šumu sa porovnateľný výsledok dá dosiahnuť spätnou časovou integráciou STFT umocnenej na druhú, preloženú adekvátnym oknom.

Ak je merací šum prítomný, je výhodné sčítavanie kvadrátov STFT, aby sa znížilo skreslenie krivky poklesu zapríčineným energiou šumu na konci impulznej odozvy. Tento postup sa nastaví tak, aby sa lokálne spektrum energie pridalo len v kmitočtoch, kde je vyššie ako šumové spektrum.

2.4 Databázy impulzných odoziev

Pre účely získania EDR je potrebné mať samotné impulzné odozvy. V prípade nemožnosti odmerania vlastných impulzných odoziev ich preto treba zaobstarať iným spôsobom. Na internete sa dajú nájsť rôzne databázy, či už komerčné alebo nekomerčné. Komerčné databázy sú často použiteľné len s produktom výrobcu danej databázy kvôli uloženiu impulzných odoziev do vlastného formátu kompatibilným s daným produktom. Slobodne šíriteľné (open source) databázy naproti tomu ponúkajú impulzné odozvy v najpoužívanejších formátoch, podporujúcich veľké množstvo aplikácií. Ich nevýhodou je často nižšia kvalita impulzných odoziev než u komerčných databáz a horšia dokumentácia.

2.4.1 Prehľad databáz

Známejšie komerčné databázy zahŕňajú databázu od firiem Altiverb [14], Waves [15] a Avid [16]. Všetky sa dajú používať iba v ich vlastných reverb pluginoch. Tieto databázy obsahujú veľké množstvo impulzných odoziev z priestorov na celom svete, medzi ktoré patria napríklad operný dom v Sydney, katedrála v Notre Dame, Berlínska filharmónia, komora vnútri pyramídy v Gize, staroveké grécke

divadlá, hokejový štadión alebo jaskyne. K väčšine priestorov sú k dispozícii fotografie a plány, informácie o použitých meracích zariadeniach a metódach merania.

Nekomerčné databázy sú početnejšie, no každá obsahuje menší počet zmeraných priestorov a impulzných odoziev. Databáza MARDY (Multichannel Acoustic Reverberation Database at York) obsahuje impulzné odozvy z jednej miestnosti osadenej sériou pohyblivých akustických panelov schopných meniť odrazivosť miestnosti [17]. Databáza AIR (Aachen Impulse Response) je séria impulzných odoziev z menších miestností meraných na figuríne hlavy. Kvôli vplyvu hlavy na charakteristiku impulznej odozvy a natočeniu mikrofónov je menej vhodná na použitie [18]. Databáza C4DM (Centre for Digital Music) zahŕňa impulzné odozvy z troch rôzne veľkých priestorov a rôznych vzdialeností snímacieho zariadenia od zdroja signálu [19]. Databáza Open AIR Library obsahuje impulzné odozvy zmeraných v približne šesťdesiatich priestoroch po celom svete rôznymi metódami a vybavením [20].

Ďalšie databázy obsahujú impulzné odozvy z gitarových komb alebo hardvérových reverbov [21], ako sú napríklad Lexicon PCM90, Bricasti M7, Lexicon 480L, no tieto impulzné odozvy sú umelo vytvorené a neobsahujú informácie o simulovanom priestore, niektoré databázy obsahujú iba samotné impulzné odozvy bez ďalších informácií.

2.4.2 Parametre uvádzané v databázach

Typickými informáciami je počet kanálov impulznej odozvy, použitá mikrofónová technika, bitová hĺbka, vzorkovací kmitočet, excitačný signál.

Ďalším parametrom je priestor v ktorom sa získava impulzná odozva. Podľa typu priestoru sa dá odhadnúť dĺžka impulznej odozvy, napríklad koncertné sály alebo katedrály majú zväčša väčší objem, a to má dopad na väčšiu vzdialenosť, ktorou sa zvuk môže šíriť a dlhší dozvuk. Ďalším parametrom je teda objem priestoru, respektíve aspoň rozmery priestoru, z ktorých sa dá objem vypočítať. Z objemu miestnosti sa dá odvodiť parameter t_{SR} , ktorý sa dá definovať ako začiatok časti mnohonásobných odrazov od počiatku impulznej odozvy

$$t_{SR} \approx \sqrt{V}, \quad (16)$$

kde V je objem priestoru. Z objemu a RT_{60} sa dá získať Schröderov kmitočet

$$f_{sch} = 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}, \quad (17)$$

čo je kmitočet, nad ktorým sa budú vlastné módy (kmitočty) miestnosti blízko seba prekrývať a obmedzia sa špičky, ktoré ovplyvňujú kmitočtovú charakteristiku priestoru v danom mieste snímania.

V tab. 4 je výber z nekomerčných databáz a ich parametrov. Databázy MARDY, AIR, C4DM a Open AIR sú popísané dostatočne; Lexicon, M7 a Echo Thief nenesú informácie o mikrofónových technikách, excitačnom signáli a ani rozmeroch alebo objemoch priestorov. Databáza AIR síce obsahuje potrebné informácie, no impulzné odozvy sú uložené ako .mat súbory, zatiaľ čo ostatné databázy sú v štandardnom formáte .wav.

Tab.4 Výber z databáz a ich parametre

Databáza	MARDY	AIR	C4DM	Open AIR	Lexicon	M7	Echo Thief
Kanály	1	rôzne	rôzne	rôzne	2	2	2
Mikrofónová technika	-	rôzne	rôzne	rôzne	-	-	-
Bitová hĺbka (bit)	32	24	32	rôzne	24	24, 32	32
Vzorkovací kmitočet (kHz)	48	48	96	rôzne	44,1	44,1; 48	44,1
Excitačný signál	MLS	MLS	LSS	rôzne	-	-	-
Typ priestoru	nahrávací miestnosť	rôzne	rôzne	rôzne	rôzne	rôzne	rôzne
Objem miestnosti, rozmery	áno	áno	rôzne	rôzne	nie	nie	nie

2.5 Vlastná databáza impulzných odoziev

Vlastná databáza je tvorená z výberu impulzných odoziev z databáz MARDY a Open AIR. Táto databáza obsahuje 32 impulzných odoziev zo 14 rôznych priestorov. Impulzné odozvy majú rôzny charakter.

Niektoré boli nasnímané v miestnostiach s malým vnútorným objemom, čas dozvuku v týchto priestoroch má hodnoty do 1 s. Ďalšie odozvy boli vytvorené v priestoroch hál. Veľkosť doby dozvuku v týchto priestoroch sa pohybuje v rozmedzí od 1 až do 10 s, čo vyplýva z povahy priestorov - veľký vnútorný objem a holé steny, ktoré podporujú odrazivosť zvuku.

Časť odoziev bola nahratých v nahrávacích miestnostiach. Tieto priestory sú menšie a upravené akustickými prvkami, ktoré znižujú dozvuk miestnosti. Jedna z miestností je varechoická – sú v nej nainštalované pohyblivé akustické prvky, ktoré dokážu meniť odrazy v miestnosti ich rozostavením, a tým upravovať celkový dozvuk miestnosti. Doba dozvuku v týchto priestoroch má hodnoty do 1 s.

V priestoroch sál sú objemy a doby dozvuku rôzne, medzi zmerané priestory patria konferenčné miestnosti, školská trieda, športová hala, otvorená kancelária, alebo sklad.

3 PARAMETRIZÁCIA A MODELOVANIE IMPULZNEJ ODOZVY V KRITICKÝCH PÁSMACH

Parametrizácia impulznej odozvy je predpokladom pre jej modelovanie. Pri parametrizácii sa určia viaceré charakteristické veličiny a z určeného rozmedzia hodnôt týchto veličín a ďalším spracovaním sa vykoná modelovanie novej impulznej odozvy. Cieľom modelovania je získať novú impulznú odozvu, ktorá sa bude jej vlastnosťami podobáť, prípadne bude rovnaká, ako pôvodná odozva. Tá slúži ako „predloha“ pre získanie vybraných parametrov a následné modelovanie.

