



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Objektivní hodnocení kvality restaurovaných archivních nahrávek

Objective assessment of restored archive recording quality

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia, elektronika
Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Ing. František Rund, PhD.

Michal Brůna

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Brůna Michal**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Objektivní hodnocení kvality restaurovaných archivních nahrávek**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s problematikou objektivního hodnocení kvality zvukového signálu.

Navrhněte a implementujte metodu pro porovnání kvality archivního záznamu zvuku před a po restauraci.

Tuto metodu ověřte na vzorcích archivních nahrávek dodaných vedoucím práce.

Seznam odborné literatury:

[1] Zalabák, M. Hodnocení kvality analogového záznamu zvuku s využitím modelu slyšení. Diplomová práce, FEL ČVUT 2016.

[2] Školný, J. Porovnání metod přepisu zvukové stopy z filmového nosiče. Diplomová práce, FEL ČVUT 2015.

[3] Godsill, J. S., Rayner, P. J. W. Digital audio restoration. Springer, 2002.

Vedoucí: Ing. František Rund, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 3. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze 27.5.2016

Michal Brůna

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá objektivními metodami hodnocení kvality zvukových záznamů. Pomocí standardních algoritmů signálového zpracování a pomocí analýzy modelem slyšení byly porovnány nahrávky z optického archivního záznamu na filmovém pásu se stejnými nahrávkami, které byly studiově upraveny procesem nazývaným mastering.

V rámci této práce byly aplikovány algoritmy pro výpočet dynamického rozsahu, šířky pásma, úrovně nelineárního zkreslení, úrovně impulzního šumu a algoritmus PEMO-Q, jehož součástí je digitální model slyšení. Kromě analýzy úrovně nelineárního zkreslení podaly na dostupných vzorcích všechny použité algoritmy výsledky, které odpovídaly předpokladům, že nahrávka, která prošla studiovým masteringem, bude vykazovat lepší kvality, než neupravovaný záznam přímo z optického média.

Abstract

The goal of this Bachelor's thesis is to find and implement different algorithms of objective sound quality assessment. Algorithms used in the analysis are both from the field of standard signal processing statistics and from the field of auditory modeling. The subjects of analysis in this thesis are various short audio recordings extracted from an optical movie soundtrack.

Another task is to analyze the recordings using the algorithms and evaluate the results with respect to the audio original medium. The sound recordings for comparison are of the same length and the same movie origin, but of very different content and quality, since half of the recordings were mastered in a studio and are considered reference points in the comparisons.

Appart from the nonlinear distortion analysis, all the other algorithms provided very reasonable output and are suitable to be used in objective test of archived sound recordings.

Klíčová slova

Objektivní hodnocení, archivní zvukové záznamy, optický záznam, analýza šumu, model slyšení, MATLAB

Keywords

Objective evaluation of sound recordings, optical soundtrack, objective analysis, auditory model, MATLAB

OBSAH

ÚVOD	7
1 ARCHIVNÍ AUDIO ZÁZNAM	8
1.1 OPTICKÝ ZÁZNAM ZVUKU	8
1.2 TYPY OPTICKÉHO ZÁZNAMU	8
1.2.1 Intenzitní (hustotní) záznam	9
1.2.1 Plošný (amplitudový) záznam	9
1.3 ARTEFAKTY V ANALOGOVÝCH ZÁZNAMECH	9
1.4 USMĚRŇOVACÍ JEV – NELINEÁRNÍ ZKRESLENÍ	10
2 HODNOCENÍ KVALITY ZVUKOVÝCH ZÁZNAMŮ	12
2.1 SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ	12
2.2 OBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ POMOCÍ OBECNÝCH PARAMETRŮ	13
2.2.1 Dynamický rozsah	13
2.2.2 Šířka pásma	13
2.2.3 Impulzní rušení	14
2.3 OBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ POMOCÍ MODELU SLYŠENÍ	15
2.3.1 PEMO-Q	15
3 SESTAVENÍ A IMPLEMENTACE ALGORITMŮ	19
3.1 POUŽITÉ TESTOVACÍ VZORKY	19
3.2 TESTOVACÍ ROZHRAŇÍ	20
3.3 LIMITACE OBJEKTIVNÍHO SROVNÁVÁNÍ	20
3.4 STANOVENÍ JEDNOTLIVÝCH PARAMETRŮ PRO SROVNÁNÍ	20
3.4.1 Stanovení dynamického rozsahu pomocí RMS	20
3.4.2 Stanovení šířky pásma	21
3.4.3 Stanovení množství impulzního rušení	23
3.4.4 Stanovení úrovně neharmonického zkreslení	23
3.4.5 Stanovení hodnot z modelu modelu slyšení PEMO-Q	24
4 POROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	25
4.1 DYNAMICKÝ ROZSAH	25
4.4 ŠÍŘKA PÁSMA	27
4.3 IMPULZNÍ ŠUM	29
4.4 NELINEÁRNÍ ZKRESLENÍ	30
4.5 PEMO-Q	33
ZÁVĚR	34
SEZNAM LITERATURY	35
PŘÍLOHY	37

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je seznámení s problematikou objektivního hodnocení kvality zvukového signálu se zaměřením na archivní analogové zvukové záznamy. Dalším cílem navrhnutí a implementace metody pro objektivní porovnání kvality záznamu archivní zvukové nahrávky z filmu před a po restauraci.

Porovnávání kvality zvukových nahrávek objektivním způsobem je proces, který předpokládá zavedení objektivních parametrů určujících kvalitu zvukového záznamu a jejich následné porovnání mezi sebou.

Téma objektivního srovnávání těchto parametrů je aktuální, neboť stále probíhají procesy digitalizace archivních záznamů uchovávaných dodnes stále na analogových médiích. Za nejlepší způsob porovnání zvukové kvality jsou považovány subjektivní poslechové testy, ale ty mají svoje nedostatky, a to zejména ve své časové a finanční náročnosti. Také proto existuje poptávka po možnostech analyzovat kvalitu záznamu strojově, v digitální doméně.

Cílem této práce je navrhnout a implementovat metodu pro porovnání záznamu zvuku před a po restauraci. Návrh spočívá ve výběru a úpravě různých algoritmů pro popis kvality daného záznamu. Při výběru algoritmů pro objektivní charakterizaci archivního záznamu jsou použity dva základní přístupy, tedy dva základní typy algoritmů, které jsou popsány v kapitole 2.

Podstatou hodnocení je vyhodnocení výsledků jednotlivých algoritmů aplikovaných na surový (neupravený) digitalizovaný záznam a jejich porovnání s výsledky na restaurovaných, zmastrovovaných kopiích. Za vhodné algoritmy budou považovány ty, jejichž výsledky bude odpovídat tomu, že originální soubor je horší než jeho ručně restaurovaná kopie, neboť vylepšení (nebo přinejmenším nezhoršení) kvality záznamu při restauraci je základní předpoklad, ze kterého tato práce vychází.

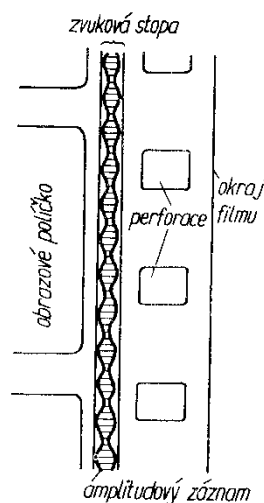
1 ARCHIVNÍ AUDIO ZÁZNAM

Archivním zvukovým záznamem se (alespoň v rozsahu této práce) myslí zvuková nahrávka staršího data vzniku, např. optický zvukový záznam na filmovém pásu, magnetofonová nahrávka apod. Tyto záznamy ovšem nároky na kvalitu a věrohodnost záznamu, jaké jsou dnes standardem, obvykle nesplňují. V této kapitole se diskutují různé charakteristické nedostatky optického záznamu zvuku. Právě z optického záznamu na filmu totiž pochází testované zvukové ukázky.

1.1 Optický záznam zvuku

Optický záznam zvuku se používá ve filmové technice k ozvučování filmů. První ozvučené filmy se objevily ve třicátých letech minulého století. První film s optickým záznamem zvuku byl promítán v roce 1928. [7]

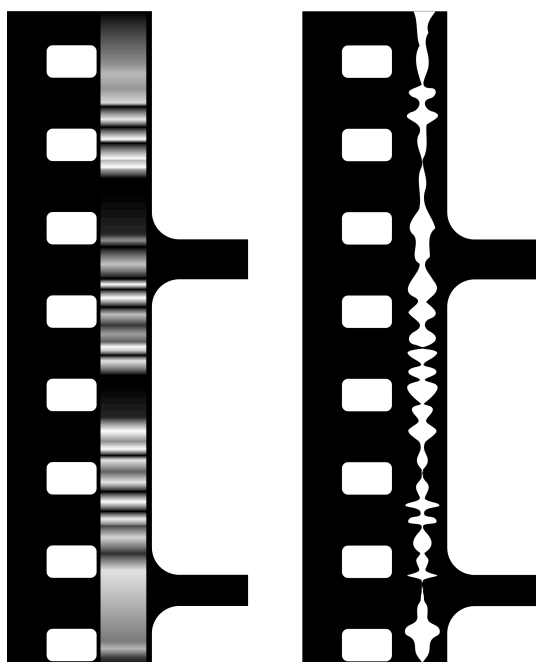
Princip záznamu zvuku opticky spočívá v přeměně elektrického signálu na světelný, který je následně zaznamenán na filmovém pásu. Zvuková stopa je exponována světlem, které je pak modulováno zvukovým signálem. Zvuková stopa je úzký proužek umístěný mezi perforací a jednotlivými obrazovými políčky. [7]



Obrázek 1.1 – Umístění zvukové stopy na filmovém pásu [7]

1.2 Typy optického záznamu

K optickému záznamu zvuku na filmový pás se používají dva způsoby. Jde o záznam plošný (amplitudový) a o záznam intenzitní (hustotní) (Obrázek 1.2). [11]



Obrázek 1.2 – Intenzitní a amplitudový záznam [12]

1.2.1 Intenzitní (hustotní) záznam

Tento princip záznamu spočívá v exponování zvukové stopy intenzitou světla, která je úměrná okamžité hodnotě zvukového signálu. Tím vzniká různé zčernání stopy při konstantní šířce. Zdrojem světelného toku je speciální výbojka, jejíž svítivost se mění podle právě zaznamenávaného zvukového signálu. [7]

1.2.1 Plošný (amplitudový) záznam

Tento typ záznamu je prováděn exponováním zvukové stopy konstantní intenzitou světla přes šterbinu, která je v závislosti na amplitudě zvukového signálu zčásti zakrývána stínem masky vhodného tvaru tak, aby osvětlená část šterbiny odpovídala okamžité hodnotě zvukového signálu. Zdrojem světelného toku je žárovka. Světlo se pomocí čočky přes masku a pohybující se zrcátko soustředí na příslušnou část filmového pásu.[11]

1.3 Artefakty v analogových záznamech

Problémy s kvalitou archivních záznamů se dají rozdělit do dvou hlavních kategorií. Zaprvé jde o artefakty lokalizované, které se projevují pouze v krátkých časových intervalech nebo v jednotlivých částech. Druhou kategorií jsou artefakty globální, které se vyskytují prakticky přes celý signál.

