

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky



Diplomová práce

**Ověření účinnosti metod pro kompresi obrazu s vysokým
dynamickým rozsahem**

Performance verification of high dynamic range image compression methods

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Autor: Bc. Martin Krupička

Vedoucí práce: Ing. Karel Fliegel, Ph.D.

leden 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krupička** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **392923**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Ověření účinnosti metod pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem

Název diplomové práce anglicky:

Performance verification of high dynamic range image compression methods

Pokyny pro vypracování:

Podejte přehled metod pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem. Zaměřte se zejména na zpětně kompatibilní standard JPEG XT. S ohledem na typické aplikační scénáře navrhnete metodiku pro ověření účinnosti vybraných přístupů založenou na použití objektivních metrik pro hodnocení kvality obrazu, případně na analýze hodnocení skupinou pozorovatelů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Wu, H. R., Rao, K. R.: Digital Video Image Quality and Perceptual Coding, CRC Press, 2006.
- [2] Bovik, A.: Handbook of Image and Video Processing, Elsevier Academic Press, 2005.
- [3] Reinhard, E.: High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting, Morgan Kaufmann/Elsevier, 2010.
- [4] Joint Photographic Experts Group (JPEG), <https://jpeg.org/>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Karel Fliegel Ph.D., katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **19.09.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **20.02.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá moderními metodami pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem (HDR). Teoretická část práce obsahuje úvod do problematiky zpracování HDR obrazu a souhrn teorie vztahující se k metodám a standardům pro kompresi HDR obrazu. Podrobně je zpracována zejména teorie vztahující se ke standardu JPEG XT. V následující praktické části je zkoumán a simulován způsob získávání a ukládání HDR fotografií užívaný ve většině dnešních fotoaparátů. Souběžně je zkoumána alternativní možnost, jak to provést, s využitím standardu JPEG XT. Tyto dva přístupy jsou porovnávány z hlediska objemu dat a z hlediska obrazové kvality.

Klíčová slova

obrazové komprese HDR obrazu, JPEG XT, fotoaparáty, srovnání, MATLAB

Abstract

This master's thesis deals with modern approaches to the image compression of high dynamic range images (HDR images). The theoretical part begins with the introduction to the processing of the high dynamic range images in general. In the following part, we can find more specific information about the image compression of the HDR images, about JPEG XT in particular. In the practical part a common scenario used in modern photo cameras supporting HDR is investigated and simulated. This approach is compared to a theoretical one that makes use of the JPEG XT standard. A comparison was carried out in the terms of data volumes and image quality.

Key words

HDR image compression, JPEG XT, photo cameras, comparison, MATLAB

Čestné 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

.....

Martin Krupička

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat všem, kteří mě při psaní této práce podporovali. Zvláštní poděkování si zaslouží zejména Ing. Karel Fliegel, Ph.D. Děkuji mu za pomoc poskytnutou při psaní této práce, čas věnovaný konzultacím, užitečné rady, připomínky a postřehy. Byl vždy příjemný a ochotný. Spolupráce s ním výborně fungovala, to je třeba ocenit.

Seznam obrázků

Obr. 1: Věrné zachycení reality	3
Obr. 2: Návrh komprese podle Warda z roku 2006	7
Obr. 3: Části standardu JPEG XT a jejich provázání	10
Obr. 4: Zjednodušené blokové schéma JPEG XT dekodéru	12
Obr. 5: Ukázka LDR obrázku po aplikaci různých TMO	18
Obr. 6: Ukázka JPEG XT kódování v Terminálu	27
Obr. 7: Závislost MSE na velikosti bitového toku	29
Obr. 8: Závislost MSE na JPEG XT q	30
Obr. 9: Závislost SNR na JPEG XT q	30
Obr. 10: Postup prvotního testování JPEG XT referenčního softwaru	31
Obr. 11: Využitelnost JPEG XT ve fotoaparátech	35
Obr. 12: Tvorba referenčního snímku pro objektivní hodnocení kvality obrazu	36
Obr. 13: Vstupní soubor in1	37
Obr. 14: Vstupní soubor in2	37
Obr. 15: Vstupní soubor in3	38
Obr. 16: Vstupní soubor in4	38
Obr. 17: Úprava vstupních obrazových souborů	39
Obr. 18: Simulace typického postupu pro získávání HDR snímků	40
Obr. 19: TMO zvolené pro praktickou realizaci	42
Obr. 20: Srovnání z hlediska objemu dat	43
Obr. 21: Zjištění bitového toku JPEG XT kódovaného souboru	43
Obr. 22: Zjištění bitového toku série N LDR JPEG souborů	43
Obr. 23: N LDR JPEG + JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – čtyři soubory	44
Obr. 24: N LDR JPEG oproti JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – čtyři soubory	45
Obr. 25: N LDR JPEG + JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – dva soubory, dva TMO	45
Obr. 26: N LDR JPEG + JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – jeden soubor, tři TMO	46
Obr. 27: N LDR JPEG oproti JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – tři TMO	47
Obr. 28: N LDR JPEG oproti JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – tři N	47
Obr. 29: N LDR JPEG + JPEG XT – velikost v bajtech v závislosti na N – tři N	48
Obr. 30: Bitové toky jednotlivých LDR JPEG souborů v sériích – čtyři soubory	49
Obr. 31: Ukázka jednotlivých expozic v LDR sérii	49
Obr. 32: Srovnání velikosti jednotlivých LDR souborů pro různá N	50
Obr. 33: N LDR JPEG + JPEG XT – velikosti mapovaných LDR a JPEG XT souborů	51
Obr. 34: N LDR JPEG + JPEG XT – bitové toky mapovaných LDR a JPEG XT souborů	52
Obr. 35: N LDR JPEG oproti JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – tři profily	52
Obr. 36: N LDR JPEG + JPEG XT – SNR v závislosti na Q – čtyři soubory	54
Obr. 37: N LDR JPEG + JPEG XT – MSE v závislosti na Q – čtyři soubory	54
Obr. 38: N LDR JPEG + JPEG XT – MSE v závislosti na Q – in4	55

Obr. 39: N LDR JPEG + JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – čtyři soubory	55
Obr. 40: N LDR JPEG + JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – čtyři soubory	56
Obr. 41: N LDR JPEG + JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – dva soubory, tři TMO	57
Obr. 42: N LDR JPEG + JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – dva soubory, tři TMO	57
Obr. 43: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na Q – čtyři soubory	58
Obr. 44: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – čtyři soubory	59
Obr. 45: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na Q – čtyři soubory	59
Obr. 46: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – čtyři soubory	60
Obr. 47: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – tři profily	60
Obr. 48: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – tři profily	61
Obr. 49: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – tři profily, rR 4	62
Obr. 50: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – tři profily, rR 4	62
Obr. 51: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – dva soubory	63
Obr. 52: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – dva soubory	63
Obr. 53: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – dva soubory, rR 4	64
Obr. 54: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – dva soubory, rR 4	64
Obr. 55: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – tři TMO, rR 4	65
Obr. 56: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – tři TMO, rR 4	65
Obr. 57: Činnosti provedené v hlavní praktické části práce	67

Seznam tabulek

Tab. 1: Porovnání velikosti souborů ve formátech OpenEXR a PFM	5
Tab. 2: Vybrané obrazové formáty podporující vyšší bitovou hloubku než 8 bitů na kanál	6
Tab. 3: Části standardu JPEG XT	11
Tab. 4: Přehled vybraných TMO dostupných v Banterleho HDR Toolboxu	25
Tab. 5: Software dostupný na webu JPEG u standardu JPEG XT	25
Tab. 6: Přehled vybraných nastavitelných parametrů při JPEG XT kódování	26
Tab. 7: Přehled souborů použitých v hlavní praktické části	36

Seznam použitých zkratek

U vybraných zkratek, kde to má smysl, je uveden také český překlad.

JPEG	Joint Photographic Experts Group
HDR	High Dynamic Range (s vysokým dynamickým rozsahem)
LDR	Low Dynamic Range (s nízkým dynamickým rozsahem)
SDR	Standard Dynamic Range (s běžným dynamickým rozsahem)
JFIF	JPEG File Interchange Format
HVS	Human Visual System (lidský vizuální systém)
MATLAB	MATrix LABoratory
PBM	Portable Bit Map
CGI	Computer Generated Image (obrázek generovaný prostřednictvím počítače)
TMO	Tone Mapping Operator (operátor pro mapování tónů)
FSIM	Feature SIMilarity Index
MSE	Mean Squared Error (střední kvadratická chyba)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (odstup signálu od šumu)
WSNR	Weighted Signal-to-Noise Ratio (váhovaný odstup signálu od šumu)
IFC	Image Fidelity Criterion
FSIM	Feature Similarity Index
HDR-VDP-2	High Dynamic Range Visible Difference Predictor ve verzi 2
LED	Light Emitting Diode (světlo emitující dioda)
EO	Expansion Operators (expanzní operátory)
iTMO	inverse Tone Mapping Operator (operátory pro inverzní mapování tónů)
rTMO	reverse Tone Mapping Operator (operátory pro inverzní mapování tónů)
HEVC	High Efficiency Video Coding
MS-SSIM	Multiscale Structural Similarity
bpp	bits per pixel (bitů na pixel)
DLP	Digital Light Processing
LCD	Liquid Crystal Display
NASA	National Aeronautics and Space Administration

Obsah

Úvod.....	1
1 Metody pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem.....	2
1.1 Úvod do zpracování obrazu s vysokým dynamickým rozsahem	2
1.2 Možnosti zobrazení HDR obrazu	3
1.3 Formáty HDR obrazových souborů.....	4
1.3.1 Obrazový formát OpenEXR.....	4
1.3.2 Obrazový formát Radiance HDR.....	4
1.3.3 Formáty Netpbm a PFM.....	4
1.3.4 Další	5
1.4 Metody pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem	6
1.5 Standardy skupiny JPEG pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem.....	7
1.5.1 JPEG 2000.....	8
1.5.2 JPEG XT	8
1.5.3 JPEG XR	8
1.5.4 Kompresce HDR videa	9
1.5.5 Zpětná kompatibilita kompresních standardů	9
2 JPEG XT	10
2.1 Původní JPEG a zpětná kompatibilita	11
2.2 Podrobnější rozbor některých částí standardu	11
2.3 JPEG XT profily.....	12
2.3.1 Profil A.....	12
2.3.2 Profil C.....	14
2.3.3 Profil B.....	15
2.3.4 Profily – zhodnocení	15
3 Změna dynamického rozsahu obrázku.....	17
3.1 Mapování tónů.....	17
3.2 Expanzní operátory.....	18
4 Databáze HDR obrazového obsahu	19
4.1 Úprava vstupních snímků.....	19
4.1.1 Rozlišení a výřezy	19
4.1.2 Formát	20
4.2 Převod HDR snímku na LDR snímek	20
5 Objektivní hodnocení kvality obrazu.....	21
5.1 SNR	22
5.2 MSE.....	22
5.3 HDR-VDP-2	23
6 JPEG XT referenční software	24
6.1 Příprava vstupů	24
6.2 Dostupný software a použitá verze.....	25
6.3 Kompilace.....	26
6.4 Realizace kódování.....	26
6.4.1 Tipy pro nastavení parametrů kodéru	27
6.5 Realizace dekódování	28
6.6 Vliv ztrátové komprese JPEG XT	28
6.7 Využití prostředí MATLAB	28
6.8 Ukázka prvních výsledků testování softwaru.....	29
7 JPEG XT ve fotoaparátech.....	32
7.1 Současný stav	32

7.2 Vlastní praktická realizace	33
7.2.1 Volba vstupních snímků.....	36
7.2.2 Úprava vstupních snímků.....	38
7.2.3 Simulace snímání HDR obrazu prostřednictvím série LDR snímků	39
7.2.4 Volba TMO pro JPEG XT kódování	41
7.2.5 Realizace JPEG XT kódování.....	42
7.2.6 Náročnost na paměťové úložiště, hodnocení z hlediska objemu dat	42
7.2.7 JPEG XT dekodování.....	53
7.2.8 Vliv JPEG XT komprese na kvalitu obrazu, hodnocení z hlediska kvality obrazu	53
7.2.9 Dosažené výsledky	66
7.2.10 Bodové shrnutí provedených úkonů.....	66
7.2.11 Přehled vlastních skriptů	67
8 Možná pokračování práce v budoucnu	68
8.1 Další nové standardy skupiny JPEG.....	68
8.1.1 JPEG XS.....	69
8.1.2 JPEG Pleno.....	69
9 Závěrečné zhodnocení	71
10 Literatura.....	73
11 Přílohy.....	78
11.1 Příložené DVD	78

Úvod

Toto je diplomová práce vypracovaná na závěr magisterského studia na FEL ČVUT. Je zaměřena na metody pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem. Jak teoretická, tak praktická část této práce vychází z materiálů vypracovaných v rámci magisterského předmětu Projekt individuální (A2M37IND) [1]. Touto diplomovou prací jsem na tento projekt navázal, rozšířil ho a přidal jsem také zcela nové části. Kompresi obrazu se v dnešní době jeví jako nezbytná nutnost i přes stále se zvyšující dosažitelné rychlosti datových přenosů a rostoucí kapacitu přenosových médií. Surová nekomprimovaná obrazová data jsou prostě zbytečně objemná, jak pro přechovávání, tak pro přenos.

Co je důležité, je fakt, že jejich velikost lze výrazně snížit bez většího poškození užitečné obrazové informace. U bezztrátových kompresí nepřicházíme dokonce o žádnou užitečnou informaci. Můžeme využít efektivnější způsob kódování, odstranit redundantní či irelevantní informaci. To už však není otázkou této práce. To jsou základy kódování a kompresí obecně.

Metod a standardů pro kompresi obrazu lze nalézt větší počet. Mezi ty nejvýznamnější patří zcela bezpochyby ty vyvíjené skupinou JPEG (Joint Photographic Experts Group). Dnes již tradiční standard JPEG zná zcela jistě téměř každý. Na tento velmi úspěšný a dnes stále jeden z nejvyužívanějších přístupů později navázal například JPEG 2000. Ten se mezi běžné uživatele příliš nerozšířil i přes mnohé výhody oproti původnímu standardu. K tomu došlo kromě jiného pravděpodobně také díky ztrátě zpětné kompatibility s původním JPEG. Tato práce je zaměřena především na aktuálně vyvíjený standard JPEG XT, který se zaměřuje na obrazová data s vysokým dynamickým rozsahem (High Dynamic Range images – HDR images) a zároveň zaručuje zpětnou kompatibilitu s původním JPEG. JPEG XT je stále ve fázi vývoje, takže reálné rozšíření v praxi lze zatím těžko garantovat, avšak potenciál rozhodně má.

Nyní přejdeme k přehledu konkrétního obsahu. První část práce je věnována teorii, informacím čerpaným z odborné literatury. Kapitola jedna obsahuje obecný úvod do HDR problematiky, přehled užívaných formátů, kompresních metod a standardů. Následující oddíl je zaměřen na podrobný popis standardu JPEG XT. Kapitola tři stručně rozebírá možnosti úpravy dynamického rozsahu obrázku, a to konkrétně mapování tónů (tone mapping) a expanzní operátory (expansion operators). Čtvrtý oddíl je věnován využitým databázím HDR obrazových souborů. Zabývá se také některými základními úpravami snímků stažených z databáze. Hned za ním najdeme oddíl věnovaný objektivnímu hodnocení kvality obrazu. Je zaměřený především na metody užívané v praktické části této práce. Ta bezprostředně následuje, v podobě dvou prakticky orientovaných kapitol. První z nich, kapitola šest, se zabývá základy užívání JPEG XT referenčního softwaru. Sedmá kapitola je pokročilejší. Zkoumá vlastnosti standardu JPEG XT a jeho využitelnost ve fotoaparátech. Dále, v osmém oddíle, jsou rozebrány možnosti dalšího rozvoje této práce, možná pokračování. Ve stejné kapitole jsou podány ještě stručné teoretické informace k dalším právě vznikajícím standardům skupiny JPEG. V kapitole devět najdeme závěrečné zhodnocení shrnující výsledky dosažené v rámci této diplomové práce. Práci uzavírají seznam použité literatury a oddíl věnovaný přílohám.

1 Metody pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem

Metod pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem existuje větší počet. Než se však začneme zabývat detaily kolem kompresi samotných, je dobré uvést obecné základy problematiky zpracování obrazu s vysokým dynamickým rozsahem. Těm se věnuje úvodní pododdíl této kapitoly. Následující pododdíly jsou pokročilejší. Zabývají se možnostmi zobrazování HDR obrazu, obrazovými formáty pro tento typ obsahu, metodami a standardy pro jeho kompresi.

1.1 Úvod do zpracování obrazu s vysokým dynamickým rozsahem

Mezi lidmi s odbornějším povědomím o digitálním obraze je všeobecně známo, že většina dnešních digitálních snímků využívá osmibitovou reprezentaci barev, jak se můžeme dočíst například v [2], který je jedním ze zdrojů tohoto pododdílu. Při využití osmi bitů na kanál máme k dispozici rozsah čísel 0 až 255, tedy 256 různých hodnot na jeden barevný kanál. U barevného obrázku je každý obrazový bod (pixel) typicky charakterizován pomocí tří kanálů, tedy tří osmibitových čísel. Každá barva musí mít jedinečné označení. K tomu se využívají právě tato tři osmibitová čísla. Při takovéto reprezentaci máme tedy k dispozici velmi omezený počet barev. Pro věrnější napodobení reálného světa je potřeba mít k dispozici daleko větší množství reprodukovatelných barev, a tedy větší rozsah hodnot pro jejich reprezentaci. K tomu je zapotřebí větší bitové hloubky. Obrazovým souborům využívajícím osmibitové reprezentace se říká LDR (Low Dynamic Range) snímky, tedy snímky s nízkým dynamickým rozsahem. Někdy se označují také jako SDR (Standard Dynamic Range) snímky, například v [3]. Obrazovým souborům s velkou bitovou hloubkou, na které je zaměřena tato práce, se říká HDR (High Dynamic Range) snímky, tedy snímky s vysokým dynamickým rozsahem.

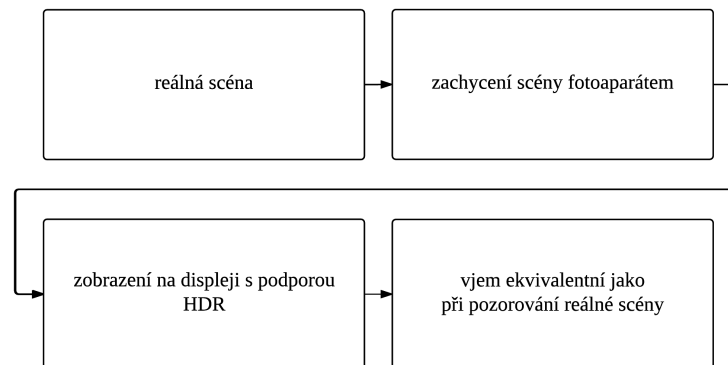
Pro uvedení do problematiky zpracování obrazu s vysokým dynamickým rozsahem lze doporučit již zmíněné [2], [3], [4], [5]. Tyto publikace byly využity jako zdroje při psaní této úvodní kapitoly.

Jak se píše v [2], mezi dnes klasickým LDR přístupem (standard imaging) a novějším HDR přístupem (HDR imaging), je zásadní rozdíl už v základní filozofii. Klasický přístup dbá v první řadě na zobrazitelnost obsahu, přiblížení realitě je až sekundární. Většina dnešních displejů nepodporuje obraz s vysokým dynamickým rozsahem. Nežvládnou ho zobrazit. HDR přístup naopak neřeší zobrazitelnost jako hlavní prioritu. Na prvním místě je co nejvěrnější zachycení reálné scény. Jde o to zachytit co nejvíce kompletní informaci o scéně. Je třeba říci, že v případě dynamického rozsahu obrazových souborů se jedná o rozsah hodnot jasu. Dynamický rozsah je definován jako poměr mezi maximální a minimální hodnotou jasu ve snímku [3]. Primárním cílem HDR přístupu je získat co nejvěrnější otisk reality. Konkrétní využití se řeší až následovně. Je logické, že se vyplatí mít kompletnější informaci o scéně. Přináší nám to širší možnosti následného využití. Na druhou stranu to samozřejmě zvyšuje i nároky. Data je třeba vhodně zpracovat, mít k tomu adekvátní metody a nástroje. Zvyšuje se tedy nejen potenciální užitek, ale také požadavky na nás a naše vybavení.

Některá moderní zařízení pro záznam obrazu umožňují přímo zachytit obraz s o něco vyšší než běžnou bitovou hloubkou, typicky 12 až 16 bitů, jak se uvádí v [2]. Využívá se surových obrazových formátů (RAW) a je třeba zdůraznit, že se jedná o celočíselnou reprezentaci [6]. Není možné použít klasický JPEG pro uložení, jelikož ten s více jak 8 bity na kanál pracovat neumí. Možnosti takového senzoru by při aplikaci klasického JPEG před uložením souboru zůstaly nevyužity. Ovšem ani 16 bitů nemusí vždy stačit.

Právě malá bitová hloubka, a s ní spojený omezený dynamický rozsah, představuje jeden z hlavních nedostatků většiny digitálních obrazových souborů dneška oproti realitě. A právě tento problém řeší snímky s vysokým dynamickým rozsahem (HDR). Umožňují

zaznamenat výrazně větší rozsah jasů ve scéně. Kromě většího množství zachycených barev umožňují HDR obrazové soubory pracovat také s výrazně většími kontrasty. Lidský zrak si umí s přirozeně vysokým kontrastem, který se někde vyskytuje, dobře poradit. Běžná obrazová technika dnešních dnů zatím ne. Kromě právě zmíněného umožňují obrázky s vysokým dynamickým rozsahem pracovat lépe i s dalšími aspekty reálných obrazových scén, například s odlesky, jak se píše v [2]. Je tedy více než zřejmé, že pokud chceme zvyšovat kvalitu reprodukce reality v oblasti digitálního obrazu, HDR technologie je jednou z cest, jak se realitě více přiblížit. Cíl našeho snažení je jednoduše naznačen následujícím blokovým schématem na obrázku Obr. 1.



Obr. 1: Věrné zachycení reality

1.2 Možnosti zobrazení HDR obrazu

První a samozřejmě nejlepší možností pro vizualizaci HDR obrazu je využít zobrazovač, typicky displej, s nativní podporou HDR obrazu. Ty však zatím nejsou běžnou součástí domácností ani pracovních kanceláří. Ani já jsem neměl během psaní této práce žádný takový k dispozici.

V [5], hlavním zdroji tohoto pododdílu, je zobrazovacím zařízením s podporou HDR věnována samostatná kapitola. Je na místě zmínit zde několik informací v ní uvedených. Prvním zařízením s podporou zobrazení HDR obsahu by měl být podle [5] tzv. HDR viewer, tedy volně přeloženo HDR prohlížeč. Vztahuje se k němu publikace [7], ze které je zde také čerpáno. Využívá mnohé dříve vyvinuté technologie, mimo jiné optiku používanou v NASA (National Aeronautics and Space Administration) v systémech pracujících s virtuální realitou. Kvalita byla podle literatury, [5] a [7], poměrně dobrá. Výraznou nevýhodou byla nemožnost přehrávat HDR video. V době své prvotní konstrukce bylo zařízení schopné zobrazovat výhradně statický obraz. Takovýto typ zobrazovacího zařízení však není vhodný pro každého. Běžný uživatel vyžaduje spíše nějaký monitor, nějakou větší obrazovku. Pro toho jsou vhodnější HDR monitory. Informace o nich jsou čerpány z [5] a také z [8].

V [8] byly představeny hned dva typy monitorů s podporou HDR obsahu. První je založen na kombinaci LCD (Liquid Crystal Display) monitoru a DLP (Digital Light Processing) projektoru. Takovýto model by mělo být podle textu možné relativně snadno sestavit. Druhý model je založený na využití LED (Light Emitting Diode) panelu. Kvalita monitorů byla oproti dnešním modelům samozřejmě poměrně nízká, ale byly diskutovány i možnosti dalšího vylepšování. Zmíňme například možnost zaměnit bílé LED diody větším počtem LED diod různých barev.

První komerční HDR displej představila v roce 2009 společnost SIM2 [5]. Jednalo se o model Solar 47. Zároveň je dobré poznamenat, že tato firma zůstává v oblasti HDR displejů stále aktivní, jak se lze dozvědět z [3] nebo [9].

Pokud nemáme možnost využít zobrazovače s nativní podporou zobrazení HDR obsahu, musíme HDR obrazový soubor předzpracovat před využitím na dnes běžných

displejích. Nabízí se možnost zobrazení LDR verze získané vhodným namapováním původního HDR obrazového souboru na nižší dynamický rozsah. K tomu slouží mapování tónů (tone mapping). Popis této operace lze nalézt například v [5]. Mapování tónů je podrobněji rozebráno v kapitole tři této práce.

Jak je zmíněno v [3], mnoho výrobců displejů/televizí dnes v rámci propagace svých výrobků uvádí podporu HDR. Jimi zobrazitelný dynamický rozsah je však stále omezený ve srovnání například s aktuálními displeji společnosti SIM2 [3].

1.3 Formáty HDR obrazových souborů

Stejně jako mnohá jiná data, můžeme i HDR snímky uchovávat v různých formátech. Jak je zmíněno v [2], typicky se setkáváme hlavně se dvěma formáty – OpenEXR a Radiance HDR. Stručné informace lze nalézt také v [10]. Jedná se o soubory s příponami *.exr* a *.hdr*. Obrázky v databázích HDR obrazových souborů na Internetu bývají obvykle právě v jednom z těchto dvou formátů. Je tomu tak i v databázích využitých v praktické části této práce. Ty jsou více popsány v kapitole čtyři této práce. [2] byl využit jako hlavní zdroj této podkapitoly. Informace o formátu OpenEXR byly čerpány také z [11]. Je však důležité říci, že se rozhodně nejedná o jediné dva formáty s podporou HDR obsahu. Najdou se samozřejmě i další, a i o těch bude tato podkapitola.

1.3.1 Obrazový formát OpenEXR

OpenEXR je moderní obrazový formát pro ukládání a uchovávání obrazu s vysokým dynamickým rozsahem. Informace o tomto formátu lze nalézt v [11], ze kterého zde bylo spolu s [2] čerpáno¹.

Jedná se o moderní obrazový formát umožňující reprezentaci dat pomocí 16 bitů na kanál nebo 32 bitů na kanál, a to buď pomocí celých čísel, nebo prostřednictvím čísel s plovoucí řádovou čárkou. Data v tomto formátu jsou obvykle komprimovaná. Lze využít hned několika různých kompresí [11], a to konkrétně PIZ, ZIP, ZIPS, RLE, PXR24, B44, B44A [11]. První čtyři zmíněné jsou bezztrátové. Následující tři patří mezi ztrátové komprese. Mělo by však být možné ukládat v tomto formátu i nekomprimovaná data [11]. Další informace lze nalézt ve zmíněné literatuře [2] a [11].

1.3.2 Obrazový formát Radiance HDR

Jedná se o jeden z prvních a velmi rozšířených HDR obrazových formátů, jehož stručný popis lze nalézt v [2], který byl využit jako zdroj v tomto pododdíle. Jeho rozšířenost demonstruje i fakt, že je podporován i prostředím MATLAB bez softwaru třetích stran. Rozlišujeme dvě varianty tohoto formátu, a to podle barevného prostoru využívaného při kódování – XYZE a RGBE.

1.3.3 Formáty Netpbm a PFM

Dalšími ze zajímavých formátů pro obrazová data s vysokým dynamickým rozsahem je právě tato skupina formátů. Pro nás jsou důležité i proto, že v praktické části této práce nutně potřebujeme obrazová data právě v některých z těchto formátů. JPEG XT referenční software využívaný v praktické části této práce totiž vyžaduje na vstupu soubory ve formátu s příponami *.pfm* a *.ppm*. V tomto pododdíle bylo čerpáno z [12], [13], [14], a [15].

Jedná se o skupinu formátů s podobnou strukturou. PPM spolu s několika dalšími formáty, například PBM, tvoří skupinu formátů nazývanou Netpbm². S prvopočátky

¹ Lze doporučit především materiály v části webu Documentation dostupné z <http://www.openexr.com/documentation.html>. Velmi užitečný je zejména dokument *TechnicalIntroduction.pdf* dostupný z <http://www.openexr.com/TechnicalIntroduction.pdf>. Citováno 23. 12. 2016.

² Nejedná se o klasickou zkratku. Více informací o názvu lze nalézt na <http://netpbm.sourceforge.net/> v části History. Citováno 23. 12. 2016.

této skupiny formátů je spojen Jef Poskanzer [14]. PFM do této skupiny nepatří. Je jimi však inspirovaný a je jim velmi podobný [13]. PFM jako Portable FloatMap [13], což naznačuje, že využívá číselné reprezentace s plovoucí řádovou čárkou. Kromě obdobné struktury platí o všech, že jsou nekomprimované. V tom je zásadní rozdíl oproti dvěma dříve zmíněným formátům pro obrazové soubory s vysokým dynamickým rozsahem, tedy formátům OpenEXR a Radiance HDR. Ve chvíli, kdy převedete soubor z formátu OpenEXR na PFM nebo jiný ze zmíněných, velikost souboru výrazně naroste. Při převodu v opačném směru naopak samozřejmě výrazně poklesne. Pro ilustraci uvádím v tabulce Tab. 1 několik příkladů, jak se velikost souboru při převodu mezi formáty změní. Jak již bylo napsáno v kapitole věnované formátu OpenEXR, podporuje tento formát více různých kompresí. Pro další informace lze doporučit k četbě [11].

Tab. 1: Porovnání velikosti souborů ve formátech OpenEXR a PFM

název souboru	velikost OpenEXR [MB]	velikost PFM [MB]
BloomingGorse(2)	49,2	146,5
DelicateArch	33,9	137,9
DevilsBathhtub	33,8	124,1
LuxoDoubleChecker	16,9	65,5
MirrorLake	42,1	146,4
PaulBunyan	34,2	124,1

Pro tuto jednoduchou demonstraci byly použity obrazové soubory s vysokým dynamickým rozsahem z databáze Marka Fairchilda³. HDR snímky z této databáze lze stáhnout ve formátu OpenEXR. Převod na formát PFM byl proveden v prostředí MATLAB s využitím Banterleho HDR Toolboxu⁴.

Původně byly tyto obrazové formáty vytvořeny pro přenos obrazu elektronickou poštou [12], kdy ještě nebylo možné k emailům přikládat přílohy. Tyto obrazové soubory byly zajímavé v tom, že uměly kódovat obrazovou informaci prostřednictvím ASCII znaků. Později do nich byla přidána i možnost kódovat obraz binárně [12].

1.3.4 Další

Kromě již zmíněných formátů, můžeme dále jmenovat také LogLuv TIFF [10], [16] a tím stále nekončíme. V oblasti LDR digitálního obrazu je velmi výrazným pojmem standard JPEG od skupiny JPEG (Joint Photographic Experts Group), definovaný v ISO/IEC 10918-1 nebo také Recommendation ITU-T T.81 [17]. Tato skupina však vyvinula a vyvíjí i další standardy pro kompresi obrazu, jak se lze dozvědět na jejich webu [17]. Některé z nich podporují kompresi obrazových dat s vyšší bitovou hloubkou než dnes standardních 8 bitů na kanál. Součástí standardu je samozřejmě i definice formátu dat. Těmto standardům je věnován jeden z následujících pododdílů.

Dále bychom mohli hledat ve formátech pro speciální aplikace. Některé z nich také podporují obrazová data s vyšší bitovou hloubkou než 8 bitů na kanál [10]. Jmenujme DPX (Digital Picture Exchange) formát užívaný ve filmovém průmyslu či DICOM formát pro medicínské aplikace [10]. Dále bychom našli různé formáty surových obrazových dat (RAW) ve fotoaparátech [10]. U těchto formátů je však třeba mít na paměti, že se jedná pouze o zvýšenou bitovou hloubku, zvýšený dynamický rozsah (higher nebo také extended dynamic range) [10]. Není to typický HDR obsah. Těmito formáty se tato práce dále nezabývá.

K formátům s podporou zvýšené bitové hloubky by se dalo napsat ještě mnoho. Pro další informace lze doporučit již odkazovanou literaturu. Vzhledem k faktu, že se problematika digitálního obrazu s vysokým dynamickým rozsahem dostává stále více do centra zájmu odborníků na zpracování obrazu, lze očekávat, že se budou formáty postupně

³ Dostupné z <http://rit-mcsl.org/fairchild/HDR.html>. Citováno 23. 12. 2016.

⁴ Dostupného z <http://www.advancedhdrbook.com/>. Přísluší k němu literatura [5]. Citováno 23. 12. 2016.

zlepšovat a objevovat také další zcela nové. Stručný přehled vybraných formátů, popisovaných v tomto pododdílu, podporujících vyšší bitovou hloubku než 8 bitů na kanál je obsahem následující tabulky Tab. 2. Její obsah byl čerpán ze zdrojů uvedených v tomto pododdílu.

Tab. 2: Vybrané obrazové formáty podporující vyšší bitovou hloubku než 8 bitů na kanál

OpenEXR
Radiance HDR
Netpbm a PFM
LogLuv TIFF
surové (RAW) formáty
DPX
DICOM

1.4 Metody pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem

V předchozím pododdíle byly zmíněny standardy skupiny JPEG. Ty jsou podrobněji rozebrány v pododdíle 1.5 této práce. Existují však i metody, které standardizovány nejsou. Tato podkapitola podává stručný přehled metod pro kompresi HDR statického obrazu. Zdrojem pododdílu je [18].

Obecně lze metody dělit podle různých hledisek. Následuje bodový přehled některých z užívaných hledisek dělení podle [18]:

- ztrátové a bezztrátové
- zpětně kompatibilní a bez zpětné kompatibility
- jednovrstvé (single layer) a vícevrstvé (multiple layers)
- podle využitelného dynamického rozsahu

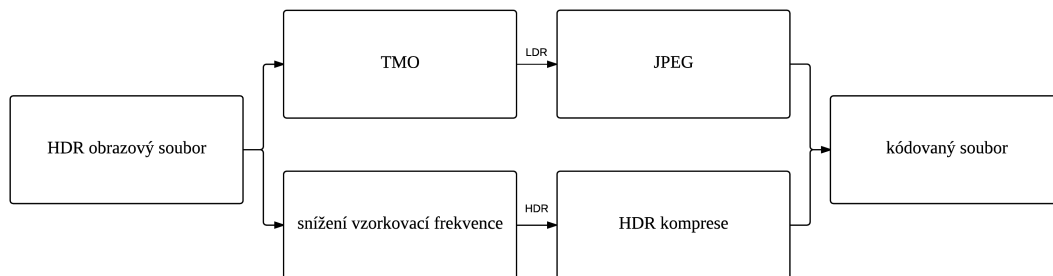
Využijeme-li prvního hlediska, podívejme se nejprve na bezztrátové metody podle [18]. Mezi ně patří například ty, které se využívají ve formátech OpenEXR a Radiance HDR. OpenEXR využívá například vlnkové transformace a PIZ komprese (jedna z více možností, viz pododdíl věnovaný tomuto formátu). Dále mezi ně patří také princip užívaný v LogLuv TIFF [18].

U ztrátových je zajímavé přidat ještě dělení na ty se zpětnou kompatibilitou a ty bez ní. Ze zpětně nekompatibilních jmenujme metodu popsanou autorem Xu a jeho spolupracovníky v roce 2005 [18], [19]. Základem bylo využití logaritmického kódování R, G, B komponent obrazu. V roce 2007 využili Okuda a Adami pro kompresi HDR obrazu LogLuv prostoru [18], [20]. V roce 2008 přišli Kaida a Okuda s metodou využívající Hillovy funkce a SPIHT algoritmus [18], [21]. Springer a Kaup v roce 2009 vylepšily metodu od Okudy a Adamiho [18], [22]. Microsoft v podobné době přišel se svým konceptem HD Photo, z jehož základu vznikl standard JPEG XR [18].

Nyní přejdeme k metodám zpětně kompatibilním. Jako jednu z prvních zpětně kompatibilních metod jmenujme tu z roku 2004 navrženou Wardem a Simmonsem [18], [23], založenou na klasickém JPEG. Zpětně kompatibilní metody samozřejmě nemusí vycházet ze standardu JPEG. Typickým přístupem zpětně kompatibilních metod je využití základní zpětně kompatibilní vrstvy a potom druhé přidané vrstvy s HDR informací navíc. Tu druhou vrstvu využijí jen HDR kompatibilní zařízení. Starší zařízení naopak HDR vrstvu ignorují a využívají jen základní LDR vrstvu. V kapitole 2 na obrázku Obr. 4 si lze prohlédnout blokové schéma konkrétního dekodéru využívajícího tento přístup.

Právě popsaného principu rozdělení informace na zpětně kompatibilní LDR vrstvu a přidanou HDR vrstvu využívá i již zmíněná metoda od Warda a Simmonse z roku 2004 [18], [23]. Další přístup popsali v roce 2006 Mantiuk a kolektiv [18], [10]. Kromě jiného využili inverzního mapování tónů. Okuda a Adami nebyli aktivní jen v oblasti zpětně

nekompatibilních metod. V roce 2007 přišli i s jednou zpětně kompatibilní [18], [24]. Využili Hillový funkce a vlnkové transformace. Vzhledem k tomu, že v centru zájmu této práce stojí JPEG XT, je pro nás velmi zajímavý návrh Warda z roku 2006 [18], [25]. LDR vrstvu vytvořenou mapováním tónů využívá jako základní vrstvu, přičemž neklade požadavky na konkrétní TMO pro její vznik a ani na využití konkrétní komprese pro zmenšení jejího objemu. HDR vrstva je odděleně převzorkována a komprimována. Při dekompresi jsou vyšší frekvence obnoveny s využitím informace ze základní LDR vrstvy. Princip kompresní části popsané Wardem v roce 2006 je naznačen na následujícím blokovém schématu na obrázku Obr. 2 inspirovaném z [18]. Jedná se o překreslení blokového schématu z [18].



