



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

HDR snímání v astronomii

HDR Imaging in Astronomy

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.

Bc. Matyáš Del Campo

Prohlášení

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

V Praze, dne :.....

.....

podpis

Poděkování

Děkuji panu Doc. Mgr. Petru Pátovi, Ph.D. za vedení a pomoc, kterou mi poskytl při zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Petru Skalovi za poskytnutí astronomických snímků a odbornou konzultaci.

Rád bych poděkoval Petře a Vendule Burešovým za kontrolu gramatiky a stylistiky práce. Nakonec bych rád poděkoval všem, kteří měli se mnou trpělivost během zpracování této práce, především své rodině.

Anotace

Klíčová slova: HDR, Skládání snímků, Astronomie, RTS2, Robotické dalekohledy.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na tvorbu HDR snímků a metody skládání snímků v astronomii. Výstupem této práce je programový balík, který umožňuje ovládání robotického dalekohledu CELESTRON CPC 800, digitálního fotoaparátu NIKON D5100 a následné zpracování snímků (HDR, skládání snímků). Součástí práce je také analýza, při které se testoval šum ve snímku a vliv metody na jasový profil hvězdy. Na základě provedeného měření jsem došel k závěru, že pro tvorbu HDR snímků v astronomii je nejvhodnější lineární metoda a pro klasické HDR je třeba implementovat lokální operátor. Snímek HDR byl vytvořen i ze sady snímků optické Fourierovy transformace.

Annotation

Key words: HDR, Image stacking, Astronomy, RTS2, Robotic telescopes.

Abstract:

This master thesis is focused on creation of HDR images and image stacking in astronomy. The result of this work is software package, which is able to control robotic telescope CELESTRON CPC 800, digital camera NIKON D5100 and post-processing of images (HDR and Image stacking). One part of the work is analysis, where the noise in image was tested and influence of the method to star's profile. Based on the testing my conclusion is that the most appropriate method of HDR creation is the linear method and for the classical HDR creation it is necessary to implement local tone mapping operators. The HDR image was created also from the set of optical Fourier transform images.

Obsah

1 Terminologie	9
2 Úvod	10
3 Dynamický rozsah	11
4 Metody skládání snímků	13
4.1 Potlačení šumu CCD senzoru	13
4.2 Potlačení náhodného šumu.....	15
4.3 Zvýšení Dynamického rozsahu	15
4.4 Metody skládání snímků	16
5 High Dynamic Range	19
5.1 Tvorba HDR snímků.....	19
5.2 HDR z více snímků s různou expoziční dobou	19
5.2.1 Získání CRF.....	20
5.2.2 Rekonstrukce osvětlení	23
5.2.3 Tónování.....	23
6. RTS2 & CELESTRON CPC 800	27
6.1 Ovládání RTS2.....	27
6.2 Robotický dalekohled CELESTRON CPC 800.....	29
7. Program	31
7.1 OBSERVE Menu	32
7.2. Post-Processing menu	35
7.3. Možné pokračování	37
8. Testování	38
8.1. SAOImage DS9	38
8.1.1. Analýza dat.....	38
8.2 Výsledky skládání snímků	39
8.3 Výsledky HDR.....	48
8.3.1 Multimediální data:.....	48
8.3.2 Astronomická data	51

8.3.3 Optická Fourierova transformace	55
9 Závěr	62
10 Zdroje informací	64
11 Seznam použitých obrázků	67
12 Seznam příloh	69
13 Přílohy.....	70

1 Terminologie

- **HDR** : (*High Dynamic Range images*) - Snímky s vysokým dynamickým rozsahem.
- **LDR**: (*Low Dynamic Range images*) - Snímky s nízkým dynamickým rozsahem.
- **EV**: (*Exposure Value*) - Expoziční hodnota.
- **SNR** : (**S**ignal **N**oise **R**atio) - Odstup signálu od šumu.
- **RMS** :(*Root Mean Square Error*) - Střední kvadratická odchylka.
- **RTS2** : (*Remote Telescope System - 2nd version*).

2 Úvod

Důvodem, proč jsem si vybral jako téma své diplomové práce HDR snímání v astronomii, je pokus o zachycení co nejvyššího dynamického rozsahu pozorovaných objektů, jako jsou astronomické objekty typu galaxie, mlhoviny a komety. Tyto objekty často uvnitř sebe ukrývají další hvězdy, které díky nízkému dynamickému rozsahu obrazového senzoru zaniknou v jasově silnějším objektu, jakým je třeba daná mlhovina. Tento problém jsme schopni pomocí digitální fotografie vyřešit zkrácením expozičního času, tím však přicházíme o tvar a detaily mlhoviny samotné. Odpovědí na otázku, jakým způsobem lze zachytit celkový dynamický rozsah takového objektu, je HDR fotografie, která se v současné době stala velkým trendem v oblasti digitální fotografie. Pro tvorbu HDR fotografie je třeba pořídit více snímků s různým expozičním časem. Bohužel s rostoucím časem klesá i odstup signálu od šumu. Jakým způsobem je možné šum v astronomických snímcích potlačit?

V třetí kapitole této práce je uveden úvod do problematiky dynamického rozsahu snímané scény. Kapitola *Skládání snímků* podává přehled metod, které se v astronomii používají pro zvýšení dynamického rozsahu a pro potlačení šumu. Popis tvorby snímků s vysokým dynamickým rozsahem je uveden v kapitole 5. *High Dynamic Range*. Následující kapitola této práce pojednává o softwaru RTS2 a jeho využití pro ovládání robotického dalekohledu CELESTRON CPC 800.

Cílem práce je vytvořit softwarový balík, který bude ovládat robotický dalekohled CELESTRON CPC 800 prostřednictvím programu RTS2, spolu s digitálním DSLR fotoaparátem NIKON D5100. Vstupním parametrem programu by měl být počet snímků, které chceme pořídit a jednotlivé parametry (expozice, clona atd.). Program by měl umožnit načtení těchto parametrů, například z xml souboru. Uživatel zadá do programu souřadnice objektu, který chce pozorovat a dalekohled se posune do správné polohy a zahájí pozorování. Po pořízení snímků provede program *post processing* snímků ve formě tvorby HDR, nebo uživatel zvolí metodu skládání snímků. Výstupní program je detailně popsán v kapitole 7. V další části diplomové práce analyzuji kvalitu výsledných snímků s ohledem na následné zpracování v astronomii.

3 Dynamický rozsah

Výstupní snímek pořízený digitální kamerou v nejvyšší kvalitě je tzv. RAW snímek. Tento snímek obsahuje hodnoty jednotlivých obrazových bodů co nejbližší k obrazovému senzoru. Jedná se o tzv. surová data. Často se setkáváme s 24 bitovým snímkem nebo se snímkem 48 bitovým. U 24 bitového snímku, kde je použita bitová hloubka 8 bitů na kanál, je počet kvantizačních hladin 256. Hodnoty 24 bitového snímku se pohybují v rozmezí 0 až 255. U snímků s bitovou hloubkou 3 x 16 bitů dostáváme 65536 kvantizačních hladin. Toto ovšem není dynamický rozsah scény [1, 2].

Dynamický rozsah scény se snímá fotometrem. Jedná se o rozdíl mezi nejsvětlejším a nejtmavším bodem snímané scény. Často se rovněž udává podíl těchto bodů (*ratio*). Čím je tento podíl větší, tím větší je dynamický rozsah scény. Typické rozsahy jasů různých scén a možné dynamické rozsahy zařízení a medií jsou uvedeny v tabulce č. 1.

