



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

fakulta elektrotechnická
katedra radioelektroniky

Implementace metody objektivního hodnocení kvality zvuku

Objective Audio Quality Assessment Method Implementation

bakalářská práce

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

Vedoucí práce: Ing. František Rund, Ph. D.

Jan Novák

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novák** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **420343**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Implementace metody objektivního hodnocení kvality zvuku

Název bakalářské práce anglicky:

Objective Audio Quality Assessment Method Implementation

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s metodami pro objektivní hodnocení kvality zvukového signálu, zaměřte se na metodu PEMO-Q [1]. Verifikujte implementaci zmíněné metody, která je součástí diplomové práce [2] oproti oficiální implementaci. Analyzujte a popište případné rozdíly a zaměřte se na jejich odstranění. Verifikovanou implementaci pak po dohodě s vedoucím práce přizpůsobte pro vybranou aplikaci hodnocení kvality zvuku.

Seznam doporučené literatury:

[1] Huber, R., Kollmeier, B. PEMO-Q - a new method for objective audio quality assessment using a model of auditory perception. IEEE Transactions on Audio, Speech & Language Processing, 14(6):1902-1911, 2006.
[2] Zalabák, M. Hodnocení kvality analogového záznamu zvuku s využitím modelu slyšení. Diplomová práce, FEL ČVUT v Praze, 2016.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. František Rund, Ph.D., katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **17.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **31.08.2018**

Ing. František Rund, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Řípka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Poděkování

Děkuji Ing. Františku Rundovi, Ph. D. za vstřícnost, cenné rady a množství postřehů při vedení bakalářské práce. Také děkuji Ing. Karlu Ulovcovi, Ph. D. a Bc. Miroslavu Smutnému za poskytnutá data.

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 dne

.....
podpis studenta

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá objektivní metodou hodnocení kvality zvuku PEMO-Q se zahrnutým modelem sluchové cesty a ověřením jeho implementace v Matlabu. Ta je podrobena analýze a jsou odstraněny nalezené problémy. Dále je tato implementace upravena s využitím technik OOP do podoby flexibilního frameworku pro hodnocení objektivní kvality vnímaného zvuku s názvem OpenQual. Možnosti použití PEMO-Q jsou vyzkoušeny ve vybraných aplikacích – optimalizaci složení multiplexu v systému digitálního rozhlasového vysílání DAB+ na základě hodnocení vnímané kvality vysílaného zvuku a v experimentální analýze restauračních zásahů do digitalizované archivní nahrávky a na závěr jsou představeny a diskutovány dosažené výsledky.

Klíčová slova: hodnocení kvality zvuku, PEMO-Q, Matlab, implementace, verifikace, funkční analýza, OOP, DAB+, restaurace zvuku

Abstract

This bachelor thesis focuses on objective audio quality assessment using the PEMO-Q method with included model of human auditory processing and on verification of its Matlab implementation. The implementation is analyzed, discovered problems are addressed and then it is transformed to more flexible framework for objective assessment of perceptual audio quality called OpenQual. Next, the capabilities of PEMO-Q are employed in two real world applications. The first is optimization of multiplex composition in DAB+ system of radio broadcasting, the second is experimental analysis of audio restoration performed on digitalized archival audio recording. Finally, acquired results are presented and discussed.

Keywords: audio quality assessment, PEMO-Q, Matlab, implementation, verification, functional analysis, OOP, DAB+, audio restoration

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek.....	8
Seznam příloh.....	9
1. Úvod	10
2. Hodnocení kvality zvuku.....	11
2.1. Motivační faktory pro hodnocení kvality zvuku.....	11
2.2. Přehled metod hodnocení kvality zvuku, terminologie.....	11
2.2.1. Metody založené na subjektivním hodnocení s referencí	11
2.2.2. Metody založené na objektivním hodnocení	12
2.3. Metoda objektivního hodnocení zvuku PEMO-Q.....	13
3. Vybrané aplikace	15
3.1. Optimalizace vysílání v systému DAB+ na základě hodnocení vnímané kvality poslechu	15
3.1.1. DAB+ systém pro rozhlasové vysílání	15
3.1.2. Zdrojové kódování v DAB+	15
3.1.3. Optimalizace počtu služeb v programovém multiplexu	15
3.1.4. Použití metody PEAQ při výběru optimálního zdrojového kódování pro zajištění požadované zvukové kvality poskytované služby	16
3.2. Objektivní hodnocení kvality restaurovaného zvuku.....	17
4. Verifikace implementace PEMO-Q v prostředí Matlab	18
4.1. Diplomová práce Ing. Martina Zalabáka	18
4.2. Statická analýza kódu	18
4.2.1. Aktualizace pro spuštění pod Matlab R2017a	18
4.2.2. Poznámka k výhradnímu cílení na Matlab 2017a (a vyšší)	19
4.2.3. Poznámka k licencování projektu a převzatých částí třetích stran.....	19
4.2.4. Poznámka k MEX funkcím, jejich použití a kompilaci	19
4.3. Funkční analýza na souboru definovaných vzorků	20
4.3.1. Metodika funkčního testování	20
4.3.2. Příprava testovacích vzorků.....	20
4.3.3. Implementace funkčního testu, dosažené výsledky	20
4.4. Vyhodnocení výsledků verifikace.....	22
4.4.1. Porovnání výsledků verifikace s oficiální implementací PEMO-Q.....	22
4.4.2. Vysvětlení nalezených rozdílů.....	22
4.5. Odstranění nalezených problémů.....	23
4.5.1. Výsledky detailní kontroly kódu, provedené úpravy	23
4.5.2. Vyhodnocení provedených úprav	23
5. Adaptace implementace s využitím technik OOP.....	25
5.1. OOP v Matlabu	25
5.2. OpenQual – obecný framework pro objektivní hodnocení kvality zvuku	25
6. Optimalizace složení multiplexu v systému DAB+ podle hodnocení metodou PEMO-Q.....	27
6.1. Motivace pro hodnocení metodou PEMO-Q	27

6.2. Metodika hodnocení, použité vzorky	27
6.3. Vyhodnocení dosažených výsledků za použití metody PEMO-Q, rozdíly oproti metodě PEAQ	Error! Bookmark not defined.
6.4. Vyhodnocení dosažených výsledků, rozdíly v použití PEMO-Q oproti PEAQ	33
7. Experimentální analýza restaurovaného zvuku.....	34
7.1. Charakteristicky hodnoceného restaurovaného audia, možnosti a omezení použité metodiky	34
7.2. Výsledek objektivního hodnocení restaurovaného zvuku, časový průběh okamžitého hodnocení kvality	34
7.3. Vyhodnocení možností metody PEMO-Q pro analýzu restaurovaného audia	36
8. Závěr	37
Zdroje.....	38
Přílohy.....	40
Příloha 1: Provedené změny v kódu pro první část verifikace	40
Příloha 2: Stručný návod na kompilaci MEX funkcí pro Matlab z C/C++ kódu na Windows v prostředí Matlab.....	40

Seznam použitých symbolů a zkratek

AAC	Advanced Audio Coding	Pokročilé kódování zvuku
AAC-LC	Advanced Audio Coding - Low Complexity	Pokročilé kódování zvuku - nízká komplexita
CASP	Computational Auditory Signal-processing and Perception Model	Výpočetní model sluchového zpracování signálu a vnímání
DAB (+)	Digital Audio Broadcasting (plus)	System digitálního rozhlasového vysílání
ETSI	The European Telecommunications Standards Institute	Evropský ústav pro telekomunikační normy
FEC	Forward Error Correction	Dopředná oprava chyb
GCC	GNU Compiler Collection	Sada kompilátorů projektu GNU
GPL	GNU Public License	Všeobecná veřejná licence GNU
HE-AAC	High Efficiency - Advanced Audio Coding	Pokročilé kódování zvuku s vysokou účinností
IDE	Integrated Development Environment	Integrované vývojové prostředí
ITU	International Telecommunication Union	Mezinárodní telekomunikační unie
MEX	Matlab Executable	Binární spustitelný Matlab soubor
MP2	MPEG-1 Audio Layer II Codec	Kodek MPEG-1 Audio Layer II
MSVC	Microsoft Visual C/C++ Compiler	Kompilátor od společnosti Microsoft
MUSHRA	Multiple Stimuli with Hidden Reference and Anchor	Metoda hodnocení používající více stimulů se skrytou referencí a ukotvením
NaN	Not a Number	Hodnota, která nereprezentuje číslo
ODG	Objective Difference Grade	Hodnocení objektivního rozdílu
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	Ortogonální frekvenčně dělený multiplex
OOP	Object-Oriented Programming	Objektově orientované programování
PAD	Program Associated Data	Doprovodná data programu
PEAQ	Perceptual Evaluation of Audio Quality	Hodnocení vnímané kvality zvuku
PEMO	Perception Model	Sluchový model metody PEMO-Q
PEMO-Q	Perception Model - Quality Assessment	Metoda objektivního hodnocení zvuku využívající modelu slyšení
PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality	Hodnocení vnímané kvality řeči
POLQA	Perceptual Objective Listening Quality Assessment	Metoda objektivního hodnocení poslechové kvality
PSM	Perceptual Similarity Measure	Hodnocení vnímané podobnosti
QoS	Quality of Service	Úroveň kvality poskytované služby
RMS	Root Mean Square	Odmocnina z průměru kvadrátů
SBR	Spectral Band Replication	Kompresní technika využívající replikaci frekvenčního spektra
SDG	Subjective Difference Grade	Hodnocení subjektivního rozdílu
VOIP	Voice Over IP/IP telephony	Přenos telefonních služeb po počítačové síti

Seznam příloh

- Příloha 1: Provedené změny v kódu pro první část verifikace
- Příloha 2: Stručný návod na kompilaci MEX funkcí pro Matlab z C/C++ kódu na Windows v prostředí Matlab
- Příloha 3: Struktura datové přílohy
- Příloha 4: Datová příloha - CD s Matlab kódem upravené implementace (OpenQual), implementacemi a výsledky jednotlivých testů

1. Úvod

Cílem této práce je seznámit se s objektivní metodou hodnocení zvuku PEMO-Q [3] a její implementací v prostředí Matlab z diplomové práce Ing. Martina Zalabáka [14]. Dále je cílem verifikovat správnou funkčnost této implementace a adaptovat ji do flexibilnější podoby pro použití ve vybrané aplikaci.

V první (teoretické) části práce se nalézá souhrn dostupných metod hodnocení (subjektivních i objektivních) a popis modelu PEMO-Q, jehož implementace je předmětem verifikace. Dále první část obsahuje přehled systému DAB+ a shrnutí již existující studie optimalizace složení multiplexu v DAB+ [29]. Teoretickou část zakončuje stručný náhled do problematiky restaurace audia a potenciálu využití objektivních metod hodnocení kvality zvuku pro analýzu výsledků restauračních zásahů do digitalizovaných nahrávek.

V druhé (praktické) části je popsána analýza a verifikace implementace PEMO-Q v Matlabu z diplomové práce M. Zalabáka. Jsou popsány výsledky verifikačních testů a provedené změny spolu s adaptací verifikované implementace do frameworku s názvem OpenQual. OpenQual je obecný, jednoduše rozšiřitelný framework v podobě Matlab balíku, který je určený pro implementace aplikací využívajících objektivní hodnocení kvality zvuku. Následuje popis metodologie a porovnání výsledků optimalizace složení multiplexu v DAB+ na základě hodnocení kvality zvuku metodou PEMO-Q s metodou PEAQ. Praktická část je zakončena popisem experimentálního použití metody PEMO-Q pro analýzu restaurovaného audia.

Závěrem jsou zrekapitulovány a vyhodnoceny výsledky, dosažené cíle práce a prezentovány možné další kroky s cílem zlepšit přesnost a výkon implementace a konzistenci podávaných výsledků.

2. Hodnocení kvality zvuku

2.1. Motivační faktory pro hodnocení kvality zvuku

Hodnocení vnímané kvality zvuku je motivováno především potřebou měřit nebo jinak hodnotit vliv přenosového a/nebo reprodukčního řetězce na kvalitu poslechu u konečného uživatele.

Za tímto účelem byly vytvořeny standardy – doporučení ITU – pro subjektivní hodnocení kvality zvuku, jejichž cílem je zejména stanovit společnou terminologii a metodiku provádění testů tak, aby vedle dostatečné vypovídající hodnoty byla zajištěna jejich porovnatelnost a opakovatelnost. Přehled terminologie, doporučení a metod bude popsán dále.

Doporučení ITU byla pro subjektivní metody hodnocení zvuku zavedena mimo jiné pro zajištění opakovatelnosti a porovnatelnosti různých testů. Jak je ukázáno v [2, 3], tento cíl v praxi nelze zcela naplnit, protože subjektivní testy jsou vždy prováděny pouze na malém vzorku populace (z časových, technických, finančních či jiných důvodů), což do nich zavádí určité zkreslení a nekonzistenci.

Se zvyšujícími se nároky na přenosové/reprodukční řetězce, (přechod od úzkopásmových telefonních linek k VOIP, rozšiřování multimediálních systémů, digitální televizní a rozhlasové vysílání, tlak na co nejefektivnější využití přidělených přenosových kanálů, zvyšování kvality reprodukce koncového hardware atd., shrnuté v [11]) je však k účinnému vývoji a hodnocení nových metod ztrátového kódování nebo pomůcek pro sluchově postižené („hearing aids“) zapotřebí možnost finančně a časově efektivně měřit kvalitu výsledného poslechu, a to s dostatečnou přesností. Jak píše ve svém rozsáhlém shrnutí Harlander, Huber a Ewert [2], tyto skutečnosti jsou od devadesátých let 20. století důvodem pro výzkum a vývoj objektivních metod založených na modelech lidského sluchu, včetně využití poznatků o psychoakustice.

2.2. Přehled metod hodnocení kvality zvuku, terminologie

Metody hodnocení kvality lze dle [1, 2] dělit na absolutní (též bezreferenční, neintruzivní) a relativní (intruzivní, s referencí). Absolutní metody jsou založené na poslechu pouze jediné testované nahrávky a je na hodnotícím, aby popsal její vlastnosti a vnímanou kvalitu. Relativní metody využívají porovnání s referencí (někdy skrytou – záleží na konkrétní metodě) a hodnotí se rušivost změn v degradovaném signálu. Relativní metody poskytují mnohem lepší možnosti pro vytvoření kontrolovaných podmínek. Také umožňují unifikovat jazyk/systém použitý k vyjádření hodnocení, což přispívá k vyšší konzistenci, opakovatelnosti a porovnatelnosti jednotlivých měření. Proto se většina výzkumu a praxe zabývá téměř výhradně relativními metodami, definovanými v patřičných doporučeních ITU-R BS.1387 [4] a ITU-R BS.1248 [11].