Obr. 2: Návrh komprese podle Warda z roku 2006
jedná se o překreslení schématu z [18]

Potenciálně zajímavá je také možnost využití kompresních metod určených primárně pro video také pro statické snímky. V [26] zkoumají kromě jiného i využití standardu HEVC (High Efficiency Video Coding).

V současné chvíli se v této podkapitole jedná o přehled metod pro kompresi HDR obrazu. Jakmile si však čtenář prostuduje informace o dále popisovaném standardu JPEG XT, bude mu jistě zcela zřejmá podobnost s mnohými právě popsanými postupy. Je vidět, že standard JPEG XT na některé z nich přímo navazuje, vychází z nich.

Kromě komprese statického obrazu můžeme samozřejmě mluvit i o kompresi HDR videa. To je rozšíření problematiky, kterým se tato práce nebude podrobně zabývat. V jednom z následujících pododdílů jsou však popsány alespoň stručné základy. Čerpáno bylo z [5], který lze doporučit pro další informace.

Je důležité také říci, že v tomto pododdíle byly využity pojmy a zkratky, se kterými nemusí být čtenář zatím obeznámen. Význam zkratk najde snadno v seznamu zkratk na začátku této práce. Konkrétnější význam mnohých pojmů je vysvětlen naopak v následujícím textu této práce. Často se jedná o složitější záležitosti, a proto nebylo vhodné je popisovat ihned v rámci tohoto stručného přehledu.

1.5 Standardy skupiny JPEG pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem

Jak již bylo řečeno, HDR obrazové soubory se od LDR souborů liší především v bitové hloubce. Vhodná komprese musí tedy podporovat v první řadě větší bitovou hloubku. Takových standardů od skupiny JPEG existuje hned několik. Již poměrně známý JPEG 2000 podporuje až 16 bitů, jak je napsáno v [2], který je zdrojem tohoto pododdílu. V dnešní době by samozřejmě byla výhodnější podpora 32 bitů. Kromě toho se tento standard příliš nerozšířil mezi běžné uživatele. Využití našel hlavně ve specifických oblastech profesionálního využití, jak si můžete přečíst v pododdílu 1.5.1 věnovaném tomuto standardu. Skupina JPEG se proto rozhodla pracovat na novém standardu s potenciálem většího rozšíření. Přišli s právě vznikajícím standardem JPEG XT, který stojí v centru zájmu této diplomové práce. Nejprve je v následujícím textu práce popsán teoreticky a poté je využíván i v praktické části. Z dalších

standardů skupiny JPEG podporujících kompresi HDR obrazových souborů zmiňme ještě JPEG XR.

1.5.1 JPEG 2000

Ze všech tří zmíněných standardů skupiny JPEG, podporujících větší bitovou hloubku než 8 bitů na kanál, je JPEG 2000 ten nejstarší. Stručné základní informace o něm se lze dočíst v [17], kde také můžeme najít i odkazy na další vhodnou literaturu o něm [27], [28] a [29]. Je definován v Recommendation ITU-T T.800 a ISO/IEC 15444-1 [17]. [17], [27], [30], [31] a [32] byly využity při psaní tohoto pododdílu.

Jak se lze dočíst v [17], jedná se o kompresi založenou na využití vlnkové transformace. Standard můžeme rozdělit do celkem 14 částí uvedených na zmíněném webu [17]. Jak uvádí autoři [27], oproti původnímu standardu JPEG přináší nový přístup a lepší kompresní vlastnosti. Bohužel však není zpětně kompatibilní s původním standardem. Starší zařízení podporující pouze klasický JPEG nedokáží soubor komprimovaný JPEG 2000 nijak využít. Další nevýhodou, jak se píše v [31], je také relativně vysoká výpočetní náročnost. Zpočátku podporoval pouze celočíselnou reprezentaci [30]. Později byl rozšířen i o možnost využití reprezentace s plovoucí řádovou čárkou [30], [32]. Používá se v oblasti filmu, zpracování videa a digitální fotografie, v digitálních archivech a databázích, v medicínských aplikacích i dalších oblastech [17]. Některé další možnosti využití lze nalézt právě v [17], včetně stručného popisu.

Jelikož se jedná o poměrně dlouho existující standard, bylo k němu již napsáno mnoho literatury, a proto nebude v tomto textu již dále rozebírán. Pro zvědavého čtenáře lze doporučit zmíněné publikace. Jistě lze najít i další zajímavé články či knihy zabývající se touto problematikou.

1.5.2 JPEG XT

JPEG XT je nový vyvíjený skupinou JPEG (Joint Photographic Experts Group). Jedná se o standard zaměřený na kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem. Základní informace o něm lze nalézt právě na stránkách skupiny JPEG [17]. Další zajímavé zdroje jsou například [33], [34] a [35]. Najde se i mnoho dalších zajímavých publikací. Tomuto standardu je věnována kapitola dvě, ve které je podrobně popsán.

1.5.3 JPEG XR

I o tomto standardu lze najít základní informace na stránkách skupiny JPEG [17], který byl spolu s [30] a [31] zdrojem pro tuto podkapitolu. Je definován v Recommendation ITU-T.832 a ISO/IEC 29199-2 [17]. Jedná se o poměrně nový standard, konkrétně z roku 2009 [30]. Cílem při jeho vytváření bylo nabídnout jednoduchý nenáročný algoritmus se širokými možnostmi využití. Zamýšlen byl hlavně pro oblast digitální fotografie. Zvýšená pozornost byla věnována také podpoře HDR obrazu. Výsledkem je, že můžeme využít poměrně širokých možností nastavení podle aktuální potřeby. Jak se píše v [31], XR se dá vyložit jako anglické spojení *extended range*, což lze přeložit jako zvětšený rozsah, rozšířené možnosti, a to je přesně to, co JPEG XR nabízí.

Pro tuto práci je velmi zajímavý fakt, že lze volit mezi různou bitovou hloubkou, a to už od 5 bitů na kanál až po 32 bitů na kanál s využitím pohyblivé řádové čárky [17]. Lze využít ztrátovou i bezztrátovou kompresi. Je výpočetně a paměťově nenáročný. Pro popis dalších vlastností lze doporučit zmíněnou literaturu či přímo oficiální specifikace⁵.

Je založen na technologii HD Photo od Microsoftu, což jen podporuje již zmíněné tvrzení, že JPEG XR byl od začátku zamýšlen hlavně pro oblast digitální fotografie. V této oblasti v době svého vzniku konkuroval především klasickému JPEG a surovým obrazovým

⁵ Odkazy na oficiální specifikace lze nalézt na <https://jpeg.org/jpegxr/workplan.html>. Citováno 30. 12. 2016.

formátům (RAW). Oproti JPEG nabízí širší možnosti a lepší kvalitu, oproti RAW zase výrazně nižší nároky na hardware.

Důležitý je i fakt, že komise JPEG umožnila implementovatelnost tohoto standardu bez placení licenčních a dalších poplatků [31], což je určitě dobré pro jeho rozšíření a rozvoj. Přesto podle [26] není na trhu kamera/fotoaparát implementující JPEG XR.

1.5.4 Komprese HDR videa

Jak již bylo naznačeno, není komprese HDR videa v centru zájmu této práce, a proto je v tomto pododdíle zmíněno jen několik málo základních faktů. Pro zájemce lze doporučit k četbě [5], ze kterého zde bylo čerpáno.

Mezi kompresí HDR videa a HDR statického obrazu lze pozorovat určité podobnosti. Například v tom, že se využívá mapování tónů (tone mapping) pro redukci dynamického rozsahu. Co lze však u videa využít navíc, je časová koherence mezi po sobě jdoucími snímky [5]. Sousední snímky ve videu bývají obvykle velmi podobné, pokud nedochází k výrazné změně scény, například vlivem střihu.

Chceme-li jmenovat konkrétní formáty, za zmínku stojí například HDRV vycházející ze standardu MPEG-4 part 2 nebo třeba HDR-MPEG [5]. U HDR-MPEG je zajímavé zachování zpětné kompatibility podobným způsobem jako u JPEG XT, tedy rozdělováním jednotlivých snímků na LDR a HDR část [5].

Jak je zmíněno v [5], komprese HDR videa skrývá mnoho výzev. Například co nejmenší redukci kvality oproti surovým datům. Se zvyšujícím se dynamickým rozsahem a stále rostoucím rozlišením bude totiž pravděpodobně stále snazší spatřit v obraze nejrůznější artefakty [5]. Kromě toho by mělo být možné provádět kompresi HDR videa v reálném čase, protože ukládání objemných surových HDR videí by bylo problematické, nemluvě o nutnosti následné „offline“ konverze [5].

Zajímavým článkem věnujícím se problematice HDR videa je [3]. Lze ho rozhodně doporučit k přečtení. Je velmi aktuální, z roku 2016, a stručně pojednává i o kompresi HDR videa. Kromě jiného je v něm také zmíněno dělení metod pro kompresi HDR videa na ty využívající jednu vrstvu a ty se dvěma vrstvami. U dvouvrstvých metod bývá jedna vrstva zpětně kompatibilní a druhá obvykle obsahuje informaci pro rekonstrukci HDR videa. V článku [3] lze nalézt i odkazy na literaturu popisující konkrétní metody.

1.5.5 Zpětná kompatibilita kompresních standardů

Jak již bylo zmíněno, v centru zájmu této práce stojí JPEG XT podrobněji popsany dále. Jeho zajímavost spočívá z velké míry ve faktu, že je zpětně kompatibilní s dnes stále velmi rozšířeným klasickým standardem JPEG. Jak je zmíněno v [5], zpětná kompatibilita kompresních standardů je poměrně důležitou otázkou.

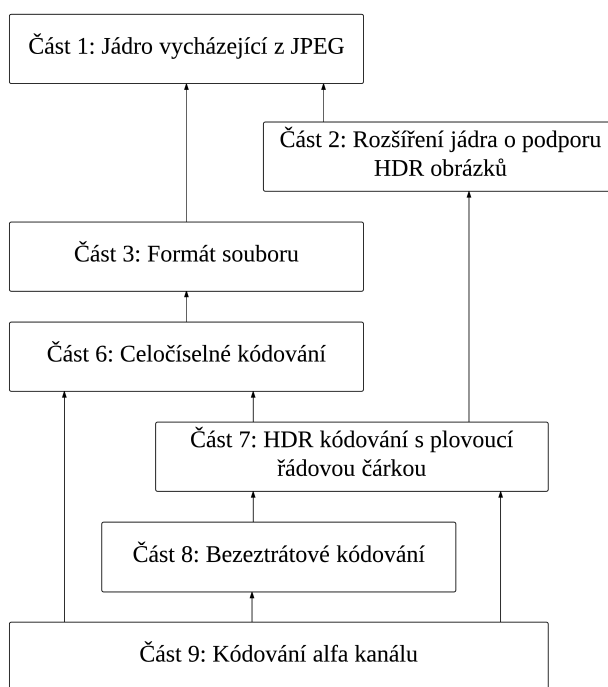
Určitě se jeví jako výhodné ji zachovat pro plynulý přechod na novější standardy při zachování kompatibility se staršími zařízeními. Zároveň je však nutné mít na mysli, že nás může její zachování limitovat při návrhu nových řešení. Až se HDR obsah více masově rozšíří, bude pravděpodobně snazší říct, která z cest je lepší – zda zpětnou kompatibilitu zachovávat někdy za cenu určitých ústupků a omezení či zda přicházet raději se zcela novými řešeními. Docela pravděpodobně se jeví i možnost, že budou obě varianty koexistovat. Pro určité účely se bude hodit jedno, pro jiné to druhé. V tomto pododdílu bylo čerpáno z [5].

2 JPEG XT

JPEG XT je nově vznikající standard zaměřený především na kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem. Hlavními zdroji této kapitoly jsou web skupiny JPEG [17] a články [33]. Využity byly také [26], [34], [35], [36]. Specifikace je předmětem ISO/IEC 18477 [17].

JPEG XT navazuje na starý klasický JPEG definovaný již v roce 1992, a to konkrétně v ITU-T Recommendation T.81 nebo také ISO/IEC 10918-1 [33]. Kromě již zmíněného zaměření na kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem řeší také například bezztrátovou kompresi či reprezentaci alfa kanálu. Tato problematika je v dnešní době vysoce aktuální a spolu se zaručením zpětné kompatibility se zdá, že by JPEG XT mohl být velmi úspěšný. Standard pro kompresi obrazu s vysokým dynamickým rozsahem určitě uplatnění najde. Podporou komprese HDR obrazového obsahu však disponují i již zmíněné standardy JPEG 2000 a JPEG XR. U JPEG XT je velmi důležitý příslib zpětné kompatibility se starým a stále velmi rozšířeným JPEG standardem. Právě tato zpětná kompatibilita výrazně zvyšuje šanci JPEG XT na úspěch.

Jak se lze dočíst v [17] a [33], lze standardizaci JPEG XT rozdělit v současné době do devíti částí. Část 1 popisuje jádro, které je obdobou původního JPEG. Další části se zabývají kódováním obrazu s vysokým dynamickým rozsahem, samotným formátem dat, referenčním softwarem, testováním, celočíselným kódováním, kódováním s plovoucí řádovou čárkou, bezztrátovým kódováním a také využitím alfa kanálu. Na tyto části lze také nahlížet jako na rozšíření původního JPEG standardu. Některá z nich jsou provázána také mezi sebou. To je dobře vidět na obrázku Obr. 3 inspirovaném z [33]. Jedná se o překreslení schématu z [33] s využitím informací z [17]. Schéma neobsahuje všechny části standardu. Pro přehlednost je všech devět částí, včetně originální anglické terminologie, uvedeno v tabulce Tab. 3. Informace v ní byly čerpány z [17].



Obr. 3: Části standardu JPEG XT a jejich provázání
jedná se o překreslení schématu z [33] s využitím [17]

Tab. 3: Části standardu JPEG XT

Část 1: Jádru vycházející z JPEG (Core coding system)
Část 2: Rozšíření jádra o podporu HDR obrázků (Coding of high dynamic range images)
Část 3: Formát souboru (Box file format)
Část 4: Testování (Conformance testing)
Část 5: Referenční software (Reference software)
Část 6: Celočíselné kódování (IDR Integer coding)
Část 7: HDR kódování s plovoucí řádovou čárkou (HDR floating-point coding)
Část 8: Bezeztrátové kódování (Lossless and near-lossless coding)
Část 9: Kódování alfa kanálu (Alpha channel coding)

2.1 Původní JPEG a zpětná kompatibilita

Již delší dobu se ukazuje, že původní JPEG standard není vhodný univerzálně pro různé situace. Neumožňuje například pracovat s obrazem s větší bitovou hloubkou než základních 8 bitů na kanál. To je v dnešní době poměrně značnou nevýhodou, takže se začalo pracovat na přijatelném řešení. Zdroji této podkapitoly jsou opět [17], [26], [33], [36]. Čerpáno bylo především z [33]. Nabízela se možnost přímého navýšení využitelného počtu bitů nebo využití plovoucí řádové čárky. Tyto dvě možnosti umožňují relativně snadnou implementaci, ale na druhou stranu je u nich problém se zpětnou kompatibilitou s původním JPEG standardem [33]. Vzhledem k tomu, že i v dnešní době je původní JPEG stále jednou z nejrozšířenějších metod užívaných pro kompresi obrazu, je vhodné přinést nějaké zpětně kompatibilní řešení. Takovým je právě JPEG XT. Dříve zmíněné standardy JPEG 2000 a JPEG XR sice podporují větší bitové hloubky než 8 bitů na kanál, je u nich však problém se zpětnou kompatibilitou.

Zpětná kompatibilita JPEG XT je zajištěna poměrně jednoduše a elegantně. Zakódovanou obrazovou informaci lze totiž rozdělit na dvě části, dvě vrstvy [33], [36]. První vrstva, tzv. základní vrstva (base layer), zajišťuje právě onu zpětnou kompatibilitu s původním standardem. V druhé části, tzv. reziduální vrstvě (residual/extension layer), je zakódována aditivní informace umožňující v případě potřeby přemapování z LDR snímku s běžným dynamickým rozsahem (LDR – Low Dynamic Range) na HDR snímek s vysokým dynamickým rozsahem (HDR – High Dynamic Range). Přejít z HDR snímku na LDR snímek provádíme pomocí tzv. mapování tónů (tone mapping). Tato operace je podrobněji rozebrána v další kapitole.

Jak je zmíněno v [33], je také dobré si uvědomovat, že dnes běžně užívaný JPEG nevyužívá všechny možnosti definované v původní podobě standardu. Na druhou stranu je třeba počítat také s později přidanými rozšířeními jako například využití JFIF (JPEG File Interchange Format) [33].

První část standardu JPEG XT popisuje jádro standardu [17]. To je založené na původním JPEG (legacy JPEG). Oproti původní specifikaci JPEG však byly vypuštěny některé nepoužívané části a naopak byla přidána některá dnes běžně užívaná rozšíření [33].

2.2 Podrobnější rozbor některých částí standardu

I v této podkapitole je čerpáno z [17] a [33] a jsou zde rozebrány vybrané zajímavé části standardu.

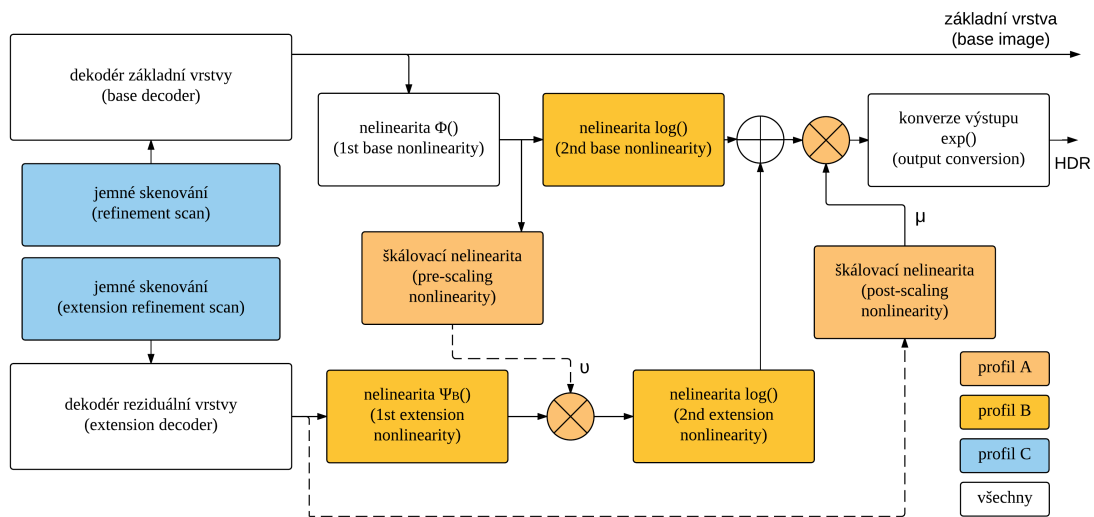
Většina lidí pohybující se v oblasti zpracování obrazu ví, že se v dnešní době využívá pro ukládání hodnot jednotlivých pixelů typicky 8 bitů na kanál. HDR snímky obecně využívají většího počtu bitů. To umožňuje zachycovat větší dynamický rozsah jasu ve scéně. Snímací senzory mnohých dnešních kamer a fotoaparátů už zvládnou zachytit větší dynamický rozsah než ten zaznamenaný do 8 bitů na kanál. Šestá část JPEG XT řeší kódování obrazové informace pomocí většího počtu bitů, než je 8 bitů na kanál, při využití celočíselného kódování. Při využití 8 bitů na kanál ihned po snímání zbytečně ztrácíme část informace.

Na část 6 navazuje část 7. Ta zavádí podporu čísel s plovoucí řádovou čárkou. Část 8 navazuje na předchozí části a řeší bezztrátové kódování. Účinnost by podle [33] měla být srovnatelná s PNG. Část 9 se zabývá využitím alfa kanálu, obsahujícím informaci o průhlednosti, která může být také často užitečná.

2.3 JPEG XT profily

JPEG XT nabízí poměrně široké spektrum možností. Avšak ne vždy chceme využít všechny z nich. Obecně jsou definovány čtyři takzvané profily (A, B, C a D) [26], které se liší právě v tom, jaké kroky ze všech možných se postupně využijí. V tomto pododdíle i všech jeho částech je čerpáno z [26], [33], [34], [35], [36]. Hlavním zdrojem byl [33].

Co je profilům A, B, C společné, je fakt, že zohledňují vlastnosti lidského vnímání (HVS – Human Visual System) [26]. Profil D je nejjednodušší. Nebere v úvahu vlastnosti HVS a zhruba odpovídá dvanáctibitovému módu JPEG [26]. V textu této práce není podrobně rozebírán. Na následujícím obrázku Obr. 4 je zjednodušené blokové schéma JPEG XT dekodéru. Jedná se o mé vlastní zjednodušené překreslení schématu z [36]. Přerušovaná čára značí skaláry, plná vektory.



Obr. 4: Zjednodušené blokové schéma JPEG XT dekodéru
Jedná se o překreslení schématu z [36]. Přerušovaná čára značí skaláry, plná vektory.

2.3.1 Profil A

První variantou je profil A. Zdroji informací v tomto pododdílu jsou [26], [33], [34], [35]. Většina informací, včetně uvedených vztahů, byla čerpána z [33]. Pojďme se podívat nejprve na dekodér. Jeho základní princip lze popsat následující jednoduchou rovnicí (1).

$$\text{HDR} = \mu(\phi(\text{LDR}) + \chi) \quad (1)$$

kde:

HDR – snímek s vysokým dynamickým rozsahem

LDR – snímek s běžným dynamickým rozsahem

ϕ – inverzní gamma korekce

χ – informace o barvách reziduální vrstvy

μ – na souřadnicích závislý škálovací faktor

Tento vztah je založen na následujících faktech. LDR snímek bývá typicky ovlivněn gamma korekcí (gamma korekce je vhodná pro zobrazení obrazu na většině dnešních displejů), a proto je nutné provést inverzní operaci. Nízký dynamický rozsah je zvětšen násobením faktorem μ , jehož hodnota může být odlišná pixel od pixelu. A kromě toho je nutné provést určitou korekci barev při přechodu od LDR k HDR snímku, což je zajištěno prostřednictvím operátoru χ .

Tyto operátory lze samozřejmě popsat i matematicky, a to pomocí následujících vztahů (2), (3), (4).

$$\mu = \exp(a\text{RES}_0 + b) \quad (2)$$

kde:

RES_0 – jasová složka reziduální vrstvy

$$\chi = vR \text{RES}_{1,2} \quad (3)$$

kde:

$\text{RES}_{1,2}$ – barevná (chrominanční) složka reziduální vrstvy

v – škálovací faktor popsaný dále vzorcem (4)

R – afinní transformace vypočítávající RGB signál z YCbCr signálu

$$v = N_f + S\phi(\text{LDR}) \quad (4)$$

kde:

ϕ – inverzní gamma korekce

S – projekce do jasové složky argumentu, tedy první složka transformace vstupního signálu z prostoru RGB do prostoru YCbCr

N_f – malá prahová hodnota důležitá pro případ malého vstupního jasového signálu, označení vychází z anglického spojení noise floor, jedná se tedy o šumový práh

Tímto bychom měli popsaný dekodér. Princip kodéru logicky odpovídá inverznímu postupu oproti dekodéru. Vstupem kodéru je pár snímků – LDR a HDR. LDR varianta nám musí zůstat i na výstupu vzhledem k požadavku zpětné kompatibility. Kromě toho musíme z kombinace LDR a HDR snímků určit reziduální vrstvy. Ta nám umožňuje rekonstruovat HDR snímek na základě znalosti LDR snímku. Princip kodéru je obecně o něco složitější než princip dekodéru a lze ho popsat pomocí následujících rovnic (5), (6), (7).

$$P_L(\phi(\text{LDR}) + vR \text{RES}) = P_L C \phi(\text{LDR}) \quad (5)$$

$$\mu(\text{RES}_0) = \frac{P_L \phi(\text{LDR})}{P_L \text{HDR}} \quad (6)$$

$$R \text{RES} = \frac{1}{v(S \text{LDR})} \left(\frac{\text{HDR}}{\mu(\text{RES}_0)} - \phi(\text{LDR}) \right) \quad (7)$$

kde:

P_L – projekce do jasového prostoru

ϕ – inverzní gamma korekce

RES_0 – jasová složka reziduální vrstvy

S – projekce do jasové složky argumentu, tedy první složka transformace vstupního signálu z prostoru RGB do prostoru YCbCr

v – škálovací faktor

μ – na souřadnicích závislý škálovací faktor

Na závěr uvedeme jednoduchý slovní popis podle [26]. Máme zde JPEG kompatibilní základní vrstvu a rozšiřující reziduální vrstvu. Z hlediska HDR je zajímavá samozřejmě především reziduální vrstva. U profilu A tato vrstva představuje poměr jasových složek HDR obrázku a LDR verze získané mapováním tónů s aplikovanou inverzní gamma korekcí. Reziduální vrstva je následně zlogaritmována a komprimována na šedotónový osmibitový obraz. Kromě zmíněného se ještě v různých krocích vyskytuje škálování. U profilu A může docházet ke zkreslení barev [26].

2.3.2 Profil C

Po profilu A je vhodné přejít k profilu C vzhledem k určité podobnosti. Zdroji jsou opět [26], [33], [34], [35]. Většina informací, včetně uvedených vztahů, byla čerpána z [33].

Základní odlišnost profilů A a C spočívá v tom, že u profilu A je jednotný škálovací faktor μ pro všechny složky obrazu. Profil C řeší jednotlivé složky odděleně. Pro srovnání s profilem A je vhodné podívat se na matematický popis dekodéru. Ten shrnují následující rovnice (8) a (9). Rovnice (8) ukazuje princip násobení po složkách. Rovnice (9) představuje reálně užívané vyjádření předchozího vztahu v logaritmickém prostoru.

$$\text{HDR}_i = \phi(\text{LDR}_i)\text{RES}_i \quad \text{pro } i = \{0,1,2\} \quad (8)$$

$$\text{HDR}_i = \exp(\log(\phi(\text{LDR}_i)) + (\log(\text{RES}_i))) \quad \text{pro } i = \{0,1,2\} \quad (9)$$

kde:

ϕ – inverzní gamma korekce

RES_0 – jasová složka reziduální vrstvy

$\text{RES}_{1,2}$ – barevná (chrominanční) složka reziduální vrstvy

LDR_0 – jasová složka základní vrstvy

$\text{LDR}_{1,2}$ – barevná (chrominanční) složka základní vrstvy

Vztah (9) lze dále podle informací uvedených v [33] upravit na následující podobu (10).

$$\text{HDR}_i = \psi \exp(\widehat{\phi}(\text{LDR}_i) + \text{RES}_i - O) \quad \text{pro } i = \{0,1,2\} \quad (10)$$

kde:

$\widehat{\phi}$ – nelineární funkce, odpovídá sloučení operací $\log(\phi(\dots))$ v jednu funkci

O – offset, aby reziduální vrstva neobsahovala záporné hodnoty

$\psi \exp$ – pseudoexponenciála, po částech lineární aproximace exponenciály

Logaritmus u reziduální vrstvy se ztratil, protože jsme ho zahrnuli již do kodéru. Reziduální vrstvu nikdy nezobrazujeme samostatně, takže můžeme v kodéru pracovat rovnou s logaritmovanou podobou této vrstvy. V dekodéru díky tomu už logaritmus nepotřebujeme, jak se lze dočíst v [33].

Pokud máme takovýto dekodér, je jasné, že u kodéru řešíme následující problém. Potřebujeme zjistit rozdíl pseudologaritmu HDR vstupu a $\widehat{\phi}(\text{LDR})$. Pokud uvažujeme, že $\widehat{\phi}$

odpovídá $\log(\phi(\text{LDR}))$, je to jednoduché. Kodéry realizované podle profilu C se však během zjišťování $\hat{\phi}$ obvykle snaží využít inverzního mapování tónů mezi HDR a LDR obrázky [33].

Na závěr uveďme opět jednoduchý slovní popis podle [26]. Profil C definuje reziduální vrstvu jako poměr HDR obrázku a verze získané inverzním mapováním tónů LDR verze, která byla získána právě mapováním tónů. Na rozdíl od profilů A a B nevyužívá jako inverzní TMO jednoduše inverzní gamma korekci. Snaží se najít přesnější inverzní operaci k TMO užitému pro získání základní vrstvy. Mezi výhodné vlastnosti můžeme zařadit fakt, že profil C je založen na využití jednoduchých celočíselných operací (integer operations), a tudíž umožňuje poměrně snadnou a nenáročnou implementovatelnost [26].

2.3.3 Profil B

I u popisu profilu B jsou zdroji [26], [33], [34], [35]. Většina informací, včetně uvedených vztahů, byla čerpána z [33]. U profilu B lze najít určitou podobnost s profilem C. Stejně jako profil C pracuje po složkách. Rozdíl však spočívá v tom, že profil C užívá násobení, kdežto profil B je založen na dělení. Začneme opět popisem dekodéru. Vystihují ho následující rovnice (11) a (12). Vztah (11) vystihuje princip. Vztah (12) opět popisuje reálně využívanou logaritmickou podobu.

$$\text{HDR}_i = \sigma \frac{\phi(\text{LDR}_i)}{\psi(\text{RES}_i) + \epsilon} \quad \text{pro } i = \{0,1,2\} \quad (11)$$

$$\text{HDR}_i = \sigma \exp(\log(\phi(\text{LDR}_i)) - \log(\psi(\text{RES}_i))) \quad \text{pro } i = \{0,1,2\} \quad (12)$$

kde:

ϕ – inverzní gamma korekce

σ – škálovací faktor

ψ – nelineární transformace reziduální vrstvy, typicky gamma korekce s exponentem závislým na vstupním obrázku

Konstrukce kodéru při znalosti dekodéru je stejně jako u profilu C už poměrně snadná. Pro další informace lze doporučit k četbě [33]. Na závěr uveďme opět jednoduchý slovní popis podle [26]. Profil B využívá rozdělení obrazu na LDR oblasti a ty zbylé s vyšším dynamickým rozsahem. Reziduální vrstva je vyjádřena pomocí poměru HDR obrázku a LDR verze získané mapováním tónů, po aplikaci inverzní gamma korekce. Reziduální vrstva je jednotková v oblastech kompletně zaznamenaných v základní vrstvě. Místo poměru je v realitě využíváno rozdílu logaritmů. Už z principu dosahujeme prostřednictvím profilu B spíše nízkých bitových toků, a tudíž spíše nižší kvality při užití kritéria střední kvadratické chyby [26].

2.3.4 Profily – zhodnocení

K poměrně zajímavým závěrům došli autoři [34] na základě testů, které v rámci práce na článku provedli. Informace v tomto pododdílu jsou čerpány právě z [34].

Pomocí měřítek objektivního hodnocení kvality obrazu zkoumali vliv dvou různých faktorů na výslednou kvalitu obrazu. Nejprve posuzovali vliv volby operátoru pro mapování tónů (TMO – Tone Mapping Operator). Následně zkoumali, jaký vliv má konkrétní obsah scény. Obojí nejprve hodnotili pomocí odstupů signálu od šumu (SNR – Signal-to-Noise Ratio). Ukázalo se, že při užití SNR záleží na obojím poměrně dost výrazně. Ze zajímavých závěrů zmiňme následující. Na operátoru TMO je nejméně závislý profil A. Pro vysoké hodnoty kvalitativních parametrů dosahuje nejlepších výsledků profil C, naopak pro nízké hodnoty je nevhodnější profil A. Z výsledků je vidět také to, že profily A a B se chovají do určité míry podobně. Profil C se chová výrazně jinak. Společným rysem profilů A a B

je například fakt, že se zvyšujícím se bitovým tokem se zlepšuje výsledná kvalita čím dál méně. U profilu C toto nepozorujeme. Je třeba zdůraznit, že uvedené platí pro porovnání prostřednictvím metriky SNR. Autoři [34] ukázali porovnání těchto tří profilů také s využitím objektivní metriky FSIM (Feature SIMilarity Index). Pro další informace doporučuji přečíst zmíněný článek [34].

3 Změna dynamického rozsahu obrázku

Každý obrazový soubor disponuje určitým dynamickým rozsahem. Dynamický rozsah je definován jako poměr mezi maximální a minimální jasem v obrázku [3]. I dynamický rozsah je však možné dodatečně upravovat. Pro realizaci této práce je zajímavý zejména proces snižování dynamického rozsahu obrázku vhodným způsobem – mapování tónů (tone mapping). Dynamický rozsah lze však samozřejmě i zvyšovat/rekonstruovat/obnovovat. K tomu slouží expanzní operátory (expansion operators).

3.1 Mapování tónů

Jelikož většina dnešních displejů podporuje bitovou hloubku maximálně 8 bitů na kanál, je přímé zobrazení HDR obsahu pro většinu uživatelů nereálné. I na těchto zařízeních však lze HDR snímky využít. Je totiž možné vhodným způsobem namapovat HDR snímek na LDR verzi, která využívá co největší část užitečné informace z původního HDR souboru. Takovému mapování, této konverzi, se říká mapování tónů (tone mapping). Pro realizaci tohoto převodu se využívají tzv. operátory pro mapování tónů (TMO – Tone Mapping Operator). Zdroji pro tuto kapitolu byly [5], [34], [35], [37]. Zejména [5] nabízí opravdu velké množství užitečných informací na toto téma a byl hlavním zdrojem tohoto oddílu. Zajímavé informace zaměřené na tuto problematiku lze nalézt také v [2].

Kromě změny dynamického rozsahu se při této operaci snažíme zachovat různé charakteristiky původního obrazového signálu, jako jsou například kontrast nebo detaily [5]. Cílem je, aby i mapovaná verze s nižším dynamickým rozsahem vyvolávala v pozorovateli stejný vjem jako reálná scéna a její HDR zachycení. Společnou vlastností většiny postupů pro mapování tónů je primární využití jasové složky obrazového souboru [5]. Informace o barvách je až na druhém místě. Důležitá je při mapování tónů i gamma korekce [5].

Metody pro mapování tónů můžeme základně rozdělit do několika skupin – globální, lokální, segmentační a frekvenční/gradientní [5].

Globální metody aplikují stejnou převodní charakteristiku na všechny obrazové body původního obrazu. Ignorování lokálních charakteristik s sebou logicky přináší ztrátu drobných detailů a lokálního kontrastu [5]. Lokální metody zohledňují okolí aktuálně zpracovávaného pixelu a podle něho příslušně upravují právě užívanou převodní charakteristiku [5]. Jak je výstižně napsáno v [5], dalo by se to popsat jednoduše matematicky následovně. U globálních metod je na všechny pixely aplikováno mapování prostřednictvím stále stejného operátoru f . U lokálních je rozdíl v tom, že aktuální podoba operátoru v daném místě obrazu závisí na hodnotách okolních pixelů. Volba ovlivňujících okolních pixelů by však neměla být zcela náhodná [5]. Například v oblasti hran či strmých přechodů by to mohlo způsobovat nežádoucí efekty. Někdy toho lze šikovně využít, avšak jindy to může přinášet problémy.

U segmentačního přístupu využijeme některého z postupů k segmentaci obrazu a následně na právě získané oblasti obrazu aplikujeme odlišnou převodní charakteristiku [5].

Posledním ze jmenovaných je frekvenční/gradientní přístup. Zde se využívá znalosti toho, jakou část obsahu scény dané frekvence nesou. Výrazněji bývají upravovány nízkofrekvenční složky obrazu [5]. Vysokofrekvenční složky je snaha co nejvíce zachovat, jelikož nesou informaci o detailech.

Operátory pro mapování tónů (TMO) lze dělit i jinými způsoby [5], avšak tato práce není primárně o této problematice a zmíněné dělení je to nejčastěji používané.

Konkrétních realizací a implementací různých TMO je mnoho. Základní princip však bývá společný. Jejich činnost lze obvykle rozdělit na dva základní kroky – extrakce jasové složky, se kterou operátor hlavně pracuje, a následná rekonstrukce informace o barvách [5].

Kromě zmíněných společných základů se samozřejmě objevují i nové trendy. Mnozí výzkumníci se například snaží pracovat více s informací o barvách v původním obrazovém souboru [5].

Na obrázku Obr. 5 je vidět, jak rozdílný může být výstup při využití různých TMO operátorů pro mapování tónů. Zdrojový HDR obrazový soubor pochází z EMPA HDR Image Database⁶.



Obr. 5: Ukázka LDR obrázku po aplikaci různých TMO (zleva Drago, iCAM06, KimKautz)

3.2 Expanzní operátory

V předchozí podkapitole bylo rozebíráno mapování tónů snižující vhodným způsobem dynamický rozsah obrazového souboru tak, aby byl zobrazitelný na dnes běžně užívaných displejích a monitorech. Objevují se však i snahy jít opačným směrem. Určitě by bylo zajímavé mít možnost zvyšovat dynamický rozsah LDR obrázků, obnovovat dynamický rozsah původní scény. I to lze, a to prostřednictvím expanzních operátorů (EO – Expansion Operators) [5]. Někdy se jim také říká inverzní/reverzní operátory pro mapování tónů (inverse TMO nebo reverse TMO, tedy iTMO nebo rTMO) [5]. V tomto pododdíle je čerpáno z [5]. Zajímavé informace zaměřené na tuto problematiku lze nalézt také v [2].