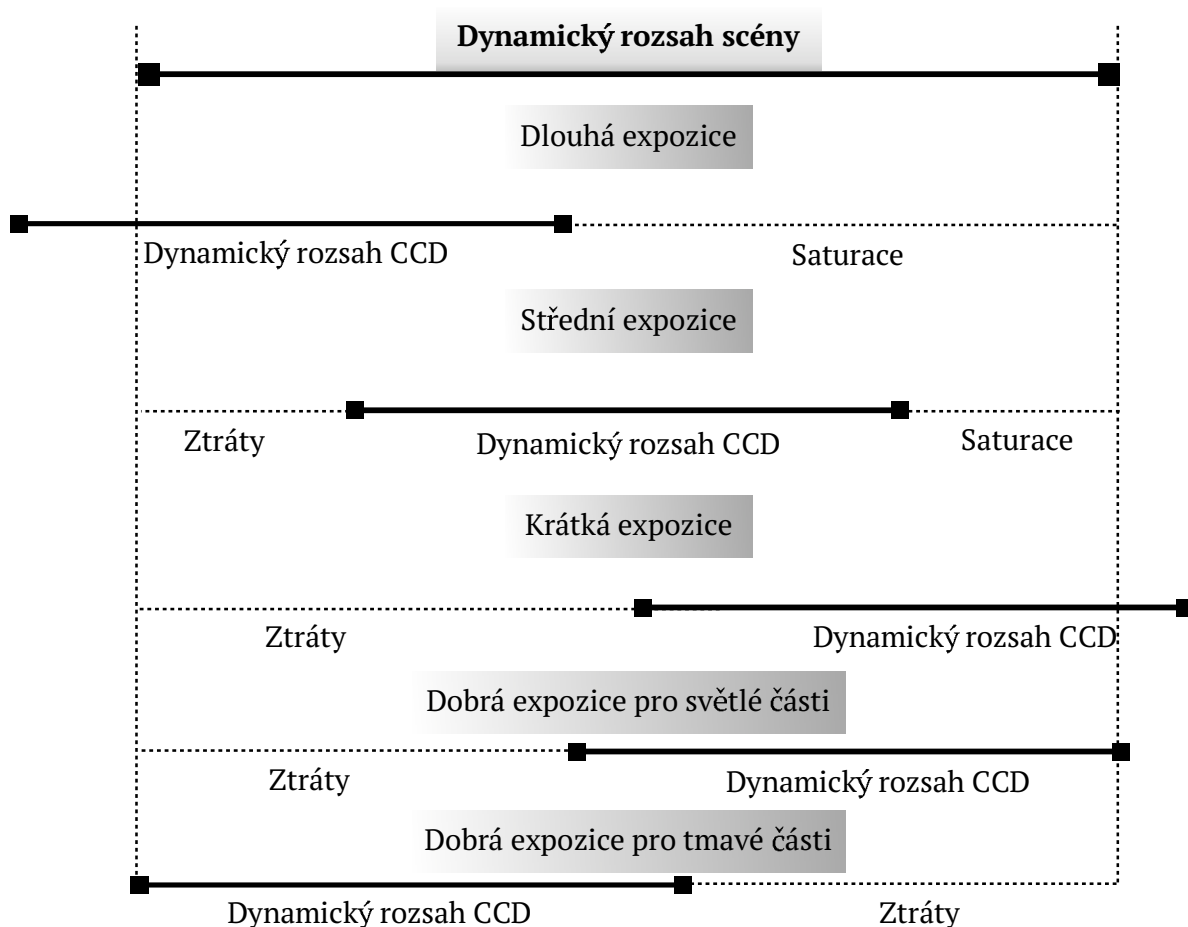
Scéna, zdroj	Rozsah jasů
Plný rozsah od Slunce po světlo hvězd	1 000 000 000 000:1
Plný rozsah lidského oka po adaptaci	100 000 000:1
Tmavý interiér s výhledem na jasné světlo	5 000–10 000:1
Lidský zrak v jednom pohledu bez adaptace	10 000:1
Černobílý negativní film	10 000:1
Typická DSLR při základní citlivosti	500:1
LCD monitor	350:1
CRT monitor	200:1
Velmi kvalitní fotopapír	100:1
Papír běžný	50:1

Tabulka č. 1 - Dynamické rozsahy [9]

Pro názornost vysvětlím princip na jednoduché analogii. Představme si, že dynamický rozsah scény je dvoumetrové měřící pásmo. Fotoaparát zachytí pouze část dynamického rozsahu. Tuto část si můžeme představit jako školní 30 cm pravítko.

Jestliže měníme expoziční dobu pořízení snímku, je to stejné, jako bychom posunovali pravítko po měřicím pásu. Máme-li fotoaparát, který pořizuje 24 bitové snímky, můžeme si v naší analogii představit, že pravítko zobrazuje pouze cm. Pokud pořizujeme snímky 48 bitové, tak pravítko zobrazuje jak cm tak mm. To znamená, že počet kvantizačních úrovní A/D převodníku obrazového senzoru má vliv na rozlišení jednotlivých úrovní, nikoliv však na dynamický rozsah, který může obrazový senzor zachytit [1, 2].

U scény, která obsahuje vysoký dynamický rozsah, dostaneme buď snímek podexponovaný, nebo snímek přexponovaný. Samozřejmě můžeme nastavit expoziční dobu také na střední hodnotu. Takto získaný snímek ale nebude obsahovat tak velké detaily ve tmavých částech obrazu, jako snímek přexponovaný a zároveň tak velké detaily světlých částí snímku, jako snímek podexponovaný. Porovnání dynamického rozsahu scény a možného dynamického rozsahu CCD senzoru pro různé expoziční časy graficky znázorňuje Obr. č. 1.



Obr. č 1 - Omezení dynamického rozsahu senzoru CCD [3]

4 Metody skládání snímků

Metoda skládání snímků neboli (*Image Stacking*) je již delší dobu používaná a to především v oblasti astronomie. Výsledný snímek je složen z více snímků. Tato metoda vede k potlačení náhodného šumu v obraze a k zvýšení dynamického rozsahu. Základem této metody je pořízení několika snímků dané statické scény.

Jestliže se objekty dané scény pohybují, jako tomu je u noční oblohy, je nutné, aby se dalekohled během expozice natáčel stejnou rychlostí, jako se pohybují hvězdy (*pointace*) [3,4,5].

4.1 Potlačení šumu CCD senzoru

Při akumulaci náboje na CCD senzoru dochází k degradaci signálu šumem. Důvodů je více. Jednotlivé fotocitlivé elementy mají různou citlivost pixel od pixelu. Optika, např. dalekohled, neosvítí senzor zcela homogenně. Šum elektroniky má také na výsledný signál negativní vliv. Celkový náboj akumulovaný na CCD elementu je dán vztahem

$$Q = \frac{e \cdot t \cdot \eta \cdot E \cdot S}{h \cdot \nu} \text{, [C] ,} \quad (4.1)$$

kde Q je celkový náboj [C], e je náboj elektronu, $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ [C], t [s] je doba akumulace, η je kvantová účinnost, ν [Hz] je frekvence fotonu, S [m²] je plocha pixelu a E [W/m²] je intenzita ozáření [6]. Výsledná hodnota je zatížena šumem (N_{sum}), který se skládá ze čtyř složek [3, 12].

$$N_{sum} = N_{bias} + N_{Ad} + N_{Mu} + N_{Rnd} \quad (4.2)$$

Šum elektroniky (N_{bias}) je možné potlačit pomocí korekčního snímku, který se získá při nastavení expoziční doby na co nejnižší úroveň s co nejnižší hodnotou clony. Často se pořídí více *Bias* snímků, které se zkombinují do jednoho *MASTER Bias* (F_{bias}) snímku, který je od originálního snímku F_{or} odečten

$$F(x, y) = F_{OR}(x, y) - F_{Bias}(x, y). \quad (4.3)$$

Aditivní složka (N_{Ad}), jejímž zdrojem je teplo generující samotný CCD čip, může být potlačena pomocí temného snímku. Temný snímek lze získat extrakcí části obrazu, která obsahuje pouze daný šum. Jelikož se jedná o aditivní šum, je korekce provedena prostým odečtením temného snímku od snímku obsahující šum

$$F_D(x,y) = F(x,y) - D(x,y) , \quad (4.4)$$

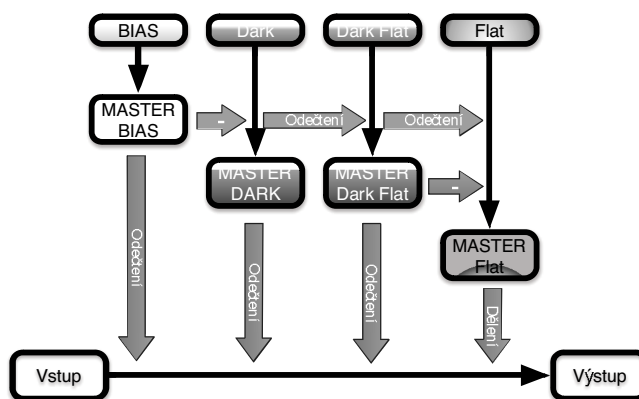
kde F_D je snímek po korekci, F je původní snímek po korekci *Bias* snímkem a D je Temný snímek. Temný proud (*Dark Current*), který je generován teplem lze potlačit chlazením. Proto jsou astronomické kamery často vybaveny aktivním chlazením např. pomocí Peltierova článku.

Multiplikativní šum (N_{Mu}) je způsoben optickou vadou zvanou vinětace. Jedná se o změnu osvětlení v závislosti od středu snímku. I toto zkreslení se dá potlačit pomocí korekčního snímku tzv. *Flat Fieldu*. Snímek je pořízen pomocí homogenního osvětlení snímací soustavy a to například pomocí odrazné desky. Důležité je pořízení rovněž temného snímku pro daný *Flat field*. Korekce je provedena

$$F_K(x,y) = K \cdot \frac{F_D(x,y)}{F_f(x,y) - D_f(x,y)} , \quad (4.5)$$

kde F_K je výsledný korigovaný snímek, K je normovací konstanta, F_d je snímek po korekci temným snímkem, F_f je *Flat field* a D_f je temný snímek k *Flat fieldu*. Poslední složku celkového šumu tvoří náhodný šum (N_{Rnd}). Potlačení tohoto šumu může být provedeno například pomocí metody Skládání snímků [6, 7, 13].

Před dalším zpracováním snímků je tedy nutno snímky zkalibrovat. Celkový kalibrační proces je uveden na Obr. č. 2.



Obr. č. 2 - Kalibrace snímku [11]

4.2 Potlačení náhodného šumu

Hodnota obrazového bodu vyčtena ze CCD senzoru se skládá ze dvou složek. Z hodnoty, která odpovídá pravé hodnotě daného bodu a z náhodné hodnoty šumu. Představme si Gaussovo rozložení, které bude centrováno do nuly, nejpravděpodobnější hodnota je tedy nula. Jestliže vybereme velké množství jak kladných, tak záporných nenulových hodnot a provedeme průměrování, dojdeme k závěru, že čím více hodnot získáme, tím výsledný průměr bude více konvergovat k nule. Pokud aplikujeme daný postup na jednotlivé pixely, kde Gaussovo rozložení bude centrováno do pravé hodnoty pixelu, zjistíme, že po zprůměrování několika snímků se zachová pravá hodnota obrazového bodu a potlačí se náhodná složka signálu. Tím dojde ke zvětšení SNR [3].