Jak již bylo zmíněno, zprvu vznikly metody hodnocení kvality zvuku v reakci na potřebu evaluace kvality mluveného slova při přenosu po telefonních linkách. Proto jsou nejpoužívanější metody hodnocení kvality zvuku standardizovány v souboru doporučení mezinárodní telekomunikační unie (ITU) a je v nich definován systém hodnocení a používané odborné termíny pro označování kvalitativních atributů a druhů zkreslení, jak bude popsáno dále.

2.2.1. Metody založené na subjektivním hodnocení s referencí

Intruzivními subjektivními metodami se zabývají doporučení ITU-R BS.1248: General methods for the subjective assessment of sound quality (Obecné metody pro subjektivní hodnocení kvality zvuku) [11] (nahrazuje ITU-R BS.562 [12]) a doporučení ITU-R BS.1116: Methods for the Subjective Assessment of Small Impairments in Audio Systems (Metody pro subjektivní hodnocení malých zhoršení v audiosystémech) [7]. Tato doporučení formálně definují rámec testů, poslechové podmínky včetně reprodukčních systémů, přípravu hodnocených zvukových vzorků, způsoby měření, jejich vyhodnocení, a nakonec způsob prezentace výsledků. Je třeba poznamenat, že definice pojmů v doporučeních ITU-T BS.1116 a ITU-R BS.1248 se mohou částečně lišit.

Hodnotící systém pro tyto subjektivní testy je založen na (spojité) škále pěti hodnot popisujících rušivost vnímaných poškození v testovaném signálu:

Tab. 1: Hodnotící škála pro subjektivní testy s referencí dle ITU-R BS.562 [12], resp. ITU-R BS.1284-1 [11]

Vnímané zhoršení	Známka
Neslyšitelné	5,0
Slyšitelné, ale nerušivé	4,0
Částečně rušivé	3,0
Rušivé	2,0
Velmi rušivé	1,0

Konečné měřítko kvality hodnoceného zvuku je dáno hodnotou SDG (Subjective Difference Grade), vypočtenou jako rozdíl hodnocení rušivosti degradovaného a referenčního signálu. Pokud hodnotící neoznámkuje referenci hůře než degradovaný signál, nabývá SDG hodnot od -4 (velmi rušivé zhoršení) do 0 (neslyšitelné zhoršení nebo identita).

Kromě stanovení celkové vnímané kvality zvuku existuje také snaha pomocí subjektivních intruzivních testů určovat střední (v literatuře označovanou jako „intermediate“) vnímanou kvalitativní úroveň kódovacích systémů (audio i video), a to z důvodu rozšiřování technologií a zařízení pracujících (a přizpůsobujících se) právě se ztrátově kódovaným obsahem. Metoda MUSHRA je dle definice v doporučení ITU-R BS.1534 [15] speciálně navržena pro subjektivní hodnocení výstupů kódovacích systémů. Hlavním cílem MUSHRA je snížení nároků na počet hodnotitelů a trvání samotného testu, se simultánním zvýšením konzistence a opakovatelnosti hodnocení. Dosahuje toho použitím nejen klasické reference, ale také skryté reference a několika dalších uměle degradovaných signálů, tzv. ukotvení (v originále „anchors“).

2.2.2. Metody založené na objektivním hodnocení

Nejpoužívanější objektivní metody se zaměřují na mluvené slovo (doporučení ITU-T P.862: Perceptual Evaluation of Speech Quality – PESQ, hodnocení vnímané kvality řeči [5] – dále rozšířené o verzi pro širokopásmový přenos řeči v doporučení ITU-T P.863 – POLQA [6]) a obecné širokopásmové signály – typicky ztrátově kódovaná multimédia (doporučení ITU-T BS.1387: Method for Objective Measurements of Perceived Audio Quality – PEAQ, metoda pro objektivní měření vnímané kvality zvuku [4]).

Novější a obecnější metody jako zmíněná metoda PEAQ [4], a metoda PEMO-Q [3], více staví na využívání výpočetních či statistických sluchových modelů a následném porovnání vnitřních reprezentací referenčního a testovaného signálu uvnitř těchto modelů.

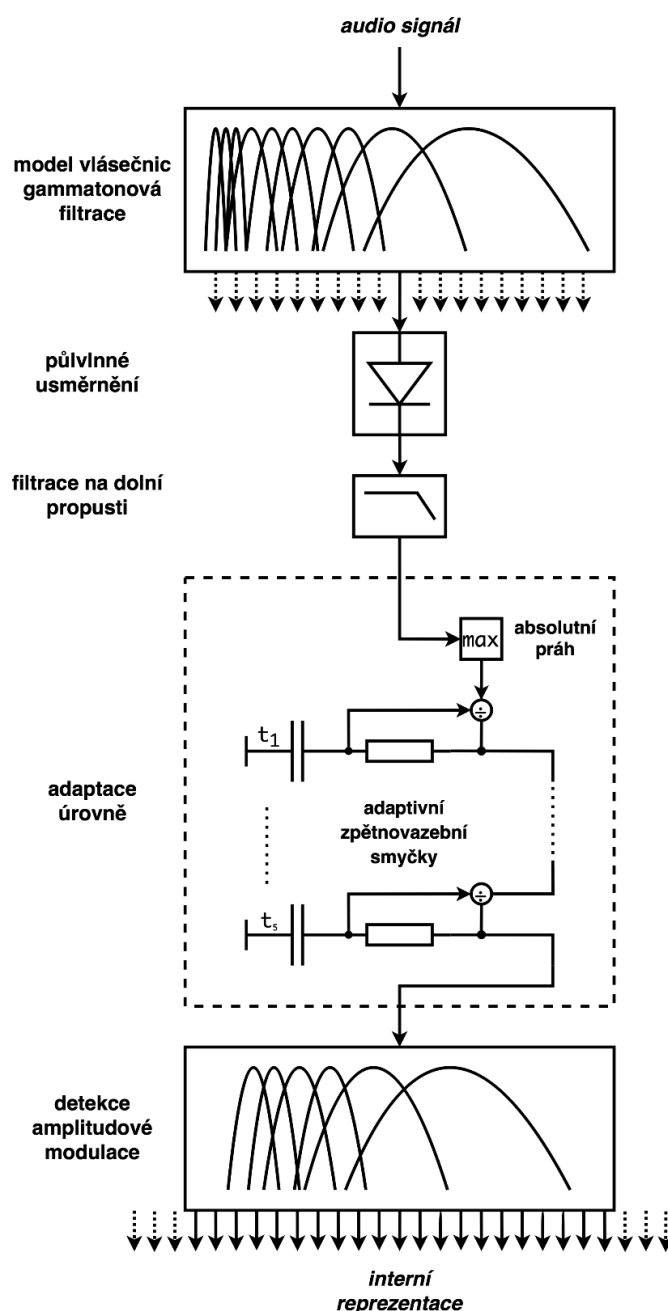
PEAQ dle popisu v [4] modeluje lidské slyšení jako soubor technických parametrů (odstup signál-šum, aktivita v kritických pásmech, úroveň zkreslení, modulace a další) vypočítaných pro referenční i testovaný signál. Tento soubor výstupních parametrů vnitřního sluchového modelu metody PEAQ je následně vyhodnocen vhodně natrénovanou umělou neuronovou sítí. Výsledkem je měřítko kvality ODG (Objective Difference Grade) navržené tak, aby bylo přímo porovnatelné s výstupním měřítkem kvality ze subjektivních testů (hodnota SDG).

Použití sluchových modelů a vyhodnocování založené na jejich vnitřní reprezentaci reference a testovaného signálu poskytuje i tu výhodu, že je lze bez velkých potíží upravit pro potřeby testů pracujících se sluchovými vadami a postiženími.

2.3. Metoda objektivního hodnocení zvuku PEMO-Q

Rainer Huber a Birger Kollmeier navrhli metodu PEMO-Q (Perception Model – Quality Assessment) publikovanou v článku PEMO-Q: A new method for objective audio quality assessment using a model of auditory perception [3]. Jde o intruzivní objektivní metodu hodnocení kvality. Použitý sluchový model (PEMO, podle kterého byla metoda pojmenována) lze navíc úspěšně zaměnit za jiné pokročilé modely slyšení, které signál transformují na vnitřní reprezentaci v modelu slyšení, ta je pak dále vyhodnocena – jako např. u modelu CASP (Computational model of human auditory signal processing and perception) [8] – který používá vyhodnocovací část metody PEMO-Q.

Oba již vzájemně časově a úrovněově sjednocené signály – referenční a testovaný – jsou nejprve skrze percepční model slyšení (blokové schéma na obr. 1 níže) transformovány na vnitřní reprezentaci. Dle popisu PEMO-Q [3] je cílem simulovat transformaci akustického podnětu lidským uchem na nervové vzruchy, které jsou v mozku dále kognitivně zpracovávány.

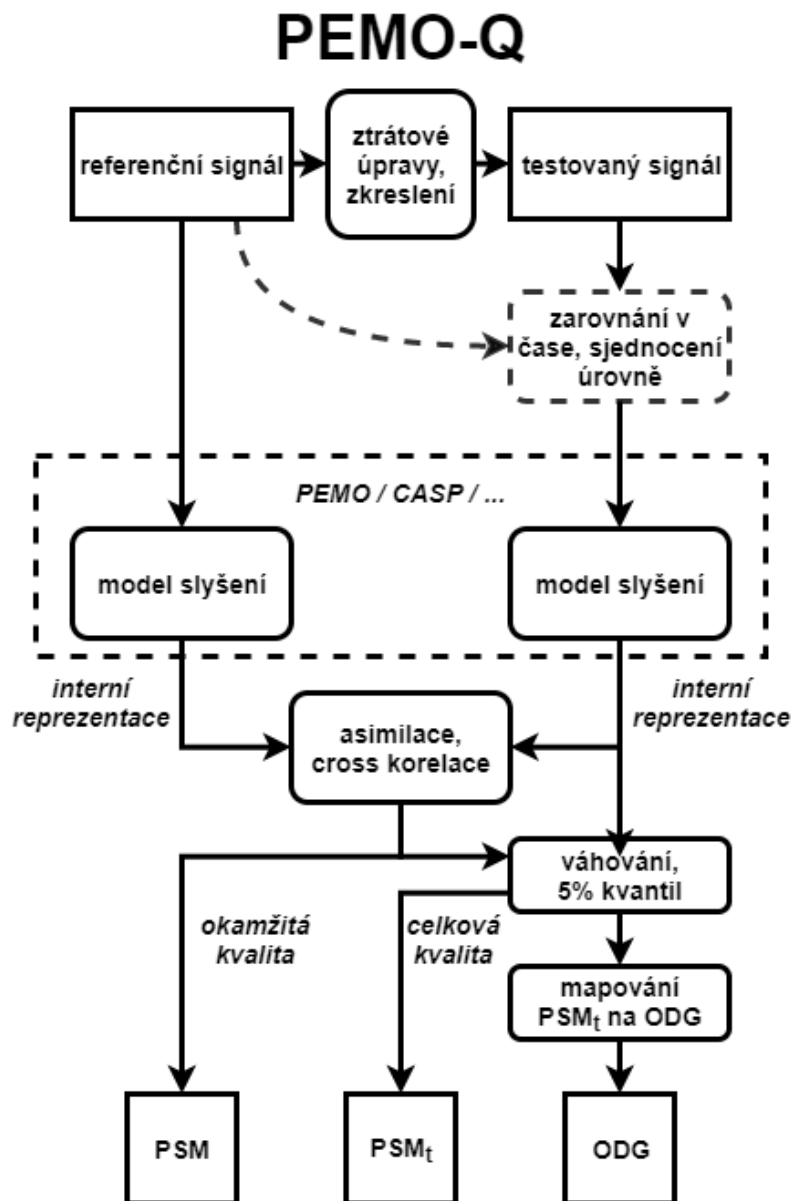


Obr. 1: Blokové schéma modelu slyšení PEMO z PEMO-Q [3]

Takto získané vnitřní reprezentace jsou pak dále matematicky zpracovávány a porovnávány. Nejprve je provedena asimilace a vzájemná korelace přes celou délku a všechna frekvenční pásma obou vnitřních reprezentací a nezávisle přes všechna pásma modulační banky. Z výsledku je vypočítána hodnota PSM, která představuje okamžitou kvalitu v čase a měla by nabývat hodnot $\langle 0;1 \rangle$, ačkoliv je dle autorů [3] matematicky možné dosáhnout až hodnoty -1 (pokud byly zaměněny referenční a testovaný signál na vstupu).

Další výstupní hodnotu představuje 5% kvantil z váženého průměru vzájemné korelace vnitřních reprezentací reference a testovaného signálu a plovoucího průměru časového průběhu interní reprezentace testovaného signálu. Tímto postupem je modelována celková vnímaná kvalita zvuku PSM_t , přičemž tato hodnota podle autorů PEMO-Q není (v kontrastu s PSM) závislá na druhu vstupního signálu.

Aby bylo možné porovnávat výsledky objektivního hodnocení s pomocí PEMO-Q a výsledky subjektivních testů (potažmo PEAQ) vyjádřených hodnotou SDG, je hodnota PSM_t převedena mapovací funkcí na hodnotu ODG, která je přímo porovnatelná s SDG, stejně jako v případě metody PEAQ.



Obr. 2: Blokové schéma metody PEMO-Q [3]

3. Vybrané aplikace

3.1. Optimalizace vysílání v systému DAB+ na základě hodnocení vnímané kvality poslechu

3.1.1. DAB+ systém pro rozhlasové vysílání

Digital Audio Broadcasting (DAB) definovaný ve standardu ETSI EN 300 401 [20] (v době psaní této práce ve verzi V2.1.1). Jde o jeden ze systémů digitálního pozemního rozhlasového vysílání zaváděného v rámci přechodu z analogových na digitální systémy vysílání.

Možnosti vysílání v systému DAB (DAB+) jsou pro potřeby rozhlasových stanic poměrně flexibilní. Rozhlasové vysílání v systému DAB+ může být dle specifikace provozováno v pásmu 30 MHz – 3 GHz, využito je sdružování několika služeb do programového multiplexu, který je klíčován pomocí OFDM modulace do šířky pásma přibližně 1,5 MHz, s celkovou přenosovou rychlostí kolem 2,4 Mbit/s (včetně ochranného kódování). Standard [20] specifikuje i obsah vysílaných služeb, jež může být složen z audia, videa a doprovodných dat (PAD – program associated data). K dispozici je několik způsobů dopředného ochranného kódování (FEC – Forward Error Correction), což spolu s nastavitelnou přenosovou rychlostí a zdrojovým kódováním obsahu umožňuje vhodně upravovat počet služeb vysílaných v jednom multiplexu v závislosti na požadované kvalitě obsahu a odolnosti vůči rušení v přenosovém kanále.

Protože je kmitočtové spektrum, které je pro digitální rozhlasové vysílání k dispozici, omezeno nejen specifikací DAB+, ale především reálnými podmínkami na trhu s kmitočty, existuje vysoký tlak na umístění co největšího počtu služeb do jednoho multiplexu při zachování adekvátní poslechové kvality, nastíněný např. v [21].