Lokalizované artefakty jsou například [1]:

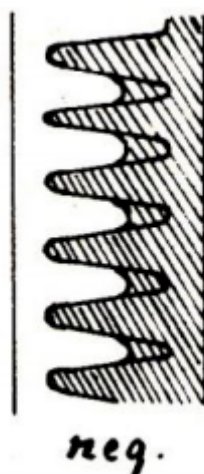
- Krátké poruchy způsobené materiálem (například drobné škrábance na záznamovém médiu). Takovéto artefakty jsou nahodilé jak rozložením v čase tak svojí délkou a amplitudou.
- Přejídný impulz, který je způsobován rezonancí ve snímačovém zařízení. Tento nízkofrekvenční impulz pak připomíná zvuk úderu.

Globální artefakty v analogových nahrávkách jsou například [1]:

- Širokopásmový šum – ten se vyskytuje prakticky ve všech analogových záznamových médiích. Šum obvykle zasáhne celé slyšitelné pásmo, což bývá nejmarkantněji poznat syčivým zvukem ve vyšší části spektra.
- Wov a fultter způsobují změnu výšky (rychlost přehrávání) a to např. kvůli kolísání rychlosti motoru. Intenzita tohoto efektu je závislá na charakteru původního zvuku - nejvýraznější v hudebním signálu, kde silně degraduje původní nahrávky.
- Zkreslení zvuku, tedy obecně nelinearity v záznamu způsobeny například ovlivněním amplitudy usměrňovacím jevem nebo zkreslení tvrdou limitací.

1.4 Usměrňovací jev – nelineární zkreslení

Usměrňovací jev vzniká u plošného optického záznamu, kde dochází k zalévání důlů záznamu nedostatečným rozlišením záznamového zařízení a média. Jde o nelineární zkreslení, které silně degraduje signál.



Obrázek 1.3 – Usměrňovací jev, ilustrace tzv. zalití důlů [11]

Standardní zkreslení přináší pouze vznik nových harmonických kmitočtů, zatímco usměrňovací jev k tomu ještě přidává zkreslení např. díky vzniku nízkých frekvencí, které vzniknou zalitím důlů v oblasti s vysokou amplitudou, zejména u signálu obsahujícího vyšší frekvence.

Tento jev se projevuje výrazně ve všech typech signálu, ale zřejmě nejvýrazněji vadí u přenosu sykavek, které jsou v našem jazyce velmi výrazné. V řečovém signálu pak v časech sykavek vznikají nízkofrekvenční rázy[14]. Proto pro signál zasažený usměrňovacím jevem lze pozorovat prudké rozšíření pásma v oblasti např. u sykavek.

2 HODNOCENÍ KVALITY ZVUKOVÝCH ZÁZNAMŮ

V problematice hodnocení kvality zvukových záznamů hraje zásadní roli psychoakustika. Tato vědní disciplína se např. zabývá definicemi vztahů mezi sluchovými vjemy a fyzikálními vlastnostmi zvuků, kterými byl vyvolány. Také popisuje limity lidského sluchu, jako jsou práh slyšení, maskování, frekvenční rozsah, křivky stejné hlasitosti apod. [13]

Při hodnocení kvality zvukové nahrávky existují dva základní přístupy. Prvním přístupem jsou subjektivní testy, které umožňují získat informaci o kvalitě sluchového vjemu přímo pomocí lidských uší. Druhý přístup je ryze technický, kdy se nahrávka analyzuje pomocí objektivních parametrů. Tyto parametry mohou buďto vycházet ze standardních veličin známých ze signálového zpracování (viz kapitola 2.2) nebo se nahrávka parametrizuje pomocí modelů slyšení, které simulují chování sluchového ústrojí posluchače.

Za nejlepší metodu hodnocení kvality jsou sice považovány subjektivní testy [15], ale jejich provedení je velmi časově náročné – obecně platí, že čím větší přesnost je požadována, tím delší čas je potřeba experimentálnímu testování věnovat. S čímž také souvisí finanční prostředky nutné pro takové testování. I proto existuje snaha nalézt rychlé a objektivní strojové metody, které nevyžadují takové množství finančních prostředků, lidských zdrojů a technického vybavení.

2.1 Subjektivní hodnocení

Subjektivním hodnocením kvality zvukových nahrávek se v případě zvukových nahrávek myslí poslechové testy. Pro poslechové testy je nutné vybrat dostatečné množství posluchačů, sestavit test a stanovit vhodné pokyny pro testované subjekty. Dále je pak nutné jejich odpovědi zpracovat a výsledky testů zanalyzovat pomocí vhodných statistických metod. Poslechové testy s sebou navíc nesou nutnost brát v potaz poslechové prostředí. Na výsledky testů mohou mít kromě samotné poslechové aparatury (frekvenční rozsah a vyrovnanost) a akustiky místnosti (doba dozvuku) vliv i umístění zdrojů zvuku a posluchače v prostoru (stojaté vlny, poměr přímého ku odraženému zvuku), úroveň šumu v pozadí, náchylnost na rušení z okolí apod. V neposlední řadě je výsledek ovlivněn lidským faktorem, protože na poslechový zážitek hraje roli mimo jiné třeba i nálada nebo zdravotní stav testovaného subjektu.

Jedním ze základních standardů pro zpracování poslechových testů je standard ITU-R BS.1116 [14].

Poslechové testy a subjektivní srovnávací metody však nejsou tématem této práce.

2.2 Objektivní hodnocení pomocí obecných parametrů

K objektivnímu porovnání nahrávek mezi sebou je nutné nejprve stanovit charakteristiky a veličiny, které lze objektivními metodami určit a které mají vypovídací hodnotu o kvalitě záznamu. Získané parametry jsou následně porovnány a vyhodnoceny. V této kapitole je uveden teoretický rozbor jednotlivých charakteristik, které jsou v této práci použity.

2.2.1 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah může být definován jako rozdíl hladiny maximální úrovně signálu ku hladině úrovně šumu. Obecně dynamický rozsah zvuku nebo zvukového média lze určit jako rozsah možných hodnot od úrovně šumu po maximální možný signál, kdy maximum je definované např. hodnotou maximálního povoleného zkreslení na výstupu. Dynamický rozsah tedy určuje, jaký je maximální možný odstup užitečného signálu od šumu. V případě lidského sluchu je dynamický rozsah dán prahem slyšení, který je pro oblast kmitočtů 500 Hz až 7 kHz přibližně 0 dB SPL (Sound Pressure Level – hladina akustického tlaku), a prahem bolestivosti, který je v dané oblasti přibližně 120 dB SPL. Dynamický rozsah lidského sluchu je tedy řádově 120 dB. V pásmu nižších frekvencí je však lidský sluch méně citlivý, proto se směrem k basovým kmitočtům dynamický rozsah snižuje [10] [25].

Pro hodnocení kvality se předpokládá, že vyšší dynamický rozsah bude odpovídat vyšší kvalitě záznamu. Dynamický rozsah je totiž snižován např. zkreslením (limitací) nebo množstvím šumu v nahrávce, což jsou objektivně negativní parametry.

2.2.2 Šířka pásma

Šířka pásma je definována jako efektivní frekvenční rozsah. Standardní postup určení nejnižší a nejvyšší frekvence je nalezení bodu poklesu úrovně o 3 dB, což odpovídá polovičnímu výkonu. Vzhledem k tomu, že zvukový záznam nemá vyrovnanou frekvenční charakteristiku, tento postup nejde aplikovat a je nutné hranice limitních frekvencí upravit složitějším způsobem. [17]

Optický záznam zvuku má u běžných filmů horní limit přenášených frekvencí přibližně 7000 – 8000 Hz. [4] Spodní limit se obvykle udává jako 30 Hz. Zavedení systému Dolby umožnilo postupné rozšíření pásma zejména na vyšších kmitočtech a to až na přibližně 13 kHz. [4]

Pro popis kvality by se na první pohled dalo předpokládat, že čím vyšší je průměrná šířka pásma, tím kvalitnější je záznam, neboť to znamená větší množství přenesené informace. To ovšem platí pouze pro signály nezasažené větším množstvím zkreslení. Větší množství výšek nebo hloubek u archivního záznamu na optickém médiu totiž obvykle znamená, že signál trpí zkreslením, které generuje frekvenční obsah nad rámec původního zvuku (typicky vyšší harmonické, ovšem může jít i o intermodulační zkreslení nebo zkreslení v důsledku usměřňovacího jevu). Proto se bude při popisu kvality za lepší považovat nižší šířka pásma, pokud zásadně neklesne pod očekávaný frekvenční rozsah [4].

2.2.3 Impulzní rušení

Impulzním rušením se myslí artefakty jako výpadek zvukového signálu nebo nahodilý krátký šum, které mají impulzní charakter. Nejčastěji jsou způsobeny poškozením povrchu zvukového média (škrábance, rýhy apod.).