Otázkou je, kolik snímků je třeba zkombinovat k dosažení dobrého výsledku. Jaká je optimální expoziční doba jednotlivých snímků? Hodnota SNR roste s druhou odmocninou z počtu použitých snímků. Jestliže budeme kombinovat snímky 10, dostaneme hodnotu 3,16, pro 50 snímků dostaneme 7,07 apod. Pořídíme-li 100 minutových snímků a provedeme jejich kombinaci a nebo zda pořídíme 10 desetiminutových snímků a provedeme jejich kombinace, bude jejich SNR totožné, ale nedostaneme stejný výsledný snímek. SNR desetiminutového snímku je 3.16 krát vyšší než snímku minutového. Kombinací snímků dostaneme stejné SNR, ale důležitý je fakt, že během minutové expozice dopadne na senzor nesrovnatelně menší světlo než během expozice desetiminutové, proto nemůže být výsledný snímek totožný. Důležité je, že kombinováním dvou nebo více snímků se SNR sčítá. Pro získání kvalitního astronomického snímku je vhodné kombinovat pokud možno co největší množství snímků a každý ze snímků před kombinací zkalibrovat viz kapitola 4.1 [11].

4.3 Zvýšení Dynamického rozsahu

Aritmetické průměrování jednotlivých obrazových bodů přes daný počet expozic má tu výhodu, že nemůže dojít k přetečení správné hodnoty. Z hlediska dynamického rozsahu je patrné, že pokud provedeme krátkodobou expozici, zachytíme na snímku velmi dobře jasné objekty. Objekty, které budou jasově slabé, se ve snímku ztratí. Pokud provedeme několik krátkodobých expozic tak, aby nedošlo k saturaci nejjasnějších bodů scény a provedeme metodu skládání snímků, dosáhneme zachování jasných bodů

a zvýraznění jasově slabších bodů. Tímto způsobem dojde ke zvětšení dynamického rozsahu [3].

4.4 Metody skládání snímků

Pro skládání snímků se využívá několika metod. V této podkapitole jsou vybrané metody popsány.

Metoda průměrování

Jedná se o základní metodu, kde je výsledný obrazový bod vypočten jako průměr z obrazových bodů daných snímků. Průměrná hodnota je vypočtena

$$X_{i,mean} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N X_{i,j}, \quad (4.6)$$

kde $X_{i,mean}$ je výsledná střední hodnota i -tého pixelu, N je počet snímků a $X_{i,j}$ je hodnota i -tého pixelu j -tého snímku [3].

Metoda výpočtu Mediánu

Výhodou této metody je fakt, že výsledná hodnota je vybrána z existujících hodnot jednotlivých snímků. Hodnoty daného pixelu se srovnají do řady od nejmenší do největší hodnoty a vybere se prostřední hodnota. Proto je nutné, mít lichý počet snímků [11].

Metoda výběru Maximum

Tuto metodu lze použít jen pro malé množství snímků. Typicky pro dva snímky. Výhoda této metody spočívá v její výpočetní nenáročnosti, kde se vybere z hodnot hodnota maximální [11].

Metoda $\kappa - \sigma$

Tuto metodu je vhodné použít pro větší počet dat. Vstupním parametrem je počet opakování. V prvním kroku se vypočte směrodatná odchylka σ dle vztahu

$$\sigma_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N (X_{i,j} - X_{i,mean})^2, \quad (4.7)$$

kde $X_{i,mean}$ je střední hodnota i -tého pixelu a $X_{i,j}$ je hodnota i -tého pixelu j -tého snímku. Díky směrodatné odchylce jsme schopni zjistit rozptyl dat. Jestliže máme Gaussovské rozložení, tak 68% hodnot leží v intervalu $\langle X_{mean}-\sigma; X_{mean}+\sigma \rangle$. V Intervalu $\langle X_{mean}-$

$(2 \cdot \sigma)$; $X_{\text{mean}} + (2 \cdot \sigma)$ leží 95% hodnot. Tyto hodnoty odpovídají intervalu κ . Chceme-li se zbavit extrémních hodnot, ale neodečíst pouze minimum a maximum daného snímku, vyřadíme hodnoty, které nejsou v intervalu κ . Tento postup se dá opakovat pro větší počet dat s daty z předchozího procesu. Výsledná hodnota se vypočte jako průměr ze zbylých dat [11].

Metoda $\kappa - \sigma$ medián

Jedná se o metodu, jejíž výpočet je prakticky shodný s výpočtem metody $\kappa - \sigma$, s tím rozdílem, že hodnoty, které neleží v požadovaném intervalu, nejsou odebrány, ale jsou nahrazeny mediánem. Výhodou této metody je její robustnost [11].

Auto-adaptivní vážený průměr

Princip této metody spočívá ve vážení jednotlivých hodnot k průměrné hodnotě. Tento proces se provádí iterativně, dokud výsledné hodnoty nekonvergují k průměrné hodnotě. Tuto metodu je vhodné použít pro data, která jsou homogenní. Váha se počítá pro každý pixel podle vztahu

$$w_{i,j} = \frac{1}{\sigma_i} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{|r_i|}{\sigma_i}\right)^2}, \quad (4.8)$$

kde $w_{i,j}$ je váha i -tého pixelu j -tého snímku, σ_i je směrodatná odchylka a r_i je residuum mezi hodnotou i -tého pixelu a aktuální střední hodnotou. V prvním cyklu se jedná o střední hodnotu všech snímků a v následujících opakováních se jedná o snímek I_{New} (4.9). Konvergence je často dosaženo již při druhém opakování [10,11]. Výsledný snímek je vypočten dle vztahu č. (4.9) Často se doporučuje použití 5 opakování.

$$I_{\text{New}}(i) = \frac{\sum_{j=1}^N w_{i,j} \cdot I_{i,j}}{\sum_{j=1}^N w_{i,j}} \quad (4.9)$$

Entropicky vážený průměr:

Každá hodnota obrazového bodu je vážený průměr entropií v dané oblasti. Entropie je průměr počtu binárních symbolů potřebných k zakódování vstupních dat s pravděpodobností výskytu těchto vstupních dat v celkovém toku dat. Pro každý pixel je

vypočtena lokální entropie přes pevně danou sekci snímku (okno). Vážený průměr p přes celkový počet snímku N se poté vypočte dle vztahu

$$p = \frac{\sum_{j=1}^N p_j \cdot v_j}{\sum_{j=1}^N v_j} . \quad (4.10)$$

Entropie v_j se vypočte

$$v_j = \sum_{k=1}^M -q_k \times \log_2(q_k) , \quad (4.11)$$

kde q_k je pravděpodobnost, že náhodně zvolený pixel z vybraného okna, centrovaného do hodnoty p_k bude mít hodnotu j a M je celkový počet bodů vybraného okna. Vysoká entropie značí vysokou varianci hodnot jednotlivých pixelů daného okna. Je-li entropie nízká, jsou data vybraného okna téměř uniformní. Díky entropii jsme schopni porovnat, které části poskytnutých snímků poskytují větší informaci pro detail a na základě toho provést dané vážení. Tato metoda je výpočetně velice náročná [9,11].

5 High Dynamic Range

HDR snímky jsou snímky, které jsou schopny zobrazit vysoký dynamický rozsah snímané scény. Vyfotíme-li scénu digitálním fotoaparátem, aniž bychom použili jakýkoliv postup pro vytvoření HDR snímku, dostaneme tzv. LDR (*Low Dynamic Range*) snímek. Při pořizování snímku nám fotoaparát umožňuje nastavit některé ze základních parametrů, jako je clonové číslo, závěrka a citlivost ISO. Zkušený fotograf ví, že často není schopen zachytit celkový dynamický rozsah scény. Ve výsledku se tento fakt může odrážet v následujících případech.

Pro názornost si představme, že jsme u moře a fotíme západ slunce. Expoziční dobu, resp. závěrku, nastavíme na krátkou dobu, tím dosáhneme krásného snímku, kde budou vidět jednotlivé detaily okolo slunce, mraky na modré obloze budou důvěryhodně prokresleny. Na dalším snímku chceme zachytit tutéž scenérii, ovšem s tím rozdílem, že do popředí umístíme osobu. Necháme stejné nastavení fotoaparátu a pořídíme snímek. Pozadí na druhém snímku je opět velmi dobře zachyceno, ale obličej osoby je “utopen” ve tmě. Prodloužíme-li expoziční dobu a pořídíme další snímek, zjistíme, že detaily obličeje jsou již zřetelné, zato pozadí je přexponované. Toto je základní problém klasické fotografie. Řešením tohoto problému jsou právě snímky HDR, často označovány také jako HDRI (*High Dynamic Range Images*).