3.1 Vytvorenie reliéfov poklesu energie

3.1.1 Úprava impulzných odoziev z vlastnej databázy

Pre získanie čo najpresnejšej analýzy museli byť impulzné odozvy dodatočne upravené. Väčšina súborov s odozvami obsahovala pred začiatkom samotnej odozvy úsek vzoriek, ktoré neboli súčasťou impulznej odozvy. Často mali podobu šumu prostredia, v ktorom bolo vykonané meranie impulznej odozvy a tento šum je pre ďalšie spracovanie nežiadúci. Tieto vzorky som pre každú impulznú odozvu odstránil pomocou voľne dostupného programu Audacity, a takto upravené odozvy sú v databáze nazvané s príponou *-edit*.

Ďalšia úprava spočívala v odstránení prvotných odrazov z upravených odoziev s príponou *-edit*. Pre parametrizáciu a modelovanie impulznej odozvy sa bude využívať hlavne časť s mnohonásobnými odrazmi, keďže prvotné odrazy sú omnoho náročnejšie na analýzu a presné modelovanie. Odstránenie prvotných odrazov som vykonal taktiež v programe Audacity podľa posluhu a takto upravené odozvy sú nazvané s príponou *-late*. Časový rozdiel medzi okamihom začiatku impulznej odozvy a počiatkom mnohonásobných odrazov je zaznamenaný v tabuľkovom súbore info.xlsx pre každú odozvu.

3.1.2 Reliéf poklesu energie v závislosti na kmitočte

Na začiatku skriptu sa po jeho spustení otvorí dialógové okno, v ktorom sa vyberie .wav súbor s impulznou odozvou, ktorej priebeh sa má analyzovať pre parametrizáciu a modelovanie. Získa sa celkový priebeh odozvy po jednotlivých vzorkách spolu so vzorkovacím kmitočtom, z ktorých sa následne vypočíta celkové trvanie súboru s odozvou a časový vektor obsahujúci okamihy jednotlivých vzoriek v čase.

Následne sa vypočíta cez spektrogram $\rho(t, f)$ s distribúciou STFT [12] spektrálna analýza danej odozvy, z ktorej sa potom analyzuje priebeh jednotlivých kmitočtových pásiem pre reliéf poklesu energie. Pre tento výpočet potrebujú byť zadefinované vstupné veličiny, ako sú napríklad typ váhovacieho okna, dĺžka váhovacieho okna a vektor tejto dĺžky, prekrytie a počet bodov diskkrétnej Fourierovej transformácie. Ako typ váhovacieho okna som zvolil Hannovo okno, dĺžku okna 512 vzoriek a prekrytie 50%. Počet bodov diskkrétnej Fourierovej transformácie je závislý na vzorkovacom kmitočte a pri každej odozve je odlišný.

Po vypočítaní spektrogramu je potrebné určiť pásmo kmitočtov, v ktorom sa vypočíta echogram. Pre EDR v závislosti na kmitočte je vybraté pásmo 0 – 20 kHz.

Ďalej sa prepočíta zobrazenie hladiny akustického tlaku v dB namiesto bezrozmerného ekvivalentu výkonu

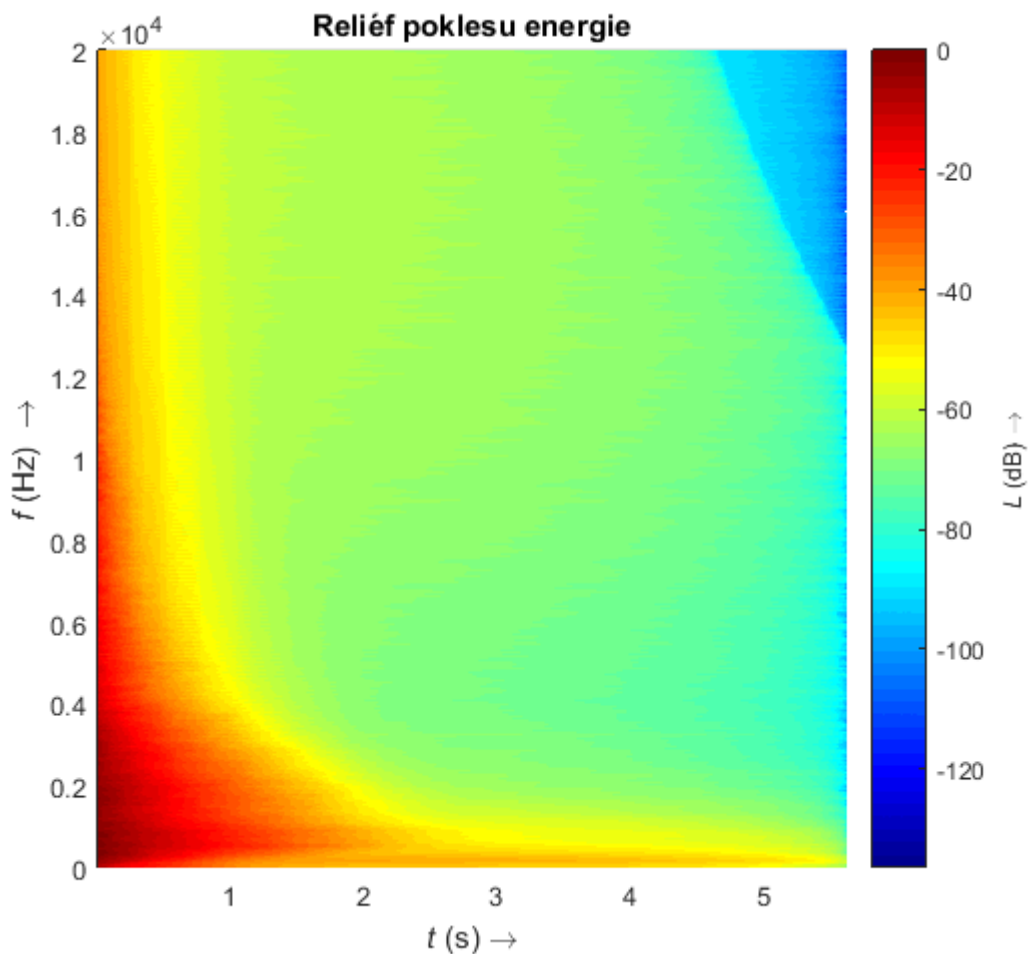
$$L = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_0}, \quad (18)$$

kde I je intenzita zvuku a referenčná hodnota intenzity $I_0 = 10^{-12}$ (W/m²). Následne prebehne normalizácia špičkovej hodnoty amplitúdy na 0 dB

$$L_{\text{norm}} = L - L_{\text{max}}, \quad (19)$$

kde L_{max} je maximálna špičková hodnota intenzity.

Z týchto údajov sa potom podľa (14) vykreslí EDR.



Obr.3 Reliéf poklesu energie v závislosti na kmitočte, priestor typingroom

3.1.3 Reliéf poklesu energie pri použití kritických pásiem podľa Barkovej stupnice

Priebeh skriptu pre túto časť je po výpočet spektrogramu rovnaký ako pre EDR v závislosti na kmitočte, potom sa zmení pásmo kmitočtov pre ďalšie výpočty na 0 – 15,5 kHz, keďže kmitočet 15500 Hz je najvyšší kmitočet posledného, 24. pásma Barkovej stupnice. Potom sú pridané vektory stredných a hraničných kmitočtov Barkových pásiem a vektor obálky pre hodnoty akustického výkonu pre jednotlivé kmitočty vypočítané spektrogramom.