3.1.2. Zdrojové kódování v DAB+

V systému DAB+ lze dle specifikace ETSI [20] vysílat audio obsah vzorkovaný buď na frekvenci 48 kHz, nebo 24 kHz a k dispozici je hned několik způsobů zdrojového kódování:

- a) MPEG-1 Audio Layer II (MP2), standardizovaný v rámci ISO/IEC 11172-3:1993 [22], který rozděluje kódované audio na 32 separátních kanálů, jež dále nezávisle na sobě kvantuje v časové doméně s využitím percepčního modelu slyšení.
- b) AAC (Advanced Audio Coding), původně specifikovaný v rámci MPEG-2 a nyní standardizovaný jako ISO/IEC 14496-3:1999 [23] (pouze v systému DAB+). AAC nabízí celkem tři profily kódování: LC-AAC (Low Complexity), HE-AACv1 (High Efficiency) a HE-AACv2, přičemž HE-AACv1 a HE-AACv2 jsou nadstavby základního profilu LC-AAC. Oproti MP2 je AAC tzv. transformační kodek využívající diskrétní kosinovou transformaci z časové do frekvenční oblasti, kde je teprve provedeno kvantování. HE-AACv1 zvyšuje efektivitu kódování použitím techniky SBR (spectral band replication). HE-AACv2 dále k oběma předchozím profilům přidává parametrické kódování sterea, jak je popsáno v technickém přehledu [24] pro European Broadcasting Union.

3.1.3. Optimalizace počtu služeb v programovém multiplexu

Jak bylo poznamenáno v části (3.1), existuje logický tlak na optimalizaci počtu služeb vysílaných v jednom multiplexu. Při tom je třeba brát v potaz náklady na využívání kmitočtového pásma a na výslednou kvalitu poskytovaných služeb (QoS). Pro potřeby vysílacího systému DAB (a DAB+) lze problematiku kvality služby (QoS) rozdělit na několik činitelů, které mají největší vliv: vysílací stanice, komunikační kanál a přijímač.

Technické parametry komunikačního kanálu a přijímacího zařízení jsou specifikovány samotným standardem DAB+. Jak bylo konstatováno v analýze systému DAB+ [25] z pohledu QoS, dodržení technických parametrů komunikačního kanálu a vysílacího a přijímacího zařízení nemá na dostatečnou

úroveň QoS negativní vliv. Je však možné ve standardem daných mezích [20] zvolit parametry zdrojového kódování obsahu vysílaného rozhlasovou stanicí, a protože je vnímaná kvalita při dodržení parametrů pro komunikační kanál a vysílací a přijímací zařízení přímo závislá na použitém kodeku a datovém toku (jak bylo potvrzeno v analýze subjektivní a objektivní vnímané audio kvality [28] u již provozovaných systémů pro digitální vysílání), jsou tyto parametry pro dodržení požadované kvality poslechu - a tím pádem úrovně QoS - určující.

V nedávné době vyvstala snaha a potřeba zhodnotit vnímanou kvalitu poslechu (a tedy QoS) pro různé druhy obsahu rozhlasového vysílání (mluvené slovo, hudba, kombinace předchozích dvou) zakódovaných různými kodeky o různých přenosových rychlostech, z čehož by bylo možné určit optimální parametry vysílaného obsahu a počet služeb v multiplexu. Této problematice se již věnovala řada prací [21, 26, 28, 29], které k hodnocení vnímané kvality používaly metody subjektivního a/nebo objektivního hodnocení kvality zvuku.

3.1.4. Použití metody PEAQ při výběru optimálního zdrojového kódování pro zajištění požadované zvukové kvality poskytované služby

Karel Ulovec a Miroslav Smutný ve svém článku „Perceived Audio Quality Analysis in Digital Audio Broadcasting Plus System Based on PEAQ“ [29] provedli rozsáhlou analýzu závislostí vnímané kvality zvuku na typu signálu (mluvené slovo, hudba, mix obou), zvoleném kodeku a přenosové rychlosti a počtu kanálů (mono, stereo) v systému DAB+ s využitím metody PEAQ pro hodnocení objektivní kvality zvuku.

V rámci použité metodiky přiřadili hodnotám ODG získaným analýzou setu reference a ztrátově kódovaných vzorků kvalitativní kritéria (viz tab. 2), která korelují s definicí škály SDG a ODG.

Tab. 2: Definice kvalitativních kritérií pro rozhlasové vysílání podle hodnocení ODG použité v rámci [29]

ODG (přibližné)	kvalitativní kritérium
0	transparence
-0,5	„prémiová“ vysílací kvalita
-1	standardní vysílací kvalita
-2	částečně rušivé zkreslení
-3	rušivé zkreslení (hranice použitelnosti pro vysílání)

Po vyhodnocení vzorků zakódovaných pomocí MP2, AAC-LC, HE-AACv1 (mono, stereo) a HE-AACv2 (z vlastností profilu použitelné pouze pro stereo) autoři studie identifikovali kombinace zdrojového kódování a datového toku splňující dané kvalitativní požadavky. Z výsledných hodnot datového toku dále vypočetli limity počtu služeb přítomných v jednom multiplexu v závislosti na zvoleném datovém toku a použitém ochranném kódování v systému DAB+.

Problémem použité metody hodnocení objektivní kvality PEAQ je však fakt, že v konečné fázi vyhodnocení využívá neuronovou síť k určení hodnoty ODG. Tato neuronová síť musí být nejdříve natrénována na dostatečně velkém a různorodém setu vzorků a nedokonalosti tohoto procesu vnášejí do finálního hodnocení nechtěné zkreslení. Jak bylo popsáno v [28] a diskutováno v závěru [29], pro hodnoty $ODG < -3$ již výsledky metody PEAQ dostatečně nekorelují se subjektivními testy a proto v [29] nebylo možné takové výsledky použít.

3.2. Objektivní hodnocení kvality restaurovaného zvuku

Motivací pro vytvoření objektivního hodnocení kvality restaurovaných (digitalizovaných) nahrávek je obecná neshoda v umělecké společnosti s aktuálními výsledky procesu restaurace děl minulého století z filmového archivu. Nejspolehlivějším hodnocením je vyjádření autora, zda restaurovaná podoba díla odpovídá jeho původnímu záměru, avšak názor autora již často nelze získat, a tak existuje snaha vytvořit objektivní metodu.

Restaurace audionahrávek spočívá v použití mnoha specializovaných technik (shrnutých v [30]) k odstranění různých poškození, vzniklých ať už v rámci původního nahrávacího procesu (praskání, nadměrný šum, zkreslení ve frekvenční oblasti, modulace), nedokonalostmi a stárnutím úložného média nebo vlivem techniky přepisu a digitalizace.

Po identifikaci a odstranění poškození je však potřeba dotčené části nahrávky vhodně doplnit (nejčastěji formou nelineární interpolace), což z pohledu metody PEMO-Q přináší opět další zkreslení. Je otázka, zda by bylo možné další výstupy z PEMO-Q (okamžitá aktivita, okamžitá audio kvalita) použít pro identifikaci i celkové kvalitativní hodnocení restauračních zásahů. Problémem může být vztah mezi referencí a degradovaným signálem, které jsou tvořené párem vyčištěného signálu a originálního přepisu. Z podstaty problému není k dispozici korektní (ideální) reference v tom smyslu, v jakém ji původně objektivní metody chápou, protože ji hledáme samotným procesem restaurace digitalizovaného přepisu.

4. Verifikace implementace PEMO-Q v prostředí Matlab

4.1. Diplomová práce Ing. Martina Zalabáka

Předmětem verifikace je implementace metody PEMO-Q včetně modelu slyšení v prostředí Matlab z diplomové práce Ing. Martina Zalabáka [14]. Tato diplomová práce se primárně zabývá možnostmi použití původně intruzivních objektivních modelů hodnocení kvality zvuku reprezentovaných PEMO-Q k neintruzivnímu (bezreferenčnímu) hodnocení kvality digitalizovaných analogových záznamů. Důvodem je fakt, že reference v dostatečné (ideální) kvalitě není u starých analogových záznamů většinou k dispozici, nebo nikdy neexistovala.

S problémem chybějící reference se Ing. Zalabák vypořádal implementací algoritmů pro vytvoření umělé reference na bázi potlačení artefaktů a odstranění šumu. Tato práce se však zabývá pouze verifikací použité implementace PEMO-Q, a tak druhá část diplomové práce Ing. Zalabáka nebude dále použita, stejně jako implementace modelu slyšení CASP, kterou sám Ing. Zalabák v závěru své práce označuje za nedokonalou a ve své stávající podobě nevhodnou k dalšímu použití.

4.2. Statická analýza kódu

4.2.1. Aktualizace pro spuštění pod Matlab R2017a

Implementace byla dle informací od vedoucího práce původně zamýšlena tak, aby byla kompatibilní s GNU Octave, což je svobodný software pro provádění (maticových) číselných výpočtů šířený pod licencí GPL a částečně kompatibilní s Matlabem. Ale vzhledem k tomu, že vědečtí pracovníci a studenti FEL mají přístup k licenci na plnohodnotný Matlab (v době psaní práce ve verzi R2017a), bylo rozhodnuto při verifikaci cílit právě na plnohodnotný Matlab R2017a běžící na OS Windows 10 64bit. Matlab obsahuje i vlastní „linter“, tj. komponentu pro statickou analýzu kódu, kterou lze integrovat i do jiných IDE (jako Microsoft Visual Studio Code použité při této verifikaci). Automatická statická analýza výrazně usnadňuje syntaktickou verifikaci a úpravu kódu tak, aby byl v souladu se syntaxí skriptovacího jazyka Matlab a neobsahoval žádné triviální chyby či překlepy.

Nejdůležitější změny zahrnují záměnu složitých `if-elseif-else` konstrukcí na počátku funkcí sloužících pro validaci vstupních proměnných za nově přidanou funkci `narginchk(min_args, max_args)`. Tato nová zabudovaná funkce automaticky vyvolá chybové hlášení do konzole a zastaví běh programu, pokud je ověřovaná funkce nesprávně zavolána. V určitých vhodných částech implementace byla konstrukce `if-elseif-else` o `narginchk()` pouze doplněna, např. pokud slouží k přiřazení implicitních parametrů (aktivace ladícího výpisu apod.).

Dále byla odstraněna volání již několik verzí zastaralé (status deprecated) funkce `wavread()` (s potlačeným přiřazením vzorkovací frekvence otevíraného audio souboru) a nahrazena doporučenou funkcí `audioread()`.

Přibalené předkompilované MEX funkce (nativní C kód zkompilovaný pro přímé volání z Matlab prostředí) ve formátu `mexa64` jsou platné pouze pro platformu Linux 64bit, bylo tedy nutné je překompilovat pro Windows 64bit (výstupní formát `mexw64`). Při té příležitosti byly odstraněny „napevno zakódované“ proměnné a parametry funkcí, které v kódu nebyly vůbec použity, nebo je žádoucí možnost je předat jako argument volané funkci.

V neposlední řadě byl sjednocen a modernizován styl formátování kódu, což značným způsobem zlepšuje jeho čitelnost a do budoucna zrychlí jeho rozšiřování a údržbu. Použitá šířka tabulátoru je nyní standardní čtyři mezery. Odsazování řádků připomíná více styl psaní v C/C++ nebo Pythonu, stejně jako používání mezer v přiřazeních, výrazech a porovnáních. Obecně bohatší používání „prázdného“ prostoru zlepšuje čitelnost a rychlou orientaci v kódu.

K usnadnění další práce s kódem také přispěje doplnění vhodných komentářů (a odstranění těch nepotřebných či nevhodných, které pouze opakovaly význam následujícího kódu bez hlubšího vysvětlení a zhoršovaly čitelnost), popis parametrů funkcí a příkladů jejich volání a obecně vyhotovení dokumentace v Matlabu dostupné přes příkazy `help` nebo `doc`.

Je třeba poznamenat, že ve své původní podobě implementace pracuje pouze s prvním nalezeným kanálem jakéhokoli předaného audio souboru, stejně jako oficiální implementace PEMO-Q od jeho autorů.

Provedené změny v původním kódu pro verifikaci jsou shrnuty v příloze 1.

4.2.2. Poznámka k výhradnímu cílení na Matlab 2017a (a vyšší)

Cílení práce a obecně vývoje na prostředí Matlab 2017a neznamená, že bude práce svázána právě pouze s tímto prostředím a nutností mít přístup k placené (a velmi drahé) licenci na plnohodnotný Matlab. Společnost MathWorks dává minimálně pro platformu Windows k dispozici volně šiřitelné „runtime knihovny“, takže je možné celý projekt zkompilovat do spustitelných binárních souborů, které lze volně šířit bez nutnosti vlastnit licenci a instalovat plnohodnotný Matlab. Jde o podobný model, který využívá např. Microsoft se svým ekosystémem jazyka Visual C/C++ (a návazných knihoven a kompilátorů) a jeho volně šiřitelných součástí.

Více o distribuci bez Matlab prostředí se lze dočíst na stránkách společnosti MathWorks [16], to samé platí pro dokumentaci pro Matlab Compiler a Matlab Runtime [17].

4.2.3. Poznámka k licencování projektu a převzatých částí třetích stran

Protože implementace obsahuje převzatý kód pro adaptivní filtrační smyčku poskytnutý pod licencí GNU/GPLv2 s možností aktualizace na GNU/GPLv3, bylo k implementaci doplněno licenční ujednání GNU/GPLv3. Tímto jsou uspokojeny požadavky původní převzaté práce. Dále bude celá práce ze své podstaty závěrečné bakalářské práce po odevzdání zveřejněna a dále bude k dispozici ve veřejné repositáři na Github.com, čímž bude splněna podmínka zveřejnění zdrojového kódu taktéž vyplývající z GNU/GPL.

Původní implementace dále přebírá jen s drobnými úpravami algoritmus pro efektivní výpočet koeficientů gammatónového filtru od Malcoma Slaneyho. Tento algoritmus byl zveřejněn v rámci technického reportu pro společnost Apple Computer Inc. [9].

4.2.4. Poznámka k MEX funkcím, jejich použití a kompilaci

MEX funkce představují způsob, jak z prostředí Matlab volat kód napsaný v jiném jazyce (nejčastěji C/C++), což představuje možnost používat efektivnější a rychlejší implementace pro specifické úkony nebo jiné řešení pro paralelizaci výpočtů vedle Parallel Computing Toolbox dostupného přímo v Matlabu. Samotné prostředí Matlab poskytuje vcelku přímočarý postup pro výběr a nastavení použitého kompilátoru či interpretu a kompilaci C/C++ kódu do mex formátu (což je de facto dynamicky linkovaná knihovna rozšířená o Matlab rozhraní pro C/C++), za předpokladu, že je podporovaný kompilátor či interpret na systému nainstalován.