Pro modelování impulzního šumu v digitálním prostředí se používá tzv. aditivní model, který předpokládá, že signál nevypadává, ale veškeré artefakty se k původnímu zvukovému signálu přičítají [9]. To lze zapsat následující rovnicí:

$$y(m) = x(m) + i(m)n(m),$$

kde výsledný signál $y(m)$ je tvořen původním signálem $x(m)$ v součtu se signálem $n(m)$, který představuje poškození záznamu. Vektor $i(m)$ pak udává, které vzorky signálu jsou poškozené. Nabývá tedy hodnot 1 v místech poškození a 0 jinde. Impulsní šumu se tedy analyzuje pomocí určení vektoru $i(m)$ [9].

Pro analýzu se nejčastěji používá metoda s použitím odhadu lineárním predikčním auto-regresivním modelem, který předpovídá hodnotu dalšího vzorku pomocí vhodného počtu hodnot předchozích. [16]. Ta je považovaná za „kvalifikovaný odhad“ a následně je stanoven rozdíl mezi odhadnutou a skutečnou hodnotou. Pravidla pro stanovení vhodného prahu včetně detailního popisu problematiky jsou v publikaci [1].

Pro popis kvality se bude za lepší záznam považovat ten, který má menší úroveň impulsního rušení.

2.3 Objektivní hodnocení pomocí modelu slyšení

Podstatou hodnocení pomocí modelu slyšení je simulace vnímání sluchové cesty člověka. Pro co největší přiblížení se lidskému vnímání kvality se používají intruzivní metody modelu sluchové cesty. První standardizovanou metodou podle ITU-R BS.1387 [20] byla *Perceptual Evaluation of Audio Quality* neboli PEAQ. V této metodě probíhá kvalitativní hodnocení pomocí umělé neuronové sítě [19].

Mezi další ITU doporučení lze najít např. model *Perceptual Speech Quality Measure* [21], kde místo neuronové sítě výpočet probíhá lineární kombinací různých průměrovaných rozdílů nebo *Perceptual Evaluation of Speech Quality* (PESQ) [22]. Tento model se kromě řeči používá také na hodnocení jiných signálů. [19]

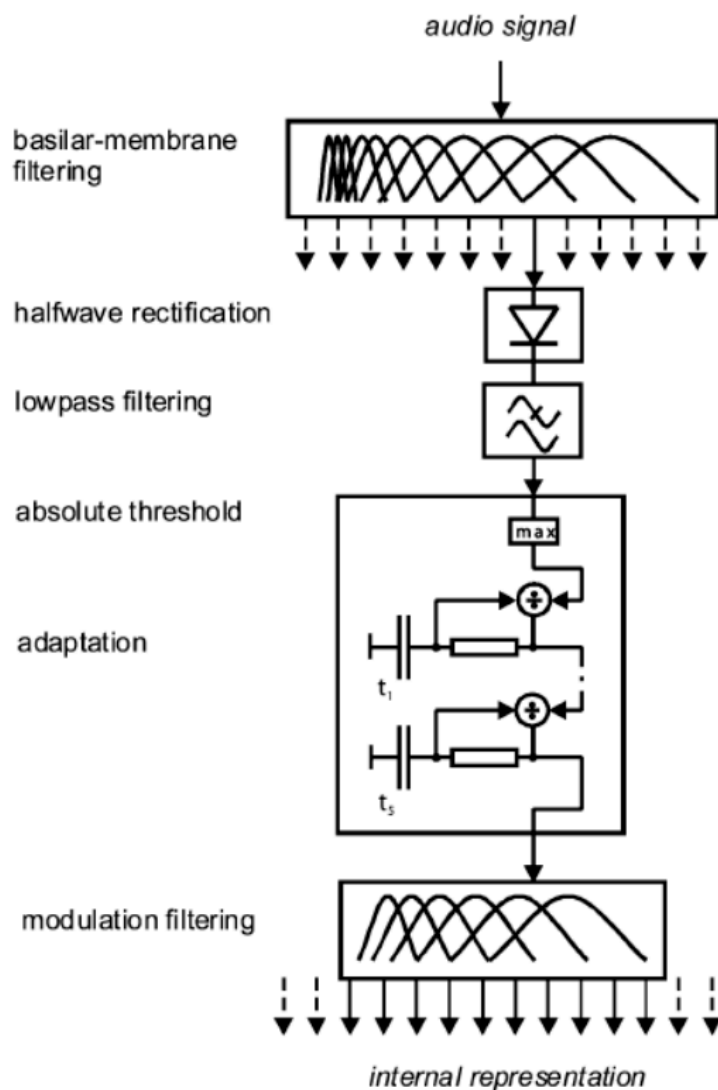
Poslední ITU doporučení v oblasti objektivního srovnání kvality zvukových vjemů je *Perceptual Objective Listening Quality Analysis* (POLQA) popsané v doporučení ITU-T P.863 [23]

2.3.1 PEMO-Q – Perception Model – Quality

Metoda použitá v této práci pro porovnání s použitím modelu slyšení je model PEMO-Q, který byl sestaven a popsán v roce 2006 v článku *PEMO-Q - a new method for objective audio quality assessment using a model of auditory perception* [18]. Metoda principiálně vychází z PEAQ, ale nemá problémy plynoucí z proměnných jevů např. kvůli adaptaci na neuronovou síť a oproti PEAQ obecně rozšiřuje možnosti a hloubku analýzy.

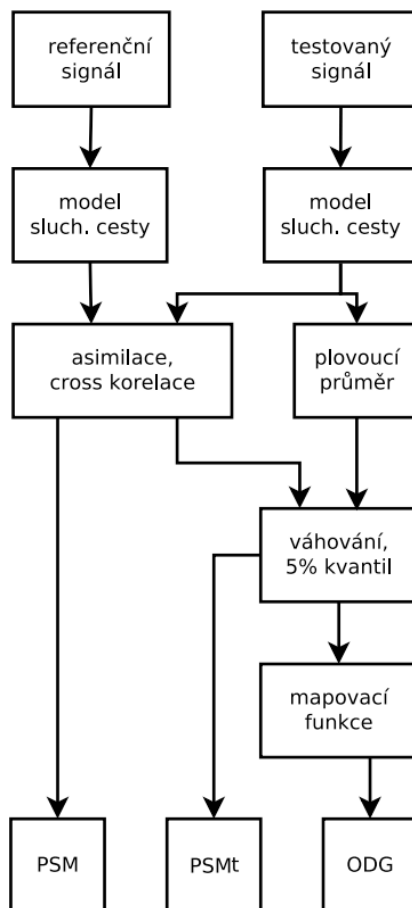
PEMO-Q je intruzivní metoda, což znamená, že pro její ideální funkci je nutné dodat perfektní referenční signál bez žádných nedostatků. V našem případě budou za referenční signál považovány vzorky, které prošly masteringem. Dále je nutné dodržet stejnou hlasitost a délku signálů.

V použité implementaci je k dispozici kód pro analýzu a přenásobení jednoho ze signálů odpovídajícím rozdílem RMS hodnot. Délka signálu je v dostupných vzorcích již vyřešena, protože mají všechny vzorky stejnou délku).



Obrázek 2.1 – Blokové schéma sluchové cesty PEMO-Q[18]

Přepočítání zvukového signálu na odhadované odpovídající nervové stimuly probíhá ve třech hlavních krocích. Jedná se o modelaci akusticko-mechanické cesty, modelaci cesty nervové a posledním krokem je modulační filtrace modelující schopnost rozpoznat amplitudovou modulaci. Na začátku tedy je model bazilární membrány pomocí banky 35 grammatónových filtrů čtvrtého řádu. Tato filtrace má za úkol simulovat rozlišení lidského sluchu ve spektrální doméně. [18]. Všechny další výpočty probíhají pro vyfiltrovaná pásma nezávisle. Signál je poté půlvlnně usměrněn a filtrován dolní propustí s mezní frekvencí 1 000 Hz, což simuluje převod z mechanických kmitů na samotné nervové impulzy. [18] [3] Blokové schéma sluchové cesty je zobrazené na obrázku 2.1.



Obrázek 2.2 – Blokové schéma kompletního implementovaného PEMO-Q modelu[3]

Na Obrázku 2.2 je vyobrazeno kompletní schéma PEMO-Q modelu. Lze zde vidět, jakým způsobem bylo dosaženo jednotlivých parametrů PSM , PSM_t a ODG .

Parametr PSM (Perceptual Similarity Measure – hodnota vnímané podobnosti) se získá počítáním vzájemné korelace přes celou délku signálu a pro všechna frekvenční pásma, následným přenásobením koeficientem spočteným pomocí podílu součtu kvadrátů všech hodnot reprezentace signálu vůči součtu kvadrátů hodnot všech modulačních pásem. Detailní rozbor výpočtu včetně všech vzorců je k dispozici v pracích [18] a [3]. Samotná hodnota PSM by se podle tvůrců [18] měla pohybovat v rozmezí od 0 do 1. Hodnota 1 vyjadřuje naprostou identitu signálu s referenčním záznamem. Na opačném rozsahu je ovšem možné limit překročit a teoreticky lze dosáhnout hodnot až -1.

Druhý parametr PSM_t , která má oproti PSM i časovou závislost, kdy jsou uvnitř vnitřní reprezentace počítány vzájemné korelace pro 10ms rámce. Výsledné hodnoty těchto korelací (viz Obrázek 2.2) jsou poté váhovány pohyblivým průměrem časového průběhu vnitřní reprezentace zkresleného signálu. To má za cíl popsat rychlé změny zvuku a jejich vliv na sluchový vjem. Výslední hodnota PSM_t se získá jako 5% kvantil z těchto váhovaných krátkodobých korelací.[3]

Poslední parametr je ODG (Objective Difference Grade – hodnocení objektivního rozdílu), který vznikne vhodným namapováním parametru PSM_t , který je považován za lepší odhad [18]. Tím lze poté lépe srovnávat výsledek se standardním 5úrovňovým hodnotícím systémem podle doporučení ITU BS.1381-1[20], které má stupnici v rozsahu 1.0 – 5.0, kdy 1 je velmi rušivé a 5 je poslechově shodný vzorek, zatímco ODG má rozsah -4.0 – 0.0, v korespondujícím pořadí.

3 SESTAVENÍ A IMPLEMENTACE ALGORITMŮ

3.1 Použité testovací vzorky

K testování navrhovaných a implementovaných metod byly použity dostupné vzorky z restaurovaného optického záznamu filmového zvuku snímku Baron Prášil.