5.1 Tvorba HDR snímků

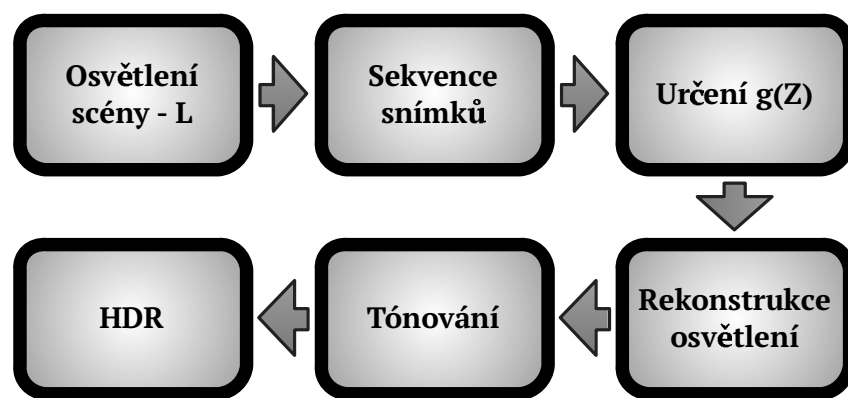
Pro získání HDR snímků se využívají grafické editory, jako jsou například programy Photoshop (od verze CS2) a Zoner Studio. Existuje mnoho způsobů, jak získat HDR snímek. Jednou z metod je skládání více snímků s různou expoziční dobou.

5.2 HDR z více snímků s různou expoziční dobou

Pro získání HDR snímku pomocí této metody je zapotřebí minimálně tří snímků. Velmi často se pro zaznamenání vyššího dynamického rozsahu používá snímku jedenáct, patnáct apod. Novější digitální fotoaparáty jsou vybaveny funkcí *bracketing*, která automaticky vyfotí 3 snímky za sebou s expoziční hodnotou EV0, EV+1 a EV-1. Podstatné je, aby snímaná scéna byla statická, nebo aby došlo k zarovnání jednotlivých snímků. V astronomii to znamená, že dalekohled musí kopírovat pohyb noční oblohy.

K tomu slouží funkce tracking, která je často součástí funkcionality robotického dalekohledu. Před pozorováním noční oblohy musí dojít k zaměření dalekohledu vzhledem k geografickým souřadnicím. Toto zaměření se provede pomocí přesného času, GPS souřadnic a manuálním zaměřením dalekohledu na několik hvězd.

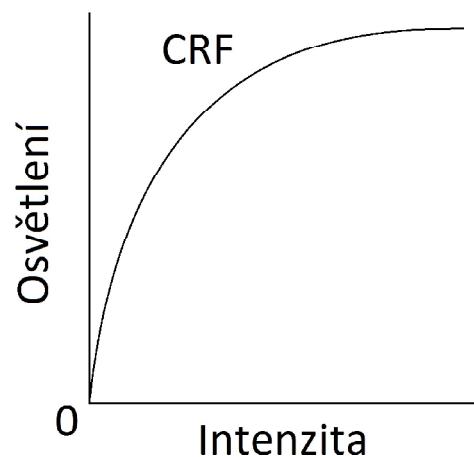
Kompletní proces získání HDR snímků je uveden na Obr. č. 3. Základem je pořízení sekvence snímků s různou expoziční dobou a určení inverzní přenosové funkce $g(z)$, díky které jsme schopni rekonstruovat osvětlení scény. Následuje proces tónování, který upraví získané jasové hodnoty jednotlivých kanálů tak, aby bylo možné výsledný dynamický rozsah zobrazit na běžném monitoru.



Obr. č. 3 - HDR proces [15]

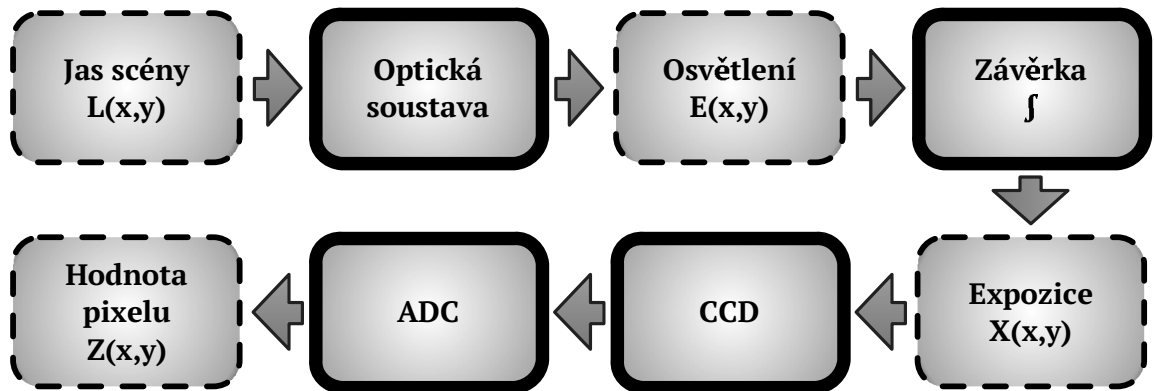
5.2.1 Získání CRF

K tomu, abychom mohli úspěšně kombinovat snímky s různou expoziční dobou, je třeba znát přenosovou funkci kamery CRF. Příklad tvaru nelineární přenosové funkce kamery je uveden na Obr. č. 4.



Obr. č. 4 - Příklad přenosové funkce kamery

Z tvaru přenosové funkce je patrné, že potlačuje vyšší osvětlení a naopak nižší osvětlení je zvýrazněno. Základní schéma získání hodnoty obrazového bodu je uvedeno na Obr. č. 5.



Obr. č. 5 - Schéma získání hodnoty obrazového bodu z jasové hodnoty snímané scény [13]

Hlavním cílem tvorby HDR je rekonstrukce mapy jasů snímané scény. Vztah mezi jasnem scény L a osvětlením je

$$E = L \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2}{f} \cdot \cos^4(\phi), \quad (5.1)$$

kde d je průměr clony, f je ohnisková vzdálenost a Φ je úhel mezi optickým paprskem a optickou osou. Výstupem blokového schématu uvedeného výše je digitalizovaná hodnota obrazového bodu $Z(x,y)$, která je **nelineární** funkcí hodnoty expozice X , definované jako součin osvětlení E s expoziční dobou Δt . Výsledná hodnota expozice X je závislá pouze na tomto součinu, nikoliv na jednotlivých složkách. Prodloužením času expozice na dvojnásobek při poloviční hodnotě ozáření dostaneme shodnou hodnotu X [13,15].

Nazveme-li tuto nelineární funkci funkcí f (CRF) platí

$$X = f^{-1}(Z). \quad (5.2)$$

Prvním krokem při tvorbě HDR snímků tedy bude zjištění této nelineární funkce. Jestliže budeme znát hodnotu X a délku expozice, jsme schopni určit hodnotu E jako

$$E = \frac{X}{\Delta t}. \quad (5.3)$$

Hodnota E je úměrná jasové hodnotě snímané scény L . Na základě reciprocity systému můžeme napsat následující vztah

$$Z_{i,j} = f(E_i \cdot \Delta t_j), \quad (5.4)$$

kde index i je indexem obrazového bodu a index j je indexem aktuálního snímku z dané sekvence. Pro funkci f platí

$$f^{-1}(Z_{i,j}) = E_i \cdot \Delta t_j. \quad (5.5)$$

Jestliže provedeme logaritmus levé a pravé části rovnice (5.5) dostaneme následující rovnici

$$\ln(f^{-1}(Z_{i,j})) = \ln(E_i) + \ln(\Delta t_j). \quad (5.6)$$

Pokud logaritmus inverzní funkce k funkci f označíme jako funkci g dostaneme rovnici

$$g(Z_{i,j}) = \ln(E_i) + \ln(\Delta t_j). \quad (5.7)$$

Pro výpočet funkce f resp. g je možné provést přesná měření nebo využít přímo pořizovaných snímků. S metodou určení přenosové funkce f přímo ze sekvence snímků přišli Debevec a Malik [13].

Cílem je stanovit hodnoty E_i a funkci g tak, aby hodnota střední kvadratické odchylky byla co nejmenší. Rekonstrukce funkce g je závislá pouze na stanovení několika funkčních hodnot $g(Z)$. Pokud stanovíme Z_{\min} a Z_{\max} jako nejtmavší a nejsvětlejší obrazový bod, tak dostačující počet funkčních hodnot $g(Z)$ bude roven $(Z_{\max} - Z_{\min} + 1)$ a N hodnot $\ln(E_i)$, kde N je počet obrazových bodů, který minimalizují kvadratickou funkci O .

$$O = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [g(Z_{i,j}) - \ln(E_i) - \ln(\Delta t_j)]^2 + \lambda \cdot \sum_{z=Z_{\min}+1}^{Z_{\max}-1} g''(z)^2 \quad (5.8)$$

První část výrazu (5.8) splňuje minimální kvadrát rovnice (5.7). Druhá derivace funkce g a její kvadrát zajišťuje, že funkce g bude hladká. Velikost konstanty λ se volí v závislosti očekávaného šumu při měření bodu Z_{ij} . Příklady rekonstrukce funkce $g(Z)$ jsou uvedeny v příloze této práce (Příloha č. 1, 2) [13].