Podporována je celá řada kompilátorů, od GCC, MSVC, MinGW, Intel Compiler nebo dokonce technologie Java JDK [18]. Pro účely verifikace byl použit kompilátor Microsoft Visual C++ 2013, který lze na Windows nejjednodušeji získat zdarma s komunitní edicí Visual Studio 2013. Podporovány jsou samozřejmě i novější verze (2015 a 2017), ačkoliv je potřeba ještě aplikovat oficiální patch ke stažení na stránkách podpory společnosti MathWorks.

Krátký návod, jak na kompilaci MEX funkcí z kódu v jazyce C pro platformu Windows, je uveden v příloze 2. Pro usnadnění prvního použití jsou binární soubory pro platformu Windows 64bit součástí projektu.

4.3. Funkční analýza na souboru definovaných vzorků

Po dokončení statické a syntaktické analýzy a zavedení nutných (funkci neměnných) úprav kódu je v druhé části verifikace implementace PEMO-Q využito tzv. „black-box“ přístupu k testování (někdy také známého pod pojmy funkční nebo integrační testování).

4.3.1. Metodika funkčního testování

V „black-box“ přístupu jde o způsob ověřování funkcionality systému bez zkoumání jeho vnitřní implementace. Na začátku testu definujeme vstupní parametry, pro které předem známe očekávaný výstup ze systému. Po zpracování definovaného vstupu je porovnán obdržený výstup s očekávanými výsledky.

4.3.2. Příprava testovacích vzorků

Pro funkční test byla zvolena vstupní data ve formě referenčních vzorků pro testy konformity implementací PEAQ třetích stran, a to z následujících důvodů:

- a) PEMO-Q si dle [3] s využitím psychoakusticky ověřeného modelu slyšení klade za cíl poskytovat přesnější výsledky než PEAQ, které by více korelovaly s výsledky subjektivních testů,
- b) existuje oficiální placená implementace PEMO-Q [13], kterou má katedra radioelektroniky k dispozici,
- c) pro testování konformity implementací objektivního hodnocení kvality třetích stran jsou volně k dispozici referenční vzorky poskytované ITU [4] (převzaté od European Broadcasting Union [10]).

Tyto vzorky byly nejprve zpracovány oficiální implementací PEMO-Q [13] a takto získané výsledky budou dále považovány za očekávaný výstup pro porovnání s ověřovanou implementací PEMO-Q v Matlabu.

4.3.3. Implementace funkčního testu, dosažené výsledky

V prostředí Matlab byl implementován automatický test, který načte všechny připravené vzorky, vyhodnotí jejich výstupní zvukovou kvalitu s využitím ověřované implementace PEMO-Q a výsledky pro porovnání shromáždí do přehledné tabulky spolu s očekávanými výsledky.

Hlavní logika testu je ve skriptu `OpenQual/test/pemoq_objquality_test.m`, který ve složce `OpenQual/test/samples/peaq/` očekává sadu vzorků ve formátu wav (reference a ztrátově kódovaný signál) a definici oficiálních výsledků v tomtéž adresáři v souboru `results_pemoq_official.csv`. Každý načtený vzorek následně předá funkci `pemoq_eval_testsample()`, která vrátí výstupní objektivní hodnocení kvality. Výsledky jsou agregovány do výstupního souboru `results_pemoq.csv` a jsou přiložené v tab. 3 (shrnutí výsledků) a v tab. 4 (přehled rozdílů).

4 - VERIFIKACE IMPLEMENTACE PEMO-Q V PROSTŘEDÍ MATLAB

Tab. 3: Výsledky funkčního testu implementace PEMO-Q v Matlabu a oficiální implementace PEMO-Q od spol. Höertech, s přiloženými hodnotami ODG modelu PEAQ pro porovnání. Tučně červeně jsou vyznačeny problematické vzorky (diskuze v kap. 4.4)

#	Testovaný vzorek	PEMOQ PSM	Matlab PEMOQ PSM	PEMOQ PSM _t	Matlab PEMOQ PSM _t	PEAQ ODG	PEMOQ ODG	Matlab PEMOQ ODG
1	ACODSNA.WAV	0.9971	0.9973	0.9287	0.9999	-0.47	-1.17	0.00
2	BCODTRI.WAV	0.9744	0.9724	0.9053	0.9044	-0.28	-1.55	-1.57
3	CCODSAX.WAV	0.9519	0.9464	0.8001	0.8692	-1.30	-2.90	-2.14
4	ECODSMG.WAV	0.9926	0.9871	0.9647	0.9735	-0.49	-0.58	-0.44
5	FCODSB1.WAV	0.9608	0.9631	0.9078	0.9559	-0.88	-1.51	-0.72
6	FCODTR1.WAV	0.9914	0.9722	0.9422	0.9437	-0.51	-0.95	-0.92
7	FCODTR2.WAV	0.9657	0.9318	0.8319	0.8517	-1.71	-2.64	-2.41
8	FCODTR3.WAV	0.9723	0.9281	0.8039	0.8165	-2.66	-2.88	-2.78
9	GCODCLA.WAV	0.9785	0.9702	0.9008	0.9530	-0.57	-1.63	-0.77
10	ICODSNA.WAV	0.9731	0.9693	0.0261	0.2922	-3.66	-3.90	-3.81
11	KCODSME.WAV	0.9990	0.9985	0.9943	0.9964	-0.03	-0.09	-0.06
12	LCODHRP.WAV	0.9931	0.9866	0.9587	0.9739	-0.52	-0.68	-0.43
13	LCODPIP.WAV	0.9887	0.9865	0.9476	0.9838	-0.22	-0.86	-0.27
14	MCODCLA.WAV	0.9557	0.8979	0.8255	0.8484	-1.44	-2.70	-2.46
15	NCODSFE.WAV	0.9870	0.9907	0.9977	0.9982	0.05	-0.04	-0.03
16	SCODCLV.WAV	0.9975	0.9815	0.9808	0.8262	-0.29	-0.32	-2.70

Tab. 4: Rozdíly hodnot PSM, PSM_t a ODG oficiální implementace PEMO-Q a implementace PEMO-Q v Matlabu. Tučně červeně jsou vyznačeny problematické vzorky.

#	Testovaný vzorek	Δ PSM	Δ PSM _t	Δ ODG
1	ACODSNA.WAV	0.0002	0.0712	1.17
2	BCODTRI.WAV	0.0020	0.0009	0.02
3	CCODSAX.WAV	0.0055	0.0691	0.76
4	ECODSMG.WAV	0.0055	0.0088	0.14
5	FCODSB1.WAV	0.0023	0.0481	0.79
6	FCODTR1.WAV	0.0192	0.0015	0.02
7	FCODTR2.WAV	0.0339	0.0198	0.23
8	FCODTR3.WAV	0.0442	0.0126	0.09
9	GCODCLA.WAV	0.0083	0.0522	0.86
10	ICODSNA.WAV	0.0038	0.2661	0.09
11	KCODSME.WAV	0.0005	0.0021	0.03
12	LCODHRP.WAV	0.0065	0.0152	0.25
13	LCODPIP.WAV	0.0022	0.0362	0.59
14	MCODCLA.WAV	0.0578	0.0229	0.25
15	NCODSFE.WAV	0.0037	0.0005	0.01
16	SCODCLV.WAV	0.0160	0.1546	2.38

4.4. Vyhodnocení výsledků verifikace

4.4.1. Porovnání výsledků verifikace s oficiální implementací PEMO-Q

Z tabulky 3 a 4 vidíme, že až na několik specifických vzorků výstup implementace PEMO-Q v Matlabu poměrně dobře odpovídá výstupu oficiální implementace. Průměrná odchylka hodnoty PSM_t – hlavního výstupního ukazatele kvality) je méně než 5 %, s čímž korespondují i nízké odchylky mapované hodnoty ODG. Nejproblémovější se jeví vzorky č. 1, 3, 9 a 16.

Je třeba dodat, že pro model PEAQ se $\Delta ODG < 0,1$ nepovažuje za signifikantní (ačkoliv jeho výstup pro oficiální vzorky pro testy konformity k modelu je zokrouhlen na tisíce), nicméně jedním z cílů dalších metod jako je např. PEMO-Q je zpřesnění hodnocení a zvýšení vypovídající hodnoty výsledků. Z tohoto důvodu jsou v tabulkách 6 a 7 uvedeny a dále diskutovány i rozdíly menší.

Vzorek č. 1 představuje několik perkusních úderů typu „snare“ oddělených různě dlouhými tichými částmi. Hodnoty PSM se liší o méně než desetinu procenta, oproti tomu PSM_t o řádově 10 % a ODG je již zcela rozdílná – oficiální PEMO-Q vzorku přisuzuje nerušivé zkeslení, zatímco implementace v Matlabu v podstatě identitu.

Byla provedena orientační kontrola výsledku subjektivním testem zkušeným posluchačem s bohatým hudebním vzděláním a cvičeným sluchem za použití reprodukcí systému skládajícího ze zvukové karty M-Audio FastTrack Pro a studiových sluchátek AKG K171 MKII. Posluchač nebyl schopen rozeznat rozdíl mezi referencí AREFSNA.WAV a degradovaným signálem z ACODSNA.WAV.

Orientační subjektivní test spolu s porovnáním s očekávanou hodnotou ODG z modelu PEAQ napovídají, že výsledek implementace v Matlabu více odpovídá realitě, nicméně by bylo za potřebí výrazně rozsáhlejší analýzy včetně souboru subjektivních testů, aby bylo možné tento názor považovat za fakt.

Signál ze třetího testovaného vzorku je na saxofon hraná pentatonika, dvakrát opakovaná. Opět, jako u vzorku č. 1 jde o širokopásmový signál pokrývající celé slyšitelné spektrum a implementace PEMO-Q jej hodnotí lépe, než je očekáváno v porovnání s oficiální implementací PEMO-Q.

Vzorek č. 9 obsahuje jednoduchou melodii hranou na klarinet. Oficiální implementace jej hodnotí s ODG = -1,63, implementace v Matlabu jeho kvalitu nadhodnocuje s výsledným ODG = -0,77. Pro klarinet je charakteristické spektrum obsahující zejména velké množství vyšších lichých násobků základní frekvence odpovídající hranému tónu.

Vzorek č. 16 představuje několik úderů dřevěných paliček. Očekávané hodnoty jsou $PSM_t = 0,98$ a ODG = -0,32, avšak model implementovaný v Matlabu vzorku přisuzuje hodnocení $PSM_t = 0,83$ a ODG = -2,70. To je v kontrastu s ostatními problematickými vzorky výrazné podhodnocení kvality.

4.4.2. Vysvětlení nalezených rozdílů

Důvodem rozdílů od oficiální implementace může být hned několik. Prvním je pravděpodobně v původní diplomové práci zmiňovaná nalezená nestabilita implementace adaptační kaskády v modelu slyšení PEMO, která pro hodnoty jdoucí nade všechny meze přiřazuje NaN (Not a Number) nebo nekonečno. To může vést k nedostatečné detekci velice rychlých změn v signálu, které jsou projevem např. rezonančních artefaktů právě u (byť jen velice málo) komprimovaných perkusních signálů ve vzorku č. 1, protože interpret Matlabu takové hodnoty při aritmetických výpočtech ignoruje bez jakéhokoliv upozornění. Výsledek hodnocení se tedy chová, jako kdyby v testovaném vzorku problémový artefakt vůbec nebyl přítomen, což logicky vede k lepšímu konečnému hodnocení jako např. u vzorku č. 1, 3 a 9.

Oproti očekávání naopak výrazně horší konečné hodnocení vzorku č. 16 by šlo vysvětlit použitými atributy modelu slyšení PEMO. Ten sám o sobě má několik stupňů volnosti, které byly v implementaci zafixovány:

- velikost gammatónové banky filtrů (použito 35 filtrů) a jejich Q koeficient (použito $Q = 2$),
- prahování (thresholding) signálů před vstupem do adaptivní kaskády na úrovni 10^{-5} a obecně podoba implementace adaptivní kaskády,

- c) délka zpracovávaných rámců vnitřní implementace (10 ms) a způsob asimilace vnitřních reprezentací s předpokladem menší rušivosti redukce vjemů (ztráta šířky pásma, snížení úrovně) než zavedení (rezonančních a jiných) artefaktů,
- d) konstanty použité v mapovací funkci transformující hodnotu PSM_t na ODG ,
- e) způsob zpracování tichých úseků signálu (s nulovou aktivitou) – implementace v Matlabu je nijak nekoriguje nebo nezkracuje (což může výsledný ukazatel PSM_t podhodnocovat)
- f) parametry výpočtu hodnoty PSM_t z posloupnosti $PSM(t)$

Je otázka, jakým způsobem jsou všechny tyto aspekty modelu slyšení PEMO a vyhodnocovací části metody PEMO-Q zpracovány v použité referenční implementaci společnosti HøerTech GmbH, která na svých stránkách [13] poznamenává, že je model slyšení přeci jen částečně upravený. Lepší referenční implementace však nebyla během verifikace k dispozici.

Je třeba také zmínit výpočetní náročnost modelu PEMO a jeho vysoký potenciál pro paralelizaci – vstupní signál je nejprve rozdělen na 35 frekvenčních pásem, ta jsou separátně filtrována (a také decimována a interpolována), usměrněna a hodnotově přizpůsobena a následně dále rozdělena při detekci amplitudové modulace. To vše jsou operace, které lze na každém frekvenčním pásmu provádět nezávisle a tím výpočetní čas řádově urychlit. FEL ČVUT bohužel nemá v rámci multilicence k dispozici Paralel Computing Toolbox pro Matlab, není tedy možné použít přímočaré nástroje pro paralelizaci (např. paralelní for-cyklus), které daný toolbox nabízí. Ve své stávající podobě je hodnocení kvality předaného vzorku na moderním procesoru Intel Core s architekturou Haswell taktovaném na 4 GHz v nejhorsím případě o cca 15 % rychlejší, než je délka signálu. Nejvíce výpočetního času (přes 50 %) stráví program decimací a interpolací signálu, které jsou vynuceny nestabilitami (rezonancemi) v použité implementaci banky gammatónových filtrů z [9].

4.5. Odstranění nalezených problémů

4.5.1. Výsledky detailní kontroly kódu, provedené úpravy

Nejprve byly zevrubně zkontrolovány všechny parametry implementovaného modelu slyšení, tj. způsob napočítání banky gammatónových filtrů (a jejich parametry), způsob napočítání banky modulačních filtrů (a jejich parametry) a parametry algoritmů pro filtrování, decimaci a interpolaci signálu. Použitím nevhodných parametrů funkce `adaptLoop.m` bylo způsobeno, že nedocházelo k horní limitaci výstupu adaptivní kaskády. Tato skutečnost byla opravena nastavením výchozího horního limitu na hodnotu 50.