Oproti mapování tónů je zde však zásadní rozdíl. Užitím expanzních operátorů se snažíme obnovit informaci, dynamický rozsah původní scény, kterou vlastně nemáme. Něco takového je logicky problematické. U mapování tónů naopak odebíráme určitou část informace. To je z hlediska realizace samozřejmě výhodnější.

I přes mnohé problémy je však vývoj těchto operátorů velmi zajímavý. LDR obrazových souborů má lidstvo obrovské množství a možnost vylepšit je na HDR verze by určitě našla uplatnění.

Podle [5] sdílí většina expanzních operátorů několik kroků, v první řadě linearizaci. Jedná se o nalezení vztahu mezi hodnotou zachyceného pixelu a jasem v reálné scéně. Následuje úprava hodnot jednotlivých pixelů, která zvyšuje dynamický rozsah obrázku. Pixelů s nízkými hodnotami získávají ještě o něco nižší hodnoty. Pixelům s vysokými hodnotami se jejich hodnota ještě zvyšuje. Pixelům středních hodnot zůstávají beze změn. Třetím krokem bývá obnova přeexponovaných a podexponovaných částí scény. To je problematické, protože tento obsah je třeba vygenerovat. Tato informace v původním souboru chybí. Samotné zvýšení dynamického rozsahu může zvýraznit artefakty vzniklé například kvantizací nebo obrazovou kompresí. I to algoritmy pro expanzi dynamického rozsahu řeší. Viditelnost artefaktů je třeba snížit. Na závěr se obvykle provádí korekce barev [5].

⁶ Tato databáze je dostupná z <http://empamedia.ethz.ch/hdrdatabase/>. Citováno 23. 12. 2016.

4 Databáze HDR obrazového obsahu

Při hledání na Internetu lze najít poměrně velké množství HDR obrazových databází různé velikosti. Pro použití v této práci byly vybrány dvě databáze jako zdroje výchozích obrazových souborů – databáze Marka Fairchilda⁷ a Empa HDR Image Database⁸. Z obou databází byly čerpány snímky ve formátu OpenEXR. V této kapitole je popsán pouze obecný úvod k výběru testovacích snímků. Konkrétní výběr pro praktickou část této práce je obsahem jiné, následující, kapitoly.

Základní kritéria při výběru užitečná pro tuto práci jsou dvě – dynamický rozsah snímků a rozmanitost/reálnost/zajímavost samotného obsahu obrazové scény. Jak se lze dočíst v [34], [35] a [37], HDR snímky často vznikají jako kombinace několika LDR snímků s různou expozicí. [35] a [37] zmiňují i další z možností získání HDR snímku – metodu CGI (Computer Generated Image), tedy umělé vytvoření prostřednictvím počítače. V [35] jsou také zmíněny některé databáze s HDR snímky.

Jak je uvedeno na stránkách obou databází, snímky v obou z nich byly získány kombinací obrazových dat ze série LDR snímků s různou expozicí. V databázi Marka Fairchilda nalezneme HDR obrazové soubory pouze ve formátu OpenEXR, v Empa HDR Image Database máme možnost stáhnout si snímky i ve formátu s příponou *.hdr*. Kromě toho si můžeme z této databáze stáhnout i zdrojové LDR snímky, jejichž kombinací byla HDR forma získána. K dispozici ke stažení je i LDR verze scény získaná mapováním tónů HDR verze. To může být velmi užitečné pro různé analýzy a porovnávání. V tomto pododdíle bylo čerpáno z [34], [35], [37] a webových stránek obou uvedených databází. Odkazy na databáze lze nalézt v poznámce pod čarou.

4.1 Úprava vstupních snímků

Jelikož součástí této práce není vytvoření vlastní databáze s HDR obrázky, je nutné pracovat s nějakými volně dostupnými, vytvořenými třetí stranou. S dostupností problém není. Jelikož však nemáme vstupní data připravená na míru, je vhodné zvážit některé úpravy snímků před samotným využitím. O předzpracování vstupních obrazových souborů vhodným způsobem pojednává právě tato podkapitola.

4.1.1 Rozlišení a výřezy

Vzhledem k velikosti a velmi vysokému rozlišení vstupních obrazových souborů je na místě zvážit, zda-li se nevyplatí před další práci zredukovat objem dat. Nabízí se dvě možnosti, změna rozlišení a výřez původní scény. Provedení výřezu má tu výhodu, že operací nemění vlastnosti původního obrazu v daném místě. Je však nutné zvážit, kde výřez provést a jak velký ho udělat. Takovýto proces tedy není vhodné automatizovat. Při úpravě rozlišení měním i vlastnosti obrazu, což může například ovlivnit účinnost komprese. Na druhou stranu zachovávám obsah scény. Podle mne je výhodnější provést redukci rozlišení, protože v běžných životních situacích je to častěji prováděná operace než realizace výřezů. Změnu rozlišení provádí podle mého názoru celkem běžně většina lidí. Realizaci výřezů považuji osobně za spíše neobvyklou činnost. Pokud však máme k dispozici počítač s dostatečným výkonem, je určitě nejlepší pracovat s původními obrazovými soubory. V praktické části této práce byly využívány výhradně snímky v původním rozlišení.

⁷ Tato databáze je dostupná z <http://rit-mcsl.org/fairchild/HDR.html>. Na této úvodní stránce najdete všeobecné informace. Pro přístup k samotným obrázkům je třeba kliknout na položku Thumbnails po levé straně nebo využít odkazu <http://rit-mcsl.org/fairchild/HDRPS/HDRthumbs.html>. Citováno 23. 12. 2016.

⁸ Tato databáze je dostupná z <http://empamedia.ethz.ch/hdrdatabase/>. Citováno 23. 12. 2016.

4.1.2 Formát

Snímky získané z databází jsou ve formátu OpenEXR. Ten však není podporován ve všech činnostech prováděných v praktické části této diplomové práce. Proto je vhodné si hned na začátku sjednotit formát u všech používaných souborů. Ideální je zvolit jeden formát podporovaný v celém řetězci prováděných činností.

V prostředí MATLAB s nainstalovaným Banterleho HDR Toolboxem⁹ lze pracovat s různými HDR formáty. Referenční JPEG XT software ovšem vyžaduje na vstupu obrazová data pouze ve formátech PFM a PPM¹⁰. Z tohoto důvodu se jeví jako výhodné převést všechny používané obrazové HDR soubory do formátu PFM a LDR soubory po mapování tónů do formátu PPM. Ty jsou pak ve zbytku práce považovány za referenční. Je to logické řešení, abychom se vyhnuli problémům způsobeným vlivem použití různých formátů na různých místech řetězce prováděných činností.

Sjednocení formátu lze provést prostřednictvím nějakého specializovaného grafického programu jako je Adobe Photoshop, nebo například v prostředí MATLAB. U MATLAB je však nutné nainstalovat si již zmiňovaný Banterleho HDR Toolbox, abychom měli podporu všech požadovaných obrazových formátů. Jelikož k tomuto toolboxu není volně dostupný teoretický popis, jen komerčně prodávaná kniha [5], doporučuji nahlédnout do skriptů jednotlivých funkcí a ověřit podporu Vámi používaných formátů ve Vámi užívané verzi tohoto toolboxu.

4.2 Převod HDR snímku na LDR snímek

Jelikož jedním z hlavních volitelných vstupů JPEG XT kodéru je LDR snímek, tedy snímek s běžným „nízkým“ dynamickým rozsahem, měli bychom být schopni si ho před kódováním našeho HDR snímku připravit. K vytvoření LDR snímku se typicky užívá mapování tónů (tone mapping), jak se lze dočíst například v [5], [34], [35], [37]. Tato operace byla podrobně popsána v kapitole tři této práce. Zde jsou zmíněny pouze naprosté základy pro zopakování.

Konkrétních způsobů, jak mapování tónů provést existuje více a [34] zkoumá také jejich vliv na výsledek následného kódování za pomoci JPEG XT. Cíl je u všech metod shodný. Jedná se o vhodné mapování vysokého dynamického rozsahu na nižší, zobrazitelný na dnes běžných displejích. Zobrazení HDR obrazu je v současné době výsadou jen poměrně omezeného počtu displejů, jak bylo napsáno v úvodní kapitole této práce. Operátorů pro mapování tónů (TMO) je větší množství. Pro laika se liší především v podobě výstupu a výpočetní náročnosti. Základně je můžeme rozdělit především na metody lokální a globální. Samozřejmě je však lze dělit i dál a jinak, jak se lze dočíst například v [5]. V tomto oddílu bylo čerpáno především z [5]. Zajímavé informace zabývající se touto problematikou lze nalézt také v [2].

⁹ Dostupný z <http://www.advancedhdrbook.com/>. Přísluší k němu literatura [5]. Citováno 23. 12. 2016.

¹⁰ Minimálně ve verzi softwaru 1.51. Ta je využívána v kapitolách 6 a 7.

5 Objektivní hodnocení kvality obrazu

Pohybujeme-li se v oblasti zpracování obrazu, jistě víme, že je třeba vyhodnocovat, jak různé prováděné operace ovlivňují kvalitu obrazu. Je nutné hodnotit kvalitu obrazu před různými činnostmi a po nich. Zároveň potřebujeme, aby bylo možné porovnávat výsledky z různých hodnocení kvality obrazu. Existují tedy určité jasně definované metody, jak takováto hodnocení provádět. Základně dělíme tyto metody na subjektivní a objektivní.

V případě subjektivního hodnocení pracujeme se skupinou pozorovatelů. Oni hodnotí kvalitu předkládaných vzorků podle svého subjektivního pocitu na předem definované stupnici a my následně získaná data statisticky zpracováváme. Pokud chceme provést subjektivní hodnocení kvalitně, je to poměrně náročné. Je nutné mít k dispozici dostatečně širokou skupinu pozorovatelů, vhodné podmínky a vybavení. Zároveň to stojí všechny účastníky poměrně značné množství času. Při dobře provedeném subjektivním hodnocení kvality obrazu však získáváme žádoucí výsledky. U kvality obrazu je pro nás obvykle důležité zejména to, jak ji vnímají lidé. O tom nás informují výsledky subjektivního hodnocení kvality obrazu velmi dobře. V úvodu této kapitoly jsem čerpal především z vlastních zkušeností při zpracovávání bakalářské práce [38]. Dalšími zdroji jsou [39], [40], [41], [42]. Vzhledem k zaměření práce na JPEG XT, a tedy kompresi HDR obrazu, byly zajímavými zdroji i [34], [35], [37].

Druhou možností je již zmíněné objektivní hodnocení kvality obrazu. Tento typ hodnocení pracuje s univerzální metrikou, s nějakým algoritmem či vzorcem pro automatické vyhodnocení. V tom spočívá jeho hlavní přednost. Chceme využívat nějaký automatický, ideálně rychlý, způsob, jak kvalitu vyhodnotit. Při dnešních výpočetních výkonech počítačů je to výrazně snazší způsob hodnocení než realizace subjektivního hodnocení. Problémem však bývá vypovídací hodnota výsledků. Je složité najít univerzální metriku, která by poskytovala univerzálně kvalitní výsledky. Typicky je nutné, aby vhodně zohledňovala vlastnosti lidského vnímání, v případě hodnocení kvality obrazu vnímání zrakovým systémem (HVS – Human Visual System).

Vzhledem k zaměření této práce je vhodné najít vhodnou objektivní metriku pro hodnocení kvality HDR obrazu. Jako zdroje byly proto užitečné [34], [35], [37] a [36]. V [34] používají, pro úkol obdobný našemu, metriky SNR a FSIM. Velmi zajímavý je [37], kde porovnávají různé objektivní metriky pro hodnocení kvality HDR obrazu. Důležité a zajímavé je, že porovnávají výsledky subjektivního a objektivního hodnocení kvality obrazu. Subjektivní hodnocení poskytuje nejlepší možné výsledky, jelikož pracuje s lidmi. Jejich vjem a jeho zhodnocení nás zajímají. Proto nám výsledky subjektivního hodnocení mohou pomoci odhadnout, které objektivní metriky jsou vhodné pro hodnocení kvality HDR obrazu a které naopak vhodné nejsou. Autoři [37] se zmiňují o celkem 36 různých objektivních metrikách. Zaměřují se na 13 z nich. Pouze 1 ze všech 36 je speciálně vytvořená pro hodnocení kvality HDR obrazu, a to metoda HDR-VDP-2. V tomto článku je také zmíněno, že většina objektivních metrik, které autoři analyzují, se typicky aplikuje pouze na jasovou složku obrazu. Nabízí se však možnost rozložit obraz na složky, aplikovat danou metriku na každou ze složek zvlášť a následně je zkombinovat, například prostřednictvím průměrování. V [37] vyzkoušeli obě varianty. Aplikovali metriky jak pouze na jasovou složku obrazu, tak postupně na jednotlivé složky obrazu v barevném prostoru $Y'C_bC_r$ s následným zkombinováním. Barevný prostor $Y'C_bC_r$ je definován v doporučení ITU-R BT.601-7 [43]. Y' nese jasovou informaci. Informace o barvách je obsažena v C_bC_r . Pro samotné porovnání jednotlivých objektivních metrik existuje standardní postup. Je vhodné využít informaci v doporučení ITU-T P.1401 [44]. Ukázalo se, že nejlepších výsledků dosahují HDR-VDP-2, dále FSIM, IFC, SNR a MSE, pokud je aplikujeme pouze na jasovou složku obrazu. Mezi nejlepší se zařadila i metrika WSNR, pokud ji využijeme k hodnocení všech komponent obrazu. Význam zkratk metrik je následující (u vybraných metrik je uveden i český překlad):

- MSE: Mean Squared Error (střední kvadratická chyba)
- SNR: Signal-to-Noise Ratio (odstup signálu od šumu)

- WSNR: Weighted Signal-to-Noise Ratio (váhovaný odstup signálu od šumu)
- IFC: Image Fidelity Criterion
- FSIM: Feature Similarity Index
- HDR-VDP-2: High Dynamic Range Visible Difference Predictor ve verzi 2.

Obecně se však ukázalo, že je v oblasti objektivního hodnocení kvality HDR obrazu mnoho prostoru pro zlepšování. Žádná z hodnocených metrik neposkytuje vyloženě skvělé výsledky. Zajímavé je i to, že metoda HDR-VDP-2, která je jako jediná přímo navržena pro hodnocení kvality HDR obrazu, nedosahuje nějak výrazně lepších výsledků než některé z dalších metrik. Patří mezi ty nejlepší, ale není zde propastný rozdíl oproti některým jiným metodám.

Velmi rozsáhlým zdrojem na toto téma byl také [45]. Stejně jako u [37] se jedná o srovnání nástrojů pro objektivní hodnocení kvality HDR obrazu. A opět je provedeno i subjektivní hodnocení kvality obrazu pro získání referenčních výsledků (ground truth). Rozdíl je hlavně v rozsahu práce. Vzhledem k obsahu a sestavě autorů se zřejmě jedná o jakési pokračování/rozšíření [37]. Zajímavý k přečtení je rozhodně i [36].

Vzhledem k obsahu zmíněných článků jsem se rozhodl zabývat se v této práci pouze metrikami SNR, MSE a HDR-VDP-2. Všechny tři porovnávají hodnocený obrazový soubor s referenčním, jedná se o metody s plnou referencí. Jejich stručný popis je obsahem následujících pododdílů. SNR a MSE jsem zvolil vzhledem ke kombinaci poměrně dobré vypovídací hodnoty dosahovaných výsledků a přijatelné výpočetní náročnosti. HDR-VDP-2 jsem zvolil, protože poskytuje poměrně věrohodné výsledky a je jako jediná ze zvolených metrik zaměřena na hodnocení kvality HDR obrazu. Komplikací pro její využití je značná výpočetní náročnost.

5.1 SNR

Jedná se o jednu z klasických metrik pro objektivní hodnocení kvality obrazu. Nebyla však vytvořena specificky pro tento účel, tedy ani k hodnocení kvality HDR obrazu. Před použitím je třeba brát tento fakt v potaz a případně uvažovat, zda ji pro naše užití nějak neadaptovat.

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu v angličtině, jedná se o odstup signálu od šumu. V realitě se za tím skrývá poměr výkonů uvnitř desítkového logaritmu, jak se lze dočíst v [34]. SNR charakterizuje následující vzorec (13). Bylo čerpáno z [34].

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{signal}}{P_{sum}} \quad (13)$$

5.2 MSE

Ani MSE, stejně jako SNR, není vytvořené na užití pro hodnocení kvality obrazu. S tím jsou opět spojeny stejná potenciální úskalí. Jako zdroj k tomuto pododdílu bylo využito [46], který lze k přečtení rozhodně doporučit.

Český význam anglické zkratky je střední kvadratická chyba a tento název velmi přesně vystihuje i podstatu této metody. Charakterizuje ji následující vzorec (14).

$$MSE(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 \quad (14)$$

kde \mathbf{x} , \mathbf{y} , značí signály reprezentované prostřednictvím vektorů a x_i , y_i na jejich i -té složky. U obrazových signálů reprezentovaných jako matice pixelů by každý pixel měl samozřejmě dvě souřadnice. Vyjádření by bylo naprosto analogické. Čerpáno bylo z [46].

Ačkoliv se jedná principem o velmi jednoduchou metodu, zvolil jsem ji, protože v [37] poskytovala dobré výsledky. To stejně platí i pro důvod volby SNR.

Když se podíváme na vzorec, je vidět, že hodnota MSE záleží na konkrétních hodnotách x_i , y_i . To může být při hodnocení kvality obrazu problematické. Velikost MSE nám vyjde odlišně při různém vyjádření hodnot jednotlivých pixelů v obrázku. Při normování

obrazových dat na rozsah hodnot 0 až 1 budeme dosahovat odlišných hodnot MSE než při jiném rozsahu, například 0 až 255. To je třeba mít na mysli až budete zkoumat výsledky s užitím této metriky v kapitolách 6 a 7. U vyhodnocování prostřednictvím SNR tento typ problému řešit nemusíme.

5.3 HDR-VDP-2

Jelikož pracujeme s obrazem s vysokým dynamickým rozsahem, je pro nás samozřejmě zajímavá metrika specializující se na objektivní hodnocení kvality HDR obrazu. Takových metrik je zatím velmi málo a jednou z nich je právě HDR-VDP-2. Podle [37] produkuje poměrně dobré výsledky, ale její výpočetní náročnost je velmi vysoká. To potvrzuje i [45] a také má vlastní zkušenost z testování této metody. Je výhodné, že na Internetu lze najít implementaci této metody v MATLAB volně ke stažení¹¹. Kvalitní popis této metody lze nalézt na stránce odkazované v poznámce pod čarou na této straně [47]. Na odkazované stránce naleznete i literaturu vztahující se k této metrice [48], [49], [50].

Základně posíláme na vstup metody dva soubory – referenční a testovaný obrázek. Po zpracování získáme několik výstupů. Prvním je mapa pravděpodobnosti detekce. Ta nám říká, s jakou pravděpodobností v daném místě testovaného obrázku postřehneme rozdíl oproti referenčnímu. Červená barva značí na vysokou pravděpodobnost zaznamenání rozdílu, zelená naopak na nízkou. Druhým výstupem je opět pravděpodobnost, tentokrát však pouze jedno číslo. Tato hodnota nám říká, s jakou pravděpodobností postřehneme rozdíl mezi referencí a testovaným obrazem. Třetím výstupem je parametr kvality testovaného obrazu. Kromě toho, že rovnou počítá s možným vysokým dynamickým rozsahem obrazu, bere tato metoda v potaz i vlastnosti lidského vnímání (HVS), což je u objektivních metrik velmi důležité.

HDR-VDP-2 je inovovanou verzí původní HDR-VDP. Aktuálně je ke stažení ve verzi 2.2.1¹², ale k dispozici jsou i starší verze. Informace byly čerpány z webové stránky odkazované v poznámce pod čarou na této straně [47]. Nastudovány a využity byly i [48], [49].

¹¹ Na stránce http://hdrvdp.sourceforge.net/wiki/index.php/Main_Page#Download lze najít zajímavé informace k této metodě a přes odkaz se dostat ke stažení matlabovského kódu z <https://sourceforge.net/projects/hdrvdp/files/hdrvdp/>. Citováno 23. 12. 2016.

¹² Aktualizováno k 4. 1. 2017. Je ke stažení z <https://sourceforge.net/projects/hdrvdp/files/hdrvdp/> viz předchozí poznámka pod čarou.

6 JPEG XT referenční software

Tato kapitola seznamuje se základy užívání referenčního softwaru JPEG XT¹³ od Thomase Richtera. Text postupuje od přípravy vstupů, přes kompilaci, realizaci kódování a dekódování až po zhodnocení vlivu ztrátové komprese na kvalitu obrazu. Byl využíván referenční software ve verzi 1.51.

6.1 Příprava vstupů

Jak již bylo napsáno v přechozím textu, za jeden ze zdrojů vstupních obrazových dat byla vybrána databáze Marka Fairchilda¹⁴. V rámci práce na této kapitole byly využívány snímky výhradně z této databáze. Druhá databáze byla využita až v následující části této práce. Jelikož jsou stažená obrazová data ve formátu OpenEXR, je nutné je nejprve převést do formátu kompatibilního se softwarem JPEG XT, do formátu PFM. To lze snadno provést ve vhodném grafickém editoru, například v Adobe Photoshop, jak bylo zmíněno již v kapitole číslo čtyři. Kromě změny formátu můžeme v tomto programu také upravit rozlišení nebo udělat výřez z původní scény. V této práci jsme se však bez zmíněného programu obešli. Instalací Banterleho HDR Toolboxu¹⁵ byla do prostředí MATLAB přidána podpora OpenEXR. Všechny prováděné činnosti byly prováděny výhradně v tomto prostředí nebo z něho byly alespoň ovládány. Tento přístup bez využití dalších programů, jako je právě zmíněný Photoshop, umožňuje automatizaci činností a snadnou opakovanou využitelnost pro různá vstupní data.

Pokud nám stačí na vstup JPEG XT poslat pouze HDR obraz, jsme již připraveni. Užitečné je však připravit si i LDR verzi naší původní scény. Lze ji užít jako jeden ze vstupů JPEG XT kodéru a přímo tím ovlivnit podobu základní zpětně kompatibilní vrstvy, jak se lze dočíst v souboru README staženém společně s referenčním softwarem. Pokud tuto možnost nevyužijeme, referenční software si LDR verzi vygeneruje sám, a to prostřednictvím Reinhardova globálního operátoru pro mapování tónů (čerpáno ze zmiňovaného souboru README). Nedodáním LDR vstupního souboru se tedy vzdáváme jednoduché možnosti, jak ovlivnit podobu základní vrstvy výstupu. Sám jsem tuto možnost automatické generace základní vrstvy samozřejmě zkoušel. Výstupy byly podle mne subjektivně nízké kvality. Doporučuji možnost poslání LDR verze na vstup kodéru využívat. Jak již bylo dříve v tomto textu popsáno, převod HDR obrazového souboru na LDR verzi se provádí prostřednictvím tzv. mapování tónů. Tuto operaci lze opět snadno provést například v prostředí Adobe Photoshop. Na přípravu vstupních souborů pro JPEG XT kodér je vhodný, protože podporuje formát OpenEXR a zároveň umožňuje provádět mapování tónů. Jeho velkou výhodou je i fakt, že rovnou ukazuje vliv nastavení mapování tónů na podobu výstupu. Při změně parametrů této operace tedy okamžitě vidíme, jak bude vypadat výstup konverze. Značnou nevýhodou je samozřejmě jeho cena. Kromě toho je nutné pracovat s každým souborem odděleně, vše provést pro každý soubor manuálně znovu. Pro rozsáhlejší práci je to spíše nevhodné řešení.

Z volně dostupného softwaru bych pro převod HDR na LDR doporučil Luminance HDR. Z programů pro zpracování HDR obrazu, které lze získat bezplatně, zřejmě patří mezi ty lepší¹⁶. Kromě toho je dostupný ve verzích pro Windows i OS X/macOS.

¹³ Dostupného z <https://jpeg.org/jpegxt/software.html>. Citováno 23. 12. 2016.

¹⁴ Tato databáze je dostupná z <http://rit-mcsl.org/fairchild/HDR.html>. Na této úvodní stránce najdete všeobecné informace. Pro přístup k samotným obrázkům je třeba kliknout na položku Thumbnails po levé straně nebo využít tohoto odkazu <http://rit-mcsl.org/fairchild/HDRPS/HDRthumbs.html>. Citováno 23. 12. 2016.

¹⁵ Dostupného z <http://www.advancedhdrbook.com/>. Přísluší k němu literatura [5]. Citováno 23. 12. 2016.

¹⁶ Usoudil jsem tak z informací na <http://captainkimo.com/hdr-software-review-comparison/> a <http://www.techsupportalert.com/best-free-high-dynamic-range-hdr-software.htm>. Pro aktuální informace však doporučuji analyzovat situaci na trhu v době, kdy čtete tuto práci. Citováno 23. 7. 2016.

Já jsem si i v tomto kroku opět vystačil pouze s prostředím MATLAB. Součástí již dříve zmíněného Banterleho HDR Toolboxu [5] jsou i operátory pro mapování tónů. Stručný přehled vybraných TMO dostupných v tomto toolboxu¹⁷ lze nalézt v tabulce Tab. 4 na konci tohoto pododdílu. Vyzkoušel jsem jich větší počet a podle vlastního subjektivního hodnocení kvality jsem se rozhodl pracovat nejprve s *DragoTMO.m*. Vybral jsem si ho, jelikož poskytuje subjektivně kvalitní výstupy při implicitním nastavení. Výpočetní náročnost je také přijatelná. Podrobnější popis tohoto TMO lze najít v dalším textu této práce.

Tab. 4: Přehled vybraných TMO dostupných v Banterleho HDR Toolboxu

AshikhminTMO
BanterleTMO
DragoTMO
DurandTMO
FerwerdaTMO
KimKautzConsistentTMO
KrawczykTMO
KuangTMO
MertensTMO
RamanTMO
ReinhardTMO
WardGlobalTMO

6.2 Dostupný software a použitá verze

Na oficiálních stránkách skupiny JPEG [17] lze najít základní informace k standardům jimi vyvinutým či právě vyvíjeným. Samozřejmě lze tedy dohledat informace i o JPEG XT. Podrobnější dokumenty jsou většinou neveřejné. Kromě teoretických informací zde můžeme najít i referenční software¹⁸ pro testování tohoto standardu. Dostupných je více variant disponujících různými možnostmi. Stručný přehled dostupných kódů a jejich autorů lze nalézt v tabulce Tab. 5. Tabulka je aktuální k 29. 12. 2016. Informace byly čerpány z [17].

Tab. 5: Software dostupný na webu JPEG u standardu JPEG XT

JPEG-HDR	Dolby Laboratories Inc
JPEG XT Profile B	Trellis Management Co Ltd
JPEG XT	Thomas Richter
libjpeg	Thomas Richter

V této práci je užíván software pojmenovaný JPEG XT od Thomase Richtera ve verzi 1.51. Jedná se o kód napsaný v jazyce C++ [17] a před samotným použitím je nutné ho zkompileovat. Proces kompilace je závislý na tom, jaký operační systém používáme.

Po kompilaci máme k dispozici program ovladatelný pomocí příkazové řádky, tedy bez grafického rozhraní. V této práci byl užíván počítač s macOS Sierra a program byl nejprve ovládán prostřednictvím programu Terminál, později zprostředkovaně přes prostředí MATLAB. Základní informace o ovládání si lze přečíst v souboru README, který najdete zabalený ve stejném archivu jako samotný software.

Práci kodéru lze ovlivnit dodáním různých vstupních souborů a také prostřednictvím různých nastavení. Jak se lze dočíst v již zmíněném souboru README a také v [34], základními parametry k nastavení jsou parametry q a Q . V obou případech vychází zkratka ze slova quality, tedy anglickým výrazem pro slovo kvalita. V případě q nastavujeme kvalitu

¹⁷ Ve verzi toolboxu 1.1.0 podle souboru Readme staženého spolu s toolboxem. Citováno 4. 1. 2017.

¹⁸ Tento software je dostupný z <https://jpeg.org/jpegxt/software.html>. Citováno 23. 12. 2016.

základní vrstvy kódování, tedy části zpětně kompatibilní s klasickým JPEG. Volba hodnoty Q ovlivňuje kvalitu reziduální vrstvy, tedy té aditivní umožňující vypočíst z LDR snímku jeho HDR variantu.

Autoři [34] došli k závěru, že je vhodné, aby se q pohybovalo v rozsahu od 40 do 99 a Q v rozsahu od 20 do 99.

6.3 Kompilace

Zdrojový kód je nutné před použitím nejprve zkompileovat. Kompilace je závislá na operačním systému, který používáme. Já zde stručně zrekapituluji postup, který jsem sám použil při kompilaci pod operačním systémem OS X El Capitan 10.11 a později i pod macOS Sierra 10.12.1¹⁹.

Je to poměrně jednoduché. Stačí následující kroky:

- otevření Terminálu
- přepnutí aktuálního pracovního adresáře do adresáře, kde máme umístěný stažený soubor se softwarem pomocí příkazu `cd`
- rozbalení staženého archivu prostřednictvím příkazu `unzip`
- zadání příkazu `./configure`
- zadání příkazu `make`.

Zároveň je třeba dát si pozor, abychom měli v počítači nainstalovaný software, který pro kompilaci potřebujeme. V případě OS X/macOS je ideální mít nainstalované prostředí Xcode. Kdyby se ani po instalaci aktuální verze tohoto prostředí kompilace nedařila, je nutné řešit problémy individuálně.

6.4 Realizace kódování

Po přípravě vstupů a kompilaci softwaru můžeme přejít k samotnému kódování. Jak již bylo řečeno, zkompileovaný kód je nutné ovládat výhradně textovými příkazy. Grafické uživatelské rozhraní není k dispozici. V již zmiňovaném souboru README, staženém společně s kodekem, najdeme i část specifikující způsob užívání softwaru ke kódování a dekodování.

Uvedu alespoň stručný popis ovládání na počítačích s operačním systémem OS X/macOS. Základně je třeba pracovat v Terminálu a nastavit pracovní adresář na složku, kde je umístěn JPEG XT kodek. Následně již můžeme zadávat příkazy pro ovládání referenčního softwaru, pro kodér například v následující podobě:

```
./jpeg -r -q 75 -Q 75 -h -profile c -rR 4 infile.pfm outfile.jpg.
```

Tento příklad byl čerpán ze zmiňovaného souboru README.

Software umožňuje poměrně široké možnosti nastavení, které jsou popsány ve zmiňovaném souboru README. Zde uvádím v tabulce Tab. 6 přehled několika různých parametrů, které lze při kódování využít nebo nastavit. Naznačena je i anglická terminologie. Čerpáno bylo ze souboru README.

Tab. 6: Přehled vybraných nastavitelných parametrů při JPEG XT kódování

q	kvalita základní vrstvy (base-quality)
Q	kvalita reziduální vrstvy (extension-quality)
r	reziduální sken pro zvýšení bitové hloubky v prostorové oblasti (residual scan)

¹⁹ Užitečné informace ke kompilaci referenčního softwaru lze najít ve wordovském dokumentu dostupném z <https://www.itsecj.ipsj.or.jp/sc29/open/29view/29n15708c.htm> [58]. Sám jsem si tento dokument při hledání vhodného způsobu kompilace nastudoval a informace z něho při kompilaci využil. Citováno 3. 1. 2017.

rR	reziduální jemný sken (residual refinement scan)
h	optimalizace Huffmanových tabulek, často nutné pro funkční běh (optimize the Huffman tables)
profile	volba použitého profilu (encode in profile a/b/c)
xyz	kódování v XYZ barevném prostoru (encode in the XYZ color space), momentálně možné jen pro profil C
c	vypnutí ztrátové komprese barevné složky obrazu (disable the lossy color transformation)
ls	využití JPEG LS (use JPEG LS), LS jako lossless viz [17]
al	využití souboru s alfa kanálem při kódování (specify the source image that contains the alpha channel)
aq	kvalita alfa kanálu (the quality of the alpha channel)
qt	volba kvantizační tabulky pro základní vrstvu (select a quantization table)

Pro představu uvádím také grafickou ukázkou kódování v Terminálu v macOS Sierra v podobě obrázku Obr. 6.

```

Martin-MacBook-Air:JPEG_XT_screen Martin$ ./jpeg -r -h -profile c -ldr in1_LDR.ppm -q 75 -Q 75 in1_HDR.pfm out2.jpg
This software module was originally contributed by the parties as
listed below in the course of development of the ISO/IEC 18477 (JPEG
XT) standard for validation and reference purposes:

- University of Stuttgart
- Accusoft

Redistribution and use in source and binary forms, with or without
modification, are permitted provided that the following conditions are
met:
* Redistributions of source code must retain the above copyright notice,
  this list of conditions and the following disclaimer.
* Redistributions in binary form must reproduce the above copyright notice,
  this list of conditions and the following disclaimer in the documentation
  and/or other materials provided with the distribution.
* Neither the name of the <ORGANIZATION> nor the names of its
  contributors may be used to endorse or promote products derived from this
  software without specific prior written permission.
* Redistributed products derived from this software must conform to
  ISO/IEC 18477 (JPEG XT) except that non-commercial redistribution
  for research and for furtherance of ISO/IEC standards is permitted.
  Otherwise, contact the contributing parties for any other
  redistribution rights for products derived from this software.

THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND CONTRIBUTORS
"AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT
LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR
A PARTICULAR PURPOSE ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE COPYRIGHT
HOLDER OR CONTRIBUTORS BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL,
SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT
LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE,
DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY
THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT
(INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE
OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.

0 bytes memory not yet released.
259313426 bytes maximal required.
3995 allocations performed.

```

Obr. 6: Ukázka JPEG XT kódování v Terminálu

6.4.1 Tipy pro nastavení parametrů kodéru

V tomto pododdíle najdete několik vybraných tipů pro práci s JPEG XT kodérem. Všechny informace v tomto pododdílu pocházejí z již několikrát zmíněného souboru README staženého spolu s JPEG XT referenčním softwarem.

- Při použití profilů A a B je vhodné použít kódování s otevřenou smyčkou, anglicky *open loop coding*. Toho dosáhneme prostřednictvím parametru *-ol*.
- Pro profily A a C je možné na vstup poslat společně s HDR obrazem i jeho LDR variantu. To může být užitečné, pokud chceme více ovlivnit výstup kodéru. Sami tím určíme, jak bude vypadat základní vrstva kódovaného souboru. Pokud LDR vstup nedodáme, kodér si tuto informaci vypočte sám s využitím globálního Reinhardova algoritmu. Pokud LDR vstup dodáme a nespecifikujeme požadovaný profil, je využití profil C. Na základě praktických zkušeností z testování kodeku doporučuji automatickou variantu neužívat. Subjektivně lepších výsledků jsem dosahoval při využití možnosti poslat na vstup kodéru vlastní LDR obrazový soubor. Je třeba dodat, že LDR vstupní obrazový soubor nemá být ve formátu s příponou *.jpg*, nýbrž *.ppm*.
- Bezeztrátového kódování lze dosáhnout více různými způsoby.
 - Užitím parametru *-p*, což není autorem doporučováno, jelikož to není kompatibilní se všemi implementacemi dekodéru.
 - Využitím profilu C a nastavením parametru *-Q*, kvality reziduální vrstvy, na maximální možnou hodnotu, tedy 100. Zároveň je nutné přidat do příkazu také parametr *-h*. V tomto případě je však kódování bezeztrátové pouze pro šestnáctibitový vstup. Pro dvaatřicetibitový dojde ke konverzi na šestnáct bitů a ke ztrátě části informace. Pokud chceme tímto způsobem kódovat bezeztrátově i pro dvaatřicetibitový vstup, musíme kódovat v XYZ barevném prostoru. To zajistíme užitím parametru *-xyz*. Toto vylepšení je zatím možné pouze při užití profilu C.
 - Další možností je užití parametrů *-l* a *-c*.

6.5 Realizace dekódování

Ovládání JPEG XT dekodéru je obdobné jako u kodéru. Rovněž ho ovládáme prostřednictvím Terminálu. Po otevření Terminálu nastavíme pracovní adresář na složku, kde je umístěn zkompileovaný referenční software. Následně již zadáváme jen příkaz ovládající kodek. Pro dekodér základně v následující podobě.

```
./jpeg infile.jpg outfile.pfm
```

Informace o ovládání dekodéru byly opět čerpány ze souboru README staženého spolu s referenčním softwarem.

6.6 Vliv ztrátové komprese JPEG XT

Pro zkoumání vlivu ztrátové komprese JPEG XT je vhodné porovnat vstup kodéru s výstupem dekodéru. V případě ztrátového kódování se tyto dva soubory budou samozřejmě do jisté míry lišit. V jednoduchém případě to můžeme porovnat sami vizuálně. Vypovídací hodnota by byla nízká. Navíc bychom potřebovali displej s podporou zobrazování HDR obsahu. Je vhodné využít metod subjektivního nebo objektivního hodnocení kvality obrazu. Zpravidla je lepší využít subjektivního hodnocení, pokud je to možné a rozumně náročné, avšak i využití objektivních metrik nám přinese užitečné informace.