5.2.2 Rekonstrukce osvětlení

Pro stanovení velikosti osvětlení pro každý pixel je využito funkce g a logaritmu expoziční doby. Výsledná velikost osvětlení resp. její logaritmická hodnota je vypočtena dle vztahu

$$\log(E_i) = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{i,j}) \cdot [g(Z_{i,j}) - \log(\Delta t_j)]}{\sum_{j=1}^P w(Z_{i,j})}, \quad (5.9)$$

kde P je počet snímků dané sekvence, w je váhová funkce, g je inverzní logaritmická převodní charakteristika a t_j jsou časy jednotlivých expozičních. Takto získanou mapu osvětlení lze uložit do formátu .hdr [14].

5.2.3 Tónování

Jelikož výsledný snímek obsahující rekonstruované osvětlení scény obsahuje mnohem větší dynamický rozsah než je možné zobrazit na displeji, je nutné snímek tónovat. K tónování se využívají tzv. tónovací operátory v anglosaské literatuře označovány jako TMO (*Tone Mapping Operators*). Podstatné pro tyto operátory je převodní charakteristika, kterou se tónuje vypočtený jas scény na jasový rozsah zobrazovacího zařízení. Tyto operátory lze rozdělit mnoha způsoby. Mezi základní rozdělení patří operátory globální a operátory lokální. Globální operátory, jsou oproti lokálním jednodušší na výpočet, jelikož jsou aplikovány na celý snímek stejným způsobem. Lokální operátory jsou vázány i na okolí bodu v němž se provádí tónovací proces. Mezi globální tónovací operátory patří například Reinhardův operátor (Fotografický operátor), Logaritmický globální operátor, Adaptivní logaritmický globální operátor, Exponenciální globální operátor a mnoho dalších. Mezi lokální operátory patří rovněž výše zmiňované operátory aplikované nikoliv na celý snímek, ale vždy na vybranou oblast snímku. Mezi lokální operátory patří i operátor, který se snaží modelovat vlastnosti sítnice lidského oka tzv. *Retinex* operátor [16].

Pro jednotlivé výpočty se často využívají následující snímky (resp. matice). Mapa jasů se převede na černobílý snímek dle následujícího vztahu

$$L_w = (0,213 \cdot E_{red}) + (0,715 \cdot E_{green}) + (0,072 \cdot E_{blue}). \quad (5.10)$$

Průměrná expoziční hodnota se vypočte dle vztahu

$$L_{avg \log} = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \ln(L_j)\right). \quad (5.11)$$

Z vypočtených převodních charakteristik se odečtou saturační hodnoty pro jednotlivé barevné kanály (r_{sat} , b_{sat} , g_{sat}). Jednotlivé operátory se liší výpočtem jasů reprodukčního zařízení (matice L_D).

Globální exponenciální tónovací operátor

$$L_D = 1 - \exp\left(-\frac{L}{L_{avg \log}}\right). \quad (5.12)$$

Adaptivní logaritmický globální operátor

$$L'_w = \frac{L_w}{L_{avg \log}} \quad (5.13)$$

$$L_D = \frac{L_{Dmax} \cdot 0.01}{\log(L'_{wmax})} \cdot \frac{\ln(L'_w + 1)}{\ln\left\{2 + \left[\left(\frac{L'_w}{L'_{wmax}}\right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}\right] \cdot 8\right\}},$$

kde b je parametr, který se volí experimentálně v rozmezí 0,7 až 0,9.

Globální fotografický tónovací operátor

$$L'_w = \frac{k}{L_{avg \log}} \cdot L, \quad (5.14)$$

kde k je parametr, který se volí v závislosti na zpracovávaných snímcích v intervalu 0,18 až 0,72. Výsledný tónovaný snímek se vypočte pomocí jasové matice L_D

$$L_D = \frac{L'_w \cdot \left(1 + \frac{L'_w}{L_{white}^2}\right)}{1 + L'_w}, \quad (5.15)$$

kde L_{white} je maximální úroveň jasové matice L_w . Jednotlivé barevné kanály tónovaného snímku se vypočtou dle vztahu (5.16)

$$\begin{aligned}
 R_{new} &= L_D \cdot \left(\frac{E_{red}}{L_w} \right) \\
 G_{new} &= L_D \cdot \left(\frac{E_{green}}{L_w} \right) \\
 B_{new} &= L_D \cdot \left(\frac{E_{blue}}{L_w} \right)
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

Tónovacích operátorů je nepřeborné množství. Je důležité vždy operátor vhodně zvolit vzhledem k zdrojovým snímkům a s ohledem na následující zpracování dat [16].

5.3 Lineární metoda HDR

Předchozí metoda tvorby HDR snímků je využívána především pro zpracování multimediálních snímků. Implementace celé škály tónovacích operátorů naleznete například v programu Photoshop CC, v jednom z nejvíce používaných editorů pro zpracování digitální fotografie. Jaké výsledky dosáhne tato rozšířená metoda v oblasti vědeckých dat? Jestliže se blíže podíváme na průběh převodní charakteristiky fotoaparátu zjistíme, že se skládá prakticky ze tří částí: část nelineární, část lineární a opět část nelineární. Předchozí metoda počítá s celou škálou hodnot. Při zpracování snímků v astronomii je jakákoliv nelineární závislost nežádoucí. Lineární metoda tvorby HDR využívá pouze rozmezí hodnot, pro které je převodní charakteristika lineární.

Je nutné, aby převodní charakteristika byla dopředu uživateli známá a uživatel sám mohl zvolit interval linearity $\langle Z_{min} ; Z_{max} \rangle$. Základem je stále sada snímků s různou expoziční dobou. Tyto snímky můžeme symbolicky označit jako I_1, I_2 až I_M , kde M je celkový počet snímků. Jednotlivým snímkům odpovídají expoziční časy t_1, t_2 až t_M . V prvním kroku se jednotlivé hodnoty obrazových bodů normují k času t_0 , dle vztahu

$$I'_j = I \cdot \frac{t_0}{t_j}, j = 1 \dots M, \tag{5.17}$$

kde t_0 je vztažný čas vhodně zvolený uživatelem tak, aby výsledné hodnoty nebyly příliš velké nebo naopak příliš malé. Výsledný bod snímku HDR je vypočten dle vztahu:

$$I_{HDR}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^M I'_{j,i}, \tag{5.18}$$

kde jednotlivé hodnoty snímku $I'_{j,i}$ jsou započteny do celkového průměru pouze v případě, že leží ve vybraném intervalu linearity, N je počet hodnot ležících v intervalu linearity i -tého bodu a M je počet snímků.

6. RTS2 & CELESTRON CPC 800

Software RTS2 (*Remote Telescope System version 2*) je systém určený pro kompletně automatizované ovládání astronomické observatoře. Tento software vznikl za spolupráce studentů z pražské Karlovy univerzity v roce 1993-2003. Systém je navržen tak, aby byl pokud možno co nejvíce robustní. Proto neustále probíhají optimalizace pro jednotlivé observatoře, dalekohledy a další zařízení. Hlavním cílem je vytvořit plně autonomní systém observatoře. Mezi jednotlivé úkoly patří otevření kopule observatoře, ovládání dalekohledu, kamery, montáže, informace o aktuálním stavu počasí atd. Podstatná je samozřejmě synchronizace jednotlivých zařízení tak, aby například nedošlo k pozorování ve stavu, kdy je kopule observatoře zavřená, nebo dalekohled není nastaven do správné pozice. Tento software využívají observatoře po celém světě. Jako příklad můžu jmenovat následující observatoře: BART(CZECH), BOOTES-1 a BOOTES-2 (ESP), FRAM(ARG), Columbia(USA) a další [17].

6.1 Ovládání RTS2

Program RTS2 se spouští z příkazové řádky pomocí příkazu `sudo service rts2 start`, vypne se pomocí `sudo service rts2 stop` a resetuje pomocí `sudo service rts2 restart`. I v případě, že observatoř nedisponuje některým zařízením, jsou v programu vytvořeny tzv. *dummy devices*, které slouží k testování softwaru. Zároveň je díky tomu možné využívat RTS2 například jen pro ovládání dalekohledu, aniž bychom měli k centrálnímu zařízení připojena další zařízení. Základní přístupové rozhraní RTS2 je monitorovací okno, které lze spustit příkazem `rts2-mon`. Ukázkou monitorovacího okna můžete vidět na Obr. č. 6.

```

rts2-mon@celer
System  Status  Debug  Help
-----
cent   HARD OFF
infotne x 2014-04-29T22:07:36.077 CET (-22.943s)
CO     longitude +015 00 00.00
CUP    latitude  +50 00 00.00
FO     W morning_off true
IMGP   W morning_standby true
W0     W required_devices
XMLR   failed_devices
stat   weather_reason
       next_state_change 2014-04-30T04:31:14.000 CET ( 6:23:14.978)
       next_state 4 dawn
       W night_horizon -10 00 00.00
       D: "time of last update"

22:07:46.255xixcentrald State changed from bad weather | HARD OFF to HARD OFF
HARD OFF c | F9 menu | F10 exit | 0 0 [15] 11:38:47|2014-04-29 20:07:55
  