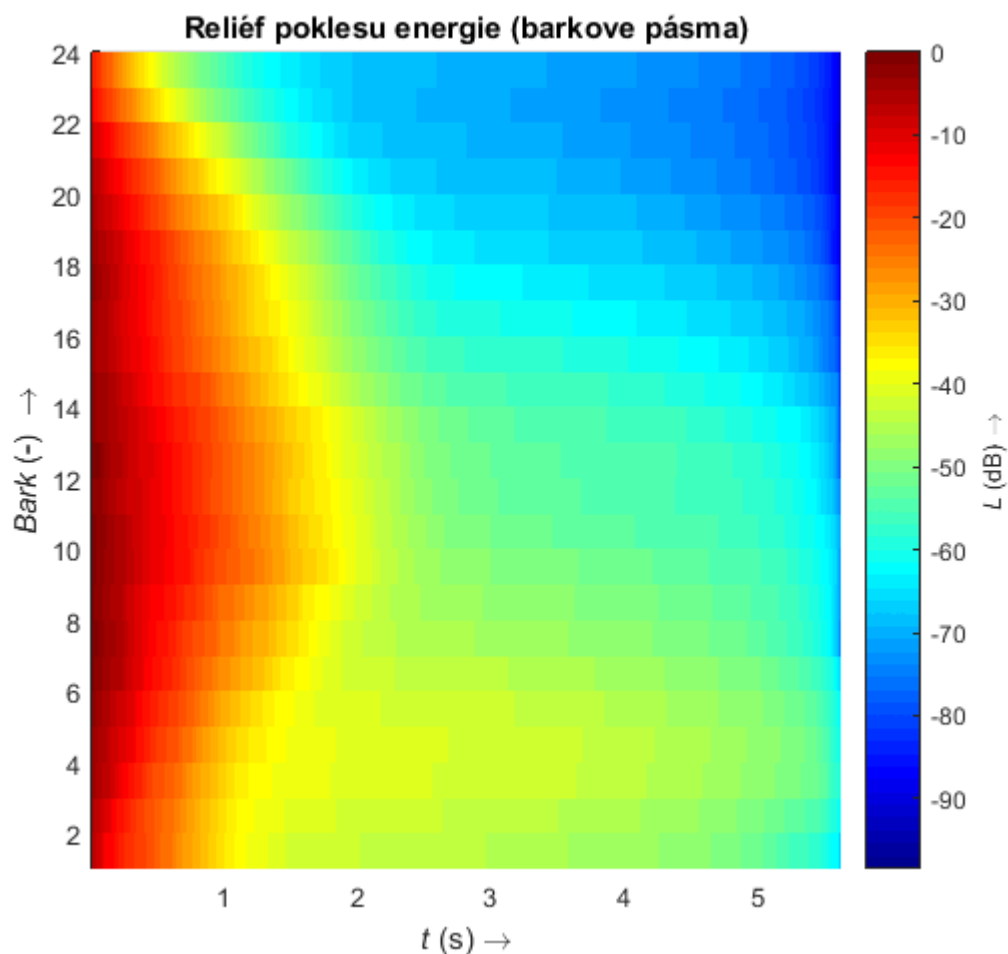
Obálka je potrebná pre určenie častí hodnôt akustického výkonu na kmitočtoch, ktoré sa budú brať do úvahy pre každé pásmo. Pásma majú 2 hraničné kmitočty – jeden s nižším pásmom a jeden s vyšším. Tieto hraničné kmitočty sú v obálke definované s polovičnou hodnotou akustického výkonu a pri kmitočtoch medzi hraničnými kmitočtami sa berú do úvahy celé hodnoty ich akustických výkonov podľa vzťahu

$$e(t) = \begin{cases} 0,5 \cdot I(t) & \text{pre } f = f_H, \\ I(t) & \text{pre } f \neq f_H. \end{cases} \quad (20)$$

Následne sa tieto hodnoty v každom pásme sčítajú a spriemerujú vydelením počtom kmitočtov, ktoré sa berú do úvahy v danom pásme podľa vzťahu

$$L_{\text{bark}}(t, f) = \sum_{i=1}^{24} \frac{e(t, \langle f_{H_{i+1}}; f_{H_i} \rangle)}{(f_{H_{i+1}} - f_{H_i})/25}. \quad (21)$$

Potom sa podľa (18) bezrozmerný ekvivalent výkonu prepočíta na hladinu akustického tlaku a ten sa normalizuje v špičke na 0 dB podľa (19). Následne sa vykreslí graf EDR pri použití kritických Barkových pásiem (14). Priebehy hladín akustického tlaku jednotlivých pásiem podľa Barkovej stupnice sú zároveň Schröderove integrály daných pásiem.



Obr.4 Reliéf poklesu energie pre pásma podľa Barkovej stupnice, priestor typingroom

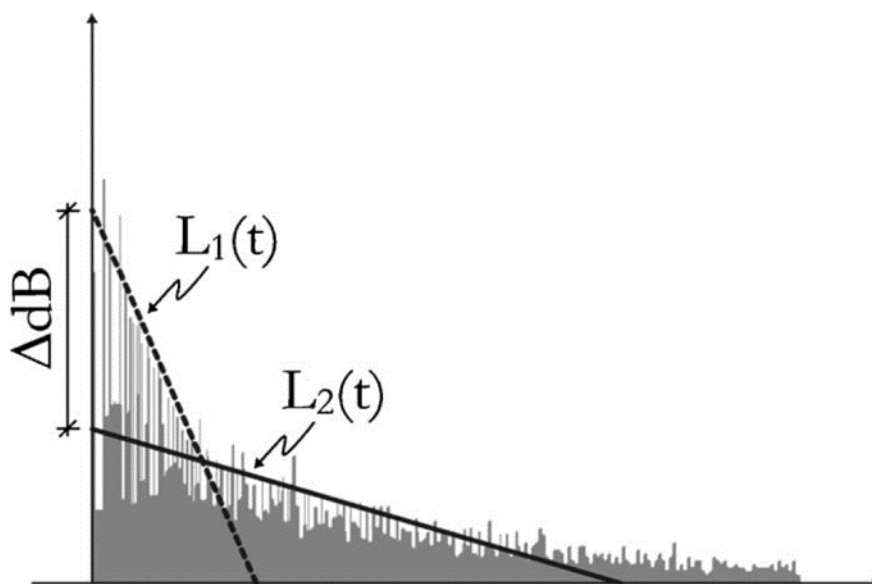
Barkove pásma sa na obr. 4 nachádzajú v priamkach medzi pásmi zobrazenia poklesu hladiny akustického tlaku.

3.2 Krivky dozvuku v pásmach podľa Barkovej stupnice

Priebeh dozvuku v pásmach podľa Barkovej stupnice sa dá určiť pomocou krivky dozvuku. Je to lomená krivka, ktorá sa skladá z niekoľkých priamok vyjadrujúcich aproximovaný lineárny pokles hladiny akustického tlaku. Tieto priamky sa dajú vyjadriť rovnicou [22]

$$L = A \cdot t + B, \quad (22)$$

kde A (dB/s) je smernica poklesu hladiny akustického tlaku a B značí počiatočnú hladinu akustického tlaku danej priamky.



Obr.5 Časti krivky dozvuku, prevzaté z [22]

Ak je objemovo malá miestnosť spojená s veľkou, napríklad malá kaplnka vo vnútri katedrály oddelená vchodom, prvá časť krivky vytvorená z priamky L_1 bude znázorňovať strmý pokles dozvuku, ku ktorému dochádza v malej miestnosti a druhá časť krivky dozvuku odvodená z priamky L_2 znázorňuje pokles, ku ktorému dochádza v objemovo väčšej miestnosti. Počet častí krivky dozvuku sa môže líšiť podľa meranej miestnosti, no pre účely tejto bakalárskej práce je zvolený počet častí kriviek 2.

Počiatočná hladina akustického tlaku prvej časti krivky má zväčša rovnakú hodnotu ako v okamihu počiatočného maxima impulznej odozvy a zo smernice poklesu sa dá vyjadriť doba dozvuku $RT (T_{60})$ [22]

$$RT = \frac{-60}{A}. \quad (23)$$

Rozsah prvej časti krivky je určený od počiatočnej vzorky odozvy po priesečník.