V následující tabulce (Tabulka 3.1) jsou rozepsány všechny testované vzorky dodané vedoucím práce. Vzorky typu Unprocessed obsahují surový zvuk z optického filmového záznamu. Vzorky typu Master prošly blíže nespecifikovaným masteringovým procesem, jehož charakteristiky budou v dalších kapitolách testovány.

název vzorku	typ vzorku	obsah vzorku	označení vzorku
Esses	Master	mluvené slovo s množstvím sykavek	A
Esses	Unprocessed	mluvené slovo s množstvím sykavek	B
MusicFX	Master	hudba a mluvené slovo	C
MusicFX	Unprocessed	hudba a mluvené slovo	D
Music	Master	hudba s efekty	E
Music	Unprocessed	hudba s efekty	F
SFX	Master	zvukové efekty	G
SFX	Unprocessed	zvukové efekty	H
Thunder	Master	zvukové efekty - bouřka	I
Thunder	Unprocessed	zvukové efekty - bouřka	J

Tabulka 3.1 – Seznam testovaných vzorků

Všechny vzorky byly dodány v 24bitové kvalitě ve formátu WAV PCM. Zmasterované vzorky byly dodány se vzorkovací frekvencí 48 kHz, zatímco syrové náběry se vzorkovací frekvencí 96 kHz, která byla pro účely porovnání s masterovanými nahrávkami snížena také na 48 kHz pomocí funkce *decimate*. Všechny vzorky pochází z filmu Baron Prášil a jedná se o úseky stejné délky (30 vteřin) vždy s charakteristickým obsahem, viz Tabulka 3.1.

V rámci analýzy budou zmasterované vzorky považovány za ideálně upravený záznam, který by v žádném vhodném objektivním testu neměl vykazovat horší výsledek, než neupravený originální záznam.

3.2 Testovací rozhraní

Pro návrh a realizaci algoritmů a jejich následnou aplikaci na dostupné vzorky bylo použito prostředí MATLAB verze R2013a včetně rozšíření *Signal Processing Toolbox*. V tomto toolboxu jsou k dispozici nástroje pro práci s filtry, pro výpočet FFT (rychlé Fourierovy transformace) a další. Prostředí MATLAB také umožňuje přímé načtení zvukových souborů ve formátu WAV PCM, ve kterém byly dodány zkoumané vzorky.

3.3 Limitace objektivního srovnávání

Při snaze implementovat i ty nejjednodušší diagnostické nástroje se naráží na nutnost ručního zásahu do testovaných vzorků, přinejmenším výběrem vhodného části nahrávky pro jednotlivé testovací úkony nebo nastavením vhodných prahových hodnot, aby výsledky měly náležitou vypovídací hodnotu. Tato práce si neklade za cíl nahradit tento proces automatizací.

3.4 Stanovení jednotlivých parametrů pro srovnání

Jak již bylo uvedeno v teoretickém rozboru v kapitole 2.2.1, dynamický rozsah nahrávky můžeme určit jako poměr maximální úrovně signálu a úrovně šumu.

3.4.1 Stanovení dynamického rozsahu pomocí RMS

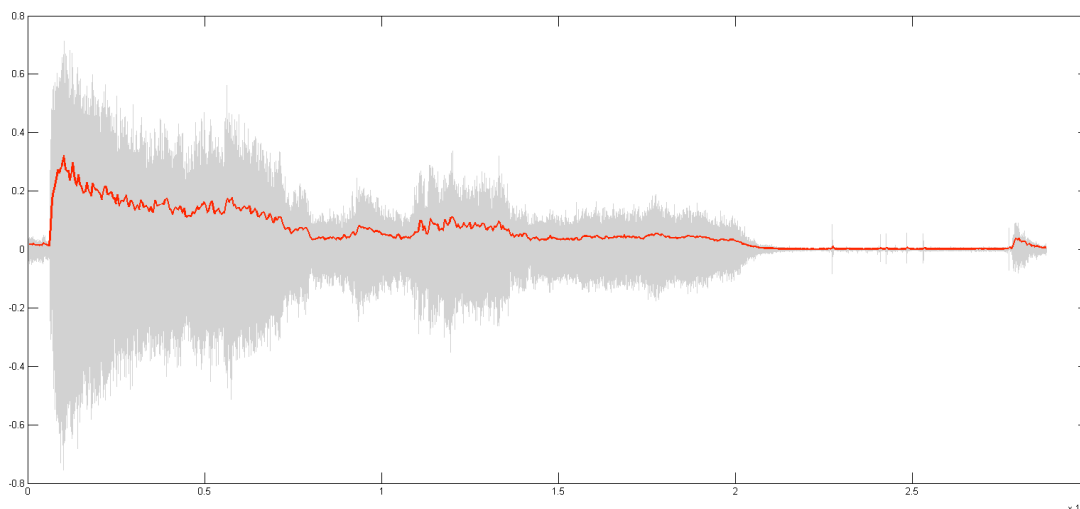
Jak již bylo uvedeno v teoretickém rozboru v kapitole 2.2.1, dynamický rozsah je definován jako poměr maximální úrovně signálu k úrovni šumu. Pro stanovení dynamického rozsahu byla zvolena metoda výpočtem efektivní hodnoty (RMS – Root Mean Square) pro jednotlivá časová okna s danou délkou, kdy pro každé zvlášť je proveden výpočet RMS. Následně se určí rozdíl maximální a minimální efektivní hodnoty, který lze považovat za dynamický rozsah nahrávky[2].

Příklad implementace stanovení dynamického rozsahu pomocí RMS[2]:

```
for i = 1:nbWindows
    slice = x(1+(i-1)*wlen:i*wlen);
    % signál je rozdělen na okna a probíhá výpočet RMS každého okna
    aktrms(i) = rms(slice);
end;
```

$\text{DynRozsah} = 20 \cdot \log_{10} (\max(\text{aktrms}) / \min(\text{aktrms}));$
% vyjádření poměru mezi minimálním a maximálním RMS v
decibelech

Vypočítaná efektivní hodnota pro délku okna 4096 samplů pro vzorek „A“:



Graf 3.1 – průběh RMS (červenou linkou) proti signálu pro vzorek A

Tímto způsobem byly vypočteny dynamické rozsahy všech vzorků a zaneseny do tabulky 4.1.

3.4.2 Stanovení šířky pásma

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2.2, ke stanovení šířky pásma zvukového signálu je nutné určit nejnižší a nejvyšší frekvenci, která se v nahrávce vyskytuje. Pro tento úkol bude tedy nutné zkoumat frekvenční spektrum nahrávky, ze kterého pak bude možné nejvyšší a nejnižší frekvenci určit.

Vzhledem k tomu, že signál jistě nebude mít vyrovnanou spektrální charakteristiku, je nutné experimentálně určit vhodný práh. [17] Základním postupem je rozdělení signálu na jednotlivá časová okna a výpočet spektra pomocí FFT každého zvlášť, což umožní vyhodnotit spektrum v každém okně zvlášť. Na signál je poté aplikován mediánový filtr řádu 3. V rámci jednotlivých oken je poté určen rozdíl maximální a minimální hodnoty. Tyto hodnoty se poté zprůměrují, čímž se získá šířka pásma pro celý záznam. Prahové hodnoty jsou nastavovány tak, aby odpovídaly známým hodnotám z uměle filtrovaných širokospektrálních (hudebních) signálů stejné hlasitosti.

Implementovaný algoritmus (převzatý z [2]) počítá navíc s výpočtem prahové hodnoty z maxima ve frekvenčním pásmu 70 Hz – 8 kHz pro každé okno zvlášť, čímž se eliminuje vliv různých hlasitostí nahrávek. Od globálního maxima je odečtený nejprve dynamický rozsah, poté je vypočítán průměr maxim ze všech oken a ten je také odečten. Poté je ještě odečteno 5dB, což experimentálním testem nejlépe odpovídá hodnotám odečteným na spektrálním analyzáru.

Příklad implementace stanovení šířky pásma [2]:

```
for i = nbWindows
    slice = x(1+(i-1)*wlen:i*wlen);
    % projede signal po oknech a spočítá spektrum každého okna
    X = fft(slice.*hamming(wlen));
    df=fs/N;
    Xdb=20*log10(abs(X(1:N/2)));
    MAX_global(i) = max(Xdb(round(3e2/df):round(8e3/df)));
    ...
    prahbw = max(MAX_global-DNRT-MAX_global_mean + RMS_MED-
5)
```

Z analýzy jsou dále vyloučena okna, kde se šířka pásma odchyluje od průměru o větší hodnotu, než je směrodatná odchylka tohoto průměru. Tím jsou minimalizovány možné vlivy obou extrémů (tedy jak příliš širokému pásmu v oblastech ticha tak příliš úzkému pásmu v oblastech např. samostatných tónů harmonicky nebohatých nástrojů).

Příklad implementace stanovení šířky pásma [2]:

```
if isempty (find(medXdb>prahbw))
    % hodnota mediánové spektra vyšší než práh
    BWN(i) = 0;
else BWN(i) = (max(f(find(medXdb>prahbw))) -
min(f(find(medXdb>prahbw))));
end
```

3.4.3 Stanovení množství impulzního rušení

Pro detekci impulzního rušení je implementována metoda s použitím odhadu lineárním predikčním auto-regresivním modelem. Algoritmus pro detekci impulzního šumu byl navržen v rámci diplomové práce *Úpravy archivních a poškozených záznamů zvukových signálů*[16].

Princip metody spočívá v odhadu hodnoty následujícího vzorku pomocí hodnot předchozích vzorků, kdy se tento odhad poté porovná se skutečnou hodnotou vzorku. Protože dodané vzorky pochází ze stejného filmu a mastering celkovou hlasitost zásadně nezměnil, použijeme pro porovnání implementaci RMS.

Příklad implementace množství impulzního rušení:

```
Imp_noise = clickDetectionAR(x,3);  
% funkce pro detekci impulzního šumu  
mean(Imp_noise1)
```

3.4.4 Stanovení úrovně neharmonického zkreslení

Z detekovatelných veličin se jako nejlepší pro analýzu úrovně neharmonického zkreslení jeví analýza pomocí šířky pásma, protože mezi hlavní artefakty, které toto zkreslení způsobuje, patří právě prudké rozšíření šířky pásma [2].