Dále byla za účelem ověření chování výstupu adaptivní kaskády zavedena validace výstupních dat funkcí, které dohromady tvoří jádro modelu – pokud bude ve výstupu jakékoliv z funkcí nalezena hodnota `NaN` nebo `inf`, nebo pokud bude výstup prázdný, vyvolá Matlab chybové hlášení. Také byl ověřen výpočet okamžité aktivity a okamžité audio kvality na 10 ms dlouhých rámcích signálu a způsob určení pátého kvantilu ve výpočtu hodnoty PSM_t . Nebyly nalezeny nesrovnalosti.

Poslední částí implementace, která byla změněna, je předzpracování vzorků před samotným hodnocením kvality. V původním kódu byla pouze srovnána celková úroveň RMS testovaného signálu na úroveň RMS referenčního signálu. Celá část předzpracování byla tedy doplněna o základní zarovnání v čase a sjednocení délky obou signálů (zkrácení delšího signálu na délku signálu kratšího). Dále byla přidána volitelná normalizace amplitudy tak, aby maximum referenčního signálu bylo v hodnotě 1 a střední hodnota RMS testovaného signálu je normalizována na střední hodnotu RMS normalizovaného referenčního signálu. Nakonec bylo přidáno zkrácení tichých částí signálu na maximální délku 200 ms – tak, aby zkrácení signálů potenciálně nemělo efekt na modelování dopředného maskování.

4.5.2. Vyhodnocení provedených úprav

Po implementaci úprav v bodě 4.5.1 byly znovu zhodnoceny vzorky z tab. 3 s následujícími výsledky shrnutými v tab. 5. Při tomto opakovaném hodnocení bylo použito doplněné zkrácení tichých částí a adaptivní kaskáda měla nastavena dolní limit na hodnotu 10^{-5} a horní limit na hodnotu 50.

V porovnání s původními výsledky z tab. 3 (pro přehlednost porovnání je původní hodnocení ODG z tab. 3 zahrnuto i v tab. 5) vidíme, že se podařilo zmenšit nejhorší odchylky ODG (vzorky č. 3, 9, 16) oproti výsledkům oficiální implementace PEMO-Q, ačkoliv za cenu malého zvětšení odchylek u některých jiných vzorků (č. 2, 7). Celkově se však průměrná odchylka mapované hodnoty ODG zmenšila na $\Delta ODG = 0,5$, lze tedy provedené změny považovat za přínosné.

Tab. 5: Výsledky opětovného funkčního testu upravené implementace PEMO-Q v Matlabu v porovnání s hodnotami z oficiální implementace PEMO-Q od spol. Höertech a původními hodnotami ODG z implementace v Matlabu před provedenými změnami

#	Testovaný vzorek	PEMOQ PSM	Matlab PEMOQ PSM (po úpravách)	PEMOQ PSM _t	Matlab PEMOQ PSM _t (po úpravách)	PEMOQ ODG	Matlab PEMOQ ODG (před úpravami)	Matlab PEMOQ ODG (po úpravách)
1	ACODSNA.WAV	0.9971	0.99	0.9287	1.00	-1.17	0.00	0.00
2	BCODTRI.WAV	0.9744	0.95	0.9053	0.86	-1.55	-1.57	-2.30
3	CCODSAX.WAV	0.9519	0.94	0.8001	0.86	-2.90	-2.14	-2.22
4	ECODSMG.WAV	0.9926	0.99	0.9647	0.97	-0.58	-0.44	-0.51
5	FCODSB1.WAV	0.9608	0.96	0.9078	0.96	-1.51	-0.72	-0.72
6	FCODTR1.WAV	0.9914	0.97	0.9422	0.95	-0.95	-0.92	-0.78
7	FCODTR2.WAV	0.9657	0.93	0.8319	0.89	-2.64	-2.41	-1.80
8	FCODTR3.WAV	0.9723	0.93	0.8039	0.85	-2.88	-2.78	-2.38
9	GCODCLA.WAV	0.9785	0.97	0.9008	0.95	-1.63	-0.77	-0.84
10	ICODSNA.WAV	0.9731	0.97	0.0261	0.30	-3.90	-3.81	-3.81
11	KCODSME.WAV	0.9990	1.00	0.9943	1.00	-0.09	-0.06	-0.05
12	LCODHRP.WAV	0.9931	0.98	0.9587	0.97	-0.68	-0.43	-0.57
13	LCODPIP.WAV	0.9887	0.97	0.9476	0.97	-0.86	-0.27	-0.57
14	MCODCLA.WAV	0.9557	0.89	0.8255	0.84	-2.70	-2.46	-2.61
15	NCODSFE.WAV	0.9870	0.99	0.9977	1.00	-0.04	-0.03	-0.03
16	SCODCLV.WAV	0.9975	0.97	0.9808	0.88	-0.32	-2.70	-2.04

5. Adaptace implementace s využitím technik OOP

5.1. OOP v Matlabu

Matlab při nejmenším od verze 7 podporuje používání tříd. V nedávných verzích (R2015, R2016) přibily také možnosti používání vnořených (lokálních) funkcí ve skriptech a nový způsob organizace kódu do balíků zjednodušuje správu větších projektů.

Hlavním důvodem pro přepsání celé implementace PEMO-Q, původně napsané Martinem Zalabákem jako soubor skriptů a velkých funkcí, je snaha zjednodušit orientaci v SW projektu, zlepšit modularitu kódu a jednotlivé nezávislé funkční celky od sebe izolovat. Tím se sníží potenciál pro zavlečení chyb a zjednoduší se celková údržba a možné rozšiřování či nové využití projektu.

Je obecně známý fakt, že softwarové projekty využívající paradigma OOP (objektově orientovaného programování) se dlouhodobě lépe udržují/rozšiřují a při vývoji vzniká menší množství defektů než u čistého procedurálního programování. Jednotlivé části jsou rozděleny na objekty definované v korespondujících třídách, které vhodným způsobem obalují data a poskytují funkce, které s daty pracují a umožňující interakci mezi objekty. Toto poskytuje kýženou úroveň izolace jednotlivých částí projektu. Využití systému dědění a rozhraní s vynucenými vlastnostmi dále zjednodušuje využívání existujícího kódu a zajišťuje dodržení základních navržených principů, na kterých je projekt postaven.

5.2. OpenQual – obecný framework pro objektivní hodnocení kvality zvuku

Nová obecná implementace s názvem OpenQual (Open Quality Assessment Framework) využívá všech zmíněných prostředků poskytovaných prostředím Matlab. Celý projekt je zabalen ve složce „+OpenQual“, kde znamínko „plus“ označuje Matlab balík. Skripty, funkce a třídy v tomto balíku uložené jsou automaticky přidány na aktuální programovou cestu prostředí Matlab, pokud je na ni přidán samotný balík. Díky tomu je možné OpenQual používat tak, že jej uživatel buďto nakopíruje do umístění s ostatními zabudovanými funkcemi a balíky standardní instalace Matlabu, nebo jej umístí do stejného umístění, jako jiný skript/funkce, ze které jej bude používat (tzv. side-by-side).

Jádro OpenQual tvoří abstraktní třídy `EvaluationMethod` – obecné rozhraní pro metody hodnocení kvality zvuku – a `AuditoryModel` – obecné rozhraní pro modely slyšení. Každá metoda hodnocení musí mimo jiné poskytovat unifikovanou funkci `evalObjQuality()`, která bude sloužit k hodnocení objektivní kvality předaných signálů. Obdobně musí každý model poskytovat funkci `processSample()`, která bude sloužit k transformaci předaného signálu na interní reprezentaci tohoto signálu v modelu slyšení. Metody obecně nemusejí využívat modelů slyšení.

Model slyšení byl adaptován do třídy `Pemo.m`, která redefinuje metodu `processSample()`. Při inicializaci modelu je třeba předat hodnotu vzorkovací frekvence, podle které se napočítají vnitřní parametry modelu: `model = Pemo(fs)`. Pak je možné modelu předat signál ke zpracování, výstupem je vnitřní reprezentace jako pole buněk (cell array): `internalRepresentationCell = model.processSample(signal)`.

Samotná metoda hodnocení PEMO-Q byla adaptována do třídy `PemoQ.m`, která dědí od rozhraní `EvaluationMethod` a v souladu s jeho požadavky redefinuje metodu `evalObjQuality(refSig, testSig)`. Součástí metody je i model slyšení reprezentovaný instancí třídy `Pemo`, a proto po inicializaci celé metody (`evalEngine = PemoQ(fs)`) lze její instanci předat signály k hodnocení: `quality = evalEngine.evalObjQuality(refSig, testSig)`.

Schopnosti implementace PEMO-Q byly dále rozšířeny o možnost předat k evaluaci interní reprezentaci jednoho nebo obou signálů. Toto je vhodné např. při evaluacích rozsáhlých množin vzorků,

kteřé mají společnou referenci a liší se pouze testovaný signál (např. analýza chování ztrátových kódérů). Nemá smysl znovu a znovu počítat vnitřní reprezentaci reference za předpokladu, že jsou již všechny vzorky v hodnoceném setu synchronizovány v čase a úrovni. Tuto synchronizaci lze proto také potlačit předáním příslušných parametrů evaluační metodě (kteřá je dále předá modelu slyšení), včetně zákazu odstraňování tichých částí. Posledními dvěma parametry, kteřé lze evaluační metodě předat, je definice audio kanálů, kteřé mají být ohodnoceny, a pokud je jich definováno více než jeden, lze zvolit strategii pro interpretaci výsledků (kanál po kanále, pouze nejhorší). Detailní návod k použití nových (nepovinných) parametrů lze najít v Matlab dokumentaci pro každou třídu a metodu v projektu definovanou.

Aby bylo používání (a rozšiřování) balíku OpenQual jednodušší, je připravena metoda `getEvaluationEngine()`, kteřé lze jako páry jméno-hodnota předat specifikaci požadované metody hodnocení (případně jejího modelu slyšení) a `getEvaluationEngine` už se postará o veškerou inicializaci (včetně validace vstupních dat a sestavení metody hodnocení) a vrátí její instanci.

OpenQual je možné snadno rozšířit o další evaluační metodu. Tu je třeba implementovat v nové třídě, kteřá musí dědit od rozhraní `EvaluationMethod`. OpenQual lze také rozšířit o další modely slyšení (ať už pro nové či stávající metody), implementované v třídách dědicích od rozhraní `AuditoryModel`. Jediný stávající kód, kteřý je v takovém případě nutné aktualizovat, je metoda `getEvaluationEngine` (zděděná od rozhraní) a enumerační třídy `Methods` a `Models` – to proto, že nové části musejí mít definovanou validaci vstupních parametrů, a dále z toho důvodu, aby metoda `getEvaluationEngine` nové části znala a mohla správně provést inicializaci a navrácení instance evaluační metody.

6. Optimalizace složení multiplexu v systému DAB+

6.1. Motivace pro hodnocení metodou PEMO-Q

Metoda PEMO-Q, popsaná v části 2.2 této práce, byla dle autorů [3] od začátku navržena jako možný nástupce předchozích metod standardizovaných jako doporučení ITU s účelem odstranit některé z jejich nevýhod, jako nedostatečná korelace ODG s výstupy subjektivních testů (SDG) pro vzorky na mezích hodnotící škály SDG/ODG (ODG ~ 0 – zdrojové kódování o relativně vysoké přenosové rychlosti blížící se hornímu limitu u použitého kodeku, ODG < -3 – ztrátové zdrojové kódování o extrémně nízkých přenosových rychlostech (typicky méně, než 50 kb/s), ukázané v [28] pro PEAQ) nebo nutnost natrénování vyhodnocovací neuronové sítě. Dále je dle [3] metoda PEMO-Q navržena jako univerzální pro použití k hodnocení vnímané kvality řeči i hudby (případně kombinace). Z tohoto důvodu se hodí pro porovnání hodnocení za použití obdobné metodiky jako v [29].

Rozdíly ve výstupních charakteristikách PEAQ a PEMO-Q by se měly teoreticky nejvíce projevit u HE-AACv1 a HE-AACv2 profilů kodeku AAC, které využívají techniky parametrického kódování. Efekty plynoucí z vlastností těchto technik by neměly být pro posluchače zásadně rušivé, ale mají na výsledný dekódovaný signál natolik zásadní dopady, že je metody jako PEAQ hodnotí hůře než subjektivní testy, protože na vyhodnocování takových zásahů kodéru nebyly nikdy navrženy (jak je ukázáno v [28] na porovnání výsledků subjektivního a objektivního testu kodeku HE-AACv2). Dále se dají čekat rozdíly u vzorků kódovaných s vysokou přenosovou rychlostí, protože dle tvrzení autorů [3] je PEMO-Q specificky navržen jako univerzální nástroj pro hodnocení i velmi malých zhoršení kvality.

6.2. Metodika hodnocení, použité vzorky

Autoři původní studie používající metodu PEAQ [29] zapůjčili podmnožinu vzorků a výsledků použitých v [29] pro přeměření experimentu za použití metody PEMO-Q se zachováním metodologie. Byly tedy připraveny referenční signály vzorkované s frekvencí 48 kHz, popsané níže v tab. 6, o délce cca 30 s, a jejich degradované varianty zakódované pomocí MP2, AAC-LC, HE-AACv1 a HE-AACv2 v mono (kromě HE-AACv2) a stereo verzi. Jde o identické vzorky (včetně kódovaných variant), jako byly použity v [29], nicméně z technických důvodů nebylo možné použít identickou množinu vzorků, jako v [29], a proto nelze výsledky této práce a [29] přímo srovnávat. Výsledky pro obě metody hodnocení kvality prezentované v této práci však vycházejí z množiny vzorků popsané v tab. 6 a porovnání možné je.

Tab. 6: Použité vzorky

Reference	Obsah	Druh
refglo.wav	širokopásmový signál s přechodovými ději	hudba
refhrp.wav	cembalo	hudba
refsop.wav	klasická hudba	hudba
rickroll.wav	popová hudba	hudba
refsfe.wav	ženský hlas, angličtina	mluvené slovo
refsme.wav	mužský hlas, angličtina	mluvené slovo
refsmg.wav	mužský hlas, němčina	mluvené slovo

Vzorky zakódované kodekem AAC byly kódované v rozmezí 8 kb/s - 256 kb/s s krokem 4 kb/s. Vzorky zakódované kodekem MP2 byly kódované pro všechny dovolené hodnoty datového toku pro systém DAB+, jak je zobrazeno v tab. 7.