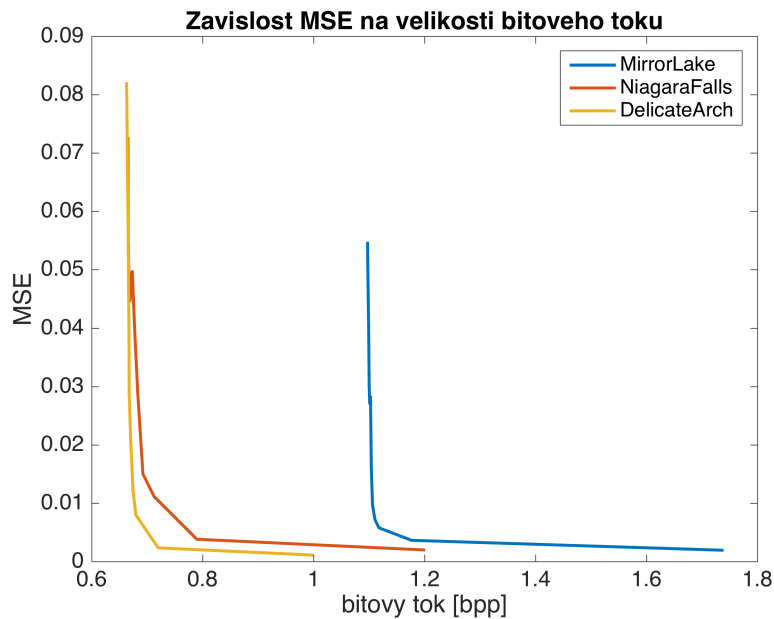
6.7 Využití prostředí MATLAB

Chceme-li při již popsanému ovládání kodéru prostřednictvím Terminálu zpracovat větší množství dat s různým nastavením, jedná se o zdlouhavou rutinní práci. Je nutné neustále měnit drobné detaily v odesílaném příkazu, následně chvíli čekat, a tak stále dokola. Využijeme-li možností prostředí MATLAB, můžeme si značně ulehčit práci a velkou část činností automatizovat. To je možné díky tomu, že MATLAB disponuje funkcí *system*.

Namísto Terminálu můžeme ovládat JPEG XT kodér i dekodér z tohoto prostředí prostřednictvím této funkce.

6.8 Ukázka prvních výsledků testování softwaru

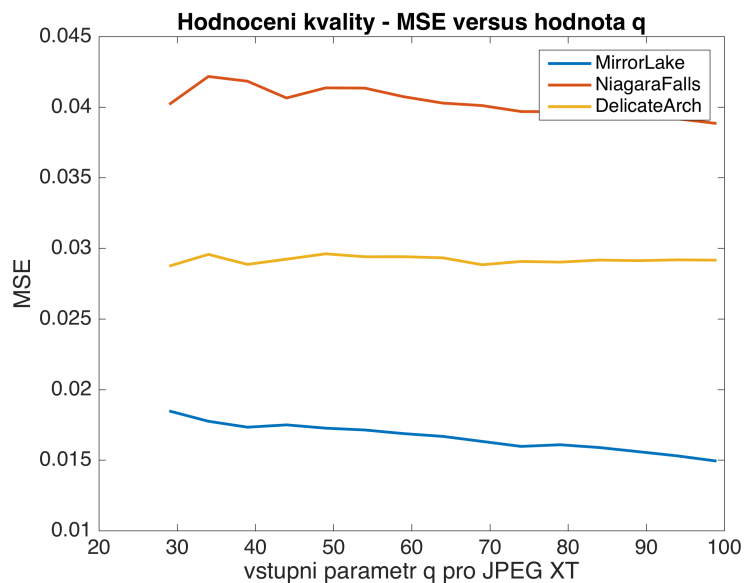
Během prvotního testování referenčního softwaru jsem zkoušel jeho možnosti, učil se s ním zacházet a vyhodnocovat získané výsledky. Pro ukázkou přikládám v podobě obrázků Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9 tři ze získaných výstupů. Ostatní výsledky prvotních testů zde nejsou uváděny, jelikož jsou z velké míry analogické k těm uváděným dále v hlavní praktické části této diplomové práce. Jednalo by se o zbytečnou duplicitu. Později uváděné výstupy a závěry jsou komplexnější a jejich vypovídací hodnota je zpravidla větší.



Obr. 7: Závislost MSE na velikosti bitového toku
tři vstupní soubory, Drago TMO, profil C ($q = 75$, různé Q , r , h)

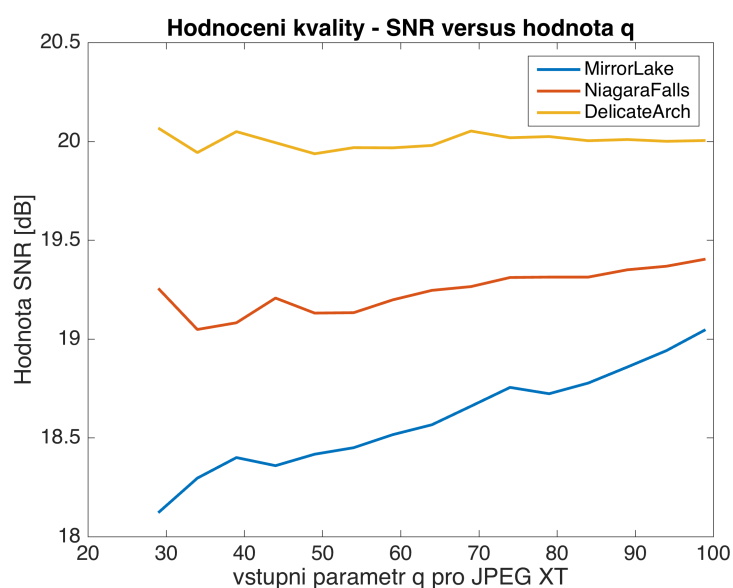
V tomto případě se jedná o objektivní hodnocení kvality obrazu s využitím metriky MSE. Je vynesena závislost MSE na bitovém toku. Cílem je zkoumání vlastností JPEG XT komprese. Práce byla provedena se třemi vstupními HDR obrázky z databáze Marka Fairchilda²⁰. Jejich názvy si lze přečíst v legendě. Byl využit profil C a pro mapování tónů Drago TMO. Je vidět, že kvalita s rostoucím bitovým tokem rychle roste až do určitého bodu. Od daného bodu je pak nárůst kvality s rostoucím bitovým tokem pozvolnější. Parametr q byl nastaven na hodnotu 75. Parametr Q byl postupně zvyšován od počáteční hodnoty 29 po koncovou hodnotu 99 s krokem 5.

²⁰ Dostupné z <http://rit-mcsl.org/fairchild/HDR.html>. Citováno 23. 12. 2016.



Obr. 8: Závislost MSE na JPEG XT q
tři vstupní soubory, Drago TMO, profil C (různé q , $Q = 75$, r , h)

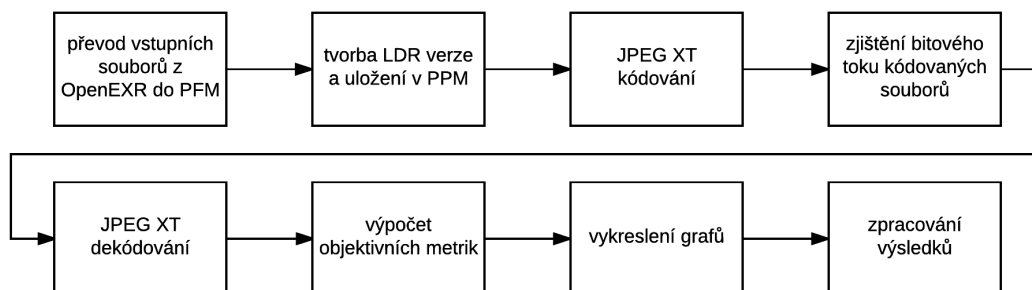
Na obrázku Obr. 8 můžeme pozorovat závislost hodnocení kvality s užitím metriky MSE na hodnotě parametru kvality q JPEG XT kodéru. Byl využit profil C a pro mapování tónů Drago TMO. Názvy vstupních souborů jsou uvedeny v legendě. Parametr Q byl nastaven na hodnotu 75. Parametr q byl postupně zvyšován od počáteční hodnoty 29 po koncovou hodnotu 99 s krokem 5. Je vidět, že parametr q JPEG XT kodéru má na kvalitu HDR snímku velmi malý vliv. To potvrzuje i následující hodnocení kvality s využitím SNR na obrázku Obr. 9. Z tohoto důvodu už není změna hodnoty parametru q JPEG XT kodéru v této práci dále zkoumána. Od tohoto místa dále je vždy nastavena na hodnotu $q = 75$. Byla zvolena z toho důvodu, že je to běžně užívaná hodnota kvality klasické JPEG komprese [34] a základní vrstva je na JPEG kompresi založena. Pro zpětnou kompatibilitu a zobrazení na starších zařízeních bez podpory HDR však tento parametr hraje logicky zásadní roli a neměli bychom ho opomínat.



Obr. 9: Závislost SNR na JPEG XT q
tři vstupní soubory, Drago TMO, profil C (různé q , $Q = 75$, r , h)

Obsah obrázku Obr. 9 byl okomentován již u předchozího obrázku. Jedná se o popis stejné situace, jen je namísto MSE využito SNR.

Během získávání uvedených výstupů jsem postupoval podle následujícího blokového schématu na obrázku Obr. 10.



Obr. 10: Postup prvotního testování JPEG XT referenčního softwaru

7 JPEG XT ve fotoaparátech

Jednou z oblastí, kde by JPEG XT mohl najít využití, jsou rozhodně fotoaparáty. V dnešní době se k zachycení HDR obrazu scény používá typicky přístup mnohonásobného vyfotografování stejné scény s různým expozičním časem (multiple exposure images). Následně je kombinací informace z LDR snímků vytvořen HDR snímek [2], [26]. Generace HDR snímku se typicky provádí až na počítači, ve fotoaparátu bývají uloženy LDR snímky [26]. To klade poměrně vysoké nároky na paměťové médium. Náročnost logicky roste v závislosti na počtu zachycených snímků s různou expozicí, různým expozičním časem. Využití standardu JPEG XT nabízí alternativní řešení tohoto problému. Namísto přechovávání N LDR snímků v paměti fotoaparátu bychom měli uloženu pouze HDR variantu, a to HDR variantu zkomprimovanou pomocí JPEG XT.

Kromě fotoaparátů se nabízí využití i v mobilních telefonech. Mnohé z nich podporují nějaký HDR režim. Osobně jsem se zatím nesetkal s telefonem, který by ukládal buď N LDR snímků nebo přímo HDR snímek. Zřejmě tedy ukládají výhradně LDR verzi po aplikaci TMO. To potvrzuje i [26]. Využití JPEG XT by umožnilo uložit přímo HDR obrazový soubor. To by samozřejmě bylo velmi užitečné pro pozdější využití, například pro zpracování souboru na počítači.

V době začátku psaní této diplomové práce jsem si nebyl vědom, že by se někdo zabýval obdobnou problematikou přede mnou. Jevilo se zajímavé zkoumat tento problém z hlediska objemu dat a obrazové kvality. V pokročilém stádiu práce jsem však narazil na článek [26] řešící velmi podobné záležitosti jako tato práce. [26] tedy představuje současný stav vývoje v této oblasti. Byly z něho čerpány informace do této kapitoly, i některých předcházejících. Lze ho také užít pro srovnání výsledků dosažených v této práci. Zároveň je třeba zdůraznit, že většina provedených činností v rámci psaní této diplomové práce probíhala po většinu času nezávisle na tomto článku.

7.1 Současný stav

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, současnému stavu výzkumu tohoto problému odpovídají závěry z [26] a ten je také zdrojem této podkapitoly.

Autoři [26] zkoumají právě problematiku paměťové náročnosti přechovávání N LDR snímků ve formátu JPEG ve srovnání s velikostí JPEG XT komprimovaného HDR souboru. Kromě toho zkoumají například také kvalitativní rozdíl mezi HDR snímkem získaným kombinací série osmibitových LDR snímků s aplikovanou gamma korekcí a série šestnáctibitových lineárních snímků.

Uvedme pro představu několik konkrétních čísel o rozsahu práce. V publikaci bylo využito 14 scén, 4 různých rozlišení a 5 TMO operátorů. Pro další detaily lze doporučit přečtení zmíněné publikace [26].

I podle [26] je využití většího počtu LDR snímků stále nejrozšířenější způsob získávání HDR snímků. Poměrně časté je, že lepší fotoaparáty uchovávají všech N snímků jak v surovém RAW formátu, tak i v komprimovaném JPEG [26]. To samozřejmě dále zvyšuje náročnost na paměťový prostor. RAW soubory mívají typicky čtrnáctibitovou hloubku [26]. Složení výsledného HDR souboru se obvykle provádí až na počítači [26]. Při generaci HDR obrazového souboru přímo v přenosném zařízení bychom museli řešit i jeho uložení. Nároky na paměťové médium by byly velmi vysoké. Bylo by vhodné ho nějakým způsobem zkomprimovat. Možnostmi komprese HDR obrazových souborů se zabývá první kapitola tohoto textu. I [26] potvrzuje, že základem jsou v současné době JPEG 2000, JPEG XR, a právě zkoumaný JPEG XT. Autoři [26] zkoumali také využití standardu HEVC (High Efficiency Video Coding).

Kromě vlastního výzkumu můžeme v [26] najít i poměrně široký přehled různých dosud vydaných publikací zabývajících se JPEG XT a obecný úvod do problematiky tohoto standardu.

Stejně jako já shledali autoři [26] využití metody HDR-VDP-2 pro hodnocení kvality HDR obrazu za komplikované z důvodu vysoké výpočetní náročnosti. Tato metoda je sice specializována na hodnocení kvality HDR obrazu, a poskytuje poměrně věrohodné výsledky, avšak její požadavky na výpočetní výkon komplikují její využití. Jako náhradu využili autoři [26] MS-SSIM (Multiscale Structural Similarity) v upravené verzi, autory nazývané PU2MS-SSIM, kde PU značí perceptually uniform space. Kromě této metody využili také PSNR metriku aplikovanou na zlogaritmovanou jasovou složku obrazu. Tuto modifikaci označili jako LOG_PSNR_Y [26]. Název je vzhledem k právě popsanému logický. Y označuje jasovou složku obrazové informace.

Dosažené výsledky jsou samozřejmě reprezentovány i graficky. Zmiňme několik vybraných zajímavých výsledků. V první řadě stojí za povšimnutí grafické porovnání bitových toků nutných pro uložení HDR snímku a) zkomprimovaného prostřednictvím JPEG XT b) prostřednictvím série LDR JPEG snímků, a to při různých hodnotách kvalitativních parametrů obou kodérů. Další grafika porovnává kvalitativní rozdíl mezi HDR snímkem složeným ze série LDR osmibitových snímků s aplikovanou gamma korekcí a ze série šestnáctibitových snímků s lineární reprezentací, oboje po průchodu JPEG XT kódováním i dekódováním. Pro porovnání je využito LOG_PSNR_Y v závislosti na bitovém toku.

U JPEG XT byly sice využity různé hodnoty kvalitativních parametrů, avšak z profilů byl využit jen profil C.

Další zajímavá část [26] zkoumá míru zvětšení objemu dat při kódování HDR obrazu oproti kódování pouze LDR verze, tedy poměr velikostí reziduální a základní vrstvy. Je to závislé například na užitém TMO operátoru. Typicky je třeba o něco více než 50 % dat navíc a zároveň obvykle méně než 150 % dat navíc podle informací uvedených v článku [26].

Nyní si shrňme některé závěry prezentované v [26]. Na bitovém toku lze při využití JPEG XT ušetřit přibližně 10 % až 70 % oproti variantě, kdy ukládáme sérii LDR JPEG obrazových souborů s různou expozicí. U té navíc objem dat silně závisí na počtu uložených snímků, počtu různých expozic. Pro kvalitnější zachycení scény je samozřejmě výhodnější větší počet LDR snímků s různým nastavením expozičního času. Kvalitu složeného HDR výstupu také výrazně ovlivňuje stupeň/míra JPEG komprese série LDR snímků. Realizace skládání přímo ve fotoaparátu s nekomprimovanými daty by tedy byla s ohledem na kvalitu vyprodukovaného HDR souboru vhodnější. Čerpáno bylo z [26].

7.2 Vlastní praktická realizace

Jak již bylo řečeno, hlavní praktická část této práce je do určité míry podobná realizaci provedené autory [26]. Zde v úvodním oddílu je stručně popsána a srovnána se zmíněnou realizací popsanou v předchozí podkapitole, kde bylo čerpáno z [26].

Cílem této práce je zkoumat vlastnosti standardu JPEG XT a jeho využitelnost ve fotoaparátech. Zajímala mne úspora dat při využití JPEG XT. Kromě toho mne zajímal také vliv JPEG komprese série LDR snímků sloužících ke generaci HDR snímku na kvalitu složeného HDR obrazového souboru. Prostřednictvím objektivních měřítek pro hodnocení kvality obrazu jsem zkoumal vliv JPEG XT kódování na kvalitu obrazu.

Nyní přejdeme k základním rozdílům oproti zmiňované a popisované publikaci [26]. Pracoval jsem se snímky ze dvou různých databází – z databáze Marka Fairchilda²¹ a EMPA databází²². Druhá jmenovaná sloužila jako zdroj HDR obrazových dat i v [26]. Výběr jednoho stejného snímku ze stejné databáze se hodí pro potenciální srovnání s již uskutečněným experimentem. Práce s odlišnými obrazovými soubory přináší nové užitečné informace.

Z JPEG XT profilů jsem nepracoval pouze s profilem C, nýbrž i s profilem A a B. Profil D je jednoduchý a nejméně zajímavý, viz popis profilů v předchozím textu této práce a také [26]. V rámci praktické realizace nebyl vůbec využíván. Velmi pravděpodobně jsem se lišil i v dalších nastaveních kodéru.

²¹ Dostupné z <http://rit-mcsl.org/fairchild/HDR.html>. Citováno 23. 12. 2016.

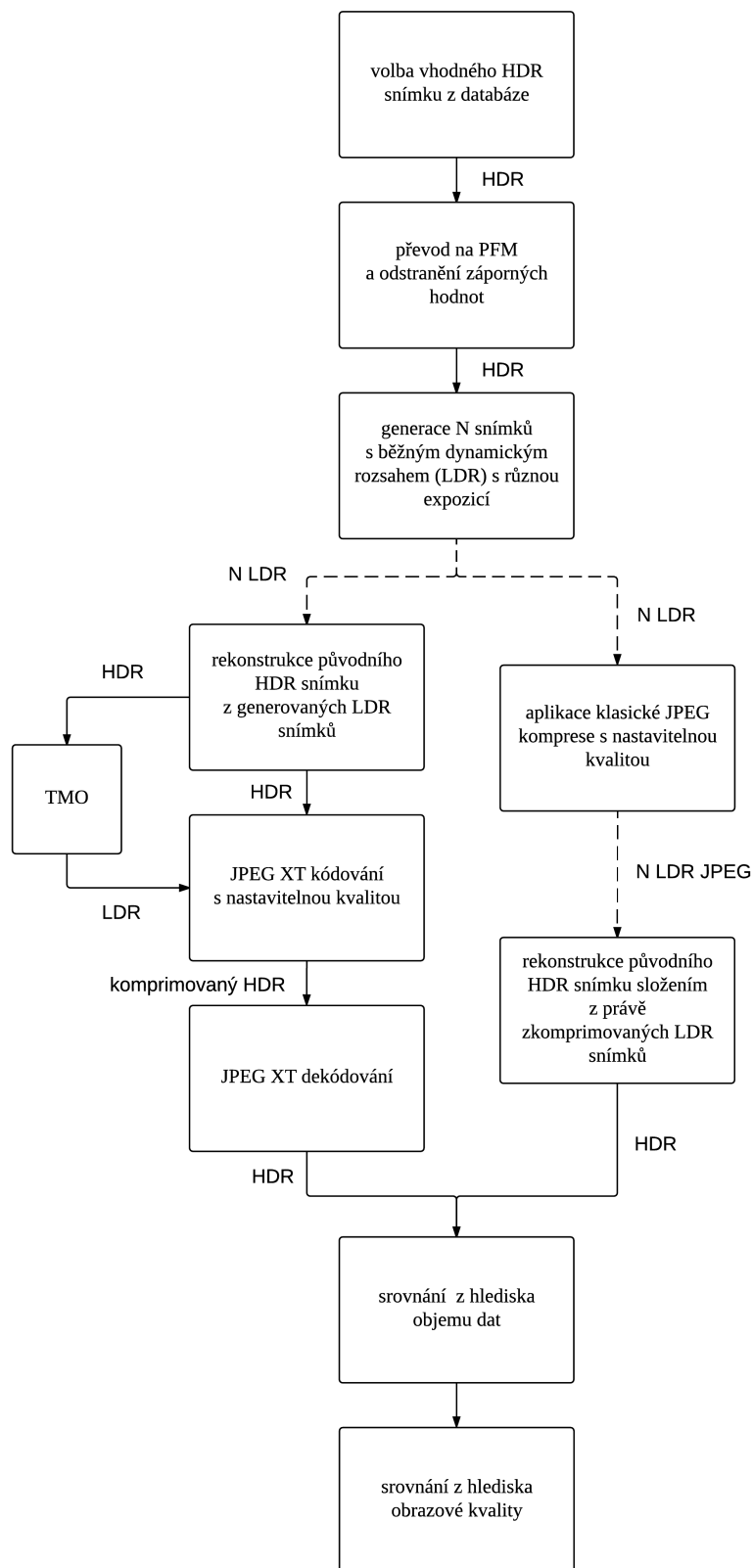
²² Dostupné z <http://empamedia.ethz.ch/hdrdatabase/>. Citováno 23. 12. 2016.

Sérii LDR snímků jsem nestahoval, nýbrž sám generoval ze zdrojového HDR souboru. Vycházel jsem ze staženého HDR obrazového souboru, jenž jsem považoval za věrný obraz reálné scény. S jeho užitím jsem simuloval, s využitím funkcí z Banterleho HDR Toolboxu²³, snímání série LDR snímků. Ty jsem využil hned dvakrát, nejprve v nekomprimované podobě, podruhé po aplikaci komprese JPEG s nastavitelnou kvalitou. Ze série nekomprimovaných LDR snímků jsem složil referenční verzi HDR snímku. Jedná se o simulaci situace, kdy fotoaparát nafotí sérii LDR snímků, neukládá je, nekomprimuje je, a ihned z nich generuje HDR obrazový soubor. Takto získaný soubor slouží dále jako referenční HDR obrazový soubor při hodnocení kvality obrazu a také jako vstup JPEG XT kodéru. Série LDR JPEG snímků představuje ekvivalent série obrazových souborů, které generují dnešní běžné fotoaparáty při focení v HDR režimu. Simulací tedy získáváme ekvivalent běžného výstupu dnešních fotoaparátů. Z této JPEG komprimované série jsem následně generoval, opět prostřednictvím funkcí z Banterleho HDR Toolboxu, HDR soubor. Ten představuje výstup, který dnes běžně získáváme kombinací série LDR JPEG snímků nafocených našimi fotoaparáty na počítači. Nasimulovali jsme tedy postup užívaný ve většině dnešních fotoaparátů s podporou HDR.

Další odlišnost, oproti [26], je ve verzi použitého JPEG XT referenčního softwaru. Používal jsem verzi 1.51 oproti verzi 1.40 užitě v [26]. Zvolil jsem také jiné metriky pro hodnocení kvality obrazu, konkrétně SNR a MSE.

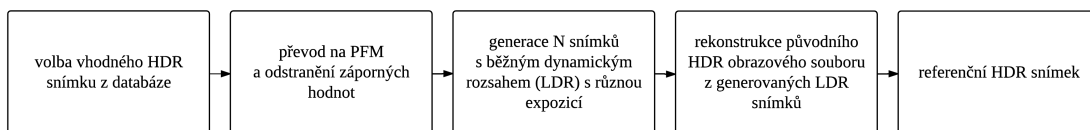
Jedním z cílů praktické části této diplomové práce je srovnat dnes užívaný postup získávání HDR obrazového souboru prostřednictvím N LDR JPEG snímků a teoretického postupu s využitím JPEG XT. Většinu činností provedených za tímto účelem dobře vystihuje následující blokové schéma na následující straně na obrázku Obr. 11.

²³ Dostupného z <http://www.advancedhdrbook.com/>. Přísluší k němu literatura [5]. Citováno 23. 12. 2016.



Obr. 11: Využitelnost JPEG XT ve fotoaparátech

Je vidět, že počáteční kroky jsou pro obě větve společné. Na závěr je provedeno srovnání obou postupů z hlediska objemu dat a z hlediska obrazové kvality. Pro hodnocení z hlediska obrazové kvality je nutné mít k dispozici vhodnou referenci. Nejpřirozenější možnost získání vhodného referenčního snímku vystihuje následující blokové schéma na obrázku Obr. 12.



Obr. 12: Tvorba referenčního snímku pro objektivní hodnocení kvality obrazu

Jelikož dnešní běžné fotoaparáty neumí fotit přímo do HDR obrazových souborů, je i při teoretickém postupu s využitím JPEG XT potřeba nejprve získat HDR snímek složením z N LDR snímků. Oproti dnes běžné situaci však dojde ke složení přímo ve fotoaparátu a na LDR snímky nebude aplikována běžná JPEG komprese. Následně, opět rovnou ve fotoaparátu, se aplikuje JPEG XT komprese a je uložena komprimovaná verze HDR snímku. Tu následně můžeme zpracovat například na počítači. JPEG XT umožní uložit přímo HDR obrazový soubor a zároveň výrazně sníží nároky na paměťové úložiště zařízení.

Teoreticky by se nabízela možnost využít přímo HDR obrazový soubor stažený z databáze po odstranění záporných hodnot a převodu do formátu PFM. To by však simulovalo situaci, kdy bychom uvažovali, že fotoaparáty umějí snímat rovnou do HDR obrazových souborů. Bylo by to o něco jednodušší, avšak v dnešní době méně blízké realitě.

7.2.1 Volba vstupních snímků

Rozhodl jsem se zvolit čtyři vstupní obrazové soubory ze zmíněných databází²⁴, po dvou z každé z nich. Volil jsem podle dynamického rozsahu vstupních souborů a podle subjektivní zajímavosti obsahu scény. Podíval jsem se tedy na dynamické rozsahy různých souborů a jejich LDR náhledy. Zvolil jsem obsahově zajímavé snímky s nadprůměrným dynamickým rozsahem v rámci výběru zkoumaných snímků. Jeden ze snímků jsem zvolil záměrně shodný jako jeden z užívaných v [26] pro možnost určitého srovnání našich výsledků pro stejný vstupní soubor. Přehled užitých obrazových souborů v této části práce shrnuje následující tabulka Tab. 7. V závorkách za původními názvy se nacházejí pracovní názvy používané v matlabovských skriptech napsaných v praktické části této diplomové práce. V dalším textu této práce jsou soubory označovány jako in1, in2, in3 a in4. Kromě samotných názvů obsahuje tabulka také rozlišení snímků a jejich dynamický rozsah. Na konci tohoto pododdílu lze nalézt náhledy LDR verzí užitých souborů získané z HDR verzí prostřednictvím TMO operátoru iCAM06 dostupného v Banterleho HDR Toolboxu. Jedná se o obrázky Obr. 13, Obr. 14, Obr. 15 a Obr. 16.

Tab. 7: Přehled souborů použitých v hlavní praktické části

název souboru	rozlišení	dyn_{\log_2} [f-stops]	$\text{dyn}_{\log_{10}}$ [výstup z funkce]
DevilsBathtub.exr (in1 HDR.exr)	4288 x 2412	9,51	2,86
PaulBunyan.exr (in2 HDR.exr)	4288 x 2412	8,82	2,66
MarketMires2.exr (in3 HDR.exr)	3869 x 2581	13,69	4,12
MontSaintMichel.exr (in4 HDR.exr)	4916 x 3273	13,78	4,15

Jak již bylo řečeno v dřívějším textu, dynamický rozsah snímku se určuje jako poměr maximální a minimální hodnoty jasu obsažených ve scéně [2], [3]. Zde uvedená čísla však nejsou pouze poměrem těchto hodnot. Uvedené hodnoty $\text{dyn}_{\log_{10}}$ [výstup z funkce] byly získány aplikací logaritmu o základu deset na absolutní hodnotu dynamického rozsahu ($\log_{10}(\text{dynamický_rozsah})$). Kromě toho absolutní hodnota dynamického rozsahu byla vypočtena pomocí tzv. robustního přístupu. Jaký je v tom rozdíl oproti prostému poměru maximální a minimální hodnoty jasu ve scéně se můžeme snadno dozvědět z kódu funkce *DynamicRange.m* z Banterleho HDR Toolboxu²⁵. Je využito percentilu jak pro hledání

²⁴ Dostupných z <http://rit-mcsl.org/fairchild/HDR.html> a <http://empamedia.ethz.ch/hdrdatabase/>. Citováno 23. 12. 2016.

²⁵ Dostupného z <http://www.advancedhdrbook.com/>. Přísluší k němu literatura [5]. Citováno 23. 12. 2016.

jasového minima, tak pro hledání jasového maxima. Tím vyřadíme některé potenciálně nežádoucí extrémní jasové hodnoty způsobené například šumem. To může být užitečné, aby nám nezkreslily výpočet dynamického rozsahu obrazového souboru. Hodnota dyn_{\log_2} [f-stops] neaplikuje na hodnotu dynamického rozsahu desítkový logaritmus, nýbrž logaritmus o základu dva ($\log_2(\text{dynamický_rozsah})$). Opět bylo využito robustního přístupu určení dynamického rozsahu scény. Obě uvedené hodnoty mají v podstatě ekvivalentní význam, avšak sdělují nám informaci nepatrně odlišným způsobem. Druhý popsaný způsob určení dynamického rozsahu obrázku užili například autoři [34] ve své publikaci. Naopak první popsaný způsob s desítkovým logaritmem využili autoři [26]. Lze se tedy setkat s oběma variantami, záleží na literatuře. Samozřejmě bychom mohli uvést ještě nelogaritmované hodnoty dynamického rozsahu, jak klasický poměr maxima a minima jasu ve scéně, tak hodnotu získanou robustním přístupem.



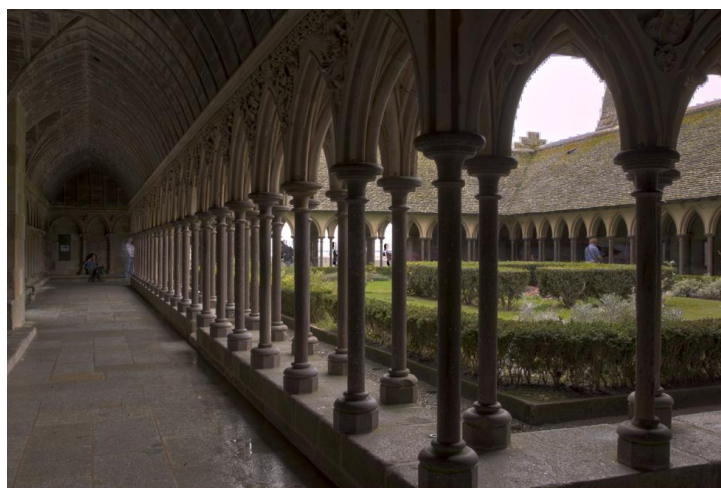
Obr. 13: Vstupní soubor in1
LDR verze získaná pomocí TMO operátoru iCAM06



Obr. 14: Vstupní soubor in2
LDR verze získaná pomocí TMO operátoru iCAM06



Obr. 15: Vstupní soubor in3
LDR verze získaná pomocí TMO operátoru iCAM06



Obr. 16: Vstupní soubor in4
LDR verze získaná pomocí TMO operátoru iCAM06

7.2.2 Úprava vstupních snímků

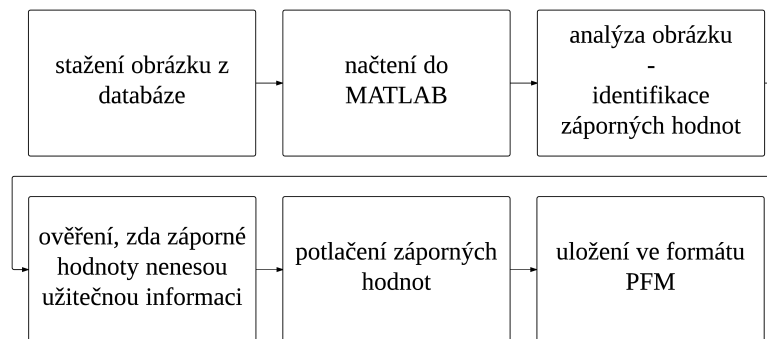
Rozhodl jsem se neupravovat vstupní soubory víc, než je nutné, abych neměnil jejich vlastnosti. Mohl bych tím ovlivnit následující operace s nimi, například účinnost komprese. Je to vhodné také pro případ, že by se v budoucnu našel někdo, kdo by chtěl opakovat některou ze zde popisovaných činností. Stejně vstupní snímky, jako zde užitě, pak získá prostým stažením ze zmíněných databází.

Rozlišení tedy zůstalo zachováno i přesto, že jeho vysoké hodnoty výrazně zvyšují výpočetní náročnost následně prováděných operací. Dále jsem zjistil, že některé vstupní snímky obsahují záporné hodnoty. To je nutné vhodným způsobem ošetřit. Před volbou konkrétního řešení je dobré zjistit, jaký typ informace záporné pixely nesou, zda nějaký šum nebo potenciálně užitečnou informaci. To lze provést například vynulováním hodnot všech kladných pixelů, převedením záporných hodnot na kladné pomocí absolutní hodnoty a následným zobrazením. Prozkoumal jsem tímto způsobem všechny vstupní soubory. Ukázalo se, že se vždy jedná o šum, který nás pravděpodobně nemusí příliš zajímat. Můžeme ho tedy potlačit.

V úvahu připadá například možnost aplikovat na celý obrazový soubor absolutní hodnotu, a tedy otočit záporné hodnoty do plusu. To by však v případě velkých hodnot přineslo jiný problém. Další možností je zjištění záporné hodnoty, která má v absolutní hodnotě

největší velikost, a přičtení její kladné verze ke všem pixelům obrázku. Nakonec jsem se však rozhodl pro jinou variantu. Všechny záporné hodnoty jsem jednoduše zaměnil za nuly. Ani to není ideální, ale je to rozumným kompromisem. Pro lepší řešení bych mohl například ještě dopočíst náhradní hodnoty těchto pixelů interpolací z hodnot okolních pixelů. Tento krok jsem nakonec nerealizoval.

Kromě potlačení záporných hodnot jsem se rozhodl změnit formát obrázků, sjednotit ho u všech užívaných obrazových souborů na PFM. Ten je požadovaný na vstupu užitého JPEG XT kodéru. Zároveň je užitečné mít všechny HDR soubory v průběhu všech operací ve stejném formátu. PFM je jediný podporovaný formát ve všech fázích této praktické realizace. Pro provedení operací popsaných v tomto pododdíle jsem napsal skript *prevod_EXR_na_PFM_nonnegative.m*. Na takto upravené verze vstupních obrázků jsem následně aplikoval další mnou připravený skript *zjisteni_dynamickeho_rozsahu_a_rozliseni.m*. Jeho úkolem je zjištění dynamického rozsahu všech vstupních obrázků a také jejich rozlišení. Získané informace jsou shrnuty v tabulce Tab. 5 v předchozí podkapitole. Kroky provedené při úpravě vstupních snímků jsou znázorněny ještě na následujícím blokovém schématu na obrázku Obr. 17.



Obr. 17: Úprava vstupních obrazových souborů

7.2.3 Simulace snímání HDR obrazu prostřednictvím série LDR snímků

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, typický fotoaparát dnešní doby nezaznamenává HDR informaci rovnou do HDR obrazového souboru. Typicky zachycuje N LDR snímků a až jejich kombinací, obvykle na PC, získáváme HDR soubor [26]. LDR snímky navíc bývají komprimované prostřednictvím standardu JPEG [26], což samozřejmě ovlivňuje jejich kvalitu, a tím i kvalitu následně generovaného HDR souboru. Kromě JPEG umožňují některé fotoaparáty ukládat fotografie v surovém (RAW) formátu, což je pro kvalitu následně generovaného HDR souboru lepší [26]. Touto variantou se však tato práce nezabývá.²⁶

Právě popsany proces je první částí této praktické realizace. Připravený soubor, stažený z obrazové databáze s potlačenými zápornými hodnotami a převedený do formátu PFM, považujeme na vstupu za věrný obraz reality, ekvivalent reálné scény. S využitím jeho, a funkcí z Banterleho HDR Toolboxu²⁷, bylo vygenerováno N LDR snímků, tedy ekvivalent toho, jak nám scénu zachytí většina dnešních fotoaparátů. Snímky byly nejprve využity v nekomprimované podobě a byl z nich složen referenční HDR obrazový soubor. Následně byla na jednotlivé LDR snímky aplikována JPEG komprese s volitelnou kvalitou. Na závěr této části práce byl ze získané LDR JPEG série generován další HDR snímek.

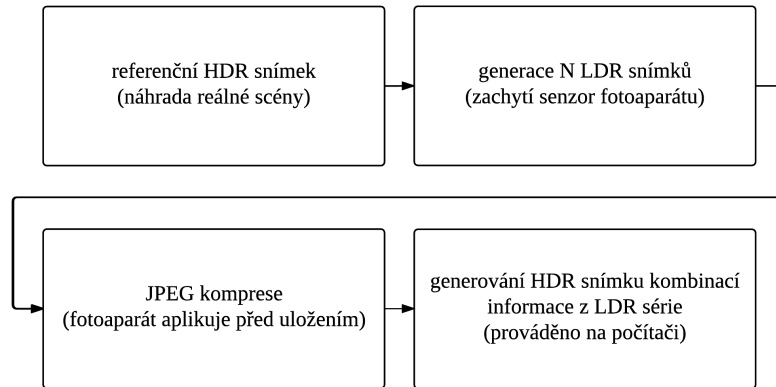
Realizace těchto úkonů může s využitím funkcí z Banterleho HDR Toolboxu vypadat snadně. Není to tak úplně pravda. Po vyzkoušení mnoha různých nastavení s různými

²⁶ Poznámka autora. Na různých místech celé práce opakují stejnou informaci. Mohlo by se zdát, že se jedná o zbytečnou duplicitu. Dělán to však záměrně, a to v případech, kdy považuji znalost dané informace v daném místě textu za velmi důležitou.