Na základě pravidla o třech směrodatných odchylkách, které říká, že s pravděpodobností 95 % leží všechny relevantní hodnoty ve vzdálenosti menší než dvě směrodatné odchylky od průměru, lze za problémová označit taková okna, jejichž šířka pásma se od průměru liší o více než dvě směrodatné odchylky. Implementace tohoto pravidla vypadá následovně[2]:

```
CM_wrong = find ( abs (BWN-BWN_mean_) > BWN_std*2);
```

Při porovnání se za kvalitnější signál bude považovat takový, jehož úroveň zkreslení bude menší.

3.4.5 Stanovení hodnot z modelu slyšení PEMO-Q

Celá implementace PEMO-Q modelu je přejata z práce *Hodnocení kvality analogového záznamu zvuku s využitím modelu slyšení [3]*, kde je k dispozici řešení přenásobením jednoho ze signálů odpovídajícím rozdílem RMS hodnot. Délka signálu je v dostupných vzorcích již vyřešena (dokonce všechny vzorky mají stejnou délku).

Podstatou algoritmu je funkce *pemoq_am*, která realizuje samotný model sluchové cesty pro daný signál. Dále je ještě nutné zmínit funkce *pemoq_am_prepare*, která vypočítává hodnoty koeficientů pro danou vzorkovací frekvenci.

Samotné vyhodnocení hodnot *PSM*, *PSM_t* a *ODG* následně probíhá pomocí funkce *objquality*. Jak je zmíněno v kapitole 2.3.1, implementace očekává vzorky stejné hlasitosti a stejné délky, což bylo v případě dodaných vzorků splněno.

4 POROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

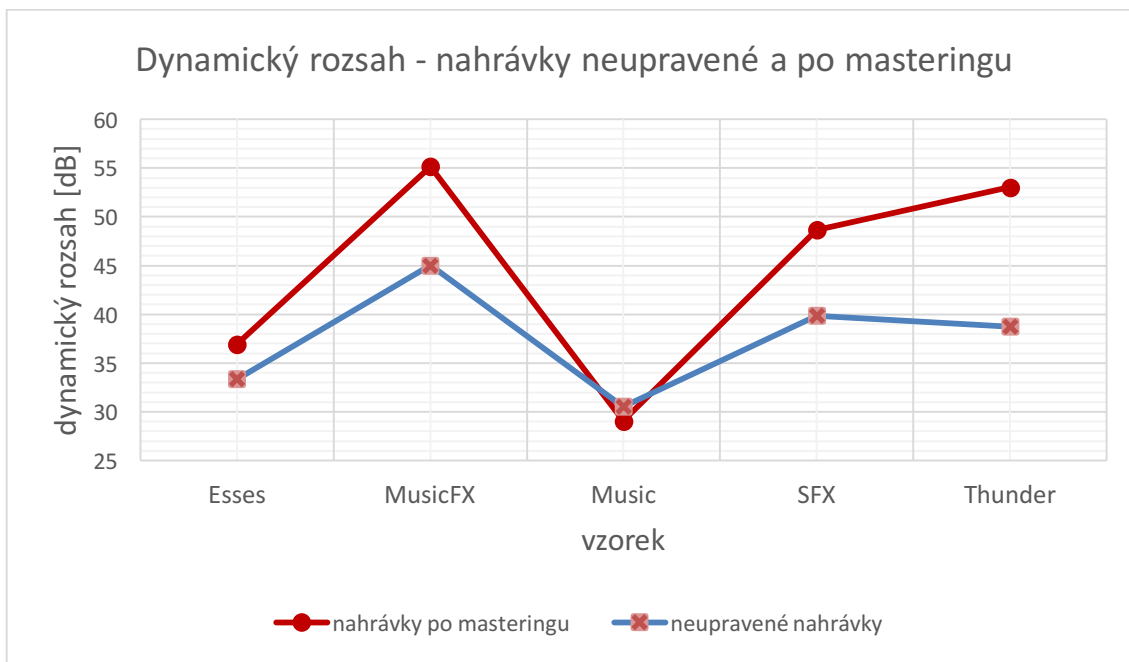
Jak je zmíněno již v úvodu, princip porovnání spočívá v tom, že se nahrávka, která prošla masteringem, považuje za univerzálně lepší. Samozřejmě je nutné počítat i s variantou, že může existovat parametr, který v dané nahrávce nepůjde vylepšit žádnou dostupnou technologií, ať už z důvodu přílišné komplexnosti vady nebo přílišného rozsahu poškození záznamu.

V každé měřené kategorii je nejprve vyobrazena tabulka se soupisem hodnot, které jsou poté pro názornost zobrazeny pomocí grafů, ve kterých jsou společně zobrazeny vzorky před a po masteringové úpravě. V dalším grafu nebo grafech jsou poté nahrávky před a po úpravě zobrazeny ve vztahu vůči sobě.

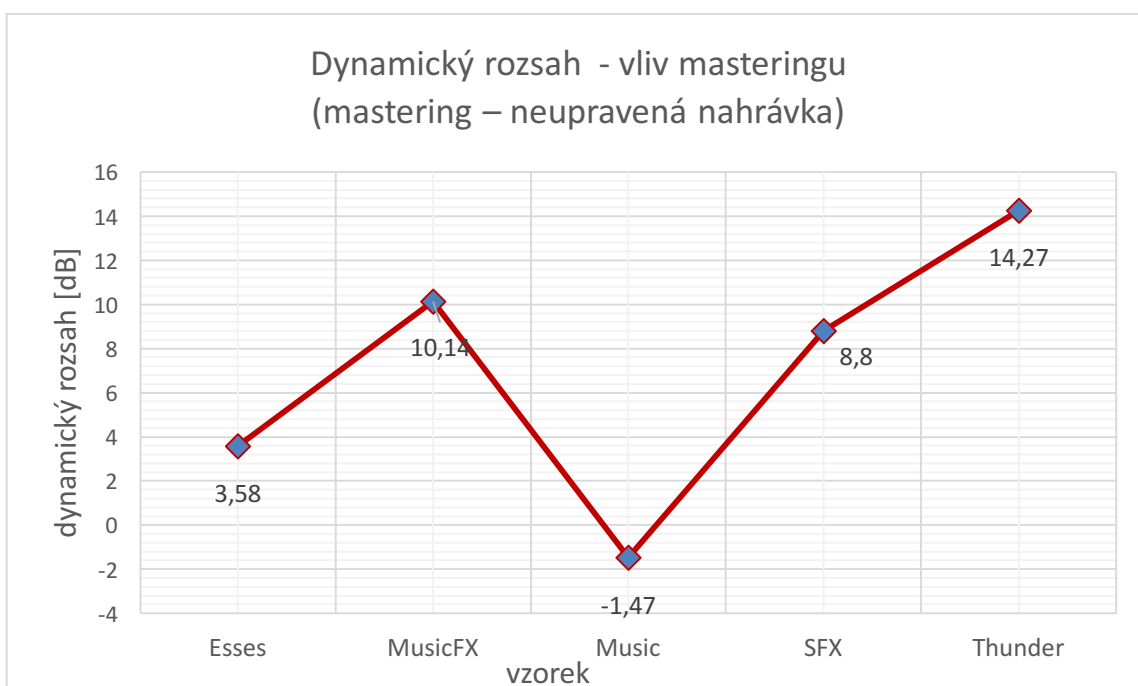
4.1 Dynamický rozsah

název vzorku	typ vzorku	obsah vzorku	označení	dynamický rozsah [dB]
Esses	Master	mluvené slovo s množstvím sykavek	A	36,94
Esses	Unprocessed	mluvené slovo s množstvím sykavek	B	33,36
MusicFX	Master	hudba a mluvené slovo	C	55,16
MusicFX	Unprocessed	hudba a mluvené slovo	D	45,02
Music	Master	hudba s efekty	E	29,07
Music	Unprocessed	hudba s efekty	F	30,54
SFX	Master	zvukové efekty	G	48,66
SFX	Unprocessed	zvukové efekty	H	39,86
Thunder	Master	zvukové efekty - bouřka	I	53,02
Thunder	Unprocessed	zvukové efekty - bouřka	J	38,75

Tabulka 4.1.1 – Tabulka s dynamickým rozsahem pro jednotlivé vzorky



Graf 4.1.2 – Dynamický rozsah upravené i neupravené nahrávky pro jednotlivé vzorky



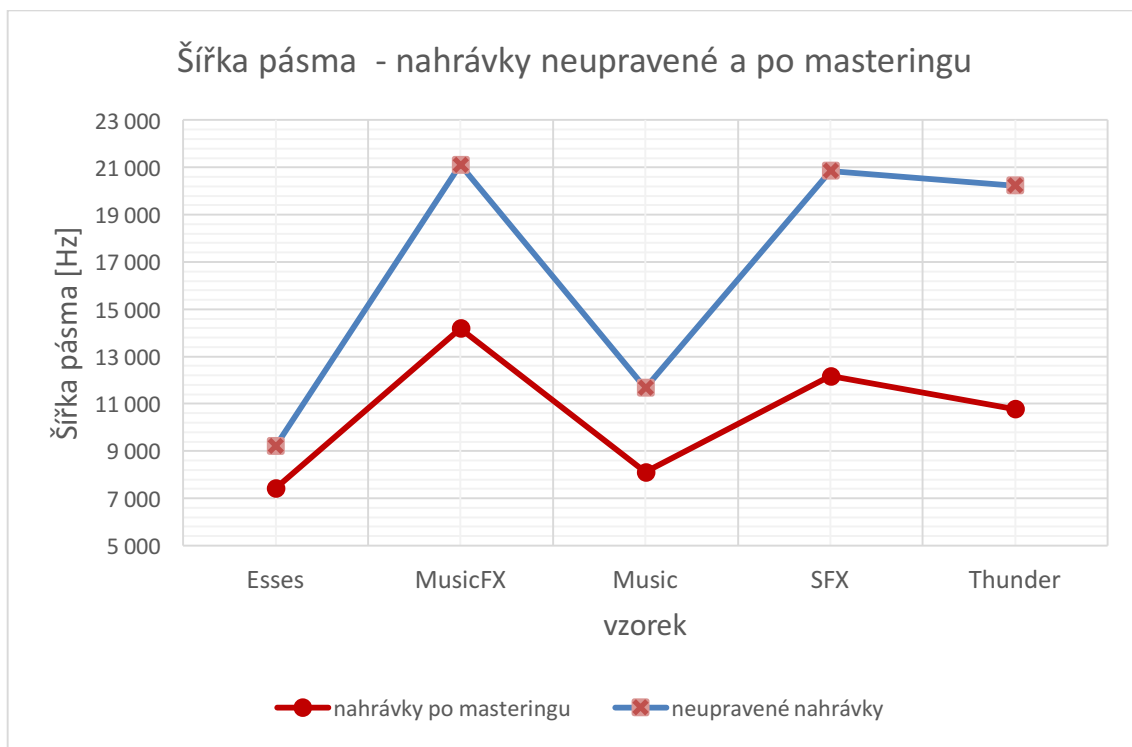
Graf 4.1.3 – Dynamický rozsah v porovnání mastering/neupravená nahrávka

Dynamický rozsah udává rozdíl mezi nejslabšími a nejsilnějšími. Podle předpokladu má při dané implementaci pomoci RMS lepší výsledek všude kromě třetího vzorku *Music* (což je záznam hudby včetně efektů). V případě vzorku *MusicFX* dokonce pozitivní rozdíl představuje zisk až 10 dB a u vzorku *Thunder* dokonce přes 14 dB.