Druhá časť krivky dozvuku znázorňuje pokles, ku ktorému dochádza v objemovo väčšej miestnosti. Tento pokles je pozvoľnejší a v celkovej krivke začína v mieste priesečníku. Jej počiatočná hladina v krivke je daná hladinou akustického tlaku v priesečníku a rozsah druhej časti odozvy je určený od priesečníka po poslednú vzorku danej odozvy.

Priesečník je miesto, kde sa krivka láme a mení svoju smernicu poklesu hladiny akustického tlaku. Lom nastane pri rovnovážnej hladine akustického tlaku oboch priamok. Z povahy impulznej odozvy vyplýva, že v priesečníku je najväčšia odchýlka hladiny akustického tlaku v priebehu odozvy. Reálna impulzná odozva nemá lineárny lomený priebeh a okolo miesta lomu sa zmena poklesu hladiny akustického tlaku mení lineárne a nie skokovo. Čím je dlhší priebeh zmeny poklesu, tým je rozdiel hladín akustického tlaku medzi reálnou impulznou odozvou a krivkou dozvuku väčší a krivka dozvuku je tým menej presná.

Po vytvorení kriviek je potrebné ich pre použitie v hadamardovom súčine s použitým excitačným signálom pre vytvorenie novej odozvy odlogaritmovať.

3.2.1 Vytvorenie kriviek dozvuku v pásmach podľa Barkovej stupnice

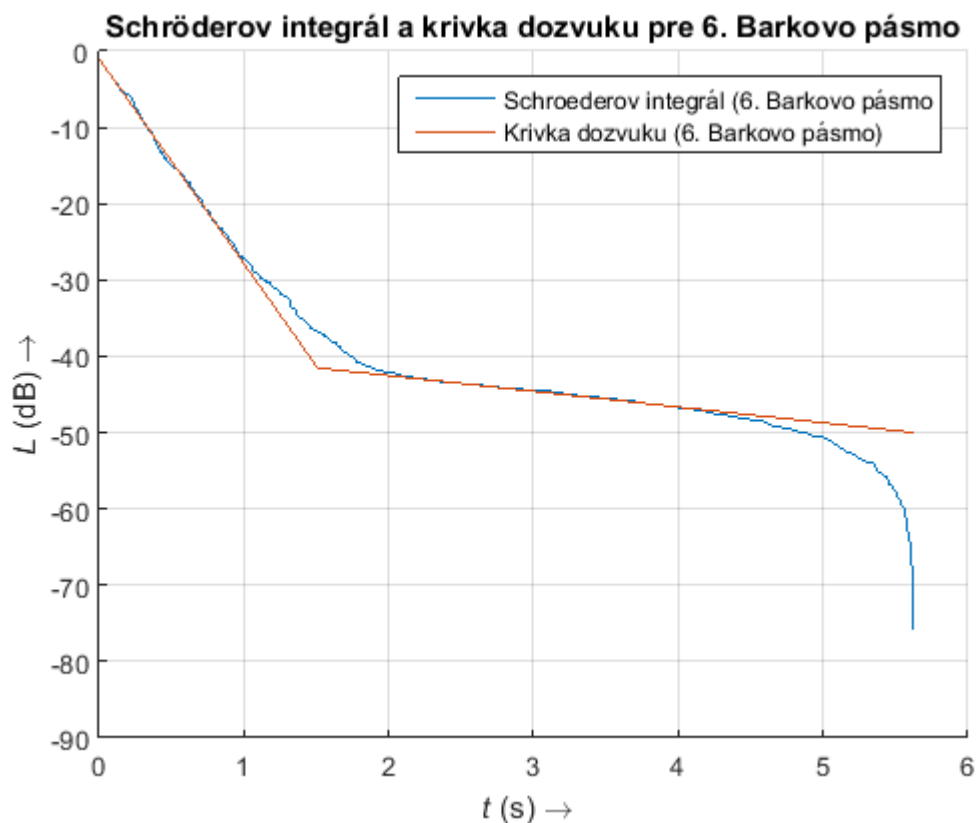
Pre vytvorenie kriviek dozvuku je najprv potrebné určiť pásma s hodnotami hladiny akustického tlaku, z ktorých sa vytvoria linearizované priebehy častí kriviek.

Pre prvú časť krivky dozvuku boli pokusom zistené ako vo všeobecnosti najpresnejšie priebehy vytvorené z hodnôt od prvej vzorky až po 0,07-násobok počtu vzoriek súboru s impulznou odozvou, zaokrúhlený na najbližšie celé číslo. U odoziev, ktorých priebeh mnohonásobných odrazov presahuje daný násobok vzoriek má prvá časť krivky o niečo menej presný priebeh pri neskorých mnohonásobných odrazoch, na druhú stranu je výrazne presnejšia pri odozvách s krátkym pásmom mnohonásobných odrazov.

Druhá časť krivky dozvuku je vytvorená z pásma hodnôt hladiny akustického tlaku od 0,45-násobku počtu vzoriek impulznej odozvy do 0,7-

násobku počtu vzoriek. Tieto hodnoty boli tiež zistené pokusom s rôznymi impulznými odozvami.

Po vypočítaní smerníc poklesu a počiatkových hladín akustického tlaku častí kriviek (22) je potrebné ich predĺžiť po dobu celej časovej osi impulznej odozvy. Vzniknú 2 priamky (ako na obr. 5), U tých je ďalej treba odstrániť vzorky prvej priamky po priesečníku a vzorky druhej priamky pred priesečníkom. Výsledkom je krivka dozvuku vybraného pásma podľa Barkovej stupnice a tento postup sa opakuje pre každé pásmo.



Obr.6 Schröderov integrál a krivka dozvuku, priestor typingroom



Obr.7 Schröderov integrál a krivka dozvuku, priestor typingroom



Obr.8 Schröderov integrál a krivka dozvuku, priestor typingroom

3.3 Modelovanie impulzných odoziev podľa kriviek dozvuku v pásmach podľa Barkovej stupnice

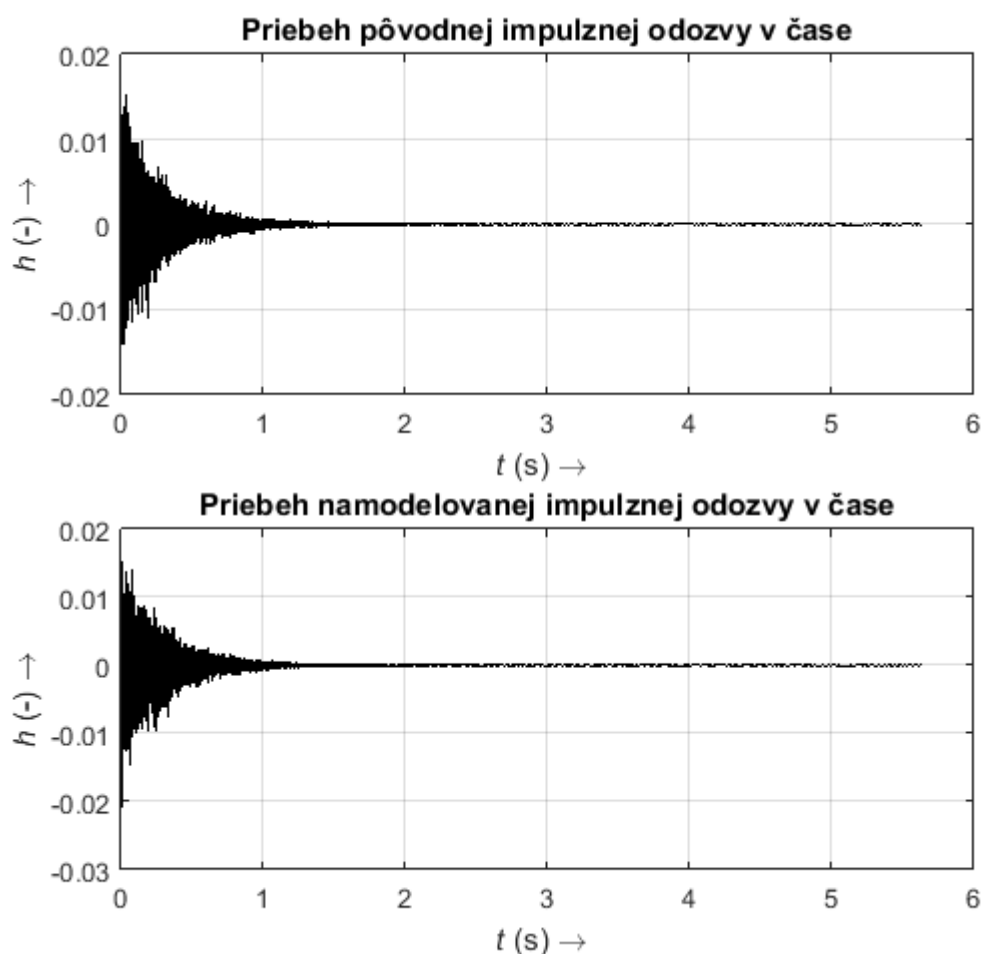
Posledným procesom je modelovanie výslednej odozvy podľa vytvorených kriviek dozvuku. Ako excitačný signál je zvolený biely Gaussov šum a vykoná sa hadamardov súčin tohto šumu a kriviek dozvuku v jednotlivých pásmach. Na krivkách dozvuku sa predtým ešte prepočíta hladina akustického tlaku na bezrozmerný ekvivalent výkonu. Výsledný priebeh šumu je širokopásmový a je potrebné ho filtrovať tak, aby kmitočtové pásma odpovedali pásmam podľa Barkovej stupnice.