Tab. 7: Použité hodnoty datového toku pro vzorky kódované kodekem MP2 ve standardu DAB+

Hodnoty datového toku pro kodek MP2 ve standardu DAB+ [kb/s]						
32	48	56	64	80	96	112
128	160	192	224	256	320	384

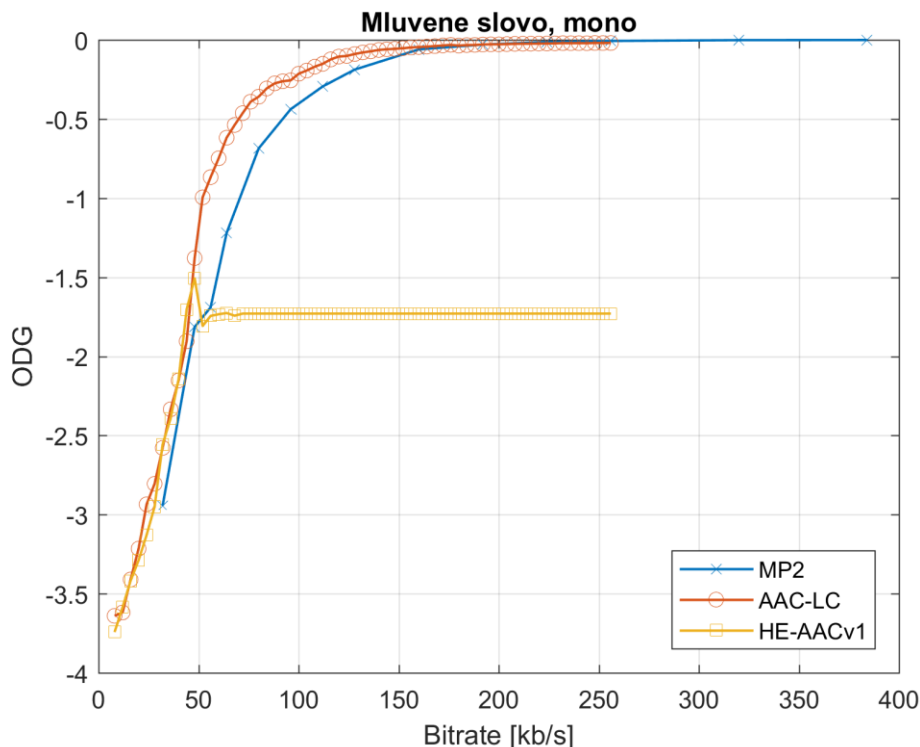
Takto vytvořené sety mono a stereo vzorků byly přeměřeny metodou PEMO-Q (samotné měření je implementováno v příložených skriptech v umístění `OpenQual/test/dab_plus_objquality_test_mono.m` a `OpenQual/test/dab_plus_objquality_test_stereo.m`) s použitými parametry `sync=false`, `removeSilence=false`, neboť vzorky byly získány již časově synchronizované, takže bylo možné výpočty urychlit použitím (pro každý vzorek) předpočítané interní reprezentace reference v modelu slyšení (z tohoto důvodu ale nebylo možné použít zkrácení tichých částí).

Pro mono signály byly následně hodnoty ODG jednotlivých vzorků setu hudebních signálů zprůměrovány, čímž je získána výsledná hodnota ODG – obdobně pro vzorky obsahující mluvené slovo.

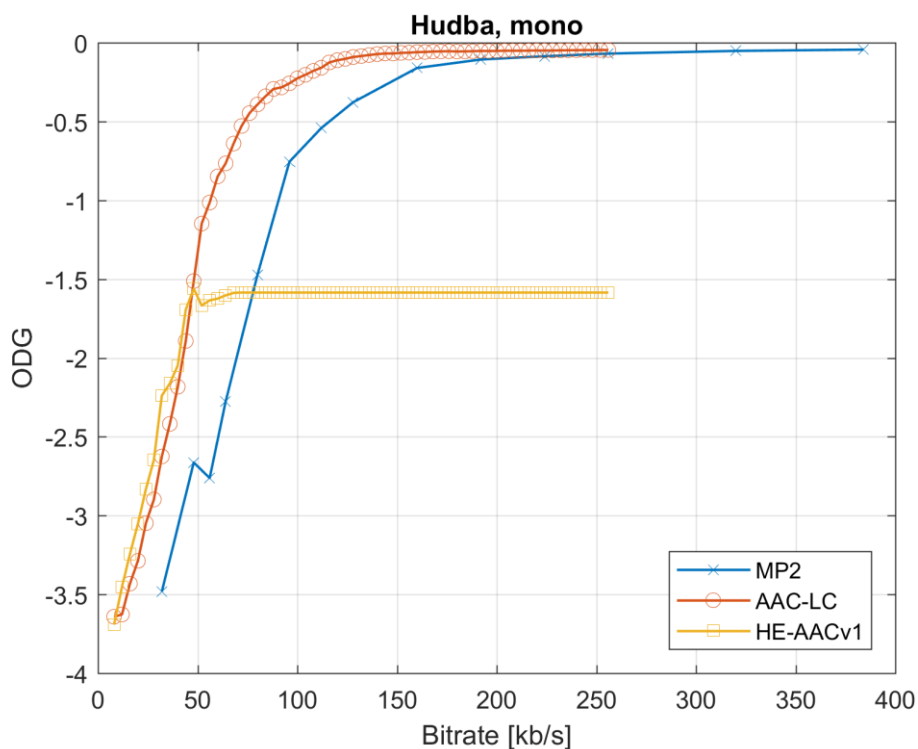
Při vyhodnocování stereo signálů byly nejprve oba kanály smíchány do jediného triviálním způsobem spočívajícím v sečtení amplitudy kanálů a vydělení počtem kanálů. Dále byly vzorky zpracovávány stejným způsobem, jako mono varianty.

6.3. Výsledky hodnocení metodou PEMO-Q

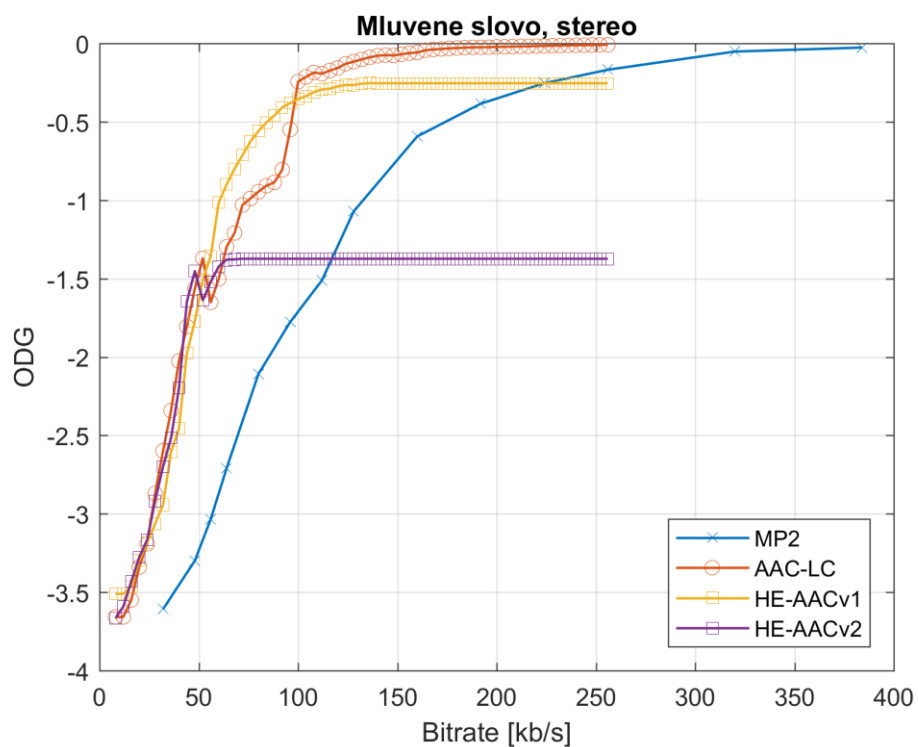
Následující grafy na obr. 3 – 6 shrnují naměřené závislosti ODG na datovém toku při kódování různými kodeky (profily) pro jednotlivé kombinace druhu obsahu a počtu kanálů.

**Obr. 3:** Závislost kvality zvuku na přenosové rychlosti, mluvené slovo, mono

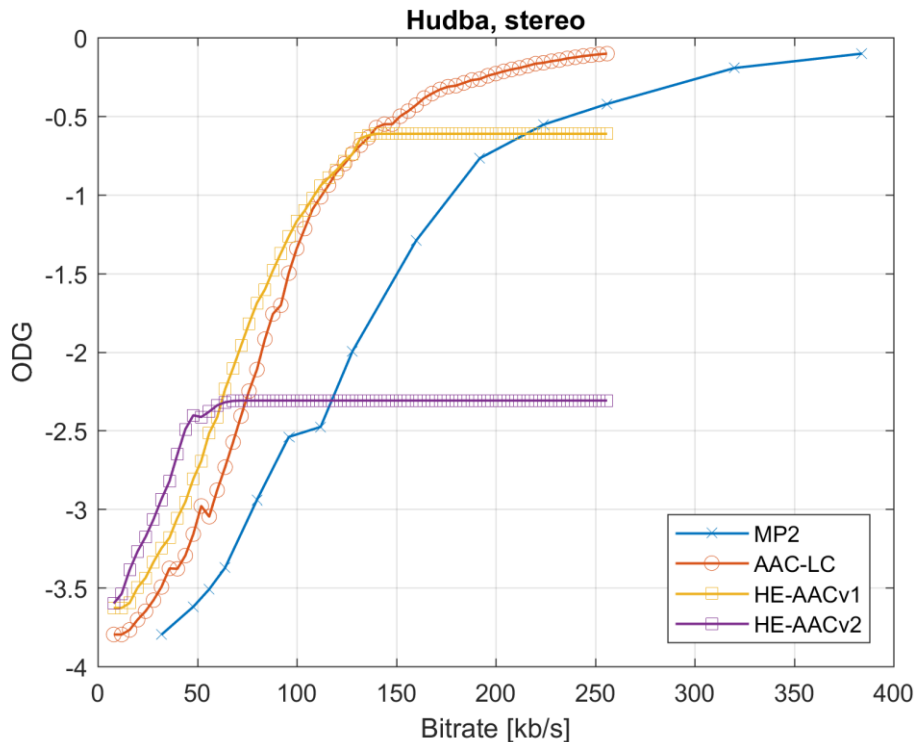
6 - OPTIMALIZACE SLOŽENÍ MULTIPLEXU V SYSTÉMU DAB+



Obr. 4: Závislost kvality zvuku na přenosové rychlosti, hudba, mono



Obr. 5: Závislost kvality zvuku na přenosové rychlosti, mluvené slovo, stereo



Obr. 6: Závislost kvality zvuku na přenosové rychlosti, hudba, stereo

Tab. 8 shrnuje konkrétní nejnižší datové toky, pro které testované kodeky dosahují daných kvalitativních kritérií. Protože z důvodu zvolené metodiky měření není výstupem spojitá závislost ODG na přenosové rychlosti, jsou zvoleny takové hodnoty datového toku, které jsou nejbližší cílovému hodnocení kvality ODG a neliší se v něm o více než 0,05 pro kritérium transparency a „prémiové“ vysílací kvality, nebo se neliší o více než 5 % pro zbylá tři kvalitativní kritéria. Pokud taková hodnota přenosové rychlosti nelze najít (např. kvůli příliš hrubému odstupňování jednotlivých měřených přenosových rychlostí u kodeku MP2), je zvolena nejbližší vyšší přenosová rychlost, aby bylo zaručeno dosažení požadovaného kvalitativního kritéria.

Pro snadnější porovnání výsledků obou metod objektivního hodnocení kvality PEMO-Q a PEAQ jsou v tab. 9 přiloženy výsledky odpovídající hodnocení stejné podmnožiny vzorků z [29] použitých v této práci hodnocených metodou PEAQ. Nejde tedy o stejné výsledky prezentované v [29] a celkově výsledky prezentované v této práci a v [29] nelze přímo srovnávat.

Dále je třeba poznamenat, že samotné hodnocení metodou PEAQ v tab. 9 (potažmo v tab. 10) nebylo provedeno v rámci této práce, ale jde o kompilaci z původních výsledků z [29], které pro účely porovnání obou metod taktéž zapůjčili autoři [29].

Tab. 8: Přenosové rychlosti dosahující kvalitativních kritérií podle hodnocení metodou PEMO-Q

	Kritérium kvality (ODG)	Přenosová rychlost [kb/s]						
		MP2		AAC-LC		HE-AACv1		HE-AACv2
		mono	stereo	mono	stereo	mono	stereo	stereo
mluvené slovo	Transparence (≈ 0)	160	320	156	164	x	x	x
	"Premiová" ($\approx -0,5$)	96	192	72	96	x	84	x
	"Standardní" (≈ -1)	80	160	52	72	x	60	x
	Částečně rušivé zkres. (≈ -2)	48	96	44	40	44	44	44
	Rušivé zkres. (≈ -3)	32	56	24	28	28	28	28
hudba	Transparence (≈ 0)	384	x	220	x	x	x	x
	"Premiová" ($\approx -0,5$)	128	256	76	152	x	x	x
	"Standardní" (≈ -1)	96	192	56	112	x	108	x
	Částečně rušivé zkres. (≈ -2)	80	128	44	84	40	68	x
	Rušivé zkres. (≈ -3)	48	80	24	50	20	40	28

Zeleně jsou v tab. 8 podbarveny případy, kdy je dle hodnocení PEMO-Q daného kritéria kvality možné dosáhnout s nižší přenosovou rychlostí, než podle výsledků hodnocení metodou PEAQ přiložených pro porovnání v tab. 11. Červeně jsou podbarveny opačné případy a pokud jsou hodnoty totožné, nejsou podbarveny vůbec.

Tab. 9: Přenosové rychlosti dosahující kvalitativních kritérií podle hodnocení ekvivalentní množiny vzorků metodou PEAQ

	Kritérium kvality (ODG)	Přenosová rychlost [kb/s]						
		MP2		AAC-LC		HE-AACv1		HE-AACv2
		mono	stereo	mono	stereo	mono	stereo	stereo
mluvené slovo	Transparence (≈ 0)	160	320	132	188	x	x	x
	"Prémiová" ($\approx -0,5$)	96	192	72	100	x	132	x
	"Standardní" (≈ -1)	80	160	60	76	x	80	x
	Částečně rušivé zkres. (≈ -2)	64	128	44	56	44	56	48
	Rušivé zkres. (≈ -3)	56	112	36	40	28	36	28
hudba	Transparence (≈ 0)	160	320	136	256	x	x	x
	"Prémiová" ($\approx -0,5$)	96	192	84	132	x	x	x
	"Standardní" (≈ -1)	96	192	60	104	x	100	x
	Částečně rušivé zkres. (≈ -2)	80	160	48	80	36	60	44
	Rušivé zkres. (≈ -3)	56	112	36	56	24	36	28

Tab. 10 představuje teoreticky maximální možný počet služeb umístitelných do jednoho multiplexu systému DAB+ při použití přenosové rychlosti odpovídající stejnému umístění v tabulce jako v tab. 8, při uvážení ochranného kódování úrovně 4-A (konvoluční kódování s parametrem CR (code rate) = 3/4, odpovídá celkové užitečné přenosové rychlosti 1728 kb/s), 5 % datového toku vyhrazeného pro PAD (program additional data) a dalších 10 % vyhrazených pro FEC (forward error correction) pro všechny profily kodeku AAC. Hodnoty v tab. 10 jsou tedy vypočítány dle rovnice (1) převzaté z [29]:

$$N_{i,j,k} = \left\lfloor \frac{C}{B_{i,j,k} \cdot (1+M_i)} \right\rfloor \quad (1)$$

kde N je počet služeb, C je celková užitečná přenosová rychlost celého multiplexu při dané úrovni ochranného kódování, B je přenosová rychlost pro i -tý kodek (profil kodeku v případě AAC), j -tý druh signálu (mluvené slovo/hudba) pro k kanálů a M_i představuje rezervu pro PAD (případně PAD+FEC) pro i -tý kodek/profil ($M = 0,05$ pro MP2, $0,15$ pro profily kodeku AAC).