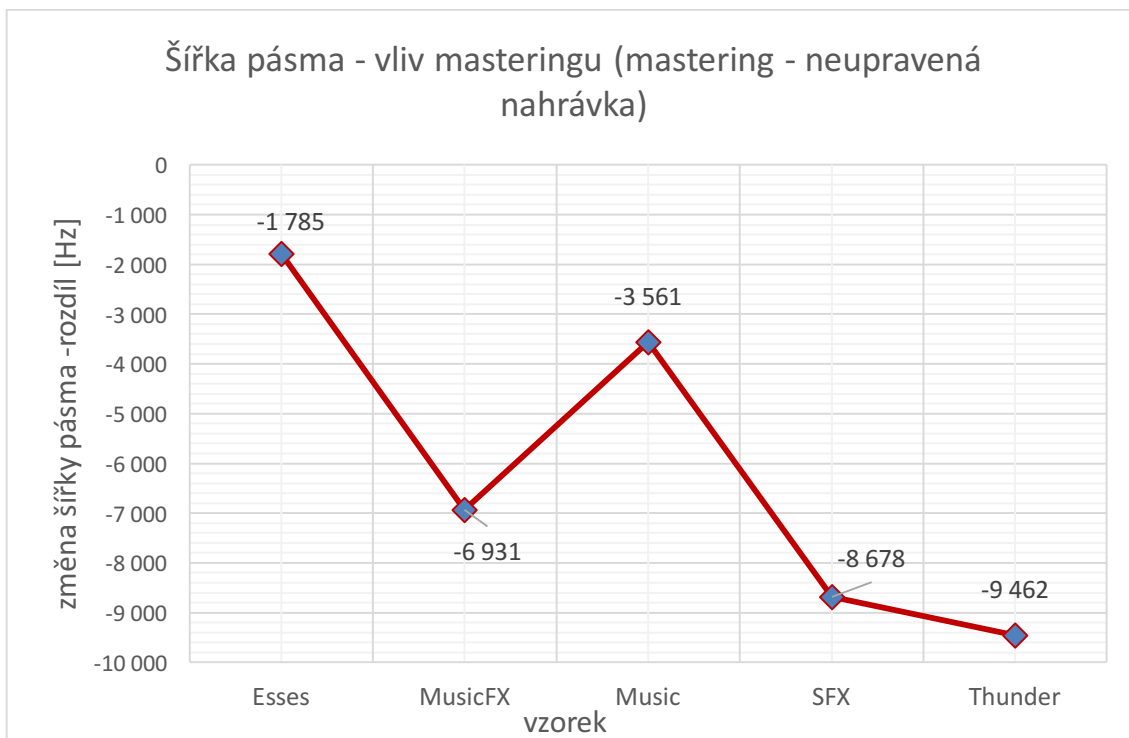
4.4 Šířka pásma

označení vzorku	šířka pásma	rozdíl [Hz]	rozdíl [dB]
A	7 430	-1 785	-1,87
B	9 215		
C	14 183	-6 931	-3,46
D	21 114		
E	8 105	-3 561	-3,16
F	11 666		
G	12 174	-8 678	-4,67
H	20 852		
I	10 772	-9 462	-5,48
J	20 234		

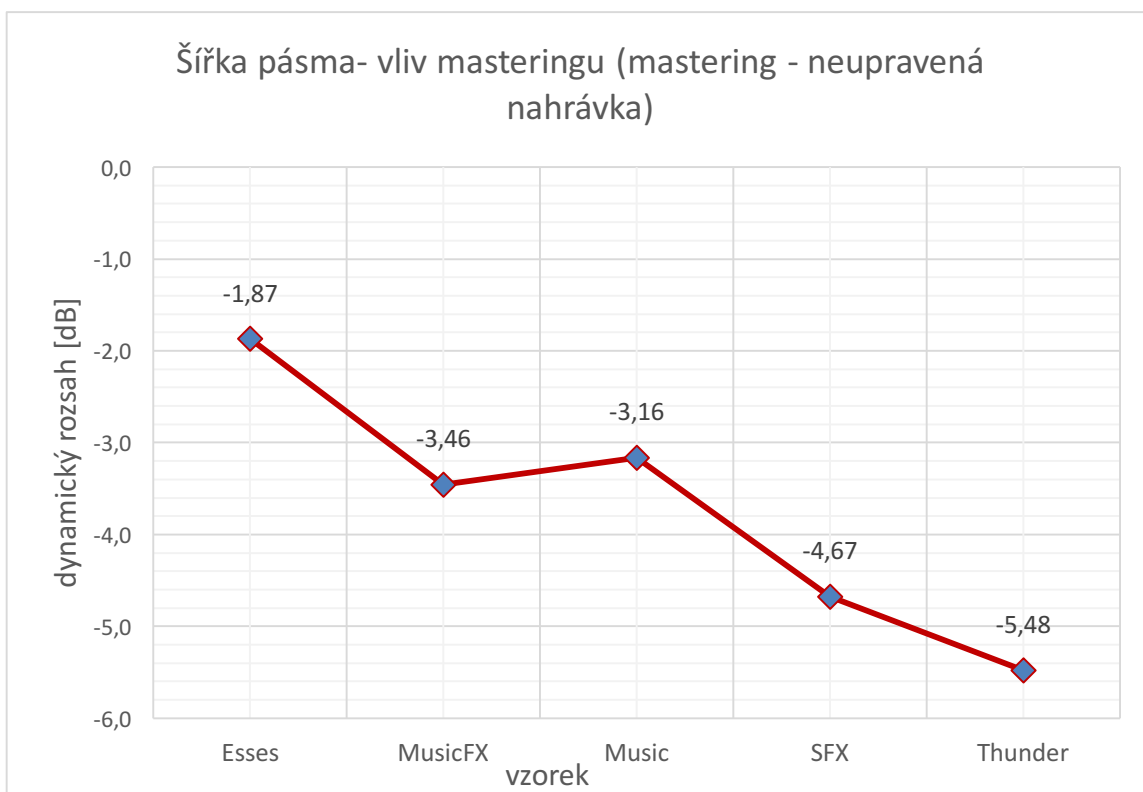
Tabulka 4.2.1 – Šířka pásma jednotlivých vzorků (rozdíl = Master - Unprocessed)



Graf 4.2.2 – Šířka pásma jednotlivých vzorků



Graf 4.2.3 – Šířka pásma jednotlivých vzorků



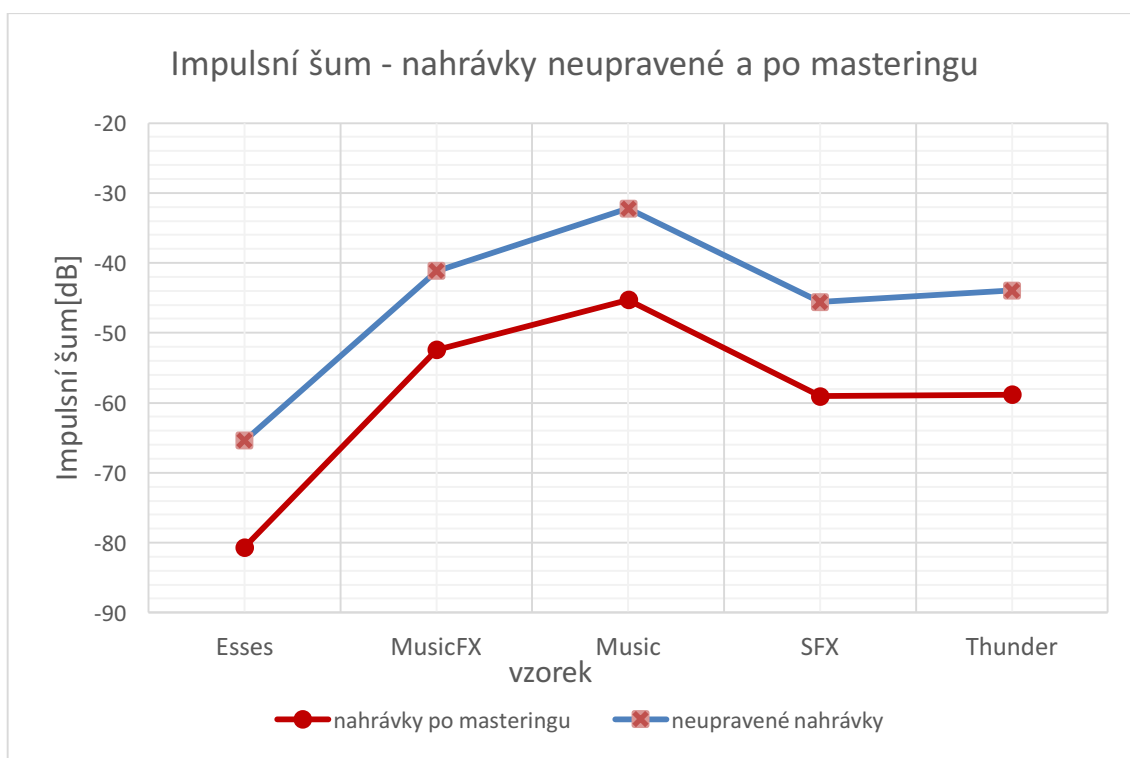
Graf 4.2.4 – Šířka pásma jednotlivých vzorků

Šířka pásma u jednotlivých vzorků vykazuje očekávaný průběh, tedy takový, že nahrávky prošlé masteringem vykazují nižší šířku pásma. Vzhledem k číselným hodnotám se dá očekávat, že algoritmus i masteringový proces probíhaly v pořádku, neboť pro zmastervované signály vycházejí hodnoty, které naprosto odpovídají očekávané šířce pásma původního média – optického záznamu.