²⁷ Dostupného z <http://www.advancedhdrbook.com/>. Přísluší k němu literatura [5]. Citováno 23. 12. 2016.

vstupními soubory, jsem stále nedosahoval uspokojivých výsledků. Rozhodl jsem se nakonec napsat na email podpory k HDR Toolboxu a [5]. Po popsání problémů a krátké konverzaci se ukázalo, že problém zřejmě nebyl v mém špatném postupu, nýbrž v užitých funkcích. Nedlouho po této konverzaci se mnou byl Banterleho HDR Toolbox aktualizován. Po provedené inovaci došlo ke zlepšení funkčnosti užívaných skriptů. Lze tedy říct, že jsem upozorněním na problematickou činnost drobně přispěl k vylepšení užitečného nástroje užívaného mnoha lidmi po celém světě.

Činnosti realizované v této praktické části shrnuje následující blokové schéma na obrázku Obr. 18. Je naznačena jen varianta s JPEG kompresí. Při variantě s nekomprimovanými LDR snímky pouze vynecháme blok JPEG komprese.



Obr. 18: Simulace typického postupu pro získávání HDR snímků

Nyní pojďme k technickým detailům. Na několika místech popsaného postupu máme možnost volby, jak daný krok konkrétně provést. Základní otázkou je počet generovaných LDR snímků. Jaké zvolit N ? S rostoucím N máme k dispozici větší množství využitelné informace, avšak narůstá nám také objem dat. Je také otázkou, jak generovat právě N různých expozičních ze zdrojového HDR snímku. Díky funkcím z Banterleho HDR Toolboxu máme hned několik možností. Můžeme například zvolit konkrétní hodnoty f -stop. Zaručeně tak získáme zamýšlený počet expozičních. Musíme se ovšem dobře rozmyslet, jaké konkrétní hodnoty zvolit. V takovém případě je vhodné zjistit si dynamický rozsah každého užívaného snímku a podle této hodnoty, a zamýšleného N , zvolit konkrétní expoziční hodnoty. Díky tomu, že dynamický rozsah jednotlivých vstupních snímků jsem během realizace tohoto kroku už znal, byla tato varianta poměrně příhodnou. Nabízí se však i možnost využít jeden z poloautomatických režimů zabudovaných (máme dvě možnosti) ve funkci *CreateLDRStackFromHDR.m*, kdy nastavujeme jen expoziční krok Δf -stop mezi generovanými snímky. Tímto způsobem získáme pravděpodobně ideální počet expozičních pro daný krok Δf -stop v závislosti na dynamickém rozsahu vstupního obrázku. Počet generovaných LDR snímků bude při stejném kroku pro různé snímky odlišný. Něco takového může být při praktickém využití zajímavé. V této práci však chceme porovnávat a hodnotit v závislosti na generovaném počtu expozičních N , a proto se zdá být lepší první zmíněná varianta, kdy počet LDR snímků přímo určujeme. Jak je však popsáno v následujícím textu, nakonec bylo využito jednoho z poloautomatických režimů. Bylo tak učiněno z důvodu získávání lepších výstupů při užití této varianty.

Co se týče volby konkrétního N , pracoval jsem s hodnotami 3, 5, 7 a to z následujících důvodů. Minimální počet pro možnost využití informace z více snímků je logicky 2. Počet 3 však působí výhodněji. Při $N = 3$ totiž můžeme mít jeden snímek se střední expoziční, tedy snímek využitelný i samostatně. Ten doplňují jeden snímek s kladně posunutou expoziční ke světlejším hodnotám pixelů a jeden se záporně posunutou expoziční k tmavším hodnotám. Při $N = 2$ by něco takového nešlo, LDR snímky by samy o sobě nebyly tak zajímavé a ani výstup získaný jejich kombinací by pravděpodobně nebyl ideální. $N = 4$ jsem nevolil

proto, že je velmi blízko $N = 3$ a navíc opět nemáme možnost zvolit jeden snímek se střední expozicí při rovnoměrném pokrytí celého dynamického rozsahu zpracovávaného obrázku. K volbě $N = 7$ jsem dospěl obdobnou úvahou. Samozřejmě by se dalo pokračovat i s vyššími hodnotami N , a nebyl by to problém, avšak s ohledem na rozsah této práce jsem se rozhodl pracovat jen se třemi různými hodnotami N .

Kromě volby počtu LDR snímků, můžeme také zvolit různý stupeň na ně aplikované JPEG komprese. I zde je otázkou, jaká je ideální hodnota. Pro možnost porovnání jsem opět zvolil více různých hodnot. Základní uvažovanou kvalitou je ta s kvalitativním parametrem $q = 75$, protože je to velmi často užívaná hodnota [34]. Pracoval jsem však i s jinými hodnotami, konkrétně s rozsahem od $q = 25$ do $q = 95$ s krokem 5.

Nyní přejdeme k popisu samotné realizace tohoto bloku. Pro realizaci úkonů popsaných v tomto pododdílu jsem napsal skript `fotoparat_JPEG_PNG_uniform_PFM_s_cyklem.m`. Využil jsem cyklu pro zpracování více vstupních souborů najednou při jednom spuštění skriptu. Pracuje se vstupním souborem ve formátu PFM. Výstupem jsou série LDR snímků ve formátech JPEG a PNG a dva HDR snímky ve formátu PFM, jeden složený z nekomprimované série, druhý složený z JPEG komprimované série. U funkce `CreateLDRStackFromHDR.m` jsem se rozhodl pracovat výhradně s režimem `uniform`. Zvolil jsem ho vzhledem k subjektivní kvalitě generovaných výsledků. Pro ostatní režimy by nebyl problém skript jednoduše upravit.

Využil jsem také funkce `ReadLDRStack.m`. Jelikož se mi nedařilo v určité době generovat uspokojivé výsledky, rozhodl jsem se po kontrole kódů všech užitých funkcí z HDR Toolboxu do této funkce zasáhnout a připravil jsem verzi `ReadLDRStack_upraveny.m`. Úprava se týkala pouze pořadí načítání souborů ze složky s N LDR snímky. Při úpravách jsem využil informace uvedené na jednom blogu²⁸ na stránkách MathWorks a funkce `sort_nat.m` dostupné z MATLAB Central File Exchange²⁹. V konečné realizaci nakonec není nutné tuto upravenou funkci používat. Hodila se pouze při testování s $N \geq 10$.

7.2.4 Volba TMO pro JPEG XT kódování

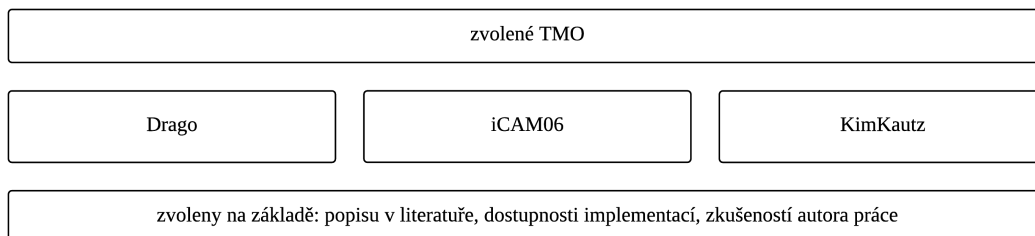
Problematické mapování tónů se věnuje již kapitola tři této práce. Zde je řešen pouze výběr konkrétních operátorů pro mapování tónů (TMO) pro užití v této praktické části práce. Nejprve jsem si přečetl několik článků porovnávajících různé TMO, konkrétně [51], [52] a [53]. Rozhodl jsem se zvolit celkem tři mapovací operátory. Na základě nastudování zmíněných publikací [51], [52], [53] jsem se rozhodl zvolit Drago TMO (dále označovaný Drago) jako zástupce globálních operátorů a iCAM06 TMO (dále označovaný iCAM06) jako zástupce lokálních operátorů. Jako třetí zkoumaný operátor jsem vybral KimKautzConsistent TMO (dále označovaný KimKautz). KimKautz patří mezi globální operátory, avšak je o několik let novější než operátor Drago. Kromě hodnocení kvality jejich výstupů ve zmíněné literatuře [51], [52], [53] jsem využil také vlastního subjektivního hodnocení výstupů různých TMO. Vzhledem ke statistické významnosti měl můj názor logicky velmi malou váhu. Všechny tři vybrané TMO jsou však dobře hodnocené a zároveň považují jejich výstupy za subjektivně kvalitní i já. Mezi jejich výhody patří i fakt, že jsou jejich implementace dostupné v Banterleho HDR Toolboxu³⁰. Pokud by někdo nemohl iCAM06 v HDR Toolboxu najít, je tam pojmenovaný jako KuangTMO. Lze to zjistit nejen ze skriptu operátoru, ale také ze souboru `Readme.txt` staženého spolu s HDR Toolboxem. Tento soubor se nachází po rozbalení archivu toolboxu v hlavní složce. Je obecně dobré si ho před užíváním HDR Toolboxu přečíst. Dozvíme se z něho i jednu zásadní věc pro právě rozebíranou činnost. Kromě samotné aplikace TMO operátoru je třeba u většiny z nich, po jejich užití, provést ještě gamma korekci. U TMO operátorů, kde to nutné není, by se mělo

²⁸ Dostupném z <http://blogs.mathworks.com/pick/2010/09/17/sorting-structure-arrays-based-on-fields/>. Citováno 23. 12. 2016.

²⁹ Dostupné z <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10959-sort-nat--natural-order-sort>. Citováno 23. 12. 2016.

³⁰ Dostupném z <http://www.advancedhdrbook.com/>. Přísluší k němu literatura [5]. Citováno 23. 12. 2016.

v MATLAB Command Window zobrazit hlášení informující nás o tom, že to potřeba není, viz zmíněný Readme soubor. Pro podrobnější informace o vybraných TMO lze doporučit následující literaturu – [54] pro Drago TMO, [55] pro iCAM06 a [56] pro KimKautzConsistent TMO. Jedná se o dokumenty zmiňované ve skriptech jednotlivých TMO v HDR Toolboxu. Volbu TMO rekapituluje následující blokové schéma na obrázku Obr. 19. Ukázka rozdílnosti výstupů používaných TMO je znázorněna na obrázku Obr. 5 v kapitole tři.



Obr. 19: TMO zvolené pro praktickou realizaci

Ještě je na místě zmínit jeden další TMO, a to operátor popisovaný v [57]. Jeho zajímavost spočívá v optimalizaci pro zpětně kompatibilní metody komprese HDR obrazu, jak se můžeme dočíst v [57]. Jeho implementaci lze nalézt například v balíčku *pfstools*³¹, pod názvem *mai11*. Takto je označován i v [26]. Do budoucna by bylo určitě zajímavé pracovat i s ním. Časové možnosti mi momentálně nedovolily přidat tento velmi zajímavý TMO již do této práce.

7.2.5 Realizace JPEG XT kódování

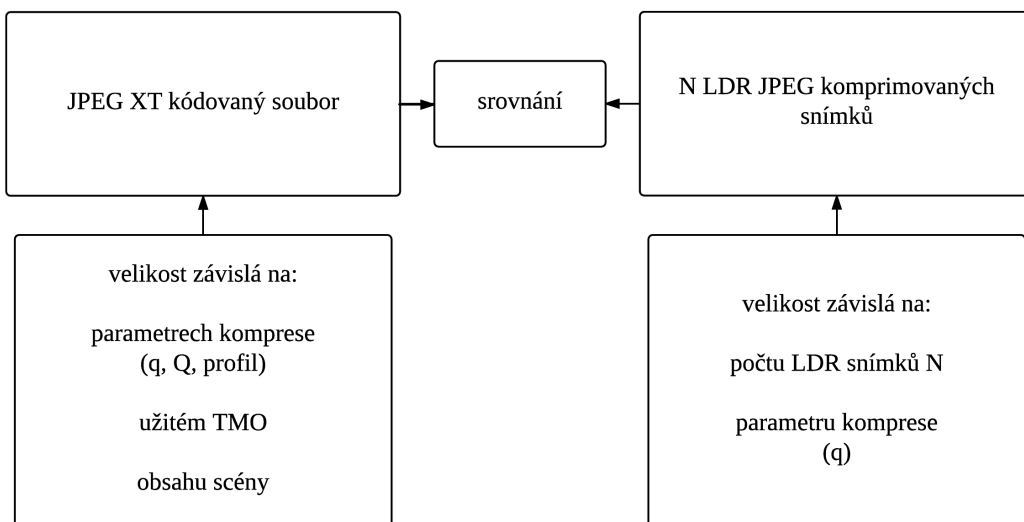
Realizace JPEG XT kódování je teoreticky popsána již v šesté kapitole této práce. Zde chci pouze zmínit, že pro realizaci tohoto bloku jsem napsal skript *JPEG_XT_kodovani.m*. Je samozřejmě kompatibilní se skripty realizujícími předešlý a následující blok práce. Uživatel může snadno měnit některá nastavení a lze kódovat větší množství HDR souborů během jednoho spuštění skriptu. Kromě toho eliminuje nutnost ovládat JPEG XT referenční software z příkazové řádky a umožňuje pracovat pouze v prostředí MATLAB.

7.2.6 Náročnost na paměťové úložiště, hodnocení z hlediska objemu dat

Teorie již byla popsána v předchozím textu, ale i zde se hodí uvést alespoň stručné shrnutí. Dnešní fotoaparáty užívají k zachycení HDR informace o scéně N LDR snímků, typicky komprimovaných prostřednictvím standardu JPEG [26]. Nároky na paměťové úložiště, například paměťovou kartu, jsou logicky značné, a navíc výrazně rostou se zvyšujícím se počtem LDR snímků. Teoreticky by bylo možné provést kombinaci LDR snímků a generaci HDR verze již ve fotoaparátu, a tím pádem se zbavit závislosti na N . HDR soubor by však byl značně objemný a bylo by vhodné ho komprimovat. A právě v této práci tolikrát zmiňovaný JPEG XT přináší možnost řešení tohoto problému.

V této části práce jsou porovnávány tyto dvě situace z hlediska objemu dat – uchovávání N LDR JPEG snímků oproti uchovávání JPEG XT komprimovaného souboru. Zároveň jsou zkoumány i obecné vlastnosti JPEG XT kódování a generovaných sérií N LDR JPEG snímků. Základem je srovnání z hlediska bitového toku v počtu bitů na pixel (bpp – bits per pixel). Je uveden také praktický reálný příklad s konkrétními velikostmi v bajtech. To proto, aby si čtenář mohl snáze udělat představu. Porovnávané situace vystihuje následující blokové schéma na obrázku Obr. 20.

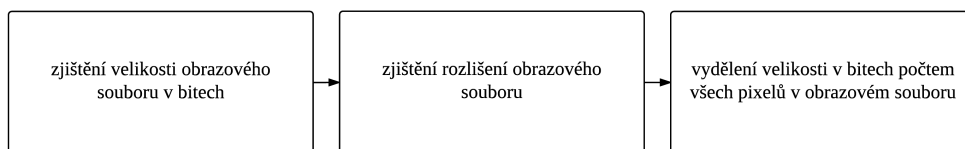
³¹ Dostupném z <http://pfstools.sourceforge.net/>. Citováno 15. 12. 2016.



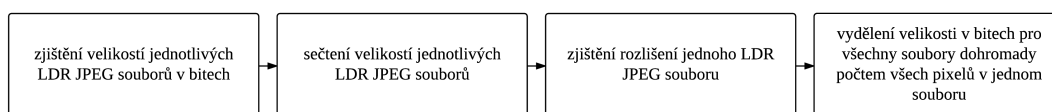
Obr. 20: Srovnání z hlediska objemu dat

V blokovém schématu jsou uvedeny vybrané faktory, na kterých závisí datový objem JPEG XT kódovaného souboru a série N LDR JPEG snímků. Nejedná se o kompletní výčet, uvedeny jsou hlavní faktory zajímavé pro tuto práci. Jako vstup JPEG XT kodéru byl primárně použit HDR snímek složený z N LDR nekomprimovaných snímků. Tato varianta je dále označována jako N LDR JPEG oproti JPEG XT. Zkoumána je také varianta, kdy jako vstup JPEG XT slouží HDR soubor složený z N LDR JPEG souborů. Tento scénář je dále označován jako N LDR JPEG + JPEG XT. Jedná se o situaci, kdy JPEG XT nezabudujeme přímo do fotoaparátu, ale budeme ho využívat například na počítači. Výstupem z fotoaparátu bude i nadále N LDR JPEG souborů. Ty na počítači složíme do HDR obrazového souboru a ten následně zkomprimujeme prostřednictvím JPEG XT. Jedná se tedy o vylepšení dnes standardní situace o využití JPEG XT. Volba TMO užitých pro tvorbu LDR vstupů JPEG XT kodéru je komentována v poddílu 7.2.4.

Základem této části práce je práce s velikostí souborů v bajtech a jejich bitovým tokem (bit rate) v bpp (bits per pixel). Využití bitového toku namísto velikosti v bajtech přináší univerzálnější vypovídající výsledky, jelikož eliminuje vliv rozlišení obrazového souboru. U JPEG XT kódovaného souboru je význam bitového toku asi každému jasný, u série LDR souborů nás však pro smysluplné následné využití zajímá počet bitů na pixel pro všechny LDR soubory ze série dohromady. Je tedy třeba nejprve sečíst velikosti všech LDR souborů ze série a až následně z nich vypočíst celkový bitový tok celé LDR série. Zjištění bitových toků charakterizují následující bloková schémata na obrázcích Obr. 21 a Obr. 22.

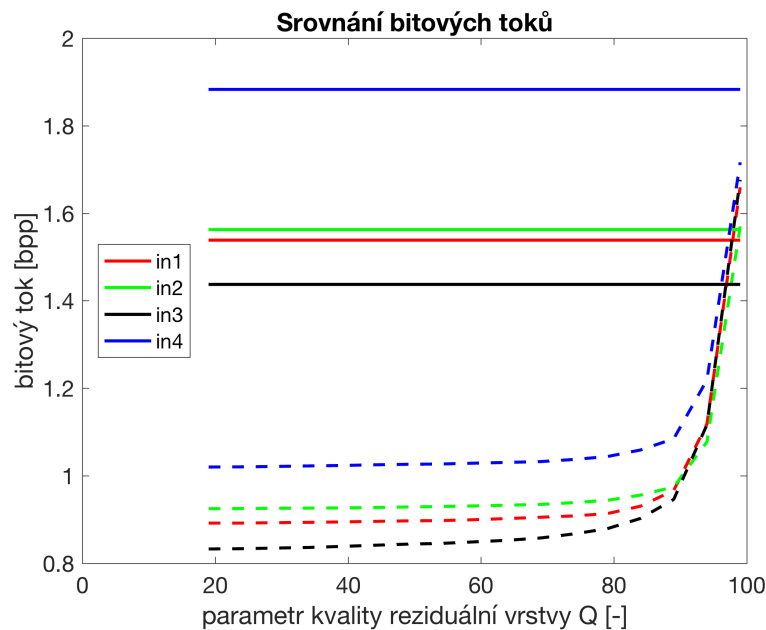


Obr. 21: Zjištění bitového toku JPEG XT kódovaného souboru



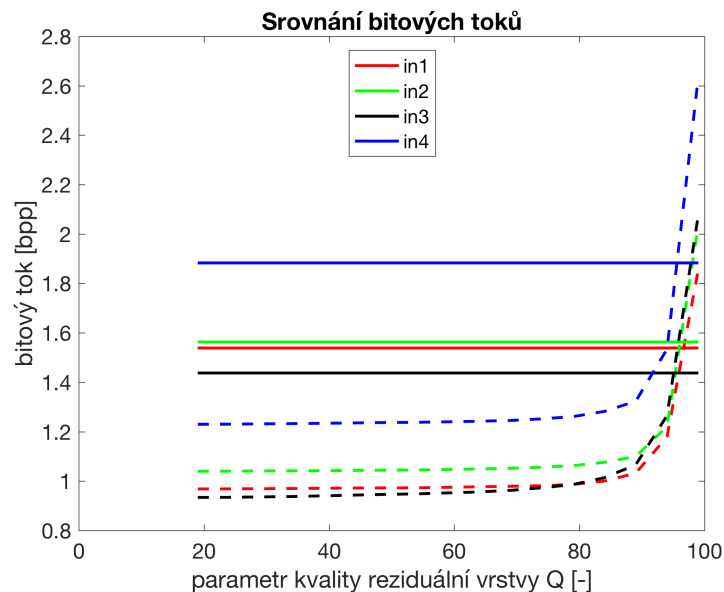
Obr. 22: Zjištění bitového toku série N LDR JPEG souborů

Následují příklady některých získaných výsledků. Vzhledem k množství stupňů volnosti, s čím všim můžeme hýbat, jaké parametry měnit, je to pouze velmi malý vzorek ze získatelných výstupů. S napsanými skripty však není problém získat celkem snadno i jiné varianty.



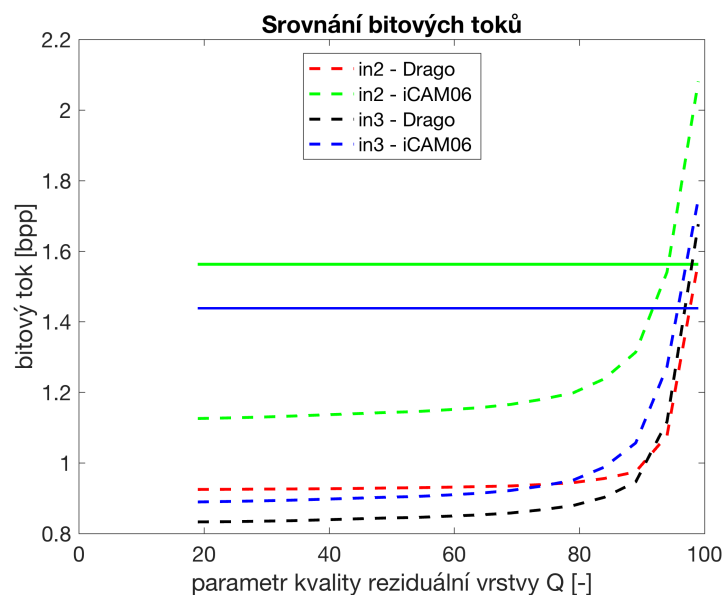
Obr. 23: N LDR JPEG + JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – čtyři soubory přerušovaná čára odpovídá JPEG XT, plná sérii N LDR JPEG snímků všechny soubory, $N = 3$, Drago TMO, JPEG $q = 75$, profil C ($q = 75$, různé Q , r , h)

Na tomto obrázku Obr. 23 lze nalézt grafické vyjádření možného ušetření paměti při využití JPEG XT v dnes používaném řetězci. Je nafoceno N LDR snímků. Ty jsou komprimovány pomocí klasického JPEG. Z nich je složen HDR snímek a na ten je aplikováno JPEG XT kódování. Tento scénář je dále označován jako N LDR JPEG + JPEG XT. Je vidět, jak náročné je uložení původních N LDR JPEG snímků a jaký je rozdíl oproti uložení HDR verze po aplikaci JPEG XT. Plná čára vždy odpovídá LDR sérii a přerušovaná čára stejné barvy odpovídá příslušnému JPEG XT kódovanému souboru. Užitím JPEG XT kódování evidentně lze při užití nižších hodnot Q velmi výrazně snížit bitový tok potřebný pro uložení obrazových dat. Při vysokých hodnotách Q , přibližně od $Q = 90$ výše, se situace postupně vyrovnává. Kromě toho je vidět, že různé scény mají různou datovou náročnost. Pořadí náročnosti jednotlivých scén zůstává stejné jak při užití LDR série, tak v případě JPEG XT kódování. Zajímavý je i fakt, že bitové toky různých scén se s rostoucím Q přibližují sobě navzájem a při velmi vysokých hodnotách Q , přibližně od $Q = 95$, už mají všechny soubory hodnotu bitového toku velmi podobnou.



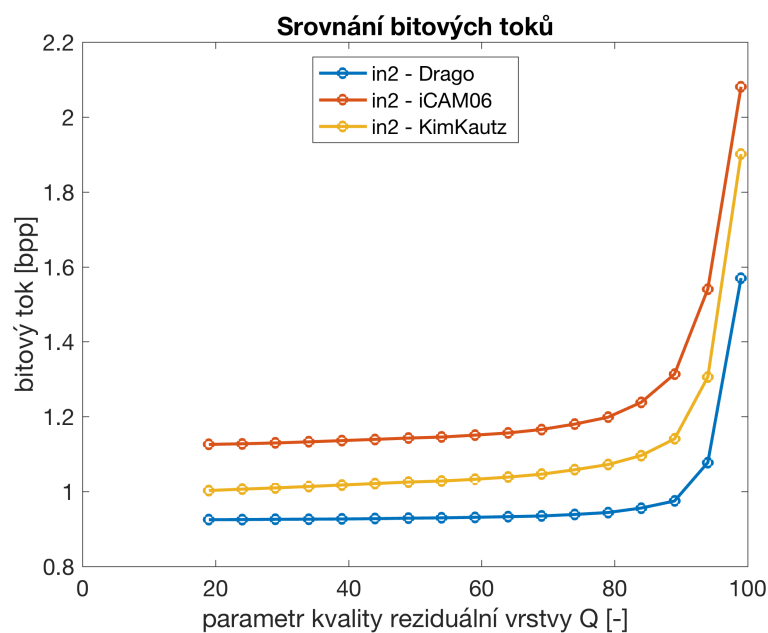
Obr. 24: N LDR JPEG oproti JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – čtyři soubory přerušovaná čára odpovídá JPEG XT, plná sérii N LDR JPEG snímků všechny soubory, N = 3, Drago TMO, JPEG q = 75, profil C (q = 75, různé Q, r, h)

Zde na obrázku Obr. 24 máme velmi podobně vyhlížející grafiku jako v předchozím případě, na obrázku Obr. 23. Situace je rozdílná v tom, že HDR snímek na vstupu JPEG XT kodéru nebyl složen z N LDR JPEG snímků, nýbrž z N LDR snímků bez komprese. Tento scénář je dále označován jako N LDR JPEG oproti JPEG XT. Srovnáváme náročnost na paměťové médium při ukládání dnes běžných N LDR JPEG snímků se situací, kdy N LDR snímků ve fotoaparátu nekomprimujeme a rovnou z nich skládáme HDR verzi, na kterou aplikujeme JPEG XT kompresi. Jinak je situace obdobná té předcházející. V tomto případě jsou JPEG XT soubory o něco objemnější a nároky na paměťové médium větší. Je třeba si uvědomit, že rozdíl není pouze v HDR vstupu JPEG XT kodéru, nýbrž i v LDR vstupu. I verze získaná mapováním tónů je logicky odlišná. Zároveň je třeba zdůraznit, že tyto výsledky platí jen pro nastavení kodéru uvedené v popisu pod obrázkem.



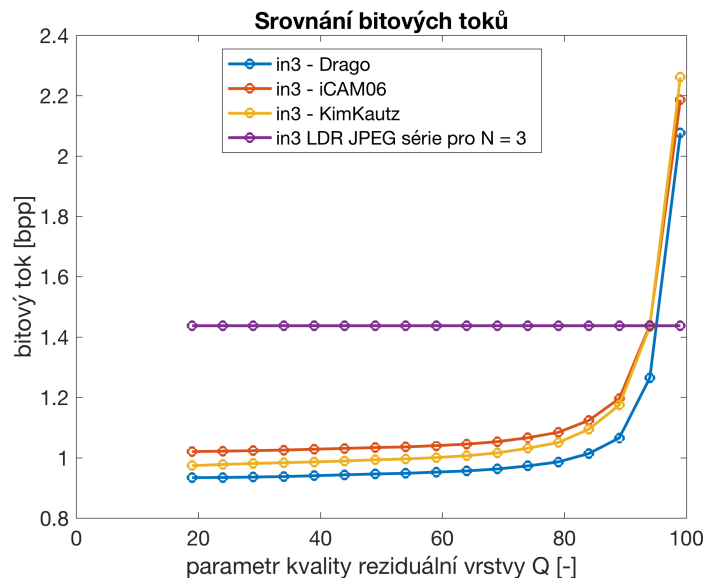
Obr. 25: N LDR JPEG + JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – dva soubory, dva TMO přerušovaná čára odpovídá JPEG XT, plná sérii N LDR JPEG snímků in2, in3, N = 3, Drago TMO a iCAM06 TMO, JPEG q = 75, profil C (q = 75, různé Q, r, h)

Zde, při generování výsledků zobrazených na obrázku Obr. 25, bylo opět využito scénáře složení HDR souboru z N LDR JPEG snímků a následné JPEG XT komprese. Opět můžeme pozorovat závislost bitového toku na hodnotě parametru Q . Navíc je zde vidět vliv použitého TMO. Pro mapování tónů byly použity operátory Drago a iCAM06. Volba konkrétních TMO je zdůvodněna v pododdílu 7.2.4. Pro přehlednost zde pracujeme jen se vstupními soubory in2 a in3, aby nebylo vyneseno příliš mnoho křivek v jednom grafu. Jsou vyznačeny také hodnoty odpovídající LDR JPEG sériím. Ty jsou logicky pouze dvě, protože nezávisí na TMO. Operátor pro mapování tónů se během jejich generace nijak nevyužívá. A nyní pojďme k závěrům, které lze z grafiky vyvodit. Jak obsah scény, tak užitý TMO bitový tok silně ovlivňují. Užití iCAM06 způsobuje obecně vyšší hodnoty bitového toku. Bitové toky JPEG XT kódovaných souborů při užití Drago TMO bývají zpravidla nižší a závislost na obsahu scény není tak velká v případě použitých vstupních souborů. Zároveň lze říci, že JPEG XT kódované soubory mají nižší bitové toky než série LDR snímků, a to při kvalitativním parametru Q přibližně do hodnoty $Q = 90$. To platí pro $N = 3$. Pro vyšší N je výhodnost užití JPEG XT samozřejmě ještě výrazně vyšší.



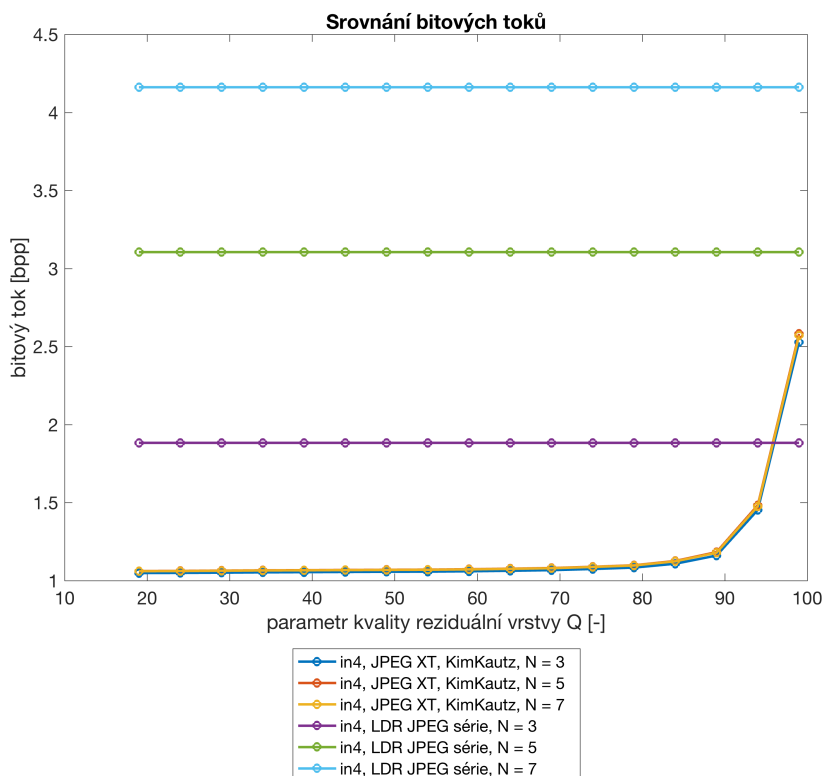
Obr. 26: N LDR JPEG + JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – jeden soubor, tři TMO in2, $N = 3$, všechny TMO, JPEG $q = 75$, profil C ($q = 75$, různé Q , r , h)

Zde byl opět využit scénář N LDR JPEG + JPEG XT. Z obrázku Obr. 26 je vidět, že potřebný bitový tok na užitém TMO výrazně závisí. Je vidět, že při užití iCAM06 TMO a stejného parametru Q dosahujeme nejvyššího bitového toku, při užití Drago TMO naopak nejnižšího. KimKautz TMO se nachází někde mezi. Zároveň je vidět, že průběh závislosti je pro všechny tři užitá TMO velmi podobný. Použité hodnoty Q jsou zvýrazněny prostřednictvím markerů.



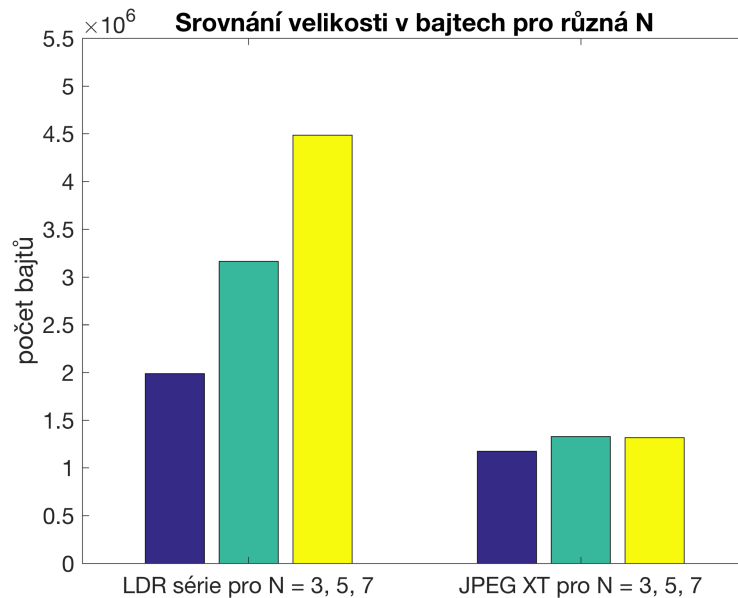
Obr. 27: N LDR JPEG oproti JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – tři TMO in3, N = 3, všechny TMO, JPEG q = 75, profil C (q = 75, různé Q, r, h)

Na obrázku Obr. 27 vidíme hodnoty bitového tok požadovaného pro uložení N LDR JPEG snímků ve srovnání se situací, kdy ze série nekomprimovaných N LDR snímků složime HDR snímek a na ten aplikujeme JPEG XT kompresi. Je zde vidět vliv TMO užitého pro JPEG XT kódování. Je vidět, že všechny tři užití TMO dosahují obdobných výsledků. Pro přehlednost jsou závislosti vyneseny pouze pro vstupní soubor in3. JPEG XT je objemově výhodnější přibližně do $Q = 94$. Přibližně od $Q = 90$ začíná objem JPEG XT komprimovaného souboru strmě růst. Markery označují hodnoty Q , se kterými bylo pracováno.



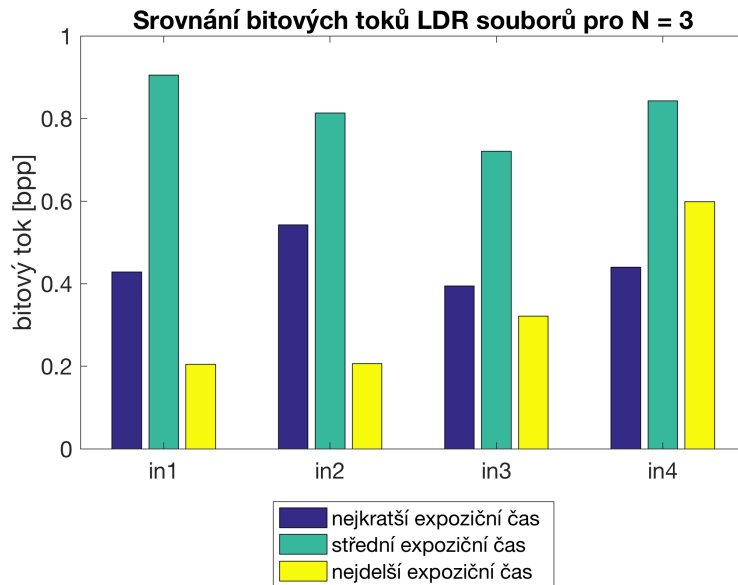
Obr. 28: N LDR JPEG oproti JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – tři N in4, různé N, KimKautz TMO, JPEG q = 75, profil C (q = 75, různé Q, r, h)

Na obrázku Obr. 28 máme opět provedeno srovnání využití uložení N LDR JPEG souborů oproti JPEG XT souboru vzniklému kompresí HDR souboru ze série N LDR nekomprimovaných snímků. Tentokrát vidíme velikost bitového toku v závislosti na Q pro různá N . Pro přehlednost jsou křivky vyneseny pro jeden vstupní soubor a jeden TMO, konkrétně in4 a KimKautz TMO. Je zde vidět, že využívat JPEG XT se z hlediska paměťových požadavků vyplatí. Pro $N = 3$ je výhodnost využití JPEG XT značná, pro vyšší hodnoty N ještě výraznější. Je vidět, že velikost JPEG XT kódovaného souboru na N v podstatě nezávisí. Je velmi obdobná pro všechna N .