Pro porovnání jsou opět v tab. 11 přiloženy výsledné počty služeb v multiplexu s ochranným kódováním 4-A získané s použitím metody PEAQ, které byly vypočítány z hodnot v tab. 9 taktéž dle rovnice (1).

Tab. 10: Složení multiplexu při ochranném kódování 4-A na základě výsledků hodnocení kvality metodou PEMO-Q v této práci

	Kritérium kvality (ODG)	Maximální počet služeb v jednom multiplexu						
		MP2		AAC-LC		HE-AACv1		HE-AACv2
		mono	stereo	mono	stereo	mono	stereo	stereo
mluvené slovo	Transparence (≈ 0)	10	5	9	9	x	x	x
	"Premiová" ($\approx -0,5$)	17	8	20	15	x	17	x
	"Standardní" (≈ -1)	20	10	28	20	x	25	x
	Částečně rušivé zkres. (≈ -2)	34	17	34	37	34	34	34
	Rušivé zkres. (≈ -3)	51	29	62	53	53	53	53
hudba	Transparence (≈ 0)	4	x	6	x	x	x	x
	"Premiová" ($\approx -0,5$)	12	6	19	9	x	x	x
	"Standardní" (≈ -1)	17	8	26	13	x	13	x
	Částečně rušivé zkres. (≈ -2)	20	12	34	17	37	22	x
	Rušivé zkres. (≈ -3)	34	20	62	30	75	37	53

Zeleně jsou v tab. 10 podbarveny případy, kdy je dle hodnocení PEMO-Q možné do multiplexu umístit více služeb, než podle výsledků hodnocení metodou PEAQ přiložených pro porovnání v tab. 11. Červeně jsou podbarveny opačné případy a pokud jsou hodnoty stejné, nejsou podbarveny vůbec.

Tab. 11: Složení multiplexu při ochranném kódování 4-A na základě výsledků hodnocení vnímané kvality zvuku metodou PEAQ z [29]

	Kritérium kvality (ODG)	Maximální počet služeb v jednom multiplexu						
		MP2		AAC-LC		HE-AACv1		HE-AACv2
		mono	stereo	mono	stereo	mono	stereo	stereo
mluvené slovo	Transparence (≈ 0)	10	5	11	7	x	x	x
	"Premiová" ($\approx -0,5$)	17	8	20	15	x	11	x
	"Standardní" (≈ -1)	20	10	25	19	x	18	x
	Částečně rušivé zkres. (≈ -2)	25	12	34	26	34	26	31
	Rušivé zkres. (≈ -3)	29	14	41	37	53	41	53
hudba	Transparence (≈ 0)	10	5	11	5	x	x	x
	"Premiová" ($\approx -0,5$)	17	8	17	11	x	x	x
	"Standardní" (≈ -1)	17	8	25	14	x	15	x
	Částečně rušivé zkres. (≈ -2)	20	10	31	18	41	25	x
	Rušivé zkres. (≈ -3)	29	14	41	26	62	41	53

6.5. Vyhodnocení dosažených výsledků, rozdíly v použití PEMO-Q oproti PEAQ

Z dosažených výsledků hodnocení metodou PEMO-Q prezentovaných v tab. 8 a 10 lze v porovnání s hodnocením PEAQ v tab. 9 a 11 obecně říci, že implementace metody PEMO-Q z této práce je oproti metodě PEAQ více citlivá na malá zhoršení kvality při použití vysokých přenosových rychlostí používaných při konvenčním ztrátovém kódování audia (více než přibližně 250 kb/s pro AAC-LC i MP2). Naopak pro nízké přenosové rychlosti, které odpovídají výslednému hodnocení $ODG \sim -2,5$ a méně, přisuzuje PEMO-Q lepší hodnocení kvality než PEAQ. Pozoruhodným efektem tohoto chování metody PEMO-Q je fakt, že ani jeden kodek nedosáhl v rámci použitého rozsahu přenosových rychlostí v hodnocení pro stereo hudební signály kvalitativního kritéria transparence (viz graf na obr. 6 a shrnutí v tab. 8).

Podle hodnocení metodou PEAQ (viz tab. 9) by měly HE varianty kodeku AAC pro velmi nízké datové toky podávat lepší výsledky než profil AAC-LC. Nicméně dle hodnocení PEMO-Q jsou rozdíly (až na stereo hudební signály, viz grafy na obr. 3 - 5 vs. graf na obr. 6) mizivé. Pouze v případě hudebního stereo signálu lze s jistotou tvrdit, že pro přenosové rychlosti nižší než 64 kb/s je dle hodnocení PEMO-Q výhodnější použití HE-AACv2 před HE-AACv1 a LC-AAC, ale není dosaženo ani kvality odpovídající $ODG \sim -2$ (částečně rušivé zkreslení). HE-AACv1 podává dle PEMO-Q při kódování hudebního stereo signálu lepší výsledky než AAC-LC až do přenosové rychlosti 136 kb/s a dosahuje (překonává) $ODG \sim -1$ (standardní vysílací kvalita). Varianta AAC-LC v hodnocení nedosáhla transparence ($ODG \sim 0$) při kódování stereo hudebních signálů, protože byly hodnoceny pouze vzorky s přenosovou rychlostí do 256 kb/s. Nicméně, pokud vezmeme v potaz možnou extrapolaci naměřené závislosti až do horního limitu datového toku pro AAC-LC – přenosové rychlosti 320 kb/s – je pravděpodobné, že by kodek AAC-LC dosáhl transparence při hodnocení metodou PEMO-Q někde v rozmezí 300 – 320 kb/s.

Z grafů je dále patrné vnitřní omezení maximální přenosové rychlosti pro profily HE-AACv1 (~ 70 kb/s pro mono, ~ 140 kb/s pro stereo) a HE-AACv2 (~ 70 kb/s). Enkodéru lze sice jako parametr předat i vyšší požadovanou přenosovou rychlost, ale po překročení vnitřního limitu je hodnota požadované přenosové rychlosti ignorována, což se ve výsledcích projevuje jako konstantní hodnocení ODG při zvyšující se přenosové rychlosti u vzorků kódovaných právě profily HE-AACv1 a HE-AACv2.

V celkovém porovnání metod PEMO-Q a PEAQ nejsou zjevné žádné extrémní odchylky implementace PEMO-Q v Matlabu od očekávaných výstupních hodnot, které v tomto případě představuje výstup metody PEAQ. Lze tedy tvrdit, že je pro takovýto typ aplikace implementovaná metoda PEMO-Q při nejmenším stejně vhodná a použitelná, jako metoda PEAQ.

7. Experimentální analýza restaurovaného zvuku

7.1. Charakteristicky hodnoceného restaurovaného audia, možnosti a omezení použité metodiky

Byla připravena audio stopa z archivního filmu, která je složena z pěti ukázek českého mužského a ženského hlasu, kde první dvě jsou doplněné podkresovou filmovou hudbou (harmonie hraná smyčcovými nástroji doplněná harfou). Jedná se o jedinou audio stopu (jediný soubor s jedním audio kanálem) dále pro potřeby metody hodnocení PEMO-Q zpracovávanou jako celistvý vzorek. Digitalizovaný přepis obsahuje mnoho přebuzení, zejména u souhlásek, typicky sykavek v ženském podání. Dále je mírně zašuměný a je znatelně shora pásmově omezený, s pravidelnými prasknutími slyšitelnými v tichých částech.

Amatérsky vyčištěný signál (na obr. 7 označený jako „nekvalitní“ master) vytvořený s použitím obecně nevhodných parametrů restauračních technik stále obsahuje již zmíněná přebuzení, nicméně byl silně odšuměn a praskání již nejsou slyšitelná.

Profesionálně restaurovaný master (na obr. 7 označený jako „kvalitní“ master) vytvořilo pro Českou Televizi studio, které se podílí přímo na restauraci archivních filmových děl pro Národní filmový archiv v České republice. Byl odšuměn, zbaven praskání a dále byly odstraněny defekty v přebuzených částech, což si vyžádalo malé snížení dynamiky. Zní tak v porovnání s originálem poněkud ploše. Také je slyšet částečná ztráta barvy hlasu, výsledný zvuk zní spíše plechově.

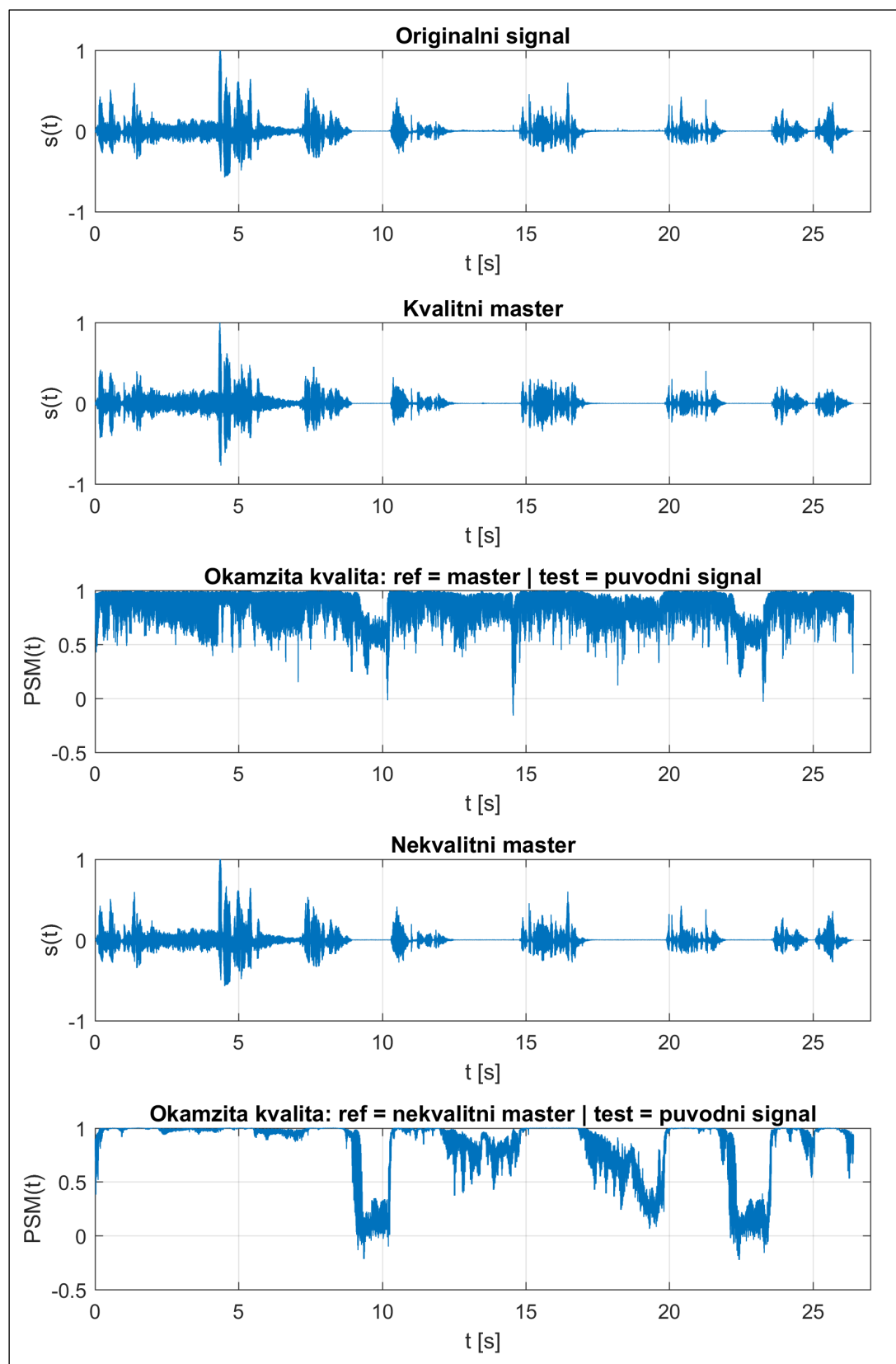
Takto byly vytvořeny dva vzorky složené z pohledu metody PEMO-Q z reference tvořené nejdříve kvalitním (profesionálním) masterem, v druhém případě nekvalitním (amatérským) masterem, a testovaného signálu tvořeného originálním digitalizovaným přepisem v obou případech. Tyto dva vzorky jsou již byly časově synchronizované a byly zpracovány konvenčním způsobem implementovanou metodou hodnocení PEMO-Q bez zkracování tichých částí, aby bylo možné porovnávat časové průběhy okamžité objektivní kvality PSM(t) a v kontextu časové obálky signálu.

7.2. Výsledek objektivního hodnocení restaurovaného zvuku, časový průběh okamžitého hodnocení kvality

Na grafech v obr. 7 lze sledovat časové průběhy obálky originálního zvuku, profesionálně restaurovaného masteru a amatérského masteru vytvořeného s použitím obecně nevhodných parametrů restauračních technik. Doplnují je korespondující časové průběhy okamžité audio kvality ve formě časového průběhu hodnoty PSM(t). Dále grafické výsledky v obr. 7 doplňují standardní hodnoty hodnocení kvality PSM, PSM_t a ODG shrnuté v tab. 12.

Tab. 12: Číselné hodnocení kvality použitých kombinací restaurovaného a originálního zvuku jako páru reference a testovaného signálu z pohledu metody PEMO-Q

Referenční signál	Testovaný signál	PSM	PSM _t	ODG
kvalitní master	originální přepis	0.8002	0.6640	-3.43
nekvalitní master	originální přepis	0.9515	0.6242	-3.51



Obr. 7: Porovnání obálky originálního, profesionálně restaurovaného a amatérsky restaurovaného signálu v čase s korespondujícím průběhem okamžitého hodnocení kvality $PSM(t)$

7.3. Vyhodnocení možností metody PEMO-Q pro analýzu restaurovaného audia

Nejprve je třeba podotknout, že zvolený způsob složení páru referenčního a testovaného signálu pro potřeby metody PEMO-Q bude mít na hodnocení zásadní vliv – díky kroku částečné asimilace interní reprezentace testovaného signálu s interní reprezentací reference v první fázi vyhodnocení kvality budou potenciální rušivé efekty, které mohly být nesprávným restauračním zásahem do nahrávky zaneseny, hodnoceny mírněji, než pokud v originálním signále oproti restaurovanému nějaké ruchy přebývají (situace, kdy byl nově vyčištěný master odšuměn nebo bylo odstraněno praskání/přebuzení). Toto chování je sice na jednu stranu chtěné, protože je cílem mimo jiné i odhalení odšuměných a vyčištěných částí (ve výsledném průběhu okamžitého hodnocení kvality se tyto oblasti tedy logicky projeví jako ostré poklesnutí hodnoty $PSM(t)$), na druhou stranu působí toto chování proti snaze objektivně hodnotit provedené restaurační zásahy a zanášá do použité metodiky vnitřní odchylky hodnocení ve prospěch razantnějšího odebrání informace.