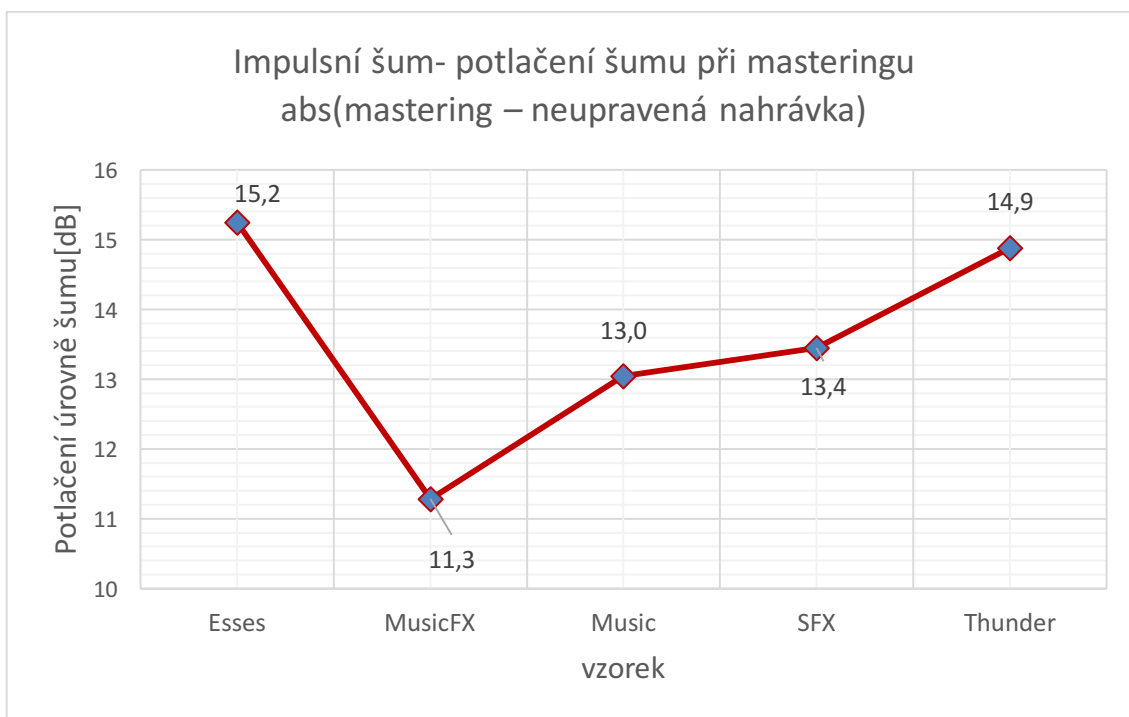
4.3 Impulzní šum

označení vzorku	šum RMS [dB]	potlačení šumu dB
A	-80,7	15,2
B	-65,4	
C	-52,4	11,3
D	-41,2	
E	-45,3	13,0
F	-32,2	
G	-59,1	13,4
H	-45,6	
I	-58,8	14,9
J	-43,9	

Tabulka 4..3.1 – Impulzní šum pro jednotlivé vzorky a potlačení šumu vlivem masteringu



Graf 4.3.2 – Impulzní šum pro jednotlivé vzorky

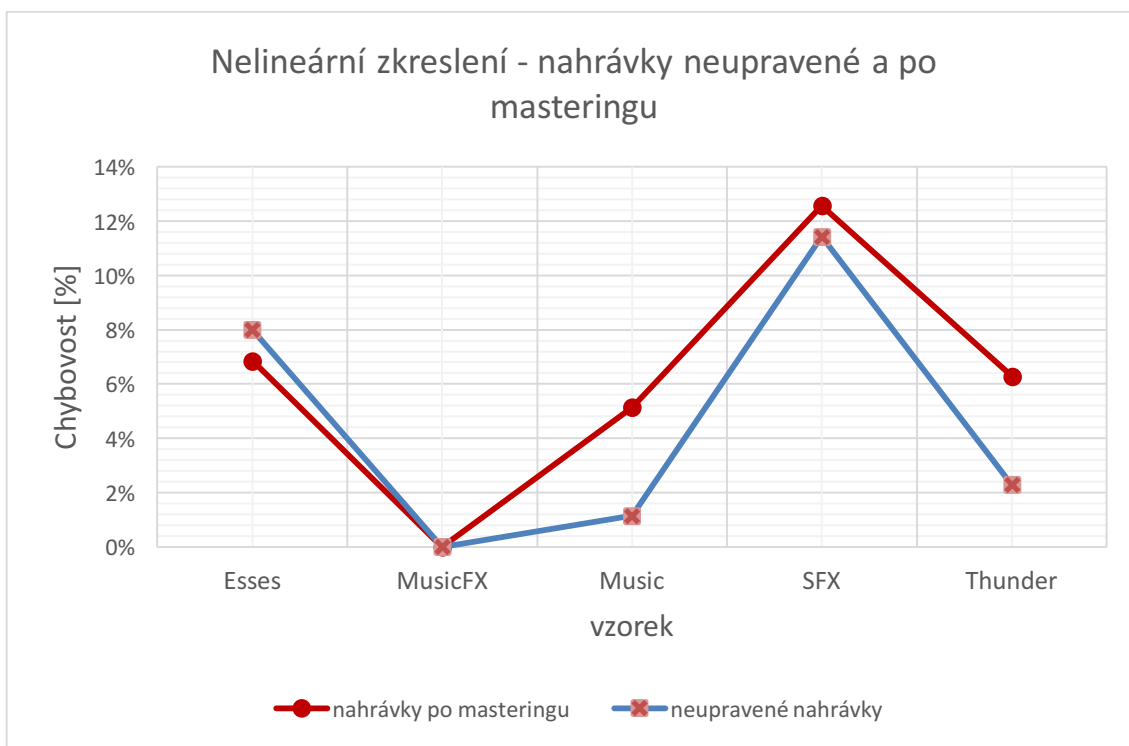


Graf 4.3.3 – Impulsní šum – potlačení šumu masteringem

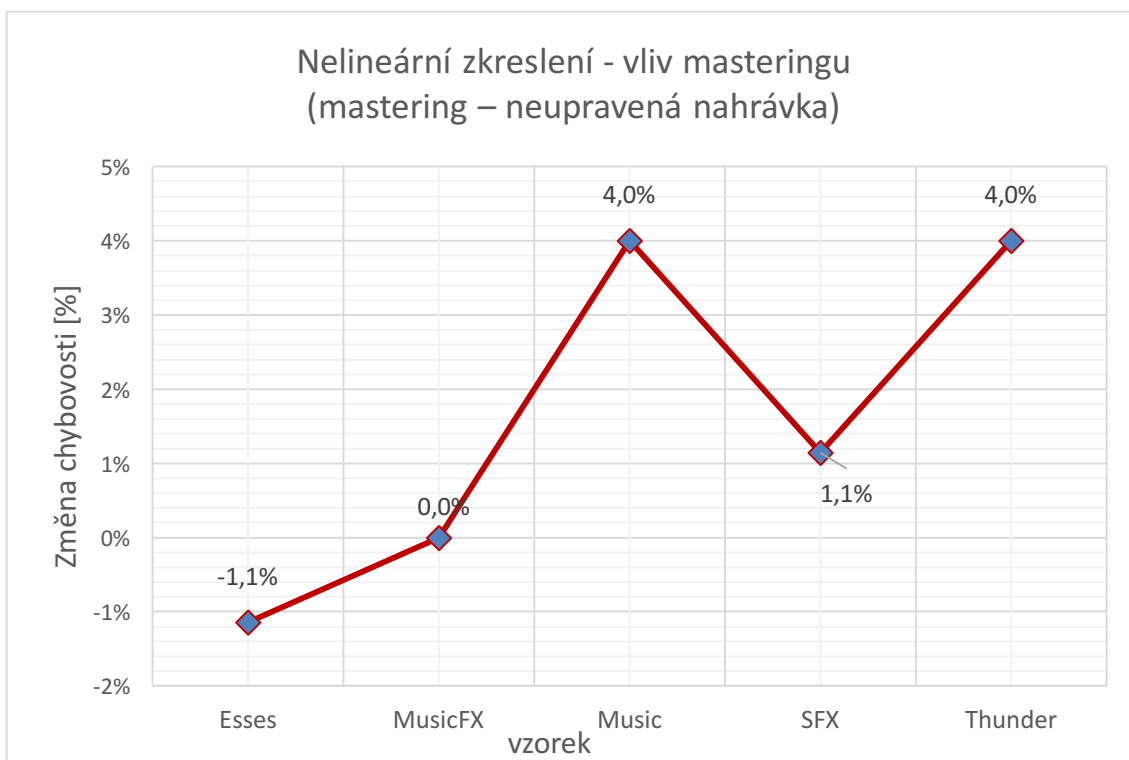
4.4 Nelineární zkreslení

označení vzorku	počet chybných	celkový počet oken	chybovost [%]	rozdíl chybovosti [%]
A	12	175	6,9%	-1,1%
B	14	175	8,0%	
C	0	175	0,0%	0,0%
D	0	175	0,0%	
E	9	175	5,1%	4,0%
F	2	175	1,1%	
G	22	175	12,6%	1,1%
H	20	175	11,4%	
I	11	175	6,3%	4,0%
J	4	175	2,3%	