Ako typ filtra je použitý Butterworthov filter. Na rozdiel od Chebyshevovho filtra je jeho strmosť menšia pri rovnakom ráde, no priepustné pásmo je maximálne ploché a monotónne (nezvlňuje sa) a nenastáva inverzia fáze kvôli jeho zvlneniu. Pri vyššom alebo rovnom 4. rádu začína byť Butterworthov filter podľa [23] nestabilný, čo je spôsobené chybou zaokrúhľovania. Aj pri pokusnom použití 3. rádu bol filter v najnižšom Barkovom pásme nestabilný, preto je výsledný použitý filter 2. rádu.

Po filtrovaní jednotlivých pásiem sa upravuje akustický tlak namodelovanej impulznej odozvy. Podľa maximálnej hodnoty v pôvodnej odozve sa zmení maximum v namodelovanej odozve a v pomere nového maxima s predošlým sa vynásobia hodnoty na všetkých ostatných vzorkách

$$p_{\text{mod}} = \frac{p_m}{p_{m_{\text{max}}}/p_{h_{\text{max}}}}, \quad (24)$$

kde p_m je akustický tlak modelovanej odozvy, $p_{m_{\text{max}}}$ maximálna hodnota akustického tlaku v modelovanej odozve a $p_{h_{\text{max}}}$ maximálna hodnota akustického tlaku pôvodnej odozvy.



Obr.9 Porovnanie priebehov pôvodnej a namodelovanej impulznej odozvy, priestor typingroom

3.4 Výsledky modelovania impulzných odoziev

Pre zistenie úspešnosti modelovania impulzných odoziev som vykonal posluchový test, kde som subjektívne porovnával vytvorené impulzné odozvy s pôvodnými.

Úspešnosť modelovania je rôzna. V niektorých prípadoch bol charakter modelovanej odozvy v dĺžke doznievania a frekvenčnej charakteristike podobný ako u pôvodných odozvách, napr. u odoziev *nrhall*, *sporstcentre*, *typingroom*. Iné odozvy mali dlhšie doznievanie ako pôvodné, najmä na nižších a stredných frekvenčných pásmach - odozvy *classroom*, *factory*, *liveroom*.

Niektoré namodelované odozvy boli nepresné, a to zrejme kvôli zložitejším priebehom pôvodných odoziev. Časť pôvodných odoziev, ako napríklad *cafeteria*, bola nesprávne zameraná a obsahovala v hluku pozadia ľudský hlas, a odozvy *classroom*, *greathall* a *octagon* obsahovali nelineárne skreslenie signálu v nelineárnej časti odozvy.

4 ZÁVER

Úlohou tejto bakalárskej práce v prvej časti bolo charakterizovanie impulznej odozvy, popísanie jej aproximácie v podobe echogramu a spôsoby využitia impulznej odozvy.

V druhej časti bolo zdokumentovanie a porovnanie metód pre meranie impulzných odoziev posluchových uzavretých priestorov. Existujú rôzne metódy využívajúce pseudonáhodný šumový signál, obdĺžnikový signál s premennou dĺžkou pulzu, rozmetaný harmonický signál, viacnásobný harmonický signál s náhodnou fázou a pulzné zdroje. Ako najlepšie použiteľné metódy sú MLS, pre odolnosť voči šumu a nízke požiadavky na výpočtový výkon, a logaritmicky rozmetaný harmonický signál pre najlepší odstup signálu od šumu a najmenšie skreslenie.

V ďalšej časti boli zhrnuté objektívne parametre akustiky priestoru, ako sú napríklad doba dozvuku, postranná časť energie, zrozumiteľnosť a ďalšie. Z opisu ich vlastností a získania je možné charakterizovať akustickú odozvu miestnosti a vhodnosť využitia miestnosti pre rôzne účely.

Vo štvrtej časti je opísaná analýza zvyškovej energie v impulznej odozve, doba dozvuku pre rôzne kmitočtové pásma, spôsoby rozdelenia kmitočtových pásiem a ich využitie pre znázornenie zvyškovej energie v impulznej odozve v podobe reliéfu poklesu energie.

V nasledujúcej časti sú zdokumentované existujúce databázy impulzných odoziev a parametrov, ktoré sú v nich uvedené. Komerčné databázy sú zväčša kvalitnejšie, zatiaľ čo slobodne šíriteľné databázy sú početnejšie.

Praktická časť obsahuje realizáciu vlastnej databázy impulzných odoziev z výberu impulzných odoziev z nekomerčných databáz a ich úprave pre správne vytvorenie a zobrazenie reliéfov poklesu energie.

Posledná časť spočívala v parametrizácii reliéfov poklesu energie impulznej odozvy a využití parametrov pre modelovanie dozvuku v kmitočtovej a časovej oblasti. S využitím pásiem Barkovej stupnice mali namodelované impulzné odozvy v posluchovom teste rôzne výsledky oproti pôvodným odozvám.

Literatúra

- [1] *Slovník spisovného jazyka českého*. Spracoval kolektiv autorov. 1. vydání. Praha: Academia, 1960-1971. 4592 s.
- [2] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, 2013. ISBN 978-80-214-4716-5
- [3] STAN, G.-B., EMBRECHTS, J.-J., ARCHAMBEAU, D. Comparison of different impulse response measurement techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*, Volume 50, 2002, no. 4, pp. 249-262, ISSN 0004-7554
- [4] MIŠUREC, J., SMÉKAL, Z. *Číslicové zpracování signálů*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, 2011.
- [5] HOLTERS, M., CORBACH, T., ZÖLZER, U. Impulse response measurement techniques and their applicability in the real world. *Proceedings of the 12th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-09)*, 2009
- [6] FARINA, A. Impulse response measurements. *23rd Nordic Sound Symposium*, Bolkesjø (Norway) 27 – 30 September 2007
- [7] MATELJAN, I., UGRINOVIC, K. The Comparison of room impulse response measuring systems. *Proceedings of the First Congress of Alps Adria Acoustics Association*, Portoroz, Slovenia, 2003, ISBN 961-6238-73-6
- [8] MATELJAN, I. Signal selection for the room acoustics measurement. *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 1999 IEEE Workshop, New Paltz, NY, 1999, pp. 199-202, ISBN 0-7803-5612-8
- [9] CAMPANINI, S., FARINA, A. A new Audacity feature: room objective acoustical parameters calculation module. *Linux Audio Conference*, Parma (Italy) 16-19 April 2009
- [10] VONDRÁŠEK, M., ANTEK, M. Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů. *Akustické listy*, 11 (3), 2005.
- [11] JOT, J.-M. An analysis/synthesis approach to real-time artificial reverberation. *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1992. ICASSP-92 Proceedings, IEEE, ISBN 0-7803-0532-9
- [12] Balík, M. *Struktury pro simulaci poslechových prostorů*. Disertační práce, Ústav telekomunikací, FEKT VUT Brno, 2003
- [13] BALÍK, M. *Číslicové zpracování akustických signálů*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. 104 s.
- [14] ALTIVERB. Altiverb Impulse Responses. *Audioease.com* [online]. 2017 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <https://www.audioease.com/altiverb/browse.php>
- [15] WAVES. IR Convolution Reverb Library. *Waves.com* [online]. 2017 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <https://www.waves.com/downloads/ir-convolution-reverb-library>