Z tabulky č. 11 vidíme, že se z pohledu PEMO-Q signály v obou případech liší tak výrazně, že jsou výsledné známky ODG $\sim -3,5$. To je očekávané, pokud bylo odstraněno velice rušivé praskání (v obou případech) a defekty způsobené přebuzením (v případě profesionálního masteru). Je dobré si všimnout faktu, že originální přepis je vůči amatérskému masteru hodnocen hůře než vůči profesionálnímu masteru. Protože v amatérském masteru nebyly vyčištěny defekty z přebuzení, toto hodnocení (s korespondujícími rozdíly v hodnotách PSM a PSM_i) napovídá, že byl amatérský pokus o redukci šumu v porovnání s profesionálním zásahem zřejmě příliš invazivní, tedy za předpokladu, že je cílem restaurace audia odebrat jen nejnütnější část informace v signálu obsažené tak, aby při odstranění rušivých podnětů nedocházelo ke zbytečné ztrátě uměleckého projevu. Tento efekt je také vidět v průběhu $PSM(t)$ v posledním (pátém) grafu na obr. 7 na extrémním poklesu hodnoty okamžité kvality tichých částí, výraznějším ve srovnání s mírnějšími poklesy hodnocení kvality stejných úseků pro kombinaci profesionálního masteru a originálního přepisu (třetí graf na obr. 7).

Dále je v průběhu $PSM(t)$ pro kombinaci profesionálního masteru a originálního přepisu na třetím grafu na obr. 7 znatelná výrazná aktivita de facto v celé délce signálu. Toto chování lze přisoudit provedení odstranění defektů přebuzení z originálního přepisu, které jsou přítomné spolu s praskáním v celé délce signálu a nejzřetelnější jsou na začátcích monologů, které typicky začínají ostrou samohláskou – často sykavkou. I tento efekt je v průběhu $PSM(t)$ zřetelný jako špičkový propad hodnoty $PSM(t)$ cca v časech 7 s, 10,5 s, 14 s, 18 s.

Celkově lze tedy říci, že z časového průběhu okamžitého hodnocení kvality $PSM(t)$ je sice potenciálně možné odhalit některé provedené restaurační zásahy (odstranění šumu, praskání, přebuzení), ale již se neprojevily jevy jako ztráta dynamiky nebo barvy hlasu. S přihlédnutím ke vnímané kvalitě poslechu v kontrastu s výsledky v tab. 12 a v grafech na obr. 7 je kvalitativní rozlišení vhodných a nevhodných zásahů při nejlepším nejednoznačné.

Navíc pokud jsou k dispozici originální přepis i restaurovaný zvuk, existují výpočetně jednodušší a efektivnější způsoby detekce restauračních zásahů, které v tomto případě hodnocení metodou PEMO-Q odhalilo (odstranění šumu, praskání, přebuzení), popsané v [30].

8. Závěr

Formální a funkční správnost implementace metody objektivního hodnocení kvality zvuku PEMO-Q byla úspěšně ověřena na souboru vzorků určených původně pro testy konformity k modelu PEAQ a dále proti výsledkům získaných z těchto vzorků aplikací oficiální implementace PEMO-Q. Ze získaných výsledků s přihlédnutím k doporučením v původní práci [14] je zjevné, že implementovaná metoda hodnocení kvality zvuku PEMO-Q odpovídá její definici v [3], nicméně vykazovala minoritní problémy způsobené implementačními detaily a chybějící částí předzpracování signálů před samotným hodnocením. Byly odstraněny nalezené problémy s nestabilitou adaptační kaskády, doplněny chybějící části předzpracování signálů a celkově byla snížena průměrná odchylka podávaných výsledků vůči oficiální implementaci PEMO-Q.

Pro další použití byla implementace přepsána s využitím technik objektivně orientovaného programování, což umožnilo nejen hlubší parametrizaci samotného hodnocení kvality, ale také zavedení jednotné architektury pro budoucí rozšíření o další evaluační metody či přidání přívětivějšího uživatelského rozhraní. Výsledkem je Matlab balík nazvaný OpenQual, který nabízí širokou flexibilitu pro různé aplikace objektivního hodnocení zvuku.

Po úpravě implementace do flexibilnější podoby byla s využitím PEMO-Q zopakována studie [29] vlivu ztrátových kodeků používaných ke zdrojovému kódování zvuku v systému digitálního rozhlasového vysílání DAB+ založená na metodě PEAQ. Přeměření podмноžiny identických vzorků umožnilo prozkoumat rozdíly v chování metod PEAQ a PEMO-Q. Rozdíly byly identifikovány zejména u velmi malých, respektive velmi velkých zhoršení kvality zvuku ($ODG > -1$, respektive $ODG < -3$), obecně lze však na základě naměřených výsledků metodu PEMO-Q považovat za obdobně vhodnou pro tento typ aplikace.

Na závěr byly vyzkoušeny možnosti použití objektivního hodnocení kvality zastoupeného metodou PEMO-Q k analýze zásahů při restauraci digitalizovaných archivních nahrávek. Z výsledných průběhů okamžitého hodnocení kvality PSM(t) lze sice odhalit některé provedené restaurační zásahy (odstranění šumu, praskání, přebuzení), ale již nebylo možné identifikovat jevy jako např. ztrátu dynamiky nebo barvy hlasu. Pokud jsou k dispozici originální přepis i restaurovaný zvuk, existují pro základní detekci výpočetně jednodušší a pravděpodobně efektivnější způsoby detekce zásahů jako je manipulace ve spektru, odstranění šumu a prasknutí (popsané v [30]). V porovnání s nimi nepřináší použití PEMO-Q žádné zjevné výhody, a tedy jej nelze doporučit pro takové použití.

Z cílů této práce vytyčených v úvodní části byly tedy splněny následující: funkčnost implementace PEMO-Q v Matlabu byla verifikována na množině testovacích vzorků a doplněna o chybějící části. Adaptovaná implementace (pro flexibilnější použití v oblasti aplikací objektivního hodnocení kvality zvuku) byla použita pro vybranou aplikaci optimalizace složení multiplexu v systému DAB+ na základě objektivního hodnocení vnímané poslechové kvality v závislosti na zvoleném zdrojovém kódování a byly ověřeny možnosti jejího použití v tomto scénáři. Teoretický potenciál metody PEMO-Q pro použití jako analytického nástroje pro zkoumání restaurovaných digitalizovaných archivních nahrávek se však potvrdit nepodařilo.

Zdroje

- [1] S. Quackenbush, T. Barnwell, and M. A. Clements. Objective Measures of Speech Quality. Prentice Hall, 1988.
- [2] Niklas Harlander, Rainer Huber, and Stephan D. Ewert. Sound quality assessment using auditory models. *Journal of the Audio Engineering Society*, 62(5):324–336, 2014.
- [3] 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*, 14(6):1902–1911, 2006.
- [4] ITU. ITU-R Recommendation BS.1387-0: Method for Objective Measurements of Perceived Audio Quality, 1998.
- [5] 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.
- [6] ITU. ITU-T Recommendation P.863: Methods for Objective and Subjective Assessment of Speech Quality: Perceptual Objective Listening Quality Assessment, 2011.
- [7] ITU. ITU-R Recommendation BS.1116-3: Methods for the Subjective Assessment of Small Impairments in Audio Systems, 2015.
- [8] ML Jepsen, Stephan D. Ewert, and Torsten Dau. A computational model of human auditory signal processing and perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124:422–438, 2008.
- [9] Malcolm Slaney et al. An efficient implementation of the Patterson-Holdsworth auditory filter bank. *Apple Computer, Perception Group, Tech. Rep*, 35:8, 1993.
- [10] European Broadcasting Union. EBU SQAM CD - sound quality assessment material recordings for subjective tests, 2008.
- [11] ITU. ITU-R Recommendation BS.1284-1: General methods for the subjective assessment of sound quality, 2003.
- [12] ITU. ITU-R Recommendation BS.562-3: Subjective assessment of sound quality, 1990
- [13] HörTech, PEMO-Q. [online] 2017. [vid. 2017-8-29]. Dostupné z <http://www.hoertech.de/en/f-e-products/pemo-q.html>
- [14] M. Zalabák. Hodnocení kvality analogového záznamu zvuku s využitím modelu slyšení. Diplomová práce, ČVUT FEL, 2016.
- [15] ITU. ITU-R Recommendation BS.1534-3: Method for the subjective assessment of intermediate quality level of coding systems, 2015.
- [16] MathWorks. MATLAB Compiler, MATLAB Runtime. [online] 2017. [vid. 2017-09-07] Dostupné z <https://www.mathworks.com/products/compiler/mcr.html>
- [17] MathWorks. MATLAB Compiler, Distribute with MATLAB Runtime. [online] 2017. [vid. 2017.09.07] Dostupné z <https://www.mathworks.com/help/compiler/deployment-process.html>
- [18] MathWorks. System Requirements & Platform Availability, Supported and Compatible Compilers for R2017a. [online] 2017. [vid. 2017-08-15] Dostupné z mathworks.com/support/compilers.html
- [19] BODSON, D. Digital Audio Around the World. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 5, no. 4, p. 24–30, 2010.

ZDROJE

- [20] ETSI Standard EN 300 401 V2.1.1. Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers. 2017.
- [21] BERG, J., BUSTAD, C., JONSSON, L., et al. Perceived Audio Quality of Realistic FM and DAB+ Radio Broadcasting Systems. *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 61, no. 10, p. 755-777, 2013.
- [22] ISO/IEC 11172-3:1993 Information technology – Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 Mbit/s – Part 3: Audio. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1993.
- [23] ISO/IEC 14496-3:1999 Information technology – Coding of audiovisual objects – Part 3: Audio. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.
- [24] MELTZER, S., MOSER, G. MPEG-4 HE-AAC v2 — audio coding for today's digital media world. *EBU Technical Review*, vol. 305, p. 37–48, 2006.
- [25] MANOUSELIS, N., KARAMPIPERIS, P., VARDIAMBASIS, I. O., et al. Digital Audio and Internet Radio Broadcasting Systems under a QoS Perspective. *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Telecommunications and Informatics (TELEINFO'05)*, no. 51, p. 6, 2005.
- [26] LEE, S., LEE, Y.-T., SEO, J., et al. An Audio Quality Evaluation of Commercial Digital Radio Systems. *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 57, no. 3, p. 629-635, 2011.
- [28] POCTA, P., BEERENDS, J. G. Subjective and Objective Assessment of Perceived Audio Quality of Current Digital Audio Broadcasting Systems and Web-Casting Applications. *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 61, no. 3, p. 407–415, 2015.
- [29] K. Ulovec, M. Smutný. Perceived Audio Quality Analysis in Digital Audio Broadcasting Plus System Based on PEAQ. Příspěvek zaslán k publikaci, 2017.
- [30] Simon Godsill, Peter Rayner, and Olivier Cappé. *Digital audio restoration*. Springer, 2002.

Přílohy

Příloha 1: Provedené změny v kódu pro první část verifikace

Nově přidáné soubory, autor: Jan Novák (novak110@fel.cvut.cz)

1. pemoq_eval_testsample.m – funkce evaluující předané vzorky pomocí modelu PEMO-Q z ověřované implementace, vrátí strukturu obsahující výstupní hodnoty PSM, PSM_t, ODG (volá původní funkce pemoq_am_prepare(), pemoq_am(), objquality())
2. pemoq_objquality_test.m – hlavní (main) script pro verifikaci, očekává testovací vzorky v cestě .\data\peaq\ s jejich popisem/definicí v souboru .\data\peaq\itemlsit_peaq.csv. Provádí načtení definovaných vzorků, jejich předání funkci pemoq_eval_testsample.m a nakonec zápis získaných výsledků do souboru .\data\peaq\results_pemoq.csv

Všechny původní soubory z implementace, jejichž autorem je Ing. Martin Zalabák, byly pouze přeformátovány, aby byla zvýšena jejich čitelnost.

Dále byly v následujícím seznamu souborů zaměněny funkce wavread() za audioread() a přidána validace předaných parametrů (pokud se jedná o funkci):

arttest.m, casp_am_prepare.m, mod_gammafilt.m, norefctest.m, nremove.m, objquality.m, pemoq_am_prepare.m, pemoq_am.m, preproc_norm.m

Příloha 2: Stručný návod na kompilaci MEX funkcí pro Matlab z C/C++ kódu na Windows v prostředí Matlab

1. Nainstalujte podporovaný C/C++ kompilátor, seznam je k nalezení na mathworks.com/support/compilers.html
 - a. nejjednodušší je instalace MSVC kompilátoru ve verzi 2013 s Microsoft Visual Studio 2013 (community edition), při instalaci vyberte pouze součásti kompilátoru
2. Nastavte kompilátor v prostředí Matlab (https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_external/changing-default-compiler.html)
 - a. z Matlab command window zavolejte funkci mex -setup a řiďte se pokyny, vyberte nainstalovaný kompilátor MSVC 2013
3. Nyní je možné zkompilovat C kód do MEX funkce (<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/mex.html>)
 - a. Otevřete cílovou složku obsahující C kód ke zkompilování tak, aby byl soubor .c na „Matlab path“
 - b. zavolejte funkci mex a předejte cestu k souboru se zdrojovým kódem C jako parametr
 - c. výstupem bude binární soubor s příponou dle aktuální (cílové) architektury OS (např. mexw64 pro Windows 64bit)
 - d. tuto funkci lze nyní volat z .m skriptů a funkcí jako jakoukoliv jinou funkci napsanou v Matlabu

Příloha 3: Struktura datové přílohy

```

\---OpenQual
  +---+OpenQual          - implementace frameworku pro
                          objektivní hodnocení kvality
    |
    | +---@AuditoryModel
    | +---@EvaluationMethod
    | +---@Methods
    | +---@Models
    | +---@Pemo
    | |   \---oscasp_adaptloop
    | |     +---mex
    | |     \---src
    | \---@PemoQ
    |
  +---+logging          - knihovna třetí strany pro usnadnění
                          debug logování testů
    |
  \---test             - implementace testů a jejich výsledky
    \---samples
      +---dab_plus
      | +---mono_results
      | +---stereo_results
      | \---analysis_results
      |
      +---peaq          - výsledky verifikačních testů
      \---rmvzorky     - výsledky experimentálních testů na
                          restaurovaných nahrávkách
        \---analysis_results

```