Obr. 29: N LDR JPEG + JPEG XT – velikost v bajtech v závislosti na N – tři N in1, různé N , Drago TMO, JPEG $q = 75$, profil C ($q = 75$, $Q = 75$, r, h)

Pro generování výsledků zobrazených na obrázku Obr. 29 byl využit scénář N LDR JPEG + JPEG XT. Tento sloupcový digram ukazuje počet bajtů obsazený na paměťovém médiu při uchování HDR informace o scéně v závislosti na volbě N v sérii generovaných LDR souborů. Porovnáváme celkový objem LDR sérií pro různá N a také velikosti z nich generovaných JPEG XT kódovaných HDR souborů. Je vidět, že u série LDR JPEG snímků se stoupajícím N odpovídajícím způsobem roste i náročnost na paměťový nosič. Zároveň můžeme pozorovat, že velikost JPEG XT kódovaného souboru na výchozím N v podstatě nezáleží, velikost souboru je stále přibližně stejná. Kromě toho je jasně vidět, že objem dat je při využití JPEG XT výrazně nižší. Čím vyšší N , tím je rozdíl markantnější. Pro JPEG XT kompresi bylo využito parametrů $q = 75$ a $Q = 75$. Zároveň je nutné zdůraznit, že vykreslené hodnoty platí pouze pro vstupní soubor in1. Využit byl Drago TMO a JPEG XT profil C s uvedeným nastavením.



Obr. 30: Bitové toky jednotlivých LDR JPEG souborů v sériích – čtyři soubory
všechny soubory, $N = 3$, JPEG $q = 75$, $\Delta f\text{-stop} = 5$

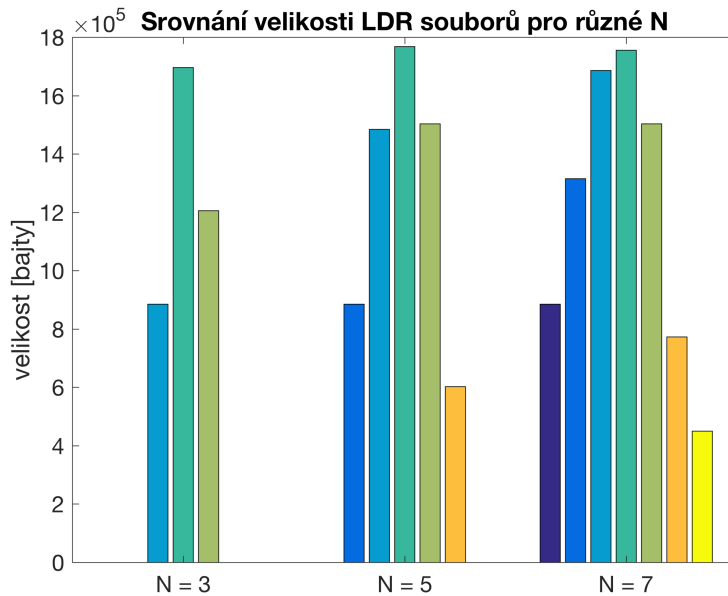
Tento sloupcový diagram na obrázku Obr. 30 znázorňuje velikost LDR JPEG souborů ve vygenerovaných sériích pro parametr kvality JPEG komprese $q = 75$. Je pracováno se všemi vstupními soubory. Jedná o případ pro $N = 3$, tedy tři různé expozice pro každý ze vstupních souborů. V tomto případě je mezi jednotlivými expozicemi v sériích vždy rozdíl $\Delta f\text{-stop} = 5$. Krok $\Delta f\text{-stop}$ byl zvolen tak, aby se z původního HDR snímku vygenerovaly právě tři LDR snímky při využití funkce *CreateLDRStackFromHDR.m* z Banterleho HDR Toolboxu³² a jejího režimu *uniform*. Je vidět, že největší bitový tok má vždy střední hodnota expozice (prostřední sloupec). Snímek s kratším expozičním časem (vlevo) bývá o něco méně náročný a nejmenší bitový tok pro své uložení obvykle vyžaduje snímek s nejdelším expozičním časem (vpravo). U in4 tomu tak však není. Nelze z toho dělat pravidlo. Souvisí to s množstvím informace v obrázku a vlastnostmi JPEG komprese. Pro ilustraci uvádím na obrázku Obr. 31 náhledy jednotlivých expozic pro in3.



Obr. 31: Ukázka jednotlivých expozic v LDR sérii
in3, $N = 3$, $q = 75$

Na těchto náhledech jednotlivých generovaných expozic je vidět rozdílné množství užitečné informace. Je očividné, že snímek s nejdelším expozičním časem má mnoho přeexponovaných nezajímavých pixelů. S tím právě souvisí i to, že jeho soubor vyžaduje po aplikaci JPEG komprese pro své uložení nejmenší počet bajtů, jak jsem zmiňoval při komentování předešlého grafu na obrázku Obr. 30.

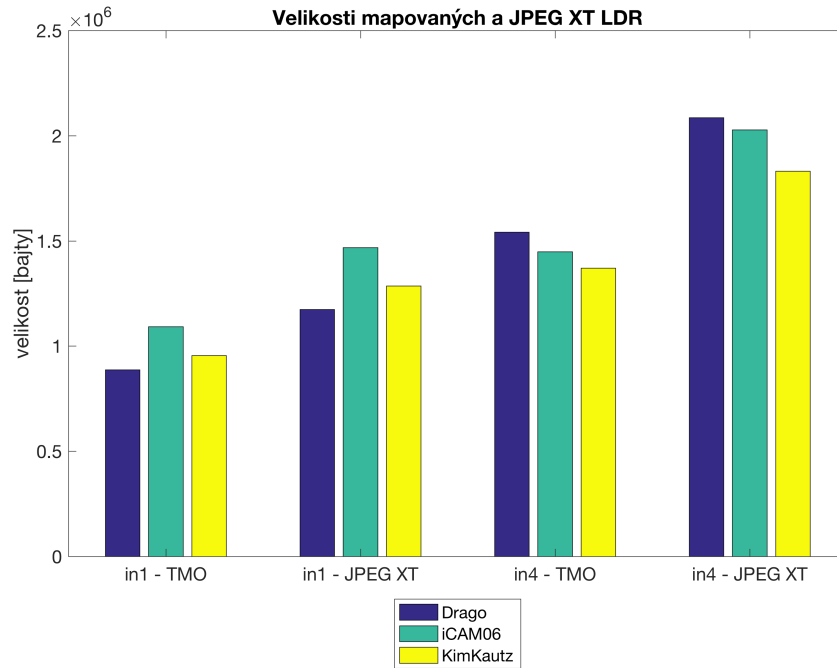
³² Dostupného z <http://www.advancedhdrbook.com/>. Přísluší k němu literatura [5]. Citováno 23. 12. 2016.



Obr. 32: Srovnání velikosti jednotlivých LDR souborů pro různá N
in4, různá N, JPEG q = 75, užitá Δf -stop = 5; 3; 2,25
v každé skupině sloupců snímků s nejkratším expozičním časem vlevo, směrem doprava expoziční čas roste

Zde, na obrázku Obr. 32, máme obdobu předchozího sloupcového diagramu. Tentokrát jsou vyneseny velikosti LDR souborů pouze pro in4, avšak pro různá N . Protože je využit jen jeden vstupní soubor, rozhodl jsem se pro ukázkou vynést velikost v bajtech. V zásadě se potvrzuje tvrzení z komentáře předchozího diagramu na obrázku Obr. 30. Snímky se střední expozicí vyžadují nejvíce paměťového prostoru. Čím více je snímek vzdálen střední expozici, tím menší počet bajtů vyžaduje pro své uložení.

Na místě je uvést poznámku pro případ, že by se někdo podívoval nad tím, proč někde užívám bitový tok (bit rate) a někde velikost v bajtech. Pro člověka znalého problematiky je zpravidla lepší srovnání prostřednictvím bitového toku z důvodu nezávislosti na rozlišení obrazových souborů. Je více univerzálně vypovídající. Avšak někdy, a pro méně zasvěcené téměř vždy, může být užitečnější porovnání v bajtech. Je totiž lépe představitelné. Z konkrétní velikosti mohou poměrně snadno odhadnout, nebo si bleskově vypočítat, kolik by se mi onoho obsahu vešlo do paměti mobilního telefonu, na paměťovou kartu ve fotoaparátu nebo na pevný disk v počítači. Mohl bych samozřejmě uvádět obě varianty, avšak to by zvětšovalo rozsah textu a mohlo by to čtenáře zbytečně obtěžovat. Pro případné zájemce je převod mezi variantami poměrně snadný. Pro představu je uvedeno porovnání obou variant na následujících dvou obrázcích Obr. 33 a Obr. 34.

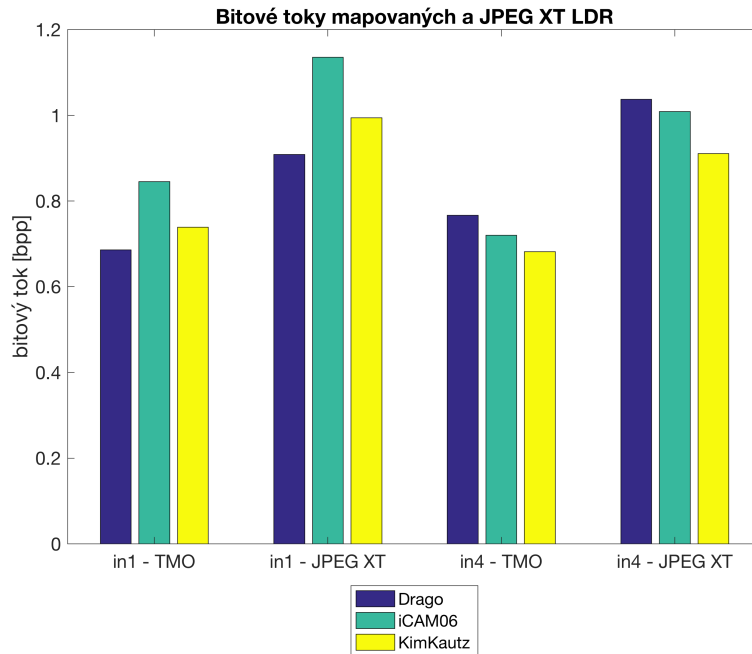


Obr. 33: N LDR JPEG + JPEG XT – velikosti mapovaných LDR a JPEG XT souborů
in1, in4, N = 3, různé TMO, JPEG q = 75, profil C (q = 75, Q = 75, r, h)

Na tomto sloupcovém diagramu na obrázku Obr. 33 můžeme vidět porovnání velikostí v bajtech pro LDR verze obrázků získané mapováním tónů HDR souboru složeného z N LDR JPEG série a k nim příslušejících JPEG XT kódovaných souborů. První skupina sloupců zleva zobrazuje velikosti LDR verzí souboru in1 získaných mapováním tónů užitím různých TMO. Zleva máme postupně Drago, iCAM06, KimKautz. Vedlejší skupina zobrazuje velikosti JPEG XT kódovaných souborů při využití právě popsaných LDR verzí získaných mapováním tónů. Další dvě skupiny sloupců jsou analogické, jen pro in4. Je také třeba uvést některé užití parametry. Uvedené výsledky platí jen pro profil C s nastavením uvedeným pod obrázkem, $q = 75$ (u JPEG i JPEG XT), $Q = 75$, $N = 3$. Je to vyneseno při využití N LDR JPEG série a následně JPEG XT komprese na složený HDR snímek.

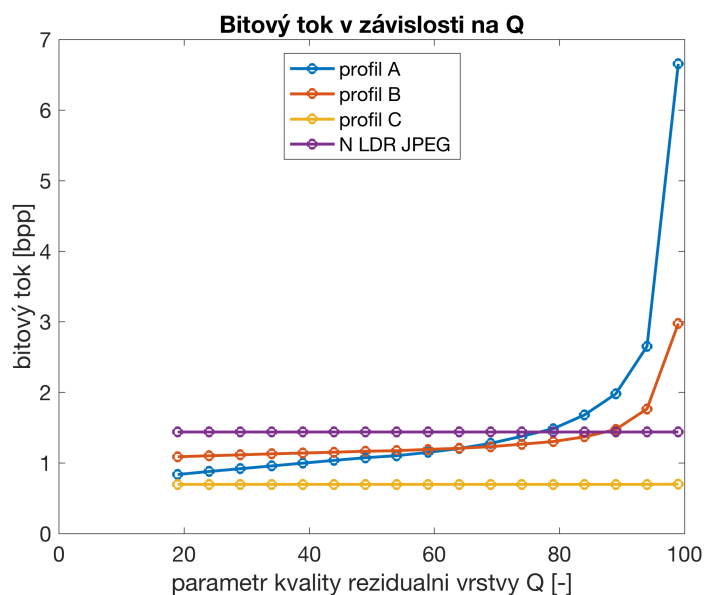
Na této grafice je dobře vidět, kolik bajtů navíc je třeba pro přidání HDR části informace do JPEG XT kódovaného souboru. Je tomu tak proto, že identický LDR soubor získaný mapováním tónů je v prvním případě samostatný soubor a v druhém případě reprezentuje základní vrstvu JPEG XT. Nějaká část z celkového počtu bajtů JPEG XT souboru je ovšem pravděpodobně věnována propojení základní a reziduální vrstvy, to je také třeba brát v úvahu.

Zároveň to vypadá, že u in4 je i pouhá LDR verze získaná mapováním tónů téměř vždy objemnější i než JPEG XT soubory u in1. To je právě způsobeno užíváním velikosti v bajtech. Na obrázku Obr. 34. následuje analogické srovnání, jen s užitím bitových toků namísto počtu bajtů.



Obr. 34: N LDR JPEG + JPEG XT – bitové toky mapovaných LDR a JPEG XT souborů in1, in4, N = 3, různé TMO, JPEG q = 75, profil C (q = 75, Q = 75, r, h)

Obsah tohoto obrázku Obr. 34 je analogický jako u předchozího Obr. 33, jen jsou užívány bitové toky namísto počtu bajtů. Zde je vidět, že in1 a in4 jsou v požadavcích na bitový tok poměrně podobné. Co je však dále vidět, a mohli jsme to vidět už na předchozím obrázku, je fakt, že u in1 jsou soubory nejobjemnější při užití iCAM06 TMO a nejméně objemné při užití Drago TMO. Naopak u in4 jsou při užití Drago TMO nejvíce objemné oproti situaci při užití ostatních TMO. Je zde tedy vidět zajímavá závislost velikosti souboru na užitém TMO a obsahu obrázku. Pro některé obrazové soubory dosáhneme nejmenší velikosti s určitým TMO, se kterým u jiných souborů dosáhneme naopak nejvyšší možné velikosti při jinak stejném nastavení.



Obr. 35: N LDR JPEG oproti JPEG XT – bitový tok v závislosti na Q – tři profily in3, N = 3, žádný externí TMO, JPEG q = 75, všechny profily (otevřená smyčka ol, q= 75, různé Q, r, h)

Na obrázku Obr. 35 můžeme pozorovat závislost bitového toku JPEG XT kódovaného souboru na hodnotě parametru Q a použitým profilu při $q = 75$. Je pracováno se souborem in3. LDR verze získaná mapováním tónů nebyla na vstup poslána. Pro získání základní vrstvy bylo využito algoritmu zabudovaného v referenčním softwaru. Je vidět, bitový tok u profilu C se při tomto scénáři v závislosti na Q téměř nemění. To je způsobeno užitým, pro tento profil zřejmě nepříliš vhodným, nastavením kodéru. Profily A a B se chovají do určité míry obdobně. Je vidět, že objem dat u profilu A roste pro vysoké Q velmi rychle. Zároveň je zde provedeno srovnání JPEG XT oproti N LDR JPEG. Je vynesena křivka pro $N = 3$, JPEG $q = 75$. Přibližně do hodnoty $Q = 75$ mají všechny JPEG XT kódované nižší bitový tok než LDR JPEG série. Opět je třeba zdůraznit, že tyto výsledky a závěry platí jen pro uvedené nastavení kodéru.

7.2.7 JPEG XT dekódování

Jakmile máme JPEG XT kódované soubory a chceme zkoumat vliv komprese na kvalitu HDR souboru, musíme tyto soubory dekódovat. Pro realizaci dekódování jsem napsal skript *JPEG_XT_zpetne_dekodovani.m*. Jeho obsah a možnosti jsou velmi podobnému skriptu napsanému pro realizaci kódování, jen provádíme inverzní operaci. Opět není nutné pracovat přímo s příkazovou řádkou. Můžeme pracovat v MATLAB s více soubory najednou a poměrně snadno měnit různá nastavení.

7.2.8 Vliv JPEG XT komprese na kvalitu obrazu, hodnocení z hlediska kvality obrazu

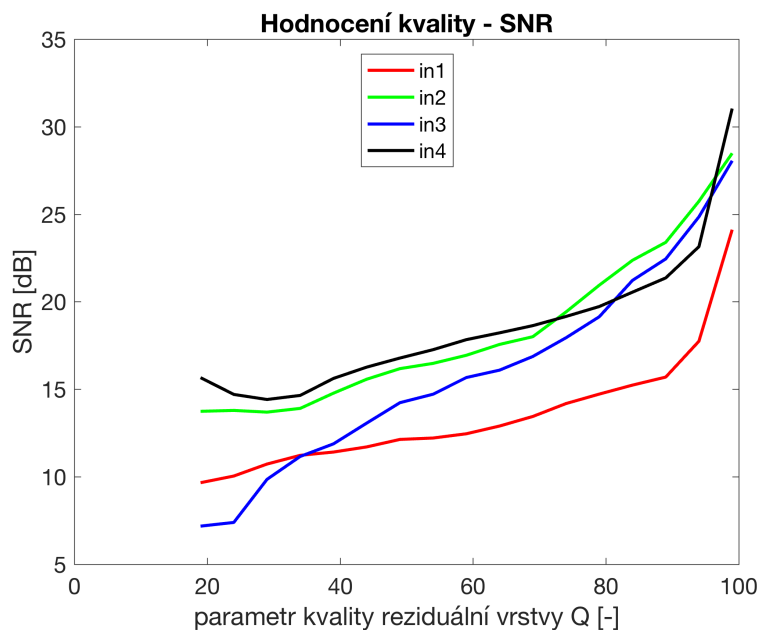
Jelikož lze JPEG XT kompresi užívat ve ztrátovém módu, je vhodné analyzovat vliv této komprese na kvalitu obrazu při různém nastavení kodéru. Vyhodnocení bylo provedeno prostřednictvím metod pro objektivní hodnocení kvality obrazu – SNR, MSE. Původně jsem zamýšlel využít ještě HDR-VDP-2, ale vzhledem k výpočetní náročnosti a nedostatku času jsem se rozhodl zpracovat raději větší množství dat méně náročnými metrikami.

Jelikož je zde mnoho stupňů volnosti, jaké vlivy, kterých nastavení lze zkoumat, je dobré si vytyčit jen některé zajímavé. Shrňme si zkoumané ovlivňující faktory v následujících bodech:

- vliv vstupního obrazového souboru – čtyři různé vstupní soubory
- vliv volby TMO operátoru – tři různé TMO operátory
- vliv nastavení parametrů JPEG XT – zajímavé hlavně Q , případně q, rR
- vliv volby použitého profilu – profily A, B, C

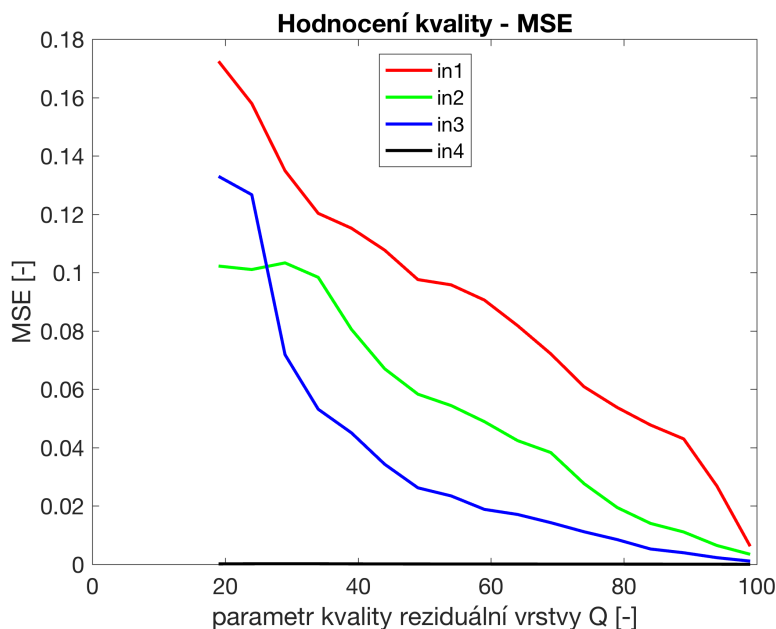
Pro realizaci objektivního hodnocení kvality obrazu jsem napsal nejprve skript *objektivni_hodnoceni_kvality_velke_Q.m*. Z tohoto skriptu vycházel i mnohé další používané vyhodnocovací skripty. Na hodnocení v závislosti na parametru kvality reziduální vrstvy Q jsem se zaměřil vzhledem k jeho zajímavosti. Je to parametr nejvíce ovlivňující kvalitu HDR části obrazu. Malé q je výrazně méně zajímavé vzhledem k tomu, že se v případě základní vrstvy jedná o obdobu klasické JPEG komprese známé již mnoho let. Vliv malého q byl naznačen již v minulé kapitole a není v této praktické části dále zkoumán. Volbu vstupních obrazových snímků a použitých TMO jsem komentoval v pododdílech 7.2.1 a 7.2.4.

JPEG XT kodér lze ovlivnit i dalšími možnými nastaveními, avšak rozhodl jsem se zabývat se v této práci zejména zmíněnými faktory pro udržení rozumné přehlednosti. Výsledky provedených testů vystihují nejlépe následující obrázky a grafy. Opět je zde uvedeno jen několik vybraných. Další je možné snadno získat prostřednictvím napsaných skriptů.



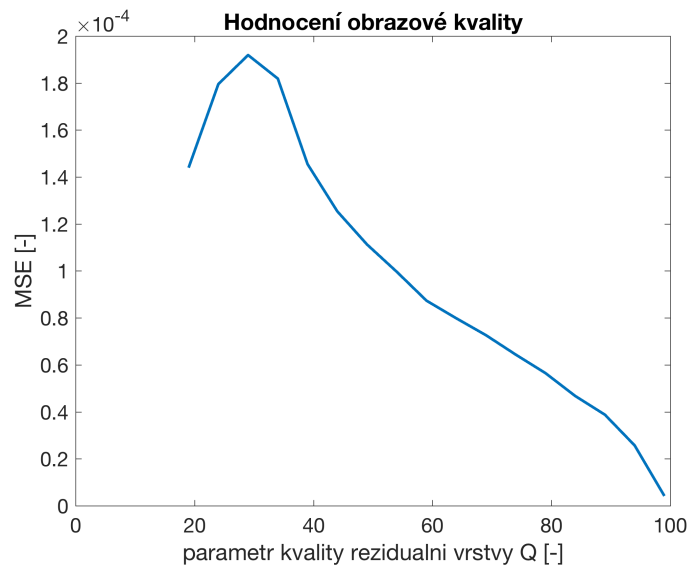
Obr. 36: N LDR JPEG + JPEG XT – SNR v závislosti na Q – čtyři soubory všechny soubory, Drago TMO, $N = 3$, JPEG $q = 75$, profil C ($q = 75$, různé Q , r, h)

Na obrázku Obr. 36 jsou vyneseny závislosti pro scénář N LDR JPEG + JPEG XT. Na vstupu JPEG XT kodéru je využit HDR snímek složený ze série N LDR JPEG snímků. Z grafu je vidět, jakým způsobem roste kvalita obrazu v závislosti na parametru kvality reziduální vrstvy Q . Závislost je vynesena pro všechny čtyři vstupní soubory, takže můžeme pozorovat i závislost na obsahu scény. Pro in3 roste kvalita zpočátku s rostoucím Q rychleji u ostatních obrázků. U těch je však vidět výrazně rychlejší růst kvality při velmi vysokých hodnotách Q , přibližně pro $Q = 90$ a více.



Obr. 37: N LDR JPEG + JPEG XT – MSE v závislosti na Q – čtyři soubory všechny soubory, Drago TMO, $N = 3$, JPEG $q = 75$, profil C ($q = 75$, různé Q , r, h)

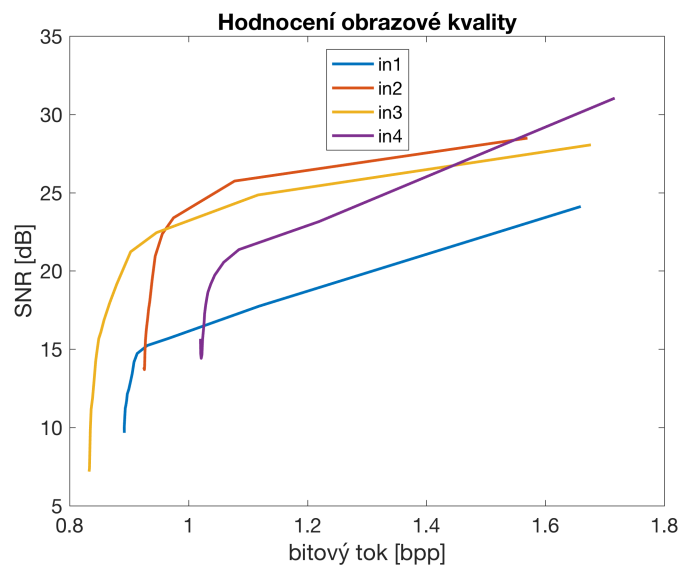
I u výsledků prezentovaných na obrázku Obr. 37 bylo využito scénáře N LDR JPEG + + JPEG XT. U MSE sledujeme, stejně jako u SNR, že kvalita s rostoucím Q roste. Co je však zajímavé, je případ souboru in4. Hodnoty MSE jsou v jeho případě tak malé, že se z tohoto obrázku zdají jako nulové. Při pohledu na konkrétní hodnoty však nulové nejsou, pouze výrazně menší než u ostatních vstupních souborů. Pro názornost následuje vynesení této závislosti pouze pro in4. Můžeme ji vidět na obrázku Obr. 38. Zřejmě se jedná o projev vlastnosti MSE zmiňované v kapitole pět této práce. Velikost MSE silně závisí na rozsahu hodnot v konkrétním obrazovém souboru. Při normování hodnot v obrazové matici na rozsah 0 až 1 dostaneme jiné hodnoty MSE než při rozsahu 0 až 256 nebo jakémkoliv jiném.



Obr. 38: N LDR JPEG + JPEG XT – MSE v závislosti na Q – in4
in4, Drago TMO, $N = 3$, JPEG $q = 75$, profil C ($q = 75$, různé Q , r , h)

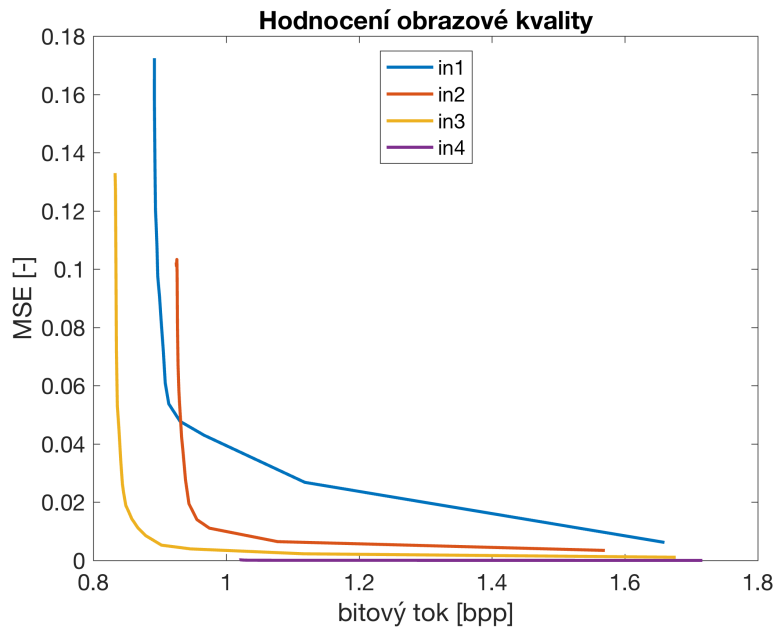
Je vidět, že trend je u in4 v zásadě podobný jako u ostatních souborů, jen jsou hodnoty celkově výrazně nižší. Kromě toho je u této křivky vidět zajímavé zakolísání na počátku.

Závislost na Q je jistě zajímavá, pro většinu uživatelů však bude zajímavější závislost kvality na bitovém toku, která vypovídá o náročnosti na paměťové médium. Následuje tedy vynesení obdobných závislostí s ohledem na velikost bitového toku kódovaného souboru.



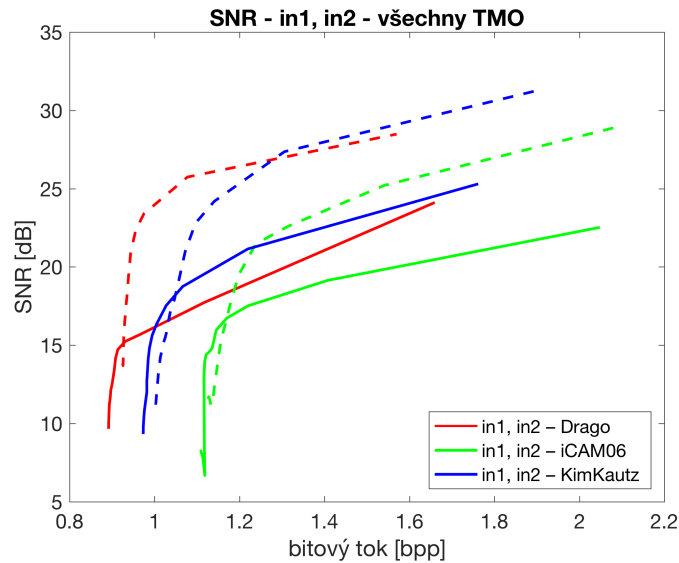
Obr. 39: N LDR JPEG + JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – čtyři soubory
všechny soubory, Drago TMO, $N = 3$, JPEG $q = 75$, profil C ($q = 75$, různé Q , r , h)

Při získávání výsledků prezentovaných na obrázku Obr. 39 bylo opět využito scénáře N LDR JPEG + JPEG XT. Jednotlivé křivky pro různé vstupní soubory mají podobný tvar, avšak jsou výrazně posunuté, to ukazuje na obsahovou závislost. Který vstup je pro určitou kvalitu nejnáročnější a nejméně náročný z hlediska bitového toku, záleží na konkrétní hodnotě SNR. Mění se to. Obecně je vidět, že zpočátku pro nízké bitové toky, typicky kolem 0,9 bpp, roste kvalita s rostoucím bitovým tokem poměrně rychle. Od určitého bitového toku, v tomto případě kolem 1 bpp, se růst kvality s rostoucím bitovým tokem výrazně zpomalí. Tyto výsledky a učiněné závěry platí pro naše čtyři vstupy v dané situaci pro $N = 3$, $q = 75$ a Drago TMO.



Obr. 40: N LDR JPEG + JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – čtyři soubory všechny soubory, Drago TMO, $N = 3$, JPEG $q = 75$, profil C ($q = 75$, různé Q , r , h)

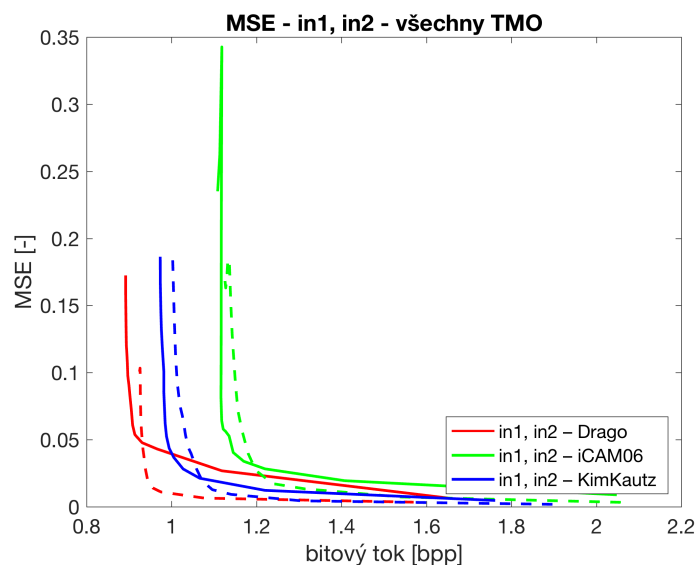
Na obrázku Obr. 40 máme situaci obdobnou té předchozí, jen namísto metriky SNR bylo využito metriky MSE, scénář opět N LDR JPEG + JPEG XT. Při užití MSE jako měřítka kvality obrazu vidíme zpočátku strmě rostoucí kvalitu se zvyšujícím se bitovým tokem. Následně však dojde ke skokovému zpomalení růstu kvality při zvyšování hodnoty bitového toku, typicky se tak stane ještě pod hodnotou bitového toku 1 bpp. Je to tedy obdobné jako při užití SNR. Opět zde můžeme pozorovat již komentovaný problém metriky MSE. Při různém rozsahu hodnot v obrázku, různém normování, dostáváme odlišné hodnoty MSE.



Obr. 41: N LDR JPEG + JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – dva soubory, tři TMO
 plná čára odpovídá in1, přerušovaná in2
 in1, in2, různé TMO, N=3, JPEG q = 75, profil C (q = 75, různé Q, r, h)

Na tomto grafu na obrázku Obr. 41 můžeme pozorovat, jak závisí obrazová kvalita hodnocená prostřednictvím SNR na bitovém toku při užití různých TMO, různých souborů a scénáři N LDR JPEG + JPEG XT. Pro složení HDR obrazového souboru byly využity 3 LDR scény s různým expozičním časem. Kvalita základní vrstvy byla nastavena na hodnotu $q = 75$. Byl využit JPEG XT profil C s parametry uvedenými v popisu obrázku. Plná čára vždy odpovídá souboru in1, přerušovaná odpovídá souboru in2.

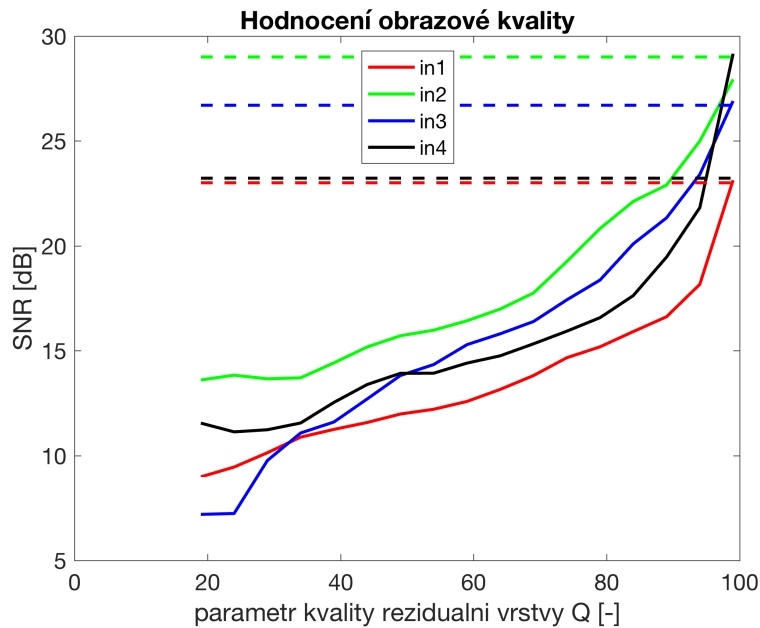
Je zde vidět silná obsahová závislost. In1 má na vyšších hodnotách bitové toku vždy výrazně nižší kvalitu než in2. Na nízkých hodnotách bitového toku je rozdíl v kvalitě mezi soubory menší. Zároveň je vidět vliv použitého TMO. Nejhorší kvality podle hodnoty SNR dosahujeme vždy u iCAM06 TMO. Navíc při nízkém Q (počátky křivek) vyžaduje jeho užití výrazně vyšší hodnoty bitového toku než ostatní TMO. U všech křivek bylo pracováno s Q od 19 do 99 s krokem 5. Pro nízké hodnoty bitového toku je výhodný Drago TMO, pro vyšší hodnoty KimKautz TMO.