- [16] AVID. Space Impulse Response Library. *Avid.com* [online]. 2017 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://www.avid.com/en/plugins/space-impulse-response-library>
- [17] WEN, J.Y.C., GAUBITCH, N.D., HABETS, E.A.P., NAYLOR, P.A. Evaluation of Speech Dereverberation Algorithms Using the Mardy Database. *IWAENC*, Paris, September 12-14, 2006
- [18] JEUB, M., SCHAFER, M., VARY, P. A binaural room impulse response database for the evaluation of dereverberation algorithms. *16th International Conference on Digital Signal Processing*, Santorini-Hellas, 2009, s. 1-5. DOI 10.1109/ICDSP.2009.5201259
- [19] STEWART, R., SANDLER, M. Database of omnidirectional and B-format room impulse responses. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Dallas, TX, 2010, s. 165-168. DOI 10.1109/ICASSP.2010.5496083
- [20] Open AIR. Open Acoustic Impulse Response Library. *Openairlib.net* [online]. 2017 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://www.openairlib.net/>
- [21] Propellerheads. Free Reverb Resources. In: *Propellerheads* [online]. 2015-22-07 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <https://www.propellerheads.se/blog/free-reverb-resources-where-to-find-impulse-responses>
- [22] Stack Exchange. Speech Processing. In: *StackExchange* [online]. 2014-30-06 [cit. 2018-22-05]. Dostupné z: <https://dsp.stackexchange.com/questions/17121/calculation-of-reverberation-time-rt60-from-the-impulse-response/17123#17123>
- [23] MathWorks. Butterworth Filter Design. In: *MathWorks* [online]. 2018 [cit. 2018-23-05]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/butter.html>

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

MLS	-	Maximum Length Sequence
IRS	-	Inverse Repeated Sequence
LSS	-	Logarithmic Sine Sweep
TDS	-	Time-Delay Spectrometry
RPMS	-	Random Phase Multisine
RT	-	Reverberation Time
EDT	-	Early Decay Time
EDC	-	Energy Decay Curve
EDR	-	Energy Decay Relief
STFT	-	Short-Time Fourier Transformation

Zoznam príloh

Príloha 1. CD disk

Na CD sa nachádza priečinko s názvom Databáza impulzných odoziev, ktorá v hlavnom priečinku obsahuje impulzné odozvy vo formáte .wav s verziami odoziev s príponou -late, napríklad *typingroom-late.wav*, ktoré obsahujú výrezy s mnohonásobnými odrazmi z pôvodných odoziev a ďalšie odozvy s príponou -new, napríklad *typingroom-late-new.wav*, čo sú odozvy vytvorené modelovaním z odoziev s príponou -late. V podpriečinku Pôvodné odozvy sú verzie odoziev s príponou -edit, napríklad *typingroom-edit.wav*, obsahujúce pôvodné impulzné odozvy začínajúce v okamihu počiatku impulznej odozvy

Ďalej sa na CD v hlavnej zložke nachádzajú súbory *projekt.m*, ktorý obsahuje skript pre výpočet EDR, analýzu a modelovanie impulznej odozvy v programe Matlab, a *info.xlsx* s tabuľkou s informáciami o jednotlivých impulzných odozvách z databázy. Celý kód skriptu je vypísaný v prílohe 2.

Príloha 2. Kód skriptu z programu Matlab

```
close all;
clear all;
clc

% vyber Barkovho pasma pre zobrazenie v grafoch
Nbi = 6;

% pridanie cesty pre priečinko s odozvami
addpath('Databáza impulzných odoziev')

% vyber suboru s impulznou odozvou
[Subor,Cesta,Index] = uigetfile('Databáza impulzných odoziev\
*.wav','Výber impulznej odozvy');

% h - impulzna odozva
% fvz - vzorkovací kmitocet
[h,fvz] = audioread(Subor);

% celkove trvanie odozvy
Tcelk = length(h)/fvz;

% casovy vektor vzoriek odozvy
Th_vekt = linspace(0,Tcelk,length(h));

% vstupne parametre pre spektrogram
DlзкаOkna = ones(512,1); % vektor poctu okien
nOkno = 512; % pocet casti rozdelenia signalu
Prekrytie = 0.5; % prekrytie susediacich casti rozdelenia
TypOkna = 'hann';
```

```

nFFT = fvz/50; % pocet bodov diskretnej fourierovej transformacie

% vypocet spektrogramu
% S - matica casovo-kmitoctovej distribucie (spektrogramu)
% F - vektor kmitoctov odvodenych z vypoctu spektrogramu
% T - casovy vektor bodov spektrogramu
[S,F,T] = spectrogram(h,DlзкаOkna,nOkno*Prekrytie,2*nFFT,fvz);

% EDR v zavislosti na kmitocte

% zmensenie maximalnej hodnoty kmitoctov na 20000 Hz
[~,F_h_20k] = min(abs(F-20000)); % hodnota indexu kmitoctu 20 kHz
F_20k = F(1:F_h_20k); % vektor kmitoctov zo spektrogramu do 20 kHz

% spektrogram pre kmitocty do 20 kHz
S_20k = S(1:F_h_20k,1:size(S,2));

% vypocet echogramu
S2 = S_20k.*conj(S_20k);

% vypocet EDR
% F_rozd - pocet rozdeleni v kmitoctovej osi
% T_rozd - pocet rozdeleni v casovej osi
[F_rozd,T_rozd] = size(S2);
S2_edr = zeros(F_rozd,T_rozd); % vytvorenie matice EDR
for i=1:F_rozd
    S2_edr(i,:) = fliplr(cumsum(fliplr(S2(i,:)))); % EDR
end

% premena relativnej velkosti EDR na dB
S2_edr_db = 10*log10(abs(S2_edr/((2*10^-5)^2)));

% normalizacia EDR na 0 dB
offset = max(max(S2_edr_db)); % hodnota odchylky najvacsej hodnoty EDR
od 0 dB
S2_edr_db_norm = S2_edr_db-offset; % EDR s normalizovanymi hodnotami

% vykreslenie grafu
figure('Name',Subor);clf; % vytvorenie a pomenovanie okna s grafom
surf(T,F_20k,S2_edr_db_norm); % typ grafu a zadane veliciny ktore sa
zobrazia
view(0,90); % zmena zobrazenia
title('Reliéf poklesu energie'); % nazov grafu
xlabel('\itt (s) \rightarrow')
ylabel('\itf (Hz) \rightarrow') % nazov osi
zlabel('\itL (dB) \rightarrow')
colormap jet % zmena farebnej skaly grafu
axis tight; % zmena rozpatia osi
shading flat % nastavenie tienovania grafu
c=colorbar; % nazov osi farebnej skaly
c.Label.String = '\itL (dB) \rightarrow';
set(gca,'zlim',[-120 0]); % zmena rozpatia osi Z
set(gcf,'pos',[820 500 550 500]) % urcenie pozicie a rozmerov grafu
pre vykreslenie na obrazovke

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% EDR podľa barkových pásiem

% spektrogram pre kmitočty do 15500 Hz
[~,F_h_15500] = min(abs(F-15500)); % hodnota indexu kmitočtu 15,5 kHz
S_15500 = S(1:F_h_15500,1:size(S,2)); % spektrogram pre kmitočty do
15,5 kHz

% vypočet echogramu pre kmitočty do 15500 Hz
S2_15500 = S_15500.*conj(S_15500);

% zmenšenie maximalnej hodnoty kmitočtov na 15500 Hz
F_15500 = F(1:F_h_15500);

% vektor stredných kmitočtov barkových pásiem
fS = [0 50 150 250 350 450 570 700 840 1000 1170 1370 1600 1850 2150
2500 2900 3400 4000 4800 5800 7000 8500 10500 13500];

% vektor hranicných kmitočtov barkových pásiem
fH = [0 100 200 300 400 510 630 770 920 1080 1270 1480 1720 2000 2320
2700 3150 3700 4400 5300 6400 7700 9500 12000 15500];
% vektor hranicných kmitočtov barkových pásiem pre použitie pri
filtrovani pásiem
fH_filter = [20 100 200 300 400 510 630 770 920 1080 1270 1480 1720
2000 2320 2700 3150 3700 4400 5300 6400 7700 9500 12000 15500];

% vektor barkových pásiem
Bark_vekt = linspace(1,length(fS)-1,length(fS)-1);

% časový vektor barkových pásiem
T_vekt = linspace(1,size(S2_15500,2),size(S2_15500,2));

% vektor obalky
Obalka_vekt = ones(1,length(F_15500));
for y = round(fH/50+1)
    Obalka_vekt(y) = 0.5; % výsledná obalka
end

% vypočet EDR
% F_rozd - počet rozdelení v kmitočtovej osi
% T_rozd - počet rozdelení v časovej osi
[F_rozd_bark,T_rozd_bark] = size(S2_15500);

S2_15500_e = zeros(F_rozd_bark,T_rozd_bark); % vytvorenie matice EDR
for i2=1:F_rozd_bark
    S2_15500_e(i2,:) = fliplr(cumsum(fliplr(S2_15500(i2,:)))); % EDR
    bez obalky
end

for cas = T_vekt
    for bark = Bark_vekt
        z =
Obalka_vekt((round(fH(bark)/50+1):(round(fH(bark+1)/50+1))); % obalka
v jednotlivých pásmach
        S2_15500_ed(bark,cas) =
z*S2_15500_e(round(fH(bark)/50+1):(round(fH(bark+1)/50+1)),cas);