```

Obr. č. 6. - RTS2 monitorovací okno

V levé části monitoringu jsou jednotlivá zařízení, v pravé části jednotlivé informace a možné parametry nastavení aktuálně vybraného zařízení. Dolní část monitorovacího okna slouží jako informační výpis provedených událostí. Mezi těmito sekcemi lze přecházet pomocí klávesnice *tab*. Zapnutí RTS2 do stavu “ON” se provede pomocí funkční klávesy F4 a následného potvrzení. Existuje více způsobů, jak ovládat RTS2. Prvním a pravděpodobně nejrychlejším způsobem je již zmíněné monitorovací okno, které umožňuje nastavit některé z parametrů jednotlivých zařízení. Zároveň je zde příkazový řádek, do kterého zkušenější programátor může přímo psát příkazy. Například příkaz *T0.move +12.0 +10.0* nastaví dalekohled na souřadnice RA=12.0, DEC=10.0. Jméno daného zařízení není specifikováno dle výrobce, ale je mu přiřazeno krátké orientační jméno jako je například *T0 (Telescope 0)*. Dalším způsobem ovládní RTS2 je JSON protokol. Pro ovládní RTS2 pomocí JSON protokolu, například z programu, který je napsán v jazyce C++, je třeba mít nainstalovanou podporu JSON protokolu. Této podpory lze například dosáhnout pomocí knihoven *json-c*, *json-glibc* nebo *jsoncpp*. Obdobný příkaz pro nastavení dalekohledu na zadané souřadnice pomocí JSON protokolu by vypadal následovně:

```
rts2-json --user=test --password=test -G T0.TEL_ 50 12
```

V tomto případě se jedná o nastavení dalekohledu v souřadnicovém systému Alt/Az. Parametr *TEL_* je jedním z parametrů dalekohledu, které lze najít v monitorovacím okně RTS2. V neposlední řadě lze RTS2 ovládat pomocí webového prohlížeče. V nynější době je toto možná budoucí cesta pro RTS2. Jednotlivé příkazy jsou zadávány pomocí URL adresy. Příklad URL adresy pro získání výpisu zařízení vypadá následovně:

```
localhost:8889/api/devices
```

Tento přístup ovládní RTS2 jsem vybral pro realizaci svého programu pro ovládní robotického dalekohledu CELESTRON CPC 800.

6.2 Robotický dalekohled CELESTRON CPC 800

Tento dalekohled je k dispozici na katedře Radioelektroniky v rámci projektu Gloria [19]. Jedná se o typ dalekohledu Schmidt-Cassegraine s ohniskovou vzdáleností 2032 mm a velikostí apertury 8" (203.2 mm).



Obr. č. 7. - Dalekohled CELESTRON CPC 800 [18]

Dalekohled je možné ovládat pomocí ručního ovladače, nebo pomocí sériového portu RS-232. Po zapnutí dalekohledu je nutné dalekohled nastavit. V první řadě je potřeba dalekohled zaměřit. Přesto, že je dalekohled vybaven interní GPS lokátorem je nutné ho zaměřit pro přesnou orientaci na noční obloze. Pro zaměření dalekohledu je třeba použít ruční ovladač. Dalekohled nabízí několik zaměřovacích módů:

► **Automatické zaměření dvou hvězd**

Uživatel je vyzván k zaměření jedné hvězdy ručně a na druhou hvězdu se dalekohled automaticky přesune. Poté uživatel potvrdí pozici dané hvězdy, nebo dalekohled ještě ručně přenastaví.

► **Zaměření pomocí dvou hvězd**

Uživatel zaměří ručně obě hvězdy.

► **Zaměření na jednu hvězdu**

Jedná se o nejjednodušší zaměření dalekohledu. Stačí zaměřit jednu z hvězd, které dalekohled nabízí z katalogu. Dokonce je možné zaměřit pouze měsíc.

► **Sky zaměření**

Tento typ zaměření využívá GPS lokátoru k získání aktuální polohy dalekohledu a dále už jen stačí zaměřit jakékoliv tři hvězdné objekty.

► **Solar zaměření**

Dalekohled vypíše na displej seznam přes den viditelných planet, díky kterým je možné dalekohled zaměřit.

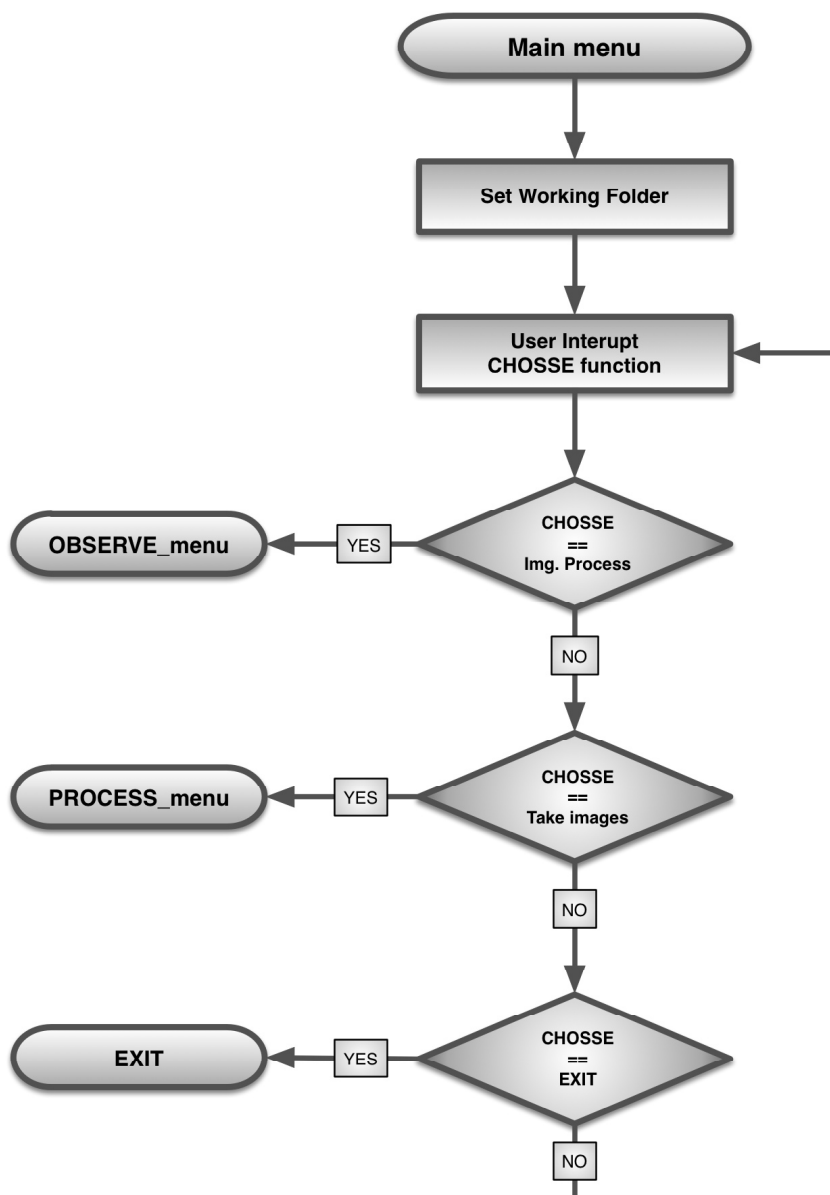
Pro přesné zaměření dalekohledu doporučuji *Sky* zaměření, kde se zaměřují 3 hvězdy a navíc je využit GPS lokátor. Je samozřejmostí, že špatné zaměření dalekohledu vede k nepřesnému nastavení polohy. Poté, co je dalekohled úspěšně zaměřen, zapne se automatické otáčení dalekohledu spolu s noční oblohou [18].

7. Program

Hlavním cílem diplomové práce bylo vytvoření programu v jazyce C++, který by ovládal dalekohled CELESTRON CPC 800, fotoaparát NIKON D5100 a umožnil *post processing* pořízených snímků. Pro zpracování snímků jsem využil knihovny pro zpracování obrazu OpenCV 3.0.0 [20]. Pro HDR snímky se používá několik dostupných formátů jako jsou například .hdr, .exr, .pic. Poslední verze OpenCV 3.0.0, která je volně dostupná na webovém portálu github.com umožňuje ukládání mapy jasů do formátu .hdr. Část programu týkající se tvorby HDR snímků, vybraných metod skládání snímků a ovládání fotoaparátu NIKON byla otestována i na operačním systému Os.X. 10.9.2. (Mavericks) [21]. Finální program je optimalizovaný pro operační systém Ubuntu 11.10. [22] z důvodu kompatibility softwaru RTS2. Pro programování jsem využil vývojové prostředí Xcode ver. 5.1.1. V následujících odstavcích je popsán samotný program.