Obr. 42: N LDR JPEG + JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – dva soubory, tři TMO
 plná čára odpovídá in1, přerušovaná in2
 in1, in2, různé TMO, N = 3, JPEG q = 75, profil C (q = 75, různé Q, r, h)

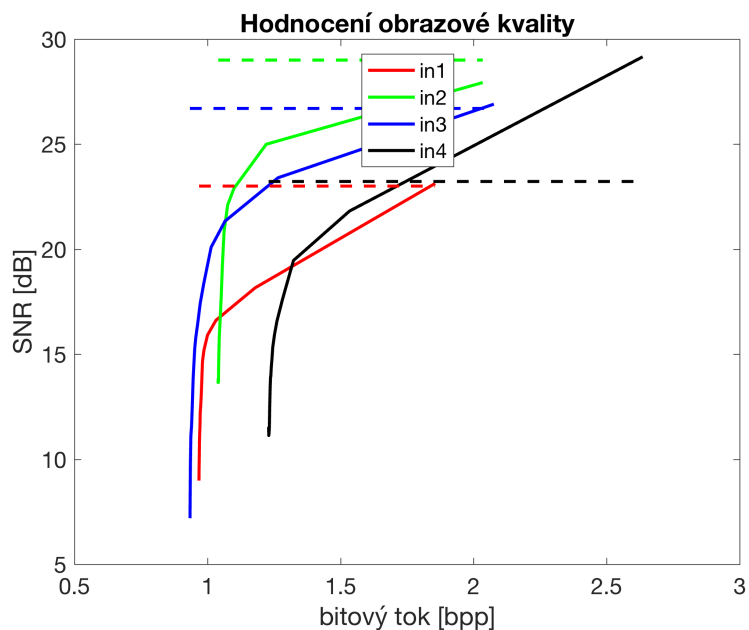
Obrázek Obr. 42 pracuje se stejnými daty jako Obr. 41. Liší se ve využití metrice pro objektivní hodnocení kvality obrazu. Tentokrát bylo využito MSE. Pro vyšší bitové toky se jednotlivé TMO jeví podobně kvalitně. Stejná hodnota parametru Q však přináší při užití různých TMO výrazně odlišný bitový tok. Je to dobře vidět hlavně na nízkých hodnotách bitového toku. Drago TMO dosahuje při stejném Q nejnižšího bitového toku, iCAM06 nejvyššího, KimKautz se nachází někdy mezi. Zároveň Drago TMO dosahuje velmi nízké chyby MSE už při výrazně nižších hodnotách bitového toku než při užití iCAM06 TMO. KimKautz se opět pohybuje mezi ostatními dvěma.

Nyní se dostáváme ke srovnání využití uložení N LDR JPEG souborů oproti JPEG XT souboru vzniklému ze série N LDR nekomprimovaných snímků.



Obr. 43: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na Q – čtyři soubory
 plná čára odpovídá JPEG XT, přerušovaná sérii N LDR JPEG snímků
 všechny soubory, Drago TMO, $N = 3$, JPEG $q = 75$, profil C ($q = 75$, různé Q , r , h)

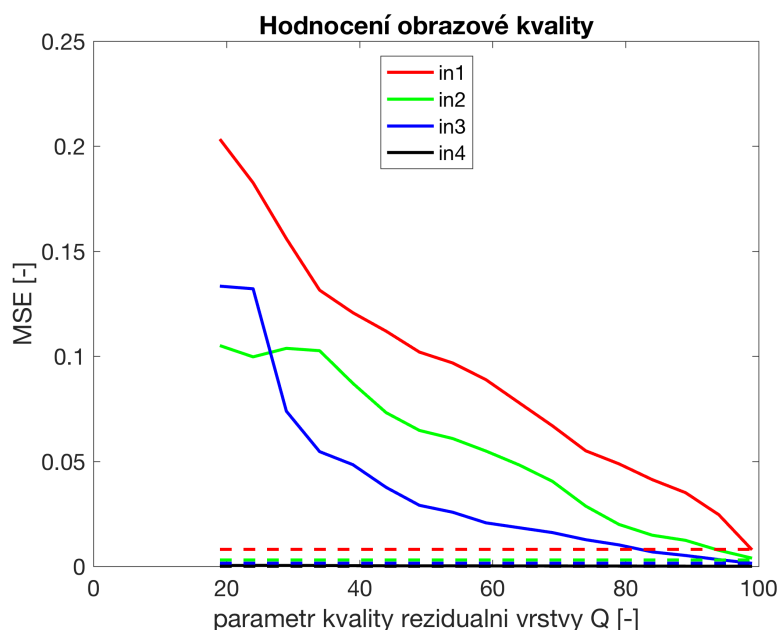
Na obrázku Obr. 43 vidíme hodnocení obrazové kvality prostřednictvím SNR v závislosti na hodnotě parametru Q . Je vidět, že lepší kvality dosahujeme převážně při využití varianty N LDR JPEG snímků. Kvalita se vyrovnává až při velmi vysokém Q . Je však třeba říct, že až při velmi vysokém Q se srovná také bitový tok porovnávaných možností. Pro nízké hodnoty Q má JPEG XT kódovaný soubor výrazně nižší požadavky na paměťové médium. Je také třeba podotknout, že uvedené výsledky platí pro dané nastavení JPEG XT kodéru. S jiným nastavením parametrů lze dosáhnout odlišných výsledků. Dále je řešena obdobná situace s využitím parametru $-rR$ 4. Kvalita JPEG XT kódovaného souboru se díky tomu výrazně zvýší a lze dojít k odlišným závěrům. U všech grafických výsledků v celé práci je třeba sledovat, jaké bylo aktuální nastavení kodéru. Vždy je uvedeno v popisu pod obrázkem.



Obr. 44: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – čtyři soubory
 plná čára odpovídá JPEG XT, přerušovaná sérii N LDR JPEG snímků
 všechny soubory, Drago TMO, N = 3, JPEG q = 75, profil C (q = 75, různé Q, r, h)

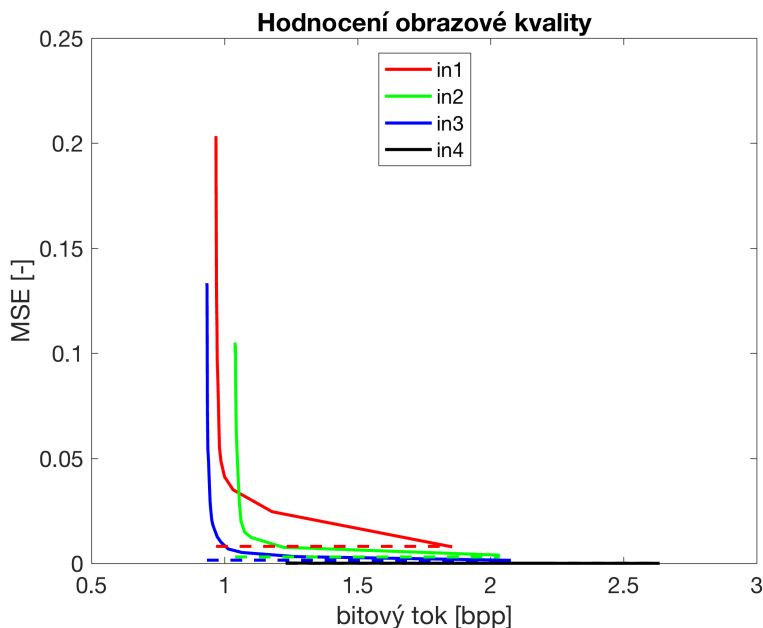
Obrázek Obr. 44 charakterizuje situaci obdobnou té předchozí, avšak máme zde závislost na bitovém toku namísto parametru Q . Opět je vidět, že převážně dosahujeme lepší kvality při využití N LDR JPEG. Je třeba říct a zároveň zdůraznit, že závislost na bitovém toku platí pouze pro JPEG XT kódované soubory. N LDR JPEG série mají v tomto případě konstantní hodnotu bitového toku, a to přibližně odpovídající té maximální u JPEG XT kódovaného souboru. V tomto ohledu je tato grafika na první pohled zavádějící.

Nyní následují další dvě obdobné charakteristiky jako ty právě vynesené. Namísto SNR je však užito metriky MSE.



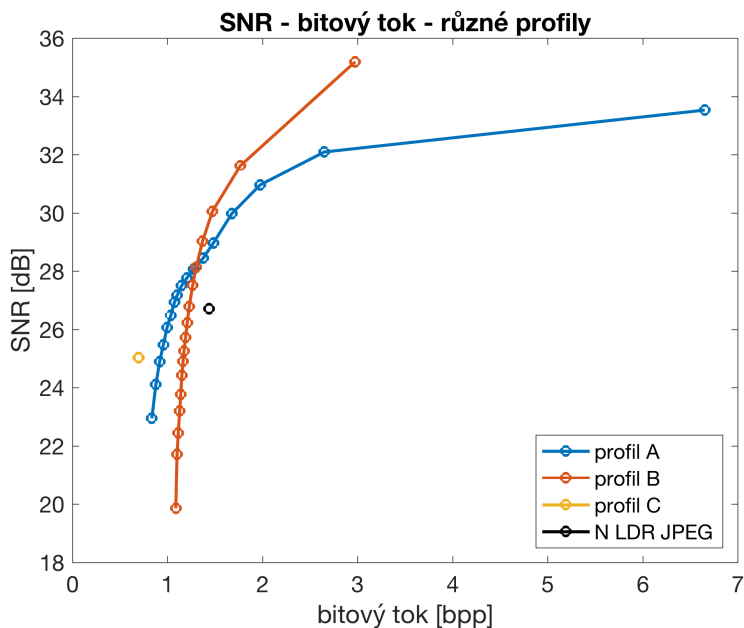
Obr. 45: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na Q – čtyři soubory
 plná čára odpovídá JPEG XT, přerušovaná sérii N LDR JPEG snímků
 všechny soubory, Drago TMO, N = 3, JPEG q = 75, profil C (q = 75, různé Q, r, h)

Závěry z křivek na obrázku Obr. 45 lze udělat obdobné jako při užití SNR. U in4 je MSE výrazně nižších hodnot než u ostatních vstupních obrázků, a proto zde není v podstatě vidět. Je to již několikrát zmiňovanou vlastností MSE popsanou také v teoretickém pododdíle 5.2.



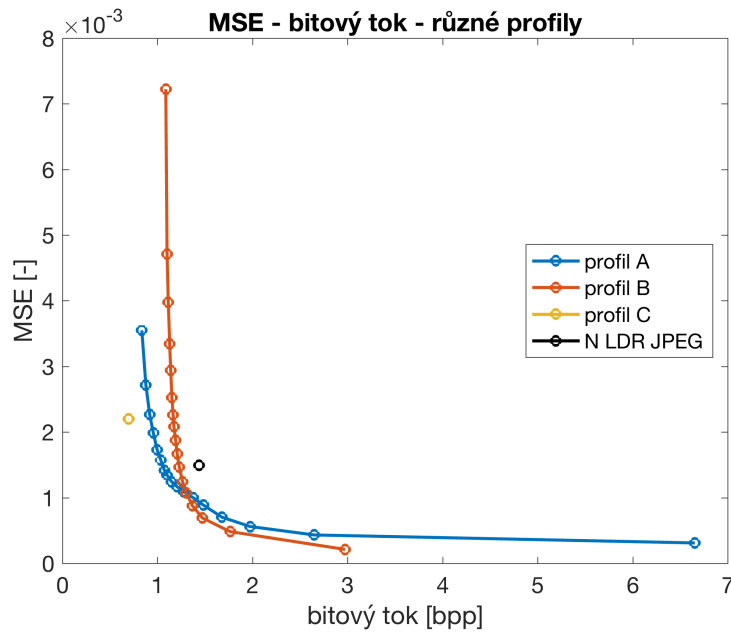
Obr. 46: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – čtyři soubory
 plná čára odpovídá JPEG XT, přerušovaná sérii N LDR JPEG snímků
 všechny soubory, Drago TMO, N = 3, JPEG q = 75, profil C (q = 75, různé Q, r, h)

I z obrázku Obr. 46 lze učinit obdobné závěry jako při užití SNR. Platí také komentář ohledně in4 uvedený u předchozího obrázku Obr. 45.



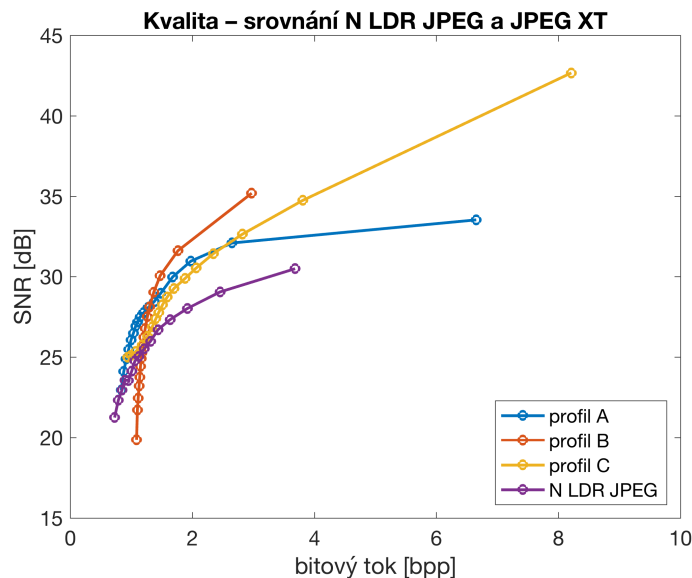
Obr. 47: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – tři profily
 in3, žádný externí TMO, N = 3, JPEG q = 75, všechny profily (q = 75, různé Q, r, h, otevřená smyčka ol)

Na obrázku Obr. 47 můžeme pozorovat závislost kvality JPEG XT kódovaného souboru v závislosti na hodnotě bitového toku a použitém profilu. Jedná se o srovnání profilů A, B, C. Výstupy při použití profilu C a daného nastavení kodéru mají téměř konstantní hodnotu bitového toku i hodnocení kvality, a proto nejsou v podstatě vidět. Zřejmě se jedná o nepřilíš vhodné nastavení kodéru pro profil C. Dále je řešena situace s odlišným, vhodnějším, nastavením pro profil C. Je vidět, že pro nízké hodnoty bitového toku je nejvýhodnější profil A. Pro vyšší hodnoty bitového toku je výhodnější profil B. Je zde také provedeno srovnání se situací, kdy využíváme N LDR JPEG snímků. Kvalita výstupu složeného z N LDR JPEG snímků je vynesena jako jediný bod, na bitovém toku za dané situace nezávisí, byla užitá jen jedna hodnota JPEG q . Co se parametrů týče, bylo využito $N = 3$, JPEG $q = 75$, JPEGXT $q = 75$, různé Q , žádný externí TMO (Myšleno tak, že nebyl dodán vlastní LDR vstupní soubor. Základní LDR vrstva byla vytvořena prostřednictvím výchozího TMO, který je součástí referenčního softwaru. Toto platí i ve zbytku celé práce.), profily A, B, C a kódování s otevřenou smyčkou. Jako vstupní soubor byl použit pouze in3. Konkrétní vypočtené hodnoty jsou označeny prostřednictvím markerů. Odpovídají hodnotám Q od 19 do 99 s krokem 5.



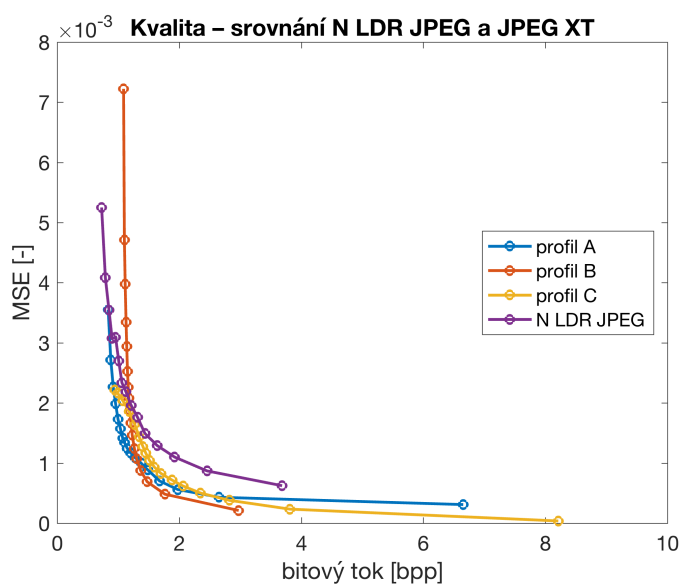
Obr. 48: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – tři profily in3, žádný externí TMO, $N = 3$, JPEG $q = 75$, všechny profily ($q = 75$, různé Q , r, h, otevřená smyčka ol)

Obrázek Obr. 48 popisuje stejnou situaci jako předchozí grafika Obr. 47, jen namísto SNR využívá metriky MSE. Závěry lze učinit naprosto analogické.



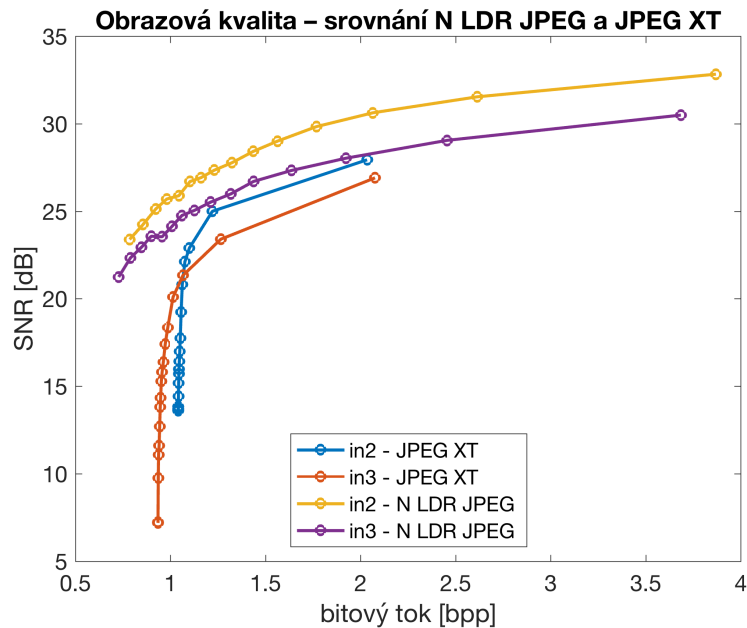
Obr. 49: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – tři profily, rR 4 in3, žádný externí TMO, N = 3, různé JPEG q (25 až 95 s krokem 5), všechny profily (otevřená smyčka ol u A a B, rR 4 u C, společné r, h, q = 75, různé Q)

Na obrázku Obr. 49 máme zdokumentovanou obdobnou situaci jako na obrázku Obr. 47, avšak s tím rozdílem, že u kódování s profilem C nebylo využito otevřené smyčky a byl přidán parametr $-rR$ 4 (residual refinement scan). Na výsledky kódování s profilem C to má výrazný vliv, jak je vidět. Demonstruje to citlivost kódování na změnu parametrů. Toto nastavení kodéru je zřejmě vhodnější než dříve užívaná varianta. Při tomto nastavení se při různých bitových tocích mění situace, který profil je zrovna nejvýhodnější. Pro nízké hodnoty bitového toku je nejvýhodnější profil A, pro střední profil B a pro vysoké profil C. Zároveň je zde provedeno srovnání se situací využívající N LDR JPEG snímků. Bitový tok série je ovlivňován změnou parametru q JPEG komprese LDR snímků. Obecně se JPEG XT jeví jako výhodnější varianta. Využití LDR JPEG série je vhodné jen pro situace, kdy klademe důraz na co nejnižší bitový tok. Pro úsporná řešení, z hlediska objemu dat, se může vyplatit zvolit tuto variantu. Pokud je naší prioritou co nejvyšší kvalita obrazu, dosáhneme nejlepších výsledků kódováním s profilem C při nastavení uvedeném v popisu obrázku.



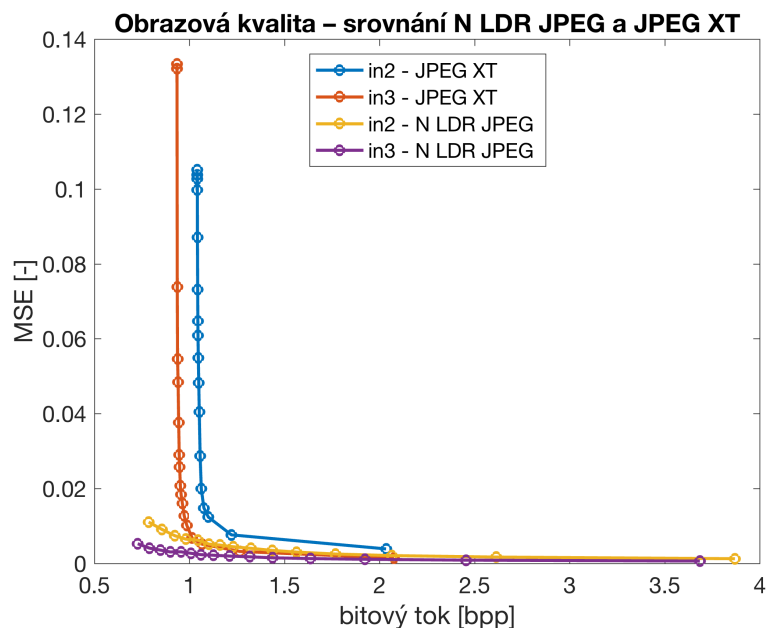
Obr. 50: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – tři profily, rR 4 in3, žádný externí TMO, N = 3, různé JPEG q (25 až 95 s krokem 5), všechny profily (otevřená smyčka ol u A a B, rR 4 u C, společné r, h, q = 75, různé Q)

Obrázek Obr. 50 dokumentuje shodnou situaci jako předchozí obrázek Obr. 49, jen je namísto SNR, využito metriky MSE. Závěry lze učinit naprosto analogické



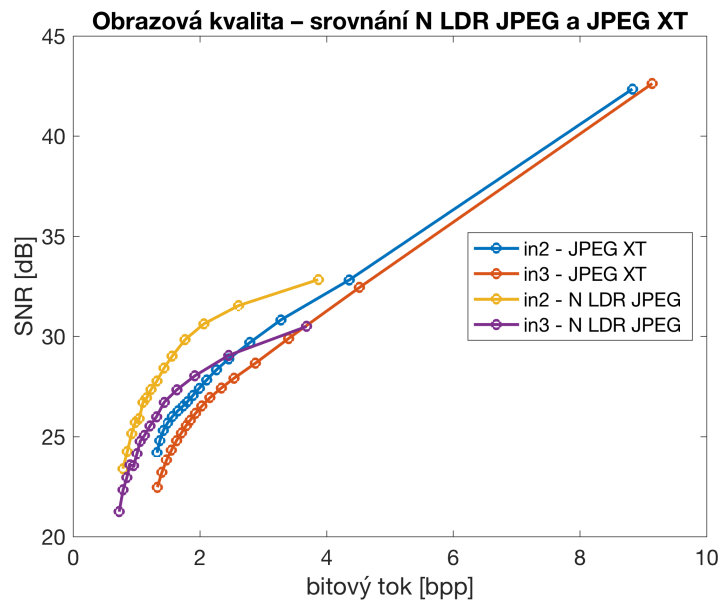
Obr. 51: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – dva soubory in2, in3, Drago TMO, $N = 3$, různé JPEG q (25 až 95 s krokem 5), profil C ($q = 75$, různé Q, r, h)

Na obrázku Obr. 51 se nachází srovnání využití N LDR JPEG a JPEG XT. Je hodnocena kvalita obrazu v závislosti na bitovém toku pro dva různé vstupní soubory. U N LDR JPEG byl bitový tok ovlivňován stupněm JPEG komprese LDR snímků v sérii, ze které byl následně složen HDR snímek. Parametr kvality byl postupně měněn od hodnoty 25 po hodnotu 95 s krokem 5. U JPEG XT byl bitový tok ovlivňován hodnotou parametru Q . Jeho hodnota byla zvyšována z 19 na 99 s krokem 5. Bylo využito Drago TMO, $N = 3$, profil C s uvedeným nastavením, zdrojové soubory in2 a in3. Z tohoto srovnání se jeví jako výhodnější volba varianta N LDR JPEG snímků. Výsledky a závěry platí pouze pro uvedené nastavení kodéru. Markery označují vypočtené hodnoty.



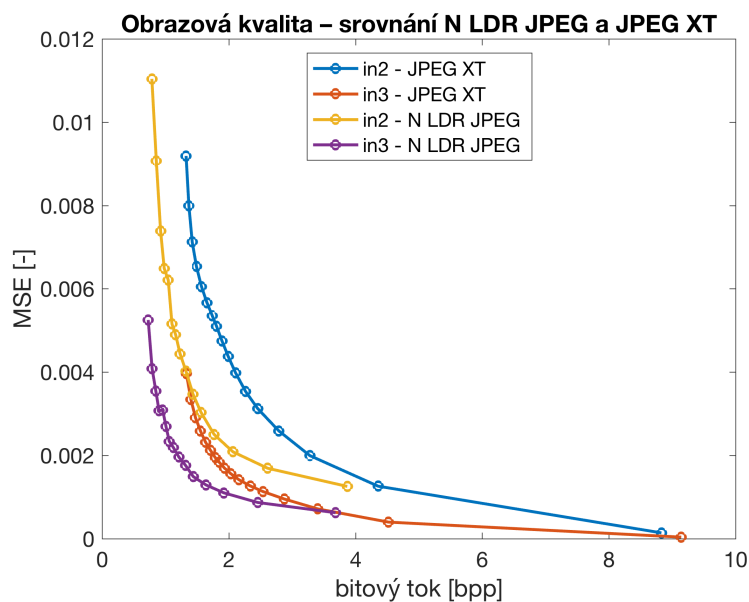
Obr. 52: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – dva soubory in2, in3, Drago TMO, $N = 3$, různé JPEG q (25 až 95 s krokem 5), profil C ($q = 75$, různé Q, r, h)

Na obrázku Obr. 52 nalezneme obdobné srovnání jako na předchozí grafice Obr. 51. Jedná se o popis stejné situace, jen bylo využito MSE namísto SNR. Vyvoditelné závěry jsou analogické.



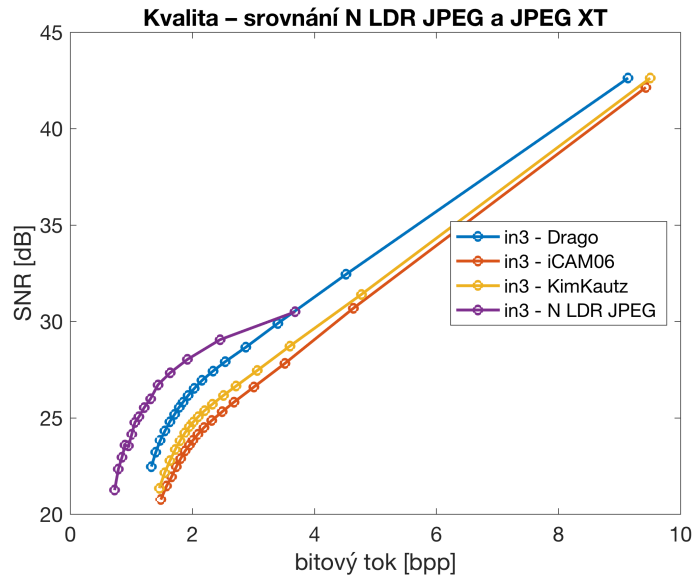
Obr. 53: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – dva soubory, rR 4 in2, in3, Drago TMO, N = 3, různé JPEG q (25 až 95 s krokem 5), profil C (q = 75, různé Q, r, h, rR 4)

Na obrázku Obr. 53 je zachycena obdobná situace jako na předchozích dvou obrázcích Obr. 51 a Obr. 52. Tentokrát je ovšem kódováno s parametrem *-rR 4* (residual refinement scan). Lze pozorovat, jak silný vliv na JPEG XT kódování v profilu C má. Jeho užití o něco zvyšuje bitový tok kódovaných souborů, ale co je hlavní, výrazně zvyšuje kvalitu. Je vidět, že takto můžeme s JPEG XT dosahovat mnohem lepší kvality než s LDR JPEG sérií. Pro nízké bitové toky je výhodnější užití variantu N LDR JPEG snímků. Pokud však klademe důraz na vysokou obrazovou kvalitu, je vhodné využít JPEG XT profil C s nastavením uvedeným v popisu obrázku. Zároveň je zde demonstrována obsahová závislost. In2 dosahuje lepšího hodnocení kvality než in3 při shodné hodnotě bitového toku.



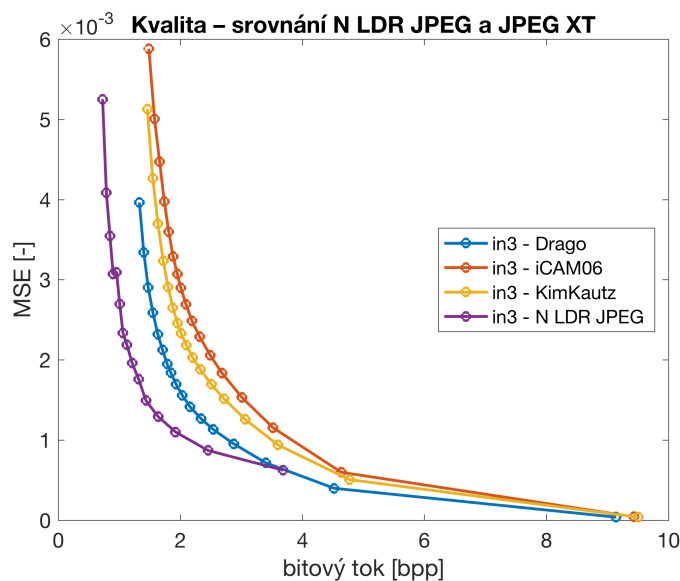
Obr. 54: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – dva soubory, rR 4 in2, in3, Drago TMO, N = 3, různé JPEG q (25 až 95 s krokem 5), profil C (q = 75, různé Q, r, h, rR 4)

Na obrázku Obr. 54 můžeme pozorovat zhodnocení stejné situace jako na předchozím obrázku Obr. 53. Namísto SNR je však využito MSE. Vyvoditelné závěry jsou v zásadě obdobné. Je zde opět vidět vliv již několikrát diskutované vlastnosti MSE popisované i v teoretickém pododdílu 5.2. In3 díky tomu dosahuje lepšího hodnocení kvality než in2 při shodné hodnotě bitového toku.



Obr. 55: N LDR JPEG oproti JPEG XT – SNR v závislosti na bitovém toku – tři TMO, rR 4 in3, různé TMO, N = 3, různé JPEG q (25 až 95 s krokem 5), profil C (q = 75, různé Q, r, h, rR 4)

Na obrázku Obr. 55 můžeme opět pozorovat srovnání využití N LDR JPEG a JPEG XT profil C při využití parametru $-rR 4$ (residual refinement scan). Opět je vidět velký vliv tohoto parametru na kvalitu kódování profilu C. Tentokrát bylo využito různých TMO. Z vynesných závislostí lze říct, že pro nízké hodnoty bitového toku se vyplatí využít N LDR JPEG série. Pokud vyžadujeme co nejvyšší kvalitu, a nevadí nám vysoká hodnota bitového toku, lepších výsledků dosáhneme s JPEG XT a uvedeným nastavením. Můžeme vidět, že v této situaci se z užitých TMO vyplatí nejvíce Drago. Při dané úrovni bitového toku dosahuje nejlepší kvality. Nejhůře se jeví iCAM06.



Obr. 56: N LDR JPEG oproti JPEG XT – MSE v závislosti na bitovém toku – tři TMO, rR 4 in3, různé TMO, N = 3, různé JPEG q (25 až 95 s krokem 5), profil C (q = 75, různé Q, r, h, rR 4)

Na obrázku Obr. 56 můžeme pozorovat stejnou situaci jako na předchozím obrázku Obr. 55. Namísto SNR je však využito MSE. Vyvoditelné závěry jsou v zásadě stejné. Pro nízké hodnoty bitového toku je výhodnější využít LDR JPEG série. Pro dosažení co nejvyšší kvality je výhodnější JPEG XT s nastavením kodéru uvedeným v popisu pod obrázkem. Nejlepších výsledků opět dosahujeme s využitím Drago TMO, nejhorších s iCAM06.

7.2.9 Dosažené výsledky

V tomto pododdíle jsou stručně shrnuty výsledky prezentované v předchozích pododdílech graficky s doprovodnými komentáři. V provedených hodnoceních byly užívány dva různé scénáře.

N LDR JPEG + JPEG XT reprezentoval situaci, kdy nasnímáme N LDR snímků, na ty aplikujeme JPEG kompresi, složíme HDR obrazový soubor a ten komprimujeme JPEG XT kodérem. Při hodnocení kvality byl v tomto scénáři referencí HDR snímek zrekonstruovaný ze série N LDR JPEG snímků.

V druhém případě, v situaci označované N LDR JPEG oproti JPEG XT, srovnáváme situace, kdy HDR snímek složíme z N LDR JPEG snímků s alternativní možností, kdy HDR snímek složíme z N LDR nekomprimovaných snímků a na tento HDR obrazový soubor aplikujeme JPEG XT kompresi. U tohoto scénáře byl při hodnocení kvality obrazu referencí HDR obrazový soubor složený z N LDR nekomprimovaných snímků.

Pro podrobné výsledky doporučuji prostudovat si závislosti vynesené v předchozích pododdílech. Obecně lze říct, že JPEG XT se jeví jako velmi dobře využitelný. Ve fotoaparátech či mobilních telefonech určitě může najít své místo. Zcela zásadní je však zvolit vhodné nastavení kodéru. Jak je vidět z dosažených výsledků, kvalita a bitový tok u profilu C velmi silně závisí na užitých parametrech. Důležitý je u tohoto profilu zejména parametr $-rR$ (residual refinement scan). Profil C je dobré zvolit v situacích, kdy klademe důraz na vysokou obrazovou kvalitu a nevadí nám vyšší hodnoty bitového toku. Pro nízké hodnoty bitového toku se jeví výhodněji profily A a B. Ani využití série N LDR JPEG snímků nelze považovat za vyložené špatnou možnost. Je to jednoduché řešení a při nevhodném nastavení JPEG XT kodéru může poskytovat lepší výsledky. Je rozumnou variantou také při požadavku na nízké hodnoty bitového toku. Pokud budou výrobci fotoaparátů nebo mobilních telefonů chtít využít JPEG XT ve svých zařízeních, volba vhodného profilu a jeho nastavení bude zcela zásadní.

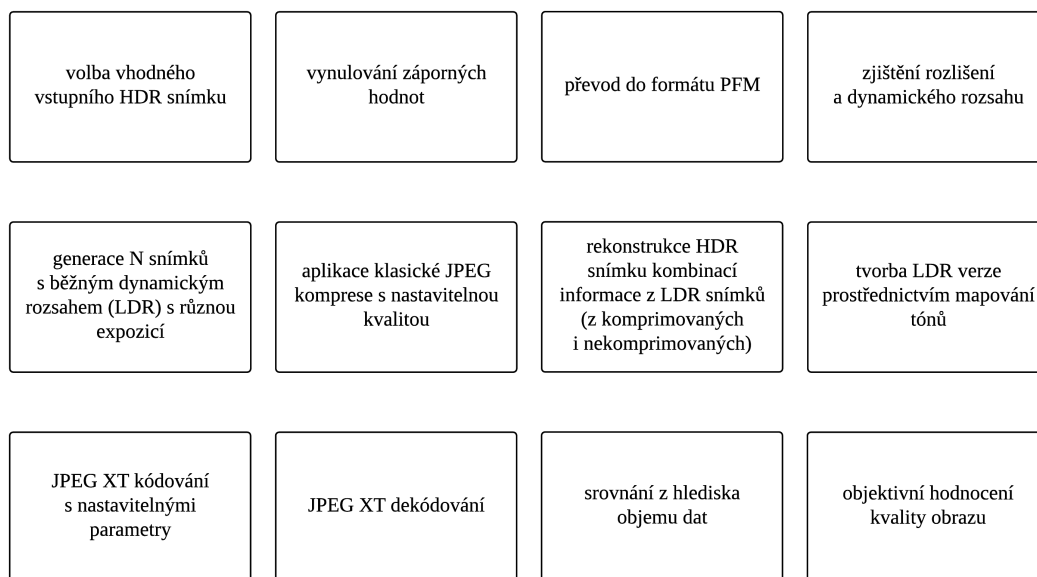
Zároveň lze na grafických výstupech dobře vidět obsahovou závislost JPEG XT kodéru či vliv volby TMO a obecné vlastnosti JPEG XT kódování.

7.2.10 Bodové shrnutí provedených úkonů

Tento pododdíl pouze stručně bodově a graficky shrnuje hlavní provedené činnosti v této praktické části práce.

- stažení HDR obrazových souborů z databází
- vynulování záporných hodnot
- převod do formátu PFM
- zjištění rozlišení, dynamického rozsahu, objemu dat, bitového toku
- rozklad na sérii LDR snímků
- JPEG komprese
- generace HDR snímku, jednou ze série nekomprimovaných LDR souborů, jednou ze série JPEG komprimovaných LDR souborů
- získání LDR verze prostřednictvím mapování tónů
- JPEG XT kódování
- JPEG XT dekódování
- hodnocení z hlediska objemu dat
- hodnocení z hlediska kvality obrazu

Pro větší názornost jsem se rozhodl uvést to samé ještě v podobě bloků představujících provedené činnosti. Grafické vyjádření naleznete na obrázku Obr. 57.



Obr. 57: Činnosti provedené v hlavní praktické části práce

7.2.11 Přehled vlastních skriptů

Během psaní této práce jsem vytvořil několik matlabovských skriptů. Pro přehlednost uvádím v této kapitole seznam těch stěžejních pro realizaci praktické části této práce. Kromě uvedených kódů jsem realizoval ještě různá vyhodnocování, vykreslování, porovnávání, převody atp. Názvy skriptů jsou voleny tak, aby vystihovaly prováděné úkony. Podrobnější informace lze vyčíst ze skriptů samotných. Naleznete je na paměťovém médiu přiloženém k této práci. Na médiu naleznete i ukázky vyhodnocovacích skriptů. V seznamu jsou uvedeny také alternativní varianty názvů v angličtině a číselně označeny kapitoly vztahující se k daným skriptům.