```

```

                S2_15500_edr(bark,cas) = S2_15500_ed(bark,cas)/(length(z)-
1); % EDR pre barkové pásma
    end
end

% premena relativnej velkosti EDR na dB
S2_15500_edr_db = 10*log10(abs(S2_15500_edr/((2*10^-5)^2)));

% normalizacia EDR na 0 dB
offset_bark = max(max(S2_15500_edr_db)); % hodnota odchylky najvacsej
hodnoty EDR od 0 dB
S2_15500_edr_db_norm (Bark_vekt,:) = S2_15500_edr_db-offset_bark; %
normalizovane EDR

% vykreslenie grafu
figure('Name',Subor) % vytvorenie a pomenovanie okna s grafom
surf(T,Bark_vekt,S2_15500_edr_db_norm); % typ grafu a zadane veliciny
ktore sa zobrazia
view(0,90); % zmena zobrazenia
title('Reliéf poklesu energie'); % nazov grafu
xlabel('\itt (s) \rightarrow')
ylabel('\itf (Hz) \rightarrow') % nazov osi
zlabel('\itL (dB) \rightarrow')
colormap jet % zmena farebnej skaly grafu
axis tight; % zmena rozpatia osi
shading flat % nastavenie tienovania grafu
c=colorbar; % nazov osi farebnej skaly
c.Label.String = '\itL (dB) \rightarrow';
set(gca,'zlim',[-120 0]); % zmena rozpatia osi Z
set(gcf,'pos',[1370 500 550 500]) % urcenie pozicie a rozmerov grafu
pre vykreslenie na obrazovke

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% krivky dozvuku v pasmach podla Barkovej stupnice

% zobrazenie Schroederovych integralov pre vsetky Barkove pasma
figure('Name',Subor) % vytvorenie a pomenovanie okna s grafom
title(['Schröderove integrály pre Barkove pásma']); % nazov grafu
hold on
for bark = 1:24
    plot(T,S2_15500_edr_db_norm(bark,:)) % typ grafu a zadane veliciny
ktore sa zobrazia
end
set(gca,'ylim',[-90,0]) % zmena zobrazenia
xlabel('\itt (s) \rightarrow') % nazov osi
ylabel('\itL (dB) \rightarrow')
grid on % zobrazenie mriezky
legend show % zobrazenie legendy

% prepocitanie kriviek dozvuku podla casovej osi povodnej impulznej
odozvy
for bark = 1:24
% prva cast krivky dozvuku

% najdenie hodnot z ktorych sa vypocita prva cast krivky (vsetky
pasma)

```

```

S2_RT = find
(S2_15500_edr_db_norm(bark,:) < S2_15500_edr_db_norm(bark,1) &
S2_15500_edr_db_norm(bark,:) > S2_15500_edr_db_norm(bark,round(0.7/10*length(S2_15500_edr_db_norm))));

Y = S2_15500_edr_db_norm(bark,S2_RT); % vektor hodnot z ktorých sa
vypocita prva cast krivky

% casovy vektor tychto hodnot
T_vekt_RT = T(S2_RT);

% vypocet prvej casti krivky
P = polyfit(T_vekt_RT,Y,1); % vytvorenie linearneho poklesu z
vektoru hodnot z ktorých sa vypocita prva cast krivky
L_RT = polyval(P,T_vekt_RT); % vektor hodnot linearneho poklesu

A(bark) = (L_RT(2)-L_RT(1))/(T_vekt_RT(2)-T_vekt_RT(1)); %
smernica poklesu hladiny akustickeho tlaku
RT60(bark,:) = -60/A(bark); % doba dozvuku
B(bark) = S2_15500_edr_db_norm(bark,1); % pociatocna hladina
akustickeho tlaku prvej casti krivky

% predlzenie prvej casti krivky
T_vekt_RT60_h = Th_vekt; % casovy vektor pre predlzenie priamky

T_vekt_RT60_index_h =
linspace(1,length(T_vekt_RT60_h),length(T_vekt_RT60_h)); % vektor
vzoriek priamky

% prva cast krivky dozvuku pre vsetky Barkove pasma
L_vekt_RT60_h(bark,T_vekt_RT60_index_h) =
A(bark)*T_vekt_RT60_h+B(bark);
%%%%%%
% druha cast krivky dozvuku

% najdenie hodnot z ktorých sa vypocita druha cast krivky (vsetky
pasma)
S2_RT_2 = find
(S2_15500_edr_db_norm(bark,:) < S2_15500_edr_db_norm(bark,round(4.5/10*length(S2_15500_edr_db_norm)) &
S2_15500_edr_db_norm(bark,:) > S2_15500_edr_db_norm(bark,round(7/10*length(S2_15500_edr_db_norm))));

Y_2 = S2_15500_edr_db_norm(bark,S2_RT_2); % vektor hodnot z
ktorých sa vypocita druha cast krivky

% casovy vektor tychto hodnot
T_vekt_RT_2 = T(S2_RT_2);

% vypocet druhej casti krivky
P_2 = polyfit(T_vekt_RT_2,Y_2,1); % vytvorenie linearneho poklesu
z vektoru hodnot z ktorých sa vypocita druha cast krivky
L_RT_2 = polyval(P_2,T_vekt_RT_2); % vektor hodnot linearneho
poklesu