Tabulka 4.4.1 – Nelineární zkreslení, chybovost oken a rozdíl chybovosti



Graf 4.4.2 – Nelineární zkreslení – chybovost pro jednotlivé vzorky



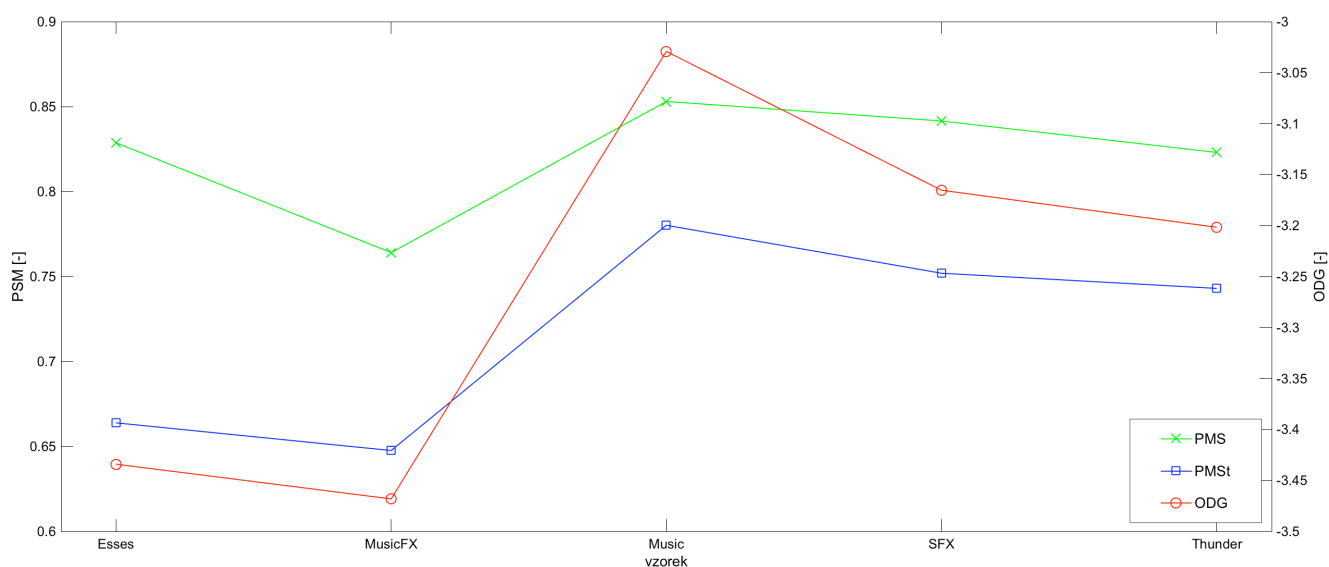
Graf 4.4.3 – Nelineární zkreslení – rozdíl (změna) chybovosti při masteringu

Výpočet nelineárního zkreslení metodou popsanou v kapitolách 3.4.2 a 3.4.4 poskytuje hodnoty, které sice příliš neodpovídají očekávaným hodnotám, ale nejsou s nimi ani v rozporu. U dvou vzorků chybovost po masteringu oproti původnímu signálu vzrostla, a to o 4 procenta. Zbývající 3 vzorky však vykazovaly hodnoty chybovosti před a po masteringu téměř totožné, přičemž u vzorků A a B, což byly vzorky obsahující velké množství sykavek, dokonce masteringová úprava dokázala chybovost oproti originálnímu záznamu snížit. Výsledek lze také mimo jiné považovat za důkaz toho, že obecné zkreslení signálu degraduje nahrávku s minimálními šancemi na opravu.

4.5 PEMO-Q

označení vzorku	PSM [-]	PSMt [-]	ODG [-]
A	0,8387	0,7180	-3,2902
B			
C	0,7784	0,6567	-3,4495
D			
E	0,8696	0,8022	-2,8925
F			
G	0,8494	0,7559	-3,1483
H			
I	0,8319	0,7582	-3,1381
J			

Tabulka 4.5.1 – PEMO-Q model výsledky porovnání



Graf 4.5.2 – PEMO-Q model výsledky PSM, PSM_t a ODG

Výsledky analýzy pomocí PEMO-Q také spíše korelovaly s očekávanými hodnotami. Hodnoty PSM ukazují, že se signál upravený oproti neupravenému pohybuje v rozmezí 0,75 až 0,85, což odpovídá částečnému zhoršení (resp. z pohledu masteringu vylepšení) kvality signálu. Parametr ODG (což není nic jiného než mapovaný PSM_t, proto tedy nesou oba parametry prakticky stejnou informaci a PSM_t se z toho důvodu již v hodnoceních dále objevovat nebude) také dokazuje, že ke změně kvality došlo, dokonce i výrazně více, neboť rozdíl oproti ideálu (resp. referenci) je pro např. pro vzorek MusicFX téměř 3,5 bodu z 5 bodového rozsahu.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámení s problematikou objektivního hodnocení kvality zvukového signálu se zaměřením na archivní analogové zvukové záznamy. Dále pak navrnutí a implementace metody pro objektivní porovnávání kvality záznamu archivní zvukové nahrávky z filmu před a po restauraci.

Pro porovnání byla navržena a implementována (případně převzata a pro konkrétní aplikaci upravena) sada algoritmů, která zahrnuje jak standardní charakteristiky pro popis signálu, tak charakteristiky získané pomocí modelu slyšení.

Porovnání výsledků jednotlivých metod podalo uspokojivé informace, neboť implementované metody úspěšně parametrizovaly vlastnosti signálu zjevně různých kvalit. Aplikovány byly algoritmy pro výpočet dynamického rozsahu, šířky pásma, úrovně nelineárního zkreslení, úrovně impulzního šumu a algoritmus PEMO-Q, který obsahuje model slyšení. Kromě analýzy úrovně nelineárního zkreslení podaly všechny použité algoritmy výsledky, které plně odpovídaly předpokladům. A z analýzy na vzorcích různého charakteru lze usoudit, že by tyto parametry šly použít pro strojové ohodnocení kvality archivních nahrávek, kde by se pouze musely na statisticky významnějším počtu vzorků určit rozsahy, ve kterých by se měly pohybovat výsledky pro danou kvalitativní kategorii.

SEZNAM LITERATURY

- [1] Simon Godsill, Peter Rayner, and Olivier Cappé. *Digital audio restoration*. Springer, 2002.
- [2] ŠKOLNÝ, Jakub. *Porovnání metod přepisu zvukové stopy z filmového nosiče*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT FEL, Katedra radioelektroniky
- [3] ZALABÁK, Martin. *Hodnocení kvality analogového záznamu zvuku s využitím modelu slyšení*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT FEL, Katedra radioelektroniky
- [4] BLJUMBERG, I. *Technologie zpracování kinematografických materiálů*. Překlad: GURTLER, F. Praha 1963
- [5] *Dolby Stereo* In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001.[cit. 20. 5. 2016] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Dolby_Stereo
- [6] *Dolby Digital* In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 24. 5. 2016]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Dolby_Digital
- [7] SEHNAL, J. *Optický záznam zvuku*. Internetový portál Elektrotechnika. 2009. [cit. 20.5.2016.] CZ.1.07.1.3.09/01.0021. Dostupné též z: <http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=6390>
- [8] *Bandwidth (signal processing)* [online] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 20. 5. 2016] Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Bandwidth_\(signal_processing\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Bandwidth_(signal_processing))
- [9] GREGOR, P. *Úpravy archivních a poškozených záznamů zvukových signálů*. Praha: ČVUT 2010. Diplomová práce, ČVUT FEL, Katedra radioelektroniky
- [10] *Dynamic Range* [online]. DSP related. [cit. 20. 5. 2016]. Dostupné z: http://www.dsprelated.com/dspbooks/mdft/Dynamic_Range.html
- [11] DUŠEK, Karel. *Záznam a reprodukce zvuku*. 5. vyd. Praha: ČVUT, 1982
- [12] [http://wikimedia.org/wikipedia /commons](http://wikimedia.org/wikipedia/commons)
- [13] MELKA, A. *Základy experimentální psychoakustiky*. Praha, Akademie múzických umění v Praze, 2005. 327 s. ISBN 8073310430
- [14] ITU. ITU-R BS.5623. *Subjective assessment of sound quality*.1990

-
- [15] Antony W Rix, John G Beerends, Doh-Suk Kim, Peter Kroon, and Oded Ghitza. Objective assessment of speech and audio quality; technology and applications. *Audio, Speech, and Language Processing*, IEEE Transactions on, 14(6):1890–1901, 2006.
- [16] GREGOR, P. Úpravy archivních a poškozených záznamů zvukových signálů. Praha: ČVUT 2010. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra radioelektroniky
- [17] RIAA equalization. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/RIAA_equalization
- [18] Rainer Huber and Birger Kollmeier. *PEMO-Q - a new method for objective audio quality assessment using a model of auditory perception*. *IEEE Transactions on Audio, Speech & Language Processing*, 2006
- [19] Niklas Harlander, Rainer Huber, and Stephan D. Ewert. *Sound quality assessment using auditory models*. *J. Audio Eng. So.*2004
- [20] ITU. ITU-R BS.1387-0: *Method for Objective Measurements of Perceived Audio Quality*, 1998.
- [21] ITU. ITU-T Recommendation P.861: *Methods for Objective and Subjective Assessment of Quality: Objective Quality Measurement of Telephone-band (300-3400 Hz) Speech Codecs*, 1998.
- [22] ITU. ITU-T Recommendation P.862: *Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ): An Objective Method for End-to-end Speech Quality Assessment of Narrow-band Telephone Networks and Speech Codecs*, 2001.
- [23] ITU. ITU-T Recommendation P.863: *Methods for Objective and Subjective Assessment of Speech Quality: Perceptual Objective Listening Quality Assessment*, 2011.
- [24] Objective difference grade. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Objective_difference_grade
- [25] Equal-loudness contour. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Equal-loudness_contour

PŘÍLOHY

Příloha č. 1: CD nosič (.zip archiv) se souhrnou tabulkou a zdrojovými kódy programu MATLAB použitými v této práci.