- *prevod_EXR_na_PFM_nonnegative.m*
(*EXR_to_PFM_conversion_nonnegative.m*, pododdíl 7.2.2)
- *zjistení_dynamickeho_rozsahu_a_rozliseni.m*
(*dynamic_range_and_resolution_calculation.m*, pododdíl 7.2.2)
- *fotoaparát_JPEG_PNG_uniform_PFM_s_cyklem.m*
(*photocamera_simulation_JPEG_uniform_PFM_cycle.m*, pododdíl 7.2.3)
- *mapovani_tonu_a_ulozeni_PPM_Drago.m*
(*tonemapping_to_PPM_Drago.m*, pododdíl 7.2.4)
- *mapovani_tonu_a_ulozeni_PPM_iCAM06.m*
(*tonemapping_to_PPM_iCAM06.m*, pododdíl 7.2.4)
- *mapovani_tonu_a_ulozeni_PPM_Reinhard.m*
(*tonemapping_to_PPM_Reinhard.m*, pododdíl 7.2.4)
- *JPEG_XT_kodovani.m*
(*JPEG_XT_coding.m*, pododdíl 7.2.5)
- *JPEG_XT_zpetne_dekodovani.m*
(*JPEG_XT_decoding.m*, pododdíl 7.2.7)

8 Možná pokračování práce v budoucnu

Vzhledem k povaze této práce, se nabízí možnost neustálého vylepšování a dalšího rozvoje. Práce na takovémto tématu může být v podstatě nikdy nekončící a téměř vždy budu schopný přidávat další a další poznatky či rozšiřovat a zdokonalovat ty již dosažené. Pro lepší vypovídající hodnotu výsledků by se hodilo pracovat s větším množstvím co nejvíce různorodých vstupních obrazových souborů, ideálně bych si mohl vytvořit vlastní databázi. Různorodost spočívá v konkrétní podobě scény, dynamickém rozsahu, ale i rozlišení a způsobu vytvoření HDR obrazového souboru. Zkoumat by se dal i vliv kvality vstupu. Mohli bychom porovnávat chování pro různě zašuměné, rozmazané či jinak degradované vstupní HDR obrazové soubory. Zároveň by bylo dobré využít většího množství různých TMO operátorů, více různých N pro LDR série. Pro kompresi LDR snímků bychom mohli využít i jinou variantu než klasický JPEG. Místo TMO verze bychom jako LDR vstup JPEG XT kodéru mohli použít jeden ze snímků z generované LDR série, konkrétně ten se střední expozicí. Stupňů volnosti je jednoduše velmi mnoho a určitě je zde prostor pro další práci.

Z hlediska hodnocení kvality obrazu by bylo užitečné provést subjektivní testy. Pro jejich realizaci by bylo vhodné mít k dispozici kvalitní displej s podporou zobrazení HDR obrazového obsahu. Přece jen nás zajímá především využití technologie lidmi, a pro tento účel jsou výsledky subjektivního hodnocení více vypovídající než výstupy objektivního hodnocení kvality obrazu. Ovšem i z hlediska objektivního hodnocení kvality je stále co vylepšovat. Rozhodně by bylo vhodné využít většího počtu objektivních metrik a jejich výsledky dále analyzovat a porovnávat. Jednou z metrik by určitě měla být HDR-VDP-2. Pro realizaci rozsáhlejšího objektivního hodnocení kvality obrazu by bylo užitečné mít k dispozici výkonnou pracovní stanici.

Kromě srovnávání HDR verzí souborů bychom mohli porovnávat také jejich LDR verze získané mapováním tónů a opět sledovat i vliv užitého TMO.

Nabízí se také možnost blíže zkoumat vnitřní strukturu JPEG XT kódovaných souborů. Zajímavé by bylo zjistit, jaký je poměr velikostí LDR a HDR částí v kódovaném souboru v závislosti na různých faktorech.

V této práci byl využit pouze jeden referenční software ze stránek skupiny JPEG. Na webu jich je však volně k dispozici větší počet, jak se můžete dočíst v pododdílu 6.2. Nabízí se tedy možnost otestovat i další, následně analyzovat výsledky, porovnat je mezi sebou atp.

Během práce se také ukázalo, že Banterleho HDR Toolbox není bezchybný. Možná by stálo za úvahu naprogramovat si některé z užívaných specializovaných funkcí vlastními silami. Další možností je přenést se z MATLAB do jiného programovacího jazyka, například do C/C++. Výpočetní časy některých činností jsou poměrně dlouhé a realizace v C/C++ by pravděpodobně zrychlení přinesla.

Zajímavé bude také sledovat, jak se JPEG XT bude šířit mezi běžné uživatele, zda úspěšně či neúspěšně. Potenciál rozhodně má a určitě se objeví i další možné oblasti využití, které bude zajímavé dále prozkoumávat a testovat.

Na stránkách skupiny JPEG [17] lze narazit také na další právě vznikající standardy. Bylo by možné a zajímavé dále zkoumat právě je. Rozhodl jsem se uvést základní informace ke dvěma vybraným již v této práci. Jejich stručný popis je předmětem následujícího pododdílu.

8.1 Další nové standardy skupiny JPEG

V této podkapitole jsou nastíněny základy vybraných dalších nově vznikajících standardů skupiny JPEG. Konkrétně se jedná o JPEG XS a JPEG PLENO.

8.1.1 JPEG XS

Vzhledem k tomu, že proces standardizace JPEG XS je výrazně méně pokročilý než u standardu JPEG XT, je k němu v této práci uveden pouze stručný teoretický úvod. Čerpáno bylo ze stránek skupiny JPEG³³ [17].

V mnoha oblastech využití videa se dodnes přenáší a uchovává nekomprimovaný obraz. JPEG XS je nově vznikající standard, jehož cílem je umožnit v takovýchto aplikacích zvýšit rozlišení či snímkovou frekvenci při zachování šířky pásma, obrazové kvality a rozumné spotřebě energie.

Musí se tedy jednat o efektivní rychlou kompresi větších obrazových souborů s co nejlepším kompresním poměrem při zachování rozumné výpočetní náročnosti a složitosti. Tento standard chce dodržet celou řadu zásad, jmenujme alespoň následující:

- rychlé kódování i dekódování
- jednoduchá implementovatelnost
- využití co nejmenší šířky pásma
- zachování obrazové kvality
- nízká spotřeba energie.

8.1.2 JPEG Pleno

Proces standardizace JPEG Pleno je stejně jako u JPEG XS ve svých počátcích. Součástí této práce je tedy opět pouze stručný teoretický úvod k tomuto budoucímu standardu. Čerpáno bylo opět ze stránek skupiny JPEG³⁴ [17].

JPEG Pleno se zaměřuje na speciální nové druhy obrazových souborů jako jsou mračna bodů (point-cloud), světelná pole (light-field) nebo snímky z oblasti holografie (holographic imaging). Tento budoucí standard chce řešit nejen reprezentaci těchto obrazových dat, jejich kompresi, manipulaci s nimi, ale také třeba i otázky bezpečnosti kolem nich a další. Důležitý je i fakt, že JPEG Pleno by měl brát ohledy na starší standardy skupiny JPEG. Podrobnější informace jsou obsahem zbytku tohoto pododdílu.

Práce na tomto standardu je reakcí na nové možnosti dané technologickým pokrokem. Předpokládá se, že v blízké době budou obrazové senzory, a tedy jimi osazené fotoaparáty a kamery, schopné zaznamenávat větší množství informací. Jak se lze dočíst na zmíněných stránkách [17], kromě základní 2D obrazové informace, jak jsme zvyklí dnes, by měly umět zaznamenávat také hloubku (depth), čas, úhel či větší spektrální rozsah (multispectral/multichannel imaging). Zachycení širšího/rozsáhlejšího objemu obrazových dat přináší nové obrazové formáty. Právě mezi ně řadíme již jmenovaná mračna bodů, světelná pole a snímky z oblasti holografie.

Jak se lze dočíst v [17], mračna bodů jsou množiny bodů v určitém systému souřadnic. Typicky se dají využít k reprezentaci 3D ploch/těles. Využití lze najít například v oblastech virtuální reality.

Světelná pole zachycují informaci o množství světla v jednotlivých bodech prostoru, v různých směrech. Tato pole lze zachytit pomocí systému více fotoaparátů/kamer nebo prostřednictvím specializovaných zařízení.

Holografie je z těchto tří typů obrazových dat pro většinu lidí asi nejznámější. Řeší možnosti zachycení a reprodukce 3D scén.

Větší množství informací o scéně nám samozřejmě přináší širší možnosti manipulace s obrazem, dodatečné úpravy. V současné době můžeme při snímání nechtěně vytvořit různé artefakty či nepřesnosti. Pokud ale budeme mít k dispozici více informací o scéně, budeme mít možnost zobrazení scény dodatečně upravovat/korigovat.

³³ Hlavně ze stránky <https://jpeg.org/jpegxs/index.html>. Citováno 23. 12. 2016.

³⁴ Hlavně ze stránek https://jpeg.org/items/20150320_pleno_summary.html, https://jpeg.org/items/20160603_press.html a <https://jpeg.org/jpegpleno/index.html>. Citováno 23. 12. 2016.

Tyto nové formy obrazových dat samozřejmě nebude možné reprezentovat pomocí klasické 2D matice obrazových bodů (pixelů). Ideální by bylo vytvořit nový univerzální formát pro obrazová data těchto nových typů s určitou zpětnou kompatibilitou k dnešním obrazovým formátům jakým je například klasický JPEG. A právě toto vše by měl řešit nově vznikající JPEG Pleno. Čerpáno bylo z [17], konkrétně ze stránek dostupných přes odkazy uvedené v poznámce pod čarou na předchozí straně.

9 Závěrečné zhodnocení

V úvodní části této práce je čtenář nejprve seznámen se základy problematiky zpracování obrazu s vysokým dynamickým rozsahem (HDR images), následně s vybranými formáty pro uložení HDR obrazových souborů. V úvodní kapitole jsou popsány také vybrané metody a standardy pro jejich kompresi. Další kapitola je zaměřena na standard JPEG XT. Jejím obsahem je podrobný teoretický popis tohoto standardu. Následují oddíly věnované mapování tónů (tone mapping), expanzním operátorům, databázím HDR obrazových souborů a objektivnímu hodnocení kvality obrazu. Po nich přichází na řadu dvě prakticky orientované kapitoly.

První z nich je věnována úvodnímu seznámení s JPEG XT referenčním softwarem. Je rozebrána příprava vstupních obrazových souborů, dostupný software a způsob jeho kompilace. Následuje popis realizace kódování a dekódování s využitím tohoto softwaru. K dispozici je přehled vybraných parametrů kodéru. Mezi ty hlavní lze zařadit kvalitativní parametry q , Q , reziduální jemný sken rR či volbu profilu. Kvalitu kódovaného HDR obrazu významněji ovlivňuje parametr velké Q , parametr kvality reziduální vrstvy. Parametr q determinuje kvalitu základní LDR vrstvy. Je důležitý hlavně pro zpětnou kompatibilitu a zobrazování na zařízeních bez podpory HDR. Důležitá je i možnost poslat na vstup kodéru LDR verzi a tím přímo ovlivnit podobu základní vrstvy kódovaného souboru. Dále je zmíněno, jak využít prostředí MATLAB k ovládání JPEG XT softwaru prostřednictvím funkce *system*. Naznačen je způsob hodnocení vlivu ztrátové JPEG XT komprese. V závěru kapitoly si lze prohlédnout ukázkou prvotních výsledků z praktického testování tohoto referenčního softwaru.

Poté už se v následující kapitole dostáváme k hlavní praktické realizaci provedené v rámci psaní této diplomové práce. Jejím cílem je zkoumat využitelnost JPEG XT ve fotoaparátech a obecné vlastnosti JPEG XT kódování. Většina dnešních běžných fotoaparátů s podporou HDR technologie nefotí přímo do HDR obrazových souborů, nýbrž zachycuje sérii LDR souborů, na které před jejich uložením aplikuje kompresi JPEG. Z této série N LDR JPEG souborů se obvykle generuje HDR obrazový soubor až na počítači. Právě popsáný přístup klade poměrně vysoké nároky na velikost paměťového média pro uložení, úměrné počtu snímků v LDR sérii, a aplikovaná JPEG komprese negativně ovlivňuje kvalitu následně produkovaného HDR souboru. Jako alternativa k tomuto postupu je představen scénář s využitím standardu JPEG XT. Fotoaparát by stejně jako v předchozím případě zachytil sérii N LDR snímků. Ovšem neaplikoval by na ně JPEG kompresi a rovnou by z jejich kombinace generoval HDR obrazový soubor. Ten by ještě před uložením komprimoval s využitím standardu JPEG XT. Právě popsáný postup umožňuje snížit nároky na velikost paměťového média či zlepšit dosahovanou obrazovou kvalitu konečného výstupního HDR snímku.

Tyto dva scénáře jsou porovnávány z hlediska objemu dat a obrazové kvality. Je využito různých nastavení parametrů, různých vstupních souborů či různých TMO. Výsledky provedených srovnání z různých hledisek si lze prohlédnout na vynesných grafech. Doprovázejí je samozřejmě komentáře a zhodnocení. Za nezajímavější z vynesných závislostí lze považovat ty uvedené jako poslední. Mám na mysli křivky znázorňující závislost SNR/MSE na bitovém toku porovnávající využití série LDR JPEG snímků ve fotoaparátech se situací využívající JPEG XT profil C s parametrem $-rR 4$ (residual refinement scan). S tímto parametrem dosahujeme při kódování v profilu C výrazně lepší kvality výstupu než při ostatních užitých nastaveních. Z vynesných grafů je dobře vidět, kdy se vyplatí využít N LDR JPEG snímků a kdy JPEG XT s uvedeným nastavením. Pro nízké hodnoty bitového toku se jeví výhodněji varianta s N LDR JPEG snímků. Pokud klademe důraz na obrazovou kvalitu, a nevadí nám zvýšený bitový tok, vyplatí se využít variantu JPEG XT profil C. Z vybraných srovnání je také vidět, že při požadavku na nízké hodnoty bitového toku se vyplatí zvolit JPEG XT profil A. Profil B je nejvýhodnější pro střední hodnoty bitového toku.

Obecně lze říct, že využití standardu JPEG XT ve fotoaparátech se jeví jako zajímavé. Z provedených hodnocení nelze s jistotou říct, která varianta je momentálně výhodnější. O něco lépe se jeví JPEG XT, avšak může se vyplatit využít i přístupu se sérii N LDR JPEG

snímků. U JPEG XT kodéru výstup silně závisí na nastavení vstupních parametrů, kterých může být poměrně velké množství, a je otázka, jak by se něco takového implementovalo do fotoaparátů. Kromě tohoto porovnání dvou alternativních možností je zkoumán také možný přínos využití JPEG XT na počítačích pro kompresi HDR snímků produkovaných dnešními fotoaparáty. Fotoaparáty se zabudovanou podporou JPEG XT nejsou v současné době realitou a tento způsob využití JPEG XT je možný ihned. Ačkoliv se na začátku psaní této diplomové práce zdálo, že to bude první publikace zabývající se tímto problémem, není tomu nakonec tak. V průběhu její tvorby se objevil článek řešící obdobný problém. Tento článek je v práci mnohokrát citován a podrobnější údaje o něm lze nalézt v seznamu použité literatury.

Za těmito prakticky orientovanými oddíly se nachází náměty na další pokračování a vylepšování této práce, stručné seznámení se dvěma dalšími aktuálně vyvíjenými standardy skupiny JPEG, se standardy JPEG XS a JPEG Pleno, toto závěrečné shrnutí, seznam použité literatury a přílohy.

Tím bychom měli zhodnocení obsah práce a stručně popsané provedené činnosti. Bylo postupováno v souladu se zadáním práce. V teoretické části bylo popsáno vše zamýšlené. V praktické části jsem měl v plánu vyprodukovat větší množství výstupů. Časové možnosti mi to bohužel nedovolily. Bylo to z velké míry způsobeno výpočetní náročností prováděných činností. Práce byla ztížena také značnými velikostmi užívaných souborů. Celkový objem pracovních dat se pohyboval okolo 100 GB. Ve chvíli, kdy využíváte prostředí MATLAB a generujete větší množství dat najednou, je vhodné si celkový objem předem alespoň přibližně odhadnout. Mohlo by se totiž snadno stát, že si zcela zaplníte disk.

Osobně si myslím, že JPEG XT bude patřit mezi úspěšné standardy. Proces jeho standardizace je zřejmě ve velmi pokročilé fázi a už nyní se zdá být velmi dobře využitelný. Jeho úspěch samozřejmě záleží také na tom, jak rychle, a jestli vůbec, se bude šířit HDR obrazový obsah mezi běžné lidi. Je zřejmé, že najde využití i na starších zařízeních. Pro to je zásadní zpětná kompatibilita s původním JPEG. Teprve větší rozšíření zobrazovacích zařízení s podporou HDR obrazového obsahu však podle mého názoru přinese možnost využití plného potenciálu tohoto standardu.

Nyní jedna osobní poznámka na závěr. Na různých místech textu opakuji stejnou informaci. Mohlo by se zdát, že se jedná o zbytečnou duplicitu. Dělán to však záměrně, a to v případech, kdy považuji znalost dané informace v daném místě textu za velmi důležitou.

10 Literatura

- [1] KRUPIČKA, Martin. *Standardy pro kompresi obrazu a hodnocení jejich účinnosti*. Praha, 2016. Projekt individuální (A2M37IND). České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce: Karel Fliegel.
- [2] MANTIUK, Rafał K., Karol MYSZKOWSKI a Hans-Peter SEIDEL. High Dynamic Range Imaging. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. 2016, 2016, 1-81. DOI: 10.1002/047134608X.W8265. ISBN 9780471346081. Dostupné také z: <https://www.cl.cam.ac.uk/~rkm38/pdfs/mantiuk15hdri.pdf>
- [3] CHALMERS, Alan, Brian KARR, Rossella SUMA a Kurt DEBATTISTA. Fifty shades of HDR. *2016 Digital Media Industry*. IEEE, 2016, 53-58. DOI: 10.1109/DMAF.2016.7574902. ISBN 978-1-5090-1000-4. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7574902/>
- [4] BANTERLE, Francesco, Kurt DEBATTISTA, Alessandro ARTUSI, Sumanta PATTANAIK, Karol MYSZKOWSKI, Patrick LEDDA a Alan CHALMERS. High Dynamic Range Imaging and Low Dynamic Range Expansion for Generating HDR Content. *Computer Graphics Forum* [online]. 2009, 28(8), 2343-2367 [cit. 2016-11-15]. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2009.01541.x. ISSN 01677055. Dostupné z: http://www.banterle.com/francesco/publications/download/cgf_2009_itmo_star.pdf
- [5] BANTERLE, Francesco, Alessandro ARTUSI, Kurt DEBATTISTA a Alan CHALMERS. *Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice*. 1. Natick, MA, USA: AK Peters (CRC Press), 2011. ISBN 978-156-8817-194.
- [6] SUMNER, Rob. Processing RAW Images in MATLAB. 2014. Dostupné z: https://rcsumner.net/raw_guide/RAWguide.pdf
- [7] WARD, G. A wide field, high dynamic range, stereographic viewer. *Journal of Vision* [online]. 2002, 2(10), 1-5 [cit. 2016-11-21]. DOI: 10.1167/2.10.2. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://jov.arvojournals.org/Article.aspx?doi=10.1167/2.10.2>
- [8] SEETZEN, Helge, Wolfgang HEIDRICH, Wolfgang STUERZLINGER, Greg WARD, Lorne WHITEHEAD, Matthew TRENTACOSTE, Abhijeet GHOSH a Andrejs VOROZCOVS. High dynamic range display systems. *ACM Transactions on Graphics* [online]. 2004, 23(3), 1-9 [cit. 2016-11-23]. DOI: 10.1145/1015706.1015797. ISSN 07300301. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1015706.1015797>
- [9] HDR47ES6MB. *SIM2 High Dynamic Range Visualization* [online]. Italy: SIM2, 2015 [cit. 2016-12-16]. Dostupné z: <http://hdr.sim2.it/hdrproducts/hdr47es6mb>
- [10] MANTIUK, Rafał, Karol MYSZKOWSKI a Hans-Peter SEIDEL. *Lossy Compression of High Dynamic Range Images and Video* [online]. 2006, 1-10 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://www.cl.cam.ac.uk/~rkm38/pdfs/mantiuk06lchdriv.pdf>
- [11] *OpenEXR* [online]. USA: Industrial Light & Magic, 2016 [cit. 2016-06-17]. Dostupné z: <http://www.openexr.com/>
- [12] FRERY, Alejandro C. a Talita PERCIANO. Image Data Formats and Color Representation. *Introduction to Image Processing Using R* [online]. 2013, , 21 [cit. 2016-06-13]. DOI: 10.1007/978-1-4471-4950-7_2. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4471-4950-7_2
- [13] PFM Portable FloatMap Image Format. *Pauldebevec.com* [online]. [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <http://www.pauldebevec.com/Research/HDR/PFM/>

- [14] *Netpbm home page* [online]. San Jose: Bryan Henderson, 2015 [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <http://netpbm.sourceforge.net/>
- [15] LI, Ze-Nian, Mark S. DREW a Jiangchuan LIU. *Graphics and Image Data Representations*. Li, Ze-NianDrew, S. MarkLiu, Jiangchuan. Cham: Springer International Publishing, 2014, s. 57-80. DOI: 10.1007/978-3-319-05290-8_3. ISBN 9783319052908. Dostupné také z: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-05290-8_3
- [16] ZHANG, Yang, Dimitris AGRAFIOTIS a David R. BULL. High Dynamic Range image. *2013 18th International Conference on Digital Signal Processing (DSP)* [online]. IEEE, 2013, , 1-7 [cit. 2016-12-13]. DOI: 10.1109/ICDSP.2013.6622714. ISBN 978-1-4673-5807-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6622714/>
- [17] *JPEG* [online]. Joint Photographic Experts Group, 2014 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <https://jpeg.org/index.html>
- [18] DOLZHENKO, Vladimir. *Algorithms for compression of high dynamic range images and video*. Loughborough University, 2015. Doctoral Thesis. Loughborough University.
- [19] RUIFENG XU, S.N. PATTANAIK a C.E. HUGHES. *High-Dynamic-Range Still-Image Encoding in JPEG 2000* [online]. [cit. 2016-12-23]. DOI: 10.1109/MCG.2005.133. ISBN 10.1109/MCG.2005.133. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1528434/>
- [20] OKUDA, Masahiro a Nicola ADAMI. Effective color space representation for wavelet based compression of HDR images. *14th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP 2007)* [online]. IEEE, 2007, , 388-392 [cit. 2016-12-23]. DOI: 10.1109/ICIAP.2007.4362809. ISBN 0-7695-2877-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4362809/>
- [21] KAIDA, Hironori a Masahiro OKUDA. Image Compression Suitable for High Dynamic Range Image Rendering. *22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications - Workshops (aina workshops 2008)* [online]. IEEE, 2008, , 1029-1033 [cit. 2016-12-23]. DOI: 10.1109/WAINA.2008.31. ISBN 978-0-7695-3096-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4483052/>
- [22] SPRINGER, Dominic; KAUP, Andre. Lossy compression of floating point high-dynamic range images using JPEG2000. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. 2009. Dostupné z: <http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.805315>
- [23] WARD, Greg a Maryann SIMMONS. Subband encoding of high dynamic range imagery. *ACM SIGGRAPH 2004 Sketches on - SIGGRAPH '04* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2004 [cit. 2016-12-23]. DOI: 10.1145/1186223.1186309. ISBN 1595938962. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1186223.1186309>
- [24] OKUDA, Masahiro a Nicola ADAMI. Two-layer coding algorithm for high dynamic range images based on luminance compensation. *Journal of Visual Communication and Image Representation* [online]. 2007, 18(5), 377-386 [cit. 2016-12-23]. DOI: 10.1016/j.jvcir.2007.06.004. ISSN 10473203. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1047320307000521>
- [25] WARD, Greg. A general approach to backwards-compatible delivery of high dynamic range images and video. *ACM SIGGRAPH 2008 classes on - SIGGRAPH '08* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2008, , 1- [cit. 2016-12-23]. DOI: 10.1145/1401132.1401172. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1401132.1401172>

- [26] HANHART, Philippe a Touradj EBRAHIMI. Evaluation of JPEG XT for high dynamic range cameras. *Signal Processing: Image Communication* [online]. 2017, 50(February 2017), 9-20 [cit. 2016-11-27]. DOI: 10.1016/j.image.2016.10.004. ISSN 09235965. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923596516301552>
- [27] TAUBMAN, D.S. a M.W. MARCELLIN. JPEG2000: standard for interactive imaging. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2002, 90(8), 1336-1357 [cit. 2016-11-16]. DOI: 10.1109/JPROC.2002.800725. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1037564/>
- [28] TAUBMAN, David S. a Michael W. MARCELLIN. *JPEG2000: image compression fundamentals, standards, and practice* [online]. 1. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002 [cit. 2016-11-16]. ISBN 07-923-7519-X. Dostupné z: <http://www.springer.com/gp/book/9780792375197>
- [29] SCHELKENS, Peter, Athanassios SKODRAS a Touradj EBRAHIMI (eds.). *The JPEG 2000 suite* [online]. Chichester: Wiley, 2009 [cit. 2016-11-16]. Wiley-IS. ISBN 978-0-470-72147-6. Dostupné z: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470721472.html>
- [30] RICHTER, T. Backwards Compatible Coding of High Dynamic Range Images with JPEG. *2013 Data Compression Conference* [online]. IEEE, 2013, , 153-160 [cit. 2016-12-24]. DOI: 10.1109/DCC.2013.24. ISBN 978-0-7695-4965-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6543051/>
- [31] DUFAUX, Frederic, Gary SULLIVAN a Touradj EBRAHIMI. The JPEG XR image coding standard [Standards in a Nutshell]. *IEEE Signal Processing Magazine* [online]. 2009, 26(6), 195-199, 204-204 [cit. 2016-11-16]. DOI: 10.1109/MSP.2009.934187. ISSN 1053-5888. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5230820/>
- [32] RICHTER, Thomas. Evaluation of floating point image compression. *2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* [online]. IEEE, 2009, , 1909-1912 [cit. 2016-12-24]. DOI: 10.1109/ICIP.2009.5413692. ISBN 978-1-4244-5653-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5413692/>
- [33] RICHTER, Thomas, Tim BRUYLANTS, Peter SCHELKENS a Touradj EBRAHIMI. *The JPEG XT suite of standards: status and future plans* [online]. , 95990T- [cit. 2016-08-06]. DOI: 10.1117/12.2189873. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2189873>
- [34] PINHEIRO, A., K. FLIEGEL, P. KORSHUNOV, L. KRASULA, M. BERNARDO, M. PEREIRA a T. EBRAHIMI. *Performance evaluation of the emerging JPEG XT image compression standard*. 2014 IEEE 16th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP) [online]. IEEE, 2014, , 1-6 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1109/MMSP.2014.6958834. ISBN 978-1-4799-5896-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6958834>
- [35] KORSHUNOV, Pavel, Philippe HANHART, Thomas RICHTER, Alessandro ARTUSI, Rafał MANTIUK a Touradj EBRAHIMI. *Subjective quality assessment database of HDR images compressed with JPEG XT*. 2015 Seventh International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX) [online]. IEEE, 2015, , 1-6 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1109/QoMEX.2015.7148119. ISBN 978-1-4799-8958-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7148119>
- [36] ARTUSI, Alessandro, Rafał K. MANTIUK, Thomas RICHTER, Philippe HANHART, Pavel KORSHUNOV, Massimiliano AGOSTINELLI, Arkady TEN a Touradj EBRAHIMI. Overview and evaluation of the JPEG XT HDR image compression standard. *Journal of*

Real-Time Image Processing [online]. [cit. 2016-12-24]. DOI: 10.1007/s11554-015-0547-x. ISSN 1861-8200. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11554-015-0547-x>

[37] HANHART, Philippe, Marco V. BERNARDO, Pavel KORSHUNOV, Manuela PEREIRA, Antonio M. G. PINHEIRO a Touradj EBRAHIMI. *HDR image compression: A new challenge for objective quality metrics*. 2014 Sixth International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX) [online]. IEEE, 2014, , 159-164 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1109/QoMEX.2014.6982313. ISBN 978-1-4799-6536-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6982313>

[38] KRUPÍČKA, Martin. *Zpracování obrazu pro autostereoskopický displej*. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Karel Fliegel.

[39] A. Zaric, M. Loncaric, D. Tralic, M. Brzica, E. Dumic and S. Grgic, "Image quality assessment - comparison of objective measures with results of subjective test," *ELMAR, 2010 PROCEEDINGS*, Zadar, 2010, pp. 113-118. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5606099&isnumber=5606063>

[40] WANG, Z., A.C. BOVIK, H.R. SHEIKH a E.P. SIMONCELLI. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing* [online]. 2004, 13(4), 600-612 [cit. 2016-06-17]. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861. ISSN 1057-7149. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1284395>

[41] SHEIKH, H.R. a A.C. BOVIK. Image information and visual quality. *IEEE Transactions on Image Processing* [online]. 2006, 15(2), 430-444 [cit. 2016-06-17]. DOI: 10.1109/TIP.2005.859378. ISSN 1057-7149. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1576816>

[42] *ITU-R BT.500-13: Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures*. International Telecommunication Union, 2012 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500>

[43] *ITU-R BT.601-7: Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios*. International Telecommunication Union, 2011 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.601/en>

[44] *ITU-T P.1401: Methods, metrics and procedures for statistical evaluation, qualification and comparison of objective quality prediction models*. International Telecommunication Union, 2012 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.1401/en>

[45] HANHART, Philippe, Marco V. BERNARDO, Manuela PEREIRA, António M. G. PINHEIRO a Touradj EBRAHIMI. Benchmarking of objective quality metrics for HDR image quality assessment. *EURASIP Journal on Image and Video Processing* [online]. 2015, 2015(1), - [cit. 2016-06-19]. DOI: 10.1186/s13640-015-0091-4. ISSN 1687-5281. Dostupné z: <http://jivp.urasipjournals.com/content/2015/1/39>

[46] ZHOU WANG a A.C. BOVIK. Mean squared error: Love it or leave it? A new look at Signal Fidelity Measures. *IEEE Signal Processing Magazine* [online]. 2009, 26(1), 98-117 [cit. 2016-06-30]. DOI: 10.1109/MSP.2008.930649. ISSN 1053-5888. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4775883>

[47] *HDRVDP* [online]. 2015 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://hdrvdp.sourceforge.net/wiki/>

[48] MANTIUK, Rafat, Kil Joong KIM, Allan G. REMPEL a Wolfgang HEIDRICH. HDR-VDP-2: A calibrated visual metric for visibility and quality predictions in all luminance

- conditions. *ACM Transactions on Graphics (Proc. of SIGGRAPH'11)*, 30(4), article no. 40 [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2011 [cit. 2016-06-28]. DOI: 10.1145/1964921.1964935. ISBN 9781450309431. Dostupné z: <http://hdvdp.sourceforge.net/hdrvdp.pdf>
- [49] NARWARIA, Manish, Rafal K. MANTIUK, Mattheiu Perreira DA SILVA a Patrick LE CALLET. HDR-VDP-2.2: A Calibrated Method for Objective Quality Prediction of High Dynamic Range and Standard Images. *Journal of Electronic Imaging*[online]. 2015, 24(1) [cit. 2016-06-28]. DOI: 10.1117/1.JEI.24.1.010501. ISSN 1017-9909. Dostupné z: <https://www.cl.cam.ac.uk/~rkm38/pdfs/narwaria15hdvdp22.pdf>
- [50] KIM, Kil Joong, Rafal MANTIUK, Kyoung Ho LEE, Huib DE RIDDER a LEE. Measurements of achromatic and chromatic contrast sensitivity functions for an extended range of adaptation luminance. *Proc. of Human Vision and Electronic Imaging XVIII, IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging*[online]. 2013, , article no. 8651-47 [cit. 2016-06-28]. DOI: 10.1117/12.2002178. Dostupné z: <https://www.cl.cam.ac.uk/~rkm38/pdfs/kim13mcsf.pdf>
- [51] YOSHIDA, Akiko, et al. Perceptual evaluation of tone mapping operators with real-world scenes. *Electronic Imaging 2005*. International Society for Optics and Photonics, 2005. 192-203. Dostupné z: <resources.mpi-inf.mpg.de/hdr/TMO/EI5666-13.pdf>
- [52] LEDDA, Patrick, Alan CHALMERS, Tom TROSCIANKO a Helge SEETZEN. Evaluation of tone mapping operators using a High Dynamic Range display. *ACM SIGGRAPH 2005 Papers on - SIGGRAPH '05* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2005, , 640-648 [cit. 2016-12-09]. DOI: 10.1145/1186822.1073242. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1186822.1073242>
- [53] CERDA-COMPANY, Xim, C. Alejandro PARRAGA a Xavier OTAZU. Which Tone-Mapping is the best? A Comparative Study of Tone-Mapping Perceived Quality. *Perception* [online]. 2014, , 1-20 [cit. 2016-12-09]. Dostupné z: <http://www.cat.uab.cat/Public/Publications/2014/CPO2014a>
- [54] DRAGO, F., K. MYSZKOWSKI, T. ANNEN a N. CHIBA. Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes. *Computer Graphics Forum*. 2003, 22(3), 419-426. DOI: 10.1111/1467-8659.00689. ISSN 0167-7055. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1111/1467-8659.00689>
- [55] KUANG, Jiangtao, Garrett M. JOHNSON a Mark D. FAIRCHILD. ICAM06: A refined image appearance model for HDR image rendering. *Journal of Visual Communication and Image Representation* [online]. 2007, 2007(5), 406–414 [cit. 2016-12-16]. DOI: 10.1016/j.jvcir.2007.06.003. ISBN 10.1016/j.jvcir.2007.06.003. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1047320307000533>
- [56] Min H. Kim and Jan Kautz. 2008. Consistent tone reproduction. In *Proceedings of the Tenth IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging (CGIM '08)*, Daniel Thalmann (Ed.). ACTA Press, Anaheim, CA, USA, 152-159. Dostupné z vclab.kaist.ac.kr/cgim2008/MHKim_JKautz_CGIM2008s.pdf
- [57] MAI, Z., H. MANSOUR, R. MANTIUK, P. NASIOPOULOS, R. WARD a W. HEIDRICH. Optimizing a Tone Curve for Backward-Compatible High Dynamic Range Image and Video Compression. *IEEE Transactions on Image Processing* [online]. 2011, 20(6), 1558-1571 [cit. 2016-12-16]. DOI: 10.1109/TIP.2010.2095866. ISSN 1057-7149. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5648461/>
- [58] *Information Technology: Scalable Compression and Coding of Continuous-Tone Still Images: Reference Software*. Japonsko: ISO/IEC JTC 1/SC 29, 2016.

11 Přílohy

11.1 Příložené DVD

K tištěné verzi této práce je přiloženo paměťové médium obsahující následující soubory:

- text diplomové práce v podobě souboru DP_Krupicka_krupima2.pdf
- skripty napsané pro realizaci praktické části této práce (+ README.txt).

K těmto skriptům je nutné uvést základní informace k jejich použití. Jsou dodány pouze matlabovské skripty napsané autorem této diplomové práce. Vstupní obrazová data je nutné stáhnout vlastními silami, vhodně pojmenovat a umístit do pracovní složky ke skriptům. Zároveň je třeba mít nainstalovaný Banterleho HDR Toolbox³⁵. Bez funkcí v něm obsažených nebudou dodané skripty fungovat. Na závěr je třeba stáhnout si referenční JPEG XT software³⁶. Bez něho se rozhodně neobejdeme. Po stažení je nutné ho rozbalit a zkompileovat do stejné složky, kde jsou umístěny všechny skripty z této práce a také vstupní obrazové soubory. Spolu se skripty je na přiloženém DVD i textový soubor README usnadňující jejich použití.

K funkčnosti skriptů bych měl ještě několik poznámek. Pracoval jsem výhradně na počítači s operačním systémem OS X/macOS. Neměl jsem možnost ověřit správnou funkci skriptů na počítači s Windows nebo jiným operačním systémem. Předpokládám, že na strojích s Windows bude nutné drobně upravit příkazy posílané do JPEG XT referenčního softwaru. Rozdíl by měl být pouze v příkazech užívaných ve funkci *system*. V ostatních částech skriptů by problém být neměl.

Důležitá je také správná kompilace JPEG XT referenčního softwaru. Jak již bylo zmíněno v kapitole šest, kompilace je závislá na operačním systému, který používáme. Uživatelům macOS by měl s kompilací pomoci postup uvedený v kapitole šest této práce. Uživatelům Windows doporučuji projít si textové soubory stažené spolu s referenčním softwarem, aktuální informace na webu skupiny JPEG [17] a vyhledat si na Internetu nějaký obecný návod popisující kompilaci kódu v C++ na počítačích s jejich operačním systémem³⁷.

Co se Banterleho HDR Toolboxu týče, byla v této práci využita verze 1.1.0. Označení verze je uvedené v souboru Readme staženém společně s toolboxem.

³⁵ Dostupný z <http://www.advancedhdrbook.com/>. Přísluší k němu literatura [5]. Citováno 23. 12. 2016.

³⁶ Dostupný z <https://jpeg.org/jpegxt/software.html>. Citováno 23. 12. 2016.

³⁷ Užitečné informace ke kompilaci referenčního softwaru lze najít ve wordovském dokumentu dostupném z <https://www.itsecj.ipsj.or.jp/sc29/open/29view/29n15708c.htm> [58]. Sám jsem si tento dokument při hledání vhodného způsobu kompilace nastudoval a informace z něho při kompilaci využil. Citováno 3. 1. 2017.