Program se spouští přímo z terminálu. Před spuštěním programu je nutné provést následující kroky. Připojit dalekohled a fotoaparát k počítači. Fotoaparát musí být nastaven na manuální režim a být stejně jako dalekohled zapnutý. Dále je nutné, aby fotoaparát byl od počítače odpojen “*unmount*”. Následuje zapnutí RTS2 pomocí příkazu který je uveden v předchozí kapitole 7.2.1. Po zapnutí dalekohledu dochází k jeho inicializaci. Program automaticky spustí druhé okno terminálu pro spuštění RTS2 a následně otevře monitorovací okno. V případě, že je v sekci jednotlivých zařízení uveden dalekohled (T0), je vše v pořádku. V opačném případě proběhla špatně inicializace a uživateli je nabídnuta volba RTS2 resetovat. Po úspěšné synchronizaci RTS2 a dalekohledu je nutné RTS2 nastavit do aktivního režimu (F4 -> a potvrdit). Následuje krok, který nesmí být opomenut, jinak by program nebyl zcela funkční. Jedná se o zaměření dalekohledu. Jednotlivé metody zaměření jsou uvedeny v předchozí kapitole 7.2. Kamera může být připojena k dalekohledu do primárního ohniska pomocí redukce CELESTRON Visual Back 1^{1/4}. Uživatelské prostředí je vytvořeno přímo v terminálu. Hlavní menu programu je znázorněno na vývojovém diagramu viz Obr. č. 8. V prvním kroku uživatel potvrdí, a nebo změní pracovní adresář. V kroku následném vybere, zda chce pořídit snímky pomocí dalekohledu, nebo zda chce snímky jen zpracovat. Poslední možností je volba ukončení programu. Pro přehlednost

jednotlivých diagramů jsem možnost ukončení programu ne vždy zahrnul do diagramu samotného. Program je navržen tak, aby uživatel mohl na každém větším rozcestníku zvolit možnost okamžitého ukončení programu.



Obr. č.8 - Vývojový diagram, Hlavní menu

7.1 OBSERVE Menu

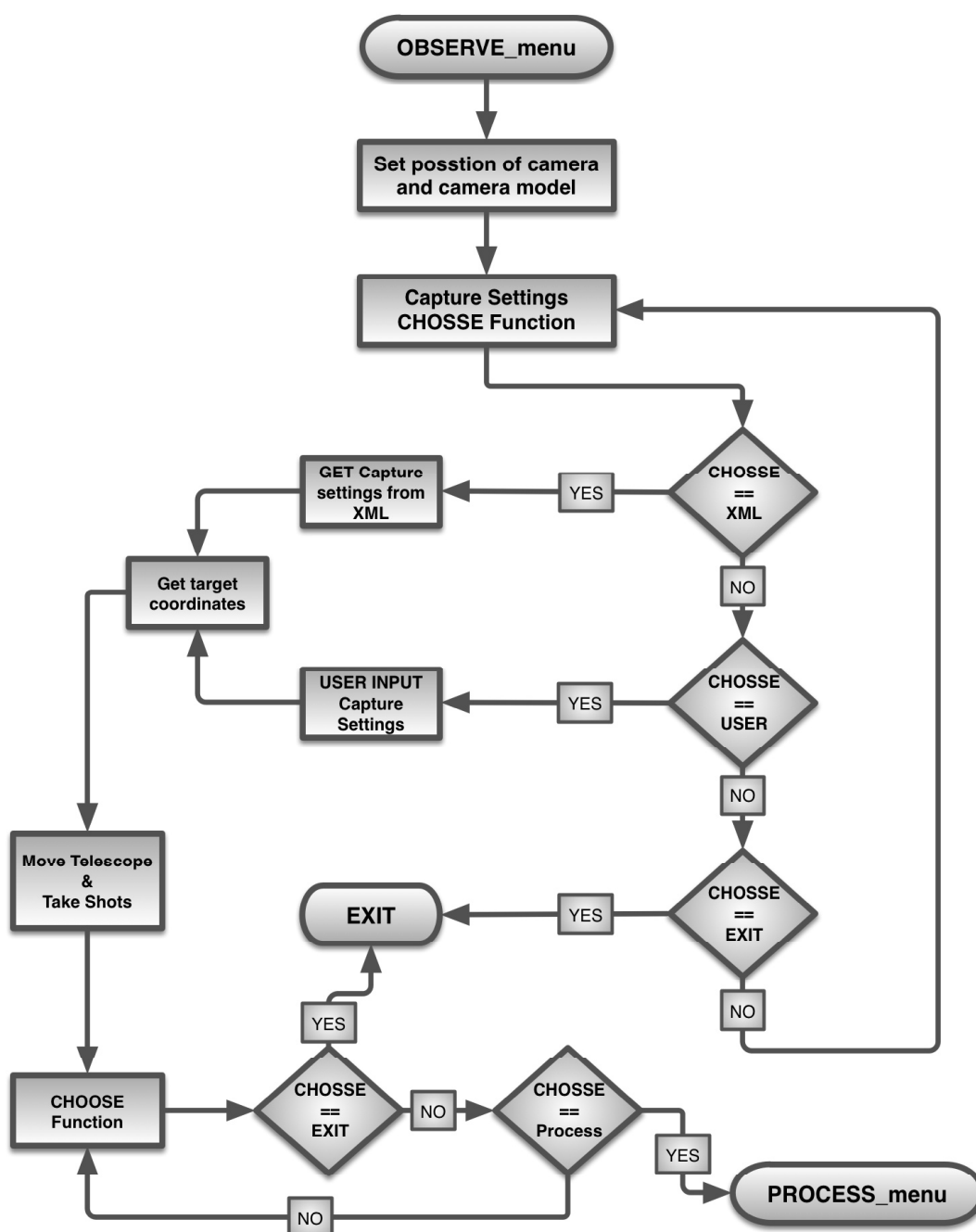
Program je nastaven tak, aby uživateli umožňoval připojení fotoaparátu do primárního ohniska dalekohledu nebo na horní část těla dalekohledu. Rozdíl spočívá v tom, že v prvním případě je optika fotoaparátu tvořena samotným dalekohledem a v případě druhém je fotoaparát osazen libovolným kompatibilním objektivem. V tomto menu uživatel nastaví jednotlivé parametry fotoaparátu tzn. expoziční časy,

citlivosti ISO, velikost snímku, kvalitu snímku a clonu v případě, že je fotoaparát osazen objektivem. V pracovním adresáři je umístěný i xml soubor s názvem *Settings.xml*, ve kterém si uživatel sám dopředu může nastavit jednotlivé parametry snímků. Uživatel tedy může celé nastavení fotoaparátu nastavit ručně přímo v programu, nebo jej načíst z xml souboru. Jestliže uživatel zvolí nastavení fotoaparátu přímo z programu, přepíše se hodnoty xml souboru tak, aby se při opětovném spuštění programu nemusel fotoaparát opětovně nastavovat a uživatel mohl jen změnit souřadnice pozorovaného objektu. Při nastavení jednotlivých hodnot je vždy uživatel vyzván k potvrzení zadané hodnoty. Uživateli se vždy vypíše tabulka hodnot, které fotoaparát/objektiv umožňuje nastavit (možné expoziční časy apod.).

Po nastavení fotoaparátu následuje nastavení souřadnic. Zde je uživatel vyzván k výběru souřadnicového systému a následně k zadání souřadnic objektu. Opět bych rád zdůraznil správné zaměření dalekohledu. Program RTS2 je ochráněn i proti pozorování objektů které jsou pod horizontem. Je proto důležité i při správném zaměření vědět přibližně, kde se daný objekt nachází. Jestliže nedojde ke správnému natočení dalekohledu z výše uvedených důvodů, pořídí se sada snímků z aktuální pozice dalekohledu.

Dalekohled CELESTRON je vybaven jistými limity. Jedním z limitů je tzv *slew limit*. Tento limit může rovněž komplikovat nastavení souřadnic. Jedná se o maximální a minimální souřadnici Alt (*Altitude*) v základním nastavení dalekohledu, nastavenou na 0° a 90°. Po úspěšném nastavení souřadnic se dalekohled začne posouvat do zadaných souřadnic. Maximální rychlost otáčení dalekohledu CELESTRON CPC 800 jsou 3°/s. Maximální rychlost otáčení je u robotických dalekohledů velmi důležitým parametrem.

Většina dalekohledů, jež využívá softwaru RTS2, je zaměřena na detekci gama záblesků. Často bývá RTS2 napojena na GCN síť (*GRB Coordinates Network*), která poskytuje nejrychlejší informaci o detekci GRB (*Gamma ray burst*) prostřednictvím tzv. GCN alert. Tato upozornění vznikají na základě detekce gama záblesků pomocí satelitů SWIFT, HETE, INTEGRAL, Ulysses a XTE. Gama záblesky jsou v RTS2 nastaveny v prioritách pozorování na nejvyšším stupni. *Observe* menu je schématicky zobrazeno na následujícím vývojovém diagramu.



Obr. č. 9. - Vývojový diagram - Observe Menu

V rámci programu jsem vytvořil podporu pro dva fotoaparáty a fotoaparát NIKON D5100 a CANON EOS 60D. Ovládání fotoaparátu a nastavení jednotlivých parametrů je provedeno pomocí knihovny *gphoto2* [23], která používá pro komunikaci se zařízením PTP protokol (*Picture Transfer Protocol*). Před zahájením posílání příkazů musí být jakákoliv další komunikace se zařízením ukončena. V případě operačního systému Mac Os.X. se ukončení komunikace provede příkazem *killall PTPCamera*, v případě Ubuntu se provede okamžitě po připojení fotoaparátu (*unmount*). Fotoaparát se pak dá

nastavit volně z terminálu. Všechny příkazy začínají `gphoto2` a dále následuje jeden z příkazů uvedených v následující tabulce.