```

```

    A_2(bark) = (L_RT_2(2)-L_RT_2(1))/(T_vekt_RT_2(2)-T_vekt_RT_2(1));
% smernica poklesu hladiny akustickeho tlaku
    RT60_2 = -60/A_2(bark); % doba dozvuku
    B_2(bark) = (S2_15500_edr_db_norm(bark, (S2_RT_2(1)))-
A_2(bark)*T(S2_RT_2(1))); % pociatocna hladina akustickeho tlaku
druhej casti krivky

% predlzenie druhej casti krivky
    T_vekt_RT60_2_h = Th_vekt; % casovy vektor pre predlzenie priamky

    T_vekt_RT60_index_2_h =
linspace(1,length(T_vekt_RT60_2_h),length(T_vekt_RT60_2_h)); % vektor
vzoriek priamky

% druha cast krivky dozvuku pre vsetky Barkove pasma
    L_vekt_RT60_2_h(bark,T_vekt_RT60_index_2_h) =
A_2(bark)*T_vekt_RT60_2_h+B_2(bark);
%%%%%%
% vysledna krivka dozvuku

    L_vekt_krivka_h(bark,:) = L_vekt_RT60_2_h(bark,:) -
L_vekt_RT60_h(bark,:); % definicia krivky ako rozdielu povodnych
priamok
    C_h = [1,-A(bark);1,-A_2(bark)]; % cast sustavy dvoch rovnici o
dvoch neznamych
    a_h = [B(bark);B_2(bark)]; % cast sustavy dvoch rovnici o dvoch
neznamych
    yx_h(1:2,bark) = C_h\a_h; % najdenie priesečníku

    L_vekt_priesečník_h(bark) = (B_2(bark)-B(bark))/(A(bark)-
A_2(bark)); % cas v ktorom sa nachadza priesečník
    [~,L_vekt_index_h] = min(abs(Th_vekt-L_vekt_priesečník_h(bark)));
% index postupnosti priesečníka
    p_h = L_vekt_index_h-1; % oprava indexu postupnosti priesečníka
    L_vekt_krivka_h(bark,1:p_h) = zeros(1,p_h); % vynulovanie casti
pred priesečníkom
    L_vekt_krivka_vysl_db_h(bark,:) =
L_vekt_krivka_h(bark,:)+L_vekt_RT60_h(bark,:); % vysledna krivka
end

% pridanie tabulky s udajmi z Excel suboru
[Subor_num,Subor_txt,Subor_raw] = xlsread('info.xlsx');

% ziskanie udaju o objeme miestnosti
Subor_nazov = strsplit(Subor,{'-','.'}); % ziskanie nazvu suboru pre
vyhladanie v tabulke
Subor_info = Subor_num(find(strcmp(Subor_raw, Subor_nazov(1)))-
2*length(Subor_raw)-1,:); % vyhladanie udajov o danej odozve z tabulky

% objem miestnosti uvedený v zdroji
V = Subor_info(4);

% Schroederov kmitocet podľa objemu uvedeneho v zdroji
f_sch = 2000*sqrt(RT60(9,:)/V);

```

```

% zobrazenie Schroederovho integralu a krivky dozvuku
figure('Name',Subor) % nazov okna s grafom
title(['Schröderov integrál a časti krivky dozvuku pre
',num2str(Nbi),'. Barkovo pásmo']); % nazov grafu
hold on

plot(T,S2_15500_edr_db_norm(Nbi,:)) % typ grafu a zobrazene veliciny
set(gca,'ylim',[-90,0]) % zmena zobrazenia
xlabel('\itt (s) \rightarrow ')
ylabel('\itL (dB) \rightarrow') % nazov osi
grid on % zobrazenie mriezky

plot(Th_vekt,L_vekt_RT60_h(Nbi,:),'-') % typ grafu a zobrazene
veliciny
legend(['Schröderov integrál (' ,num2str(Nbi),'. Barkovo
pásmo'], ['Časti krivky dozvuku (' ,num2str(Nbi),'. Barkovo pásmo')']) %
legenda

plot(Th_vekt,L_vekt_RT60_2_h(Nbi,:),'-') % typ grafu a zobrazene
veliciny

% zobrazenie krivky dozvuku v casovej ose povodnej odozvy a
Schroederovho integralu
figure('Name',Subor) % nazov okna s grafom
title(['Schröderov integrál a krivka dozvuku pre ',num2str(Nbi),'.
Barkovo pásmo']); % nazov grafu
hold on
plot(T,S2_15500_edr_db_norm(Nbi,:)) % typ grafu a zobrazene veliciny
set(gca,'ylim',[-90,0]) % zmena zobrazenia
xlabel('\itt (s) \rightarrow ')
ylabel('\itL (dB) \rightarrow') % nazov osi
grid on % zobrazenie mriezky

plot(Th_vekt,L_vekt_krivka_vysl_db_h(Nbi,:),'-') % typ grafu a
zobrazene veliciny
legend(['Schroederov integrál (' ,num2str(Nbi),'. Barkovo
pásmo'], ['Krivka dozvuku (' ,num2str(Nbi),'. Barkovo pásmo')']) %
legenda

for bark = 1:24
% vytvorenie priebehu vyslednych kriviek dozvuku
    n2 = wgn(1,length(h),0); % excitacny signal
    e2(bark,:) = 10.^(L_vekt_krivka_vysl_db_h(bark,+)/20)*((2*10^-5));
% odlogaritmovana obalka

    out2(bark,:) = n2.*e2(bark,); % signal s postupnostou podľa
obalky

% filtrovanie priebehov kriviek dozvuku pasmovymi priepustami pre
Barkove pasma
    [filtA(bark,:),filtB(bark,)] = butter(2,[fH_filter(bark)/fvz
fH_filter(bark+1)/fvz]);

```

```

% vysledna namodelovana impulzna odozva
    h_nove(bark,:) = filter(filtA(bark,:),filtB(bark,:),out2(bark,:));
end

% spojenie filtrovanych casti modelovanej odozvy v Barkovych pasmach
do vyslednej impulznej odozvy
for Th = 1:length(h)
    h_nove_2(1,Th) = sum(h_nove(:,Th));
end

% denormalizacia hlasitosti vytvorenej odozvy
h_max = max(max(h)); % ziskanie najvysskej hodnoty vzorky povodnej
odozvy
h_nove_2_max = max(max(h_nove_2)); % ziskanie najvysskej hodnoty vzorky
namodelovanej odozvy
h_nove_vysl = h_nove_2/(h_nove_2_max/h_max); % zmena najvysskej hodnoty
vzorky modelovanej odozvy na najvyssiou hodnotu vzorky povodnej odozvy

% zobrazenie priebehov povodnej a namodelovanej impulznej odozvy
figure
subplot(2,1,1) % rozdelenie grafu na 2 casti
plot(Th_vekt,h,'k') % typ casti grafu a vykreslene veliciny
title('Priebeh pôvodnej impulznej odozvy v čase'); % nazov casti grafu
xlabel('\itt (s) \rightarrow ')
ylabel('\ith (-) \rightarrow') % nazov osi
grid on % mriezka

subplot(2,1,2)
plot(Th_vekt,h_nove_vysl,'k')
title('Priebeh namodelovanej impulznej odozvy v čase');
xlabel('\itt (s) \rightarrow ')
ylabel('\ith (-) \rightarrow') % nazov osi
grid on % mriezka
set(gcf,'pos',[1370 150 550 500]) % pozicia a rozmiery okna s grafom

% cesta a nazov suboru vytvorenej impulznej odozvy
Subor_nazov_n = char(strcat(Cesta,Subor_nazov(1),'-',Subor_nazov(2),'-
new.wav'));

% zapis namodelovanej impulznej odozvy na disk
audiowrite(Subor_nazov_n,h_nove_vysl,fvz)

```