Příkaz	Akce
<code>--list-config</code>	seznam možných nastavení
<code>--list-files</code>	seznam snímků uložených na SD kartě
<code>--get-config adresa</code>	možné hodnoty dané proměnné
<code>--set-config adresa=x</code>	nastavení proměnné na hodnotu x
<code>--auto-detect</code>	auto detekce zařízení

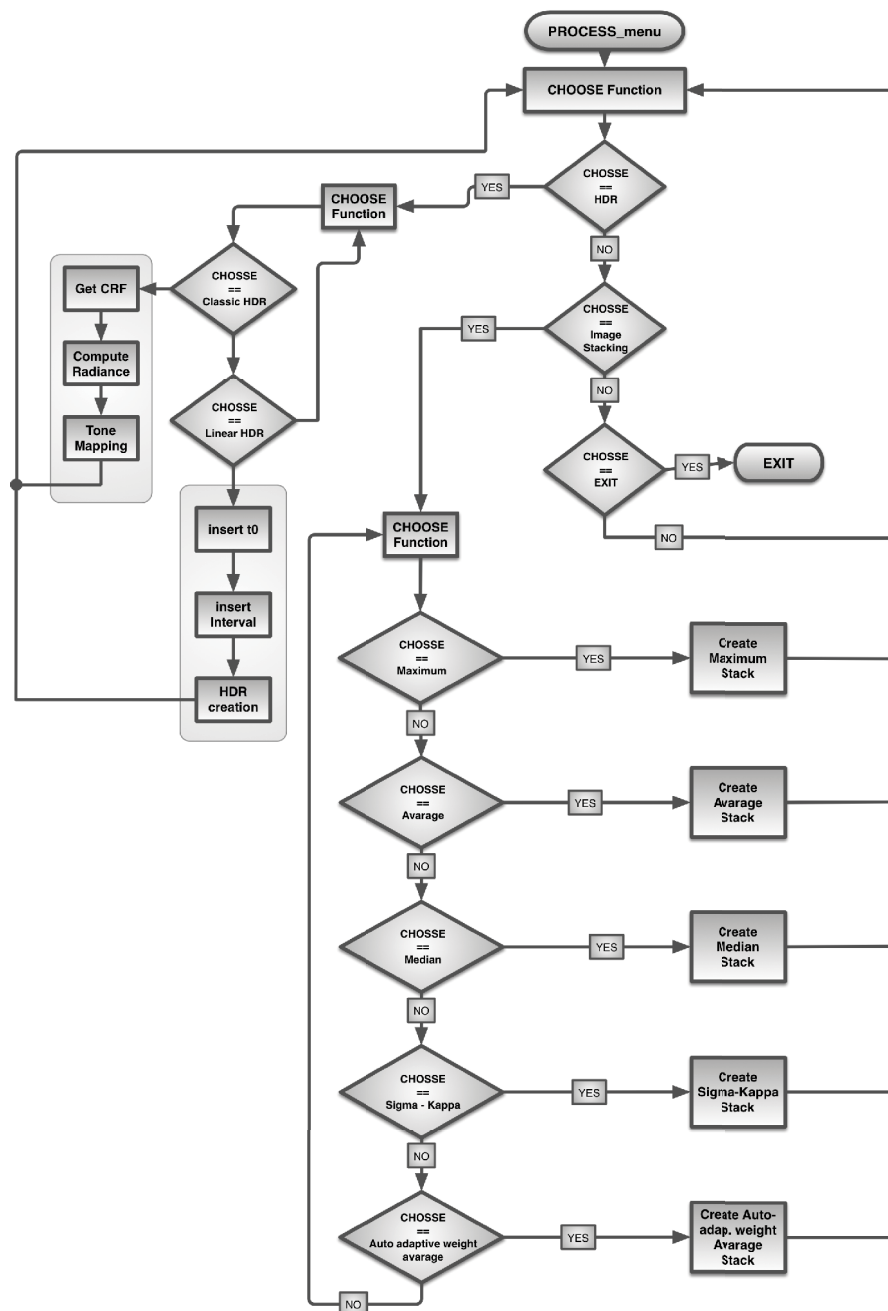
Tabulka č. 2 - Ukázka příkazů knihovny `gphoto2`

Pro spuštění jednotlivých *shell* příkazů jsem vytvořil samostatné skripty, které spouštím přímo z programu pomocí funkce `system()`. Poté, co se pořídí sada snímků, se v pracovním adresáři vytvoří složka `Capture_photos`, do které se automaticky stáhnou všechny pořízené snímky. Následuje automatické přesměrování do *Post-processing* menu.

7.2. Post-Processing menu

V této části programu jsou implementovány jednotlivé metody HDR a vybrané metody skládání snímků. Přístup do *Post-processing* menu je uživateli umožněn okamžitě po spuštění programu, nebo jakmile je sem přesměrován z *Observe* menu. Snímky ve zdrojovém adresáři musí být jednotného formátu. Pro zpracování snímků využívám knihovnu OpenCV 3.0.0. Tato knihovna bohužel nepodporuje formát RAW. Proto jsem napsal podporu pro NIKON RAW formát (.NEF) pomocí knihovny Libraw [24]. Implementovaná funkce `RAW2Mat` převede RAW snímek do maticového tvaru. Výstupní snímek je vždy uložen v kvalitě vstupního snímku. Program nabídne uživateli následující možnosti: HDR, Skládání snímků, a nebo ukončení programu. V programu je implementována metoda HDR spolu s algoritmem pro získání inverzní logaritmické převodní charakteristiky. Tato charakteristika může být nahrazena gama křivkou, kdy uživatel zadá parametr gama. Program umožňuje aplikaci všech tónovacích operátorů

zmiňovaných v kapitole 5.2.3 *Tónování* a rovněž umožňuje tvorbu HDR snímků lineární metodou. Strukturu *Post-Processing* menu můžete vidět na Obr. č. 10.



Obr. č. 10. - Vývojový digram - *Post-processing* menu

Součástí programu je 5 metod skládání snímků. Jedná se o metodu Maxima, Průměru, Mediánu, Sigma-kappa a Automaticky váženého průměru. Pro dosažení lepších výsledků doporučuji před zahájením zpracování snímku snímky korigovat pomocí snímku *Master dark* a snímku *Flat field*. Rovněž doporučuji před vytvořením HDR snímků jednotlivé snímky zaregistrovat vhodným astronomickým softwarem, který jednotlivé snímky zarovná. V této práci jsem pro korekci snímků a jejich registraci

využil softwaru IRIS [26], který slouží výhradně pro zpracování astronomických dat a jedná se o freeware software.

7.3. Možné pokračování

Jako možné pokračování vývoje tohoto programu bych považoval implementaci korekce jednotlivých snímků pomocí snímků *Master Dark* a *Master Flatfield* a registraci jednotlivých snímků. Pro vytvoření HDR snímků je podstatná přenosová funkce kamery. Tu lze odhadnout pomocí Debevecova algoritmu, nebo ji odsimulovat například pomocí gama křivky. Pro přesné výsledky je přínosnější mít přesně naměřenou převodní charakteristiku pro daný fotoaparát. Program umožňuje uživateli importovat naměřenou převodní charakteristiku z yml souboru. Samotné měření převodní charakteristiky nebylo v rámci diplomové práce provedeno. Dále bych doporučil implementaci lokálních tónovacích operátorů.

8. Testování

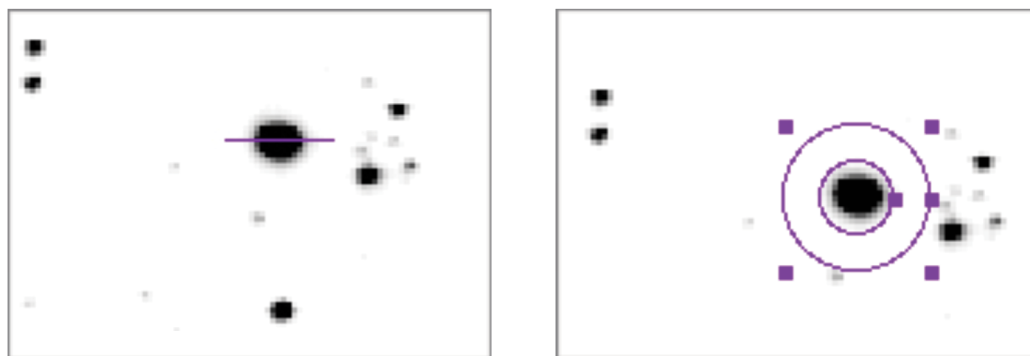
V rámci diplomové práce jsem provedl testování jednotlivých metod skládání snímků a tvorby HDR na třech typech dat. Prvním typem jsou vybrané multimediální snímky, druhým astronomická data a třetím snímky optické Fourierovy transformace. Cílem testování astronomických snímků bylo porovnat vliv skládání snímků na tvar a magnitudu hvězd. Jakým způsobem budou snímky modifikovány pomocí klasické metody tvorby HDR snímků oproti lineární metodě tvorby HDR? Zajímala mě rovněž aplikace tónovacích operátorů na astronomická data. Pro vyhodnocení jednotlivých metod byl použit software SAOImage DS9 [25].

8.1. SAOImage DS9

Jedná se o freeware software, který je často využíván pro zpracování a analýzu astronomických dat. Podporuje astronomický formát obrazu .FITS, ale i další bitmapové formáty jako jsou TIF, JPEG a PNG. Samotná aplikace nepotřebuje žádnou instalaci či další softwarovou podporu a je multiplatformní. Při analýze získaných dat je použita poslední dostupná verze softwaru 7.2 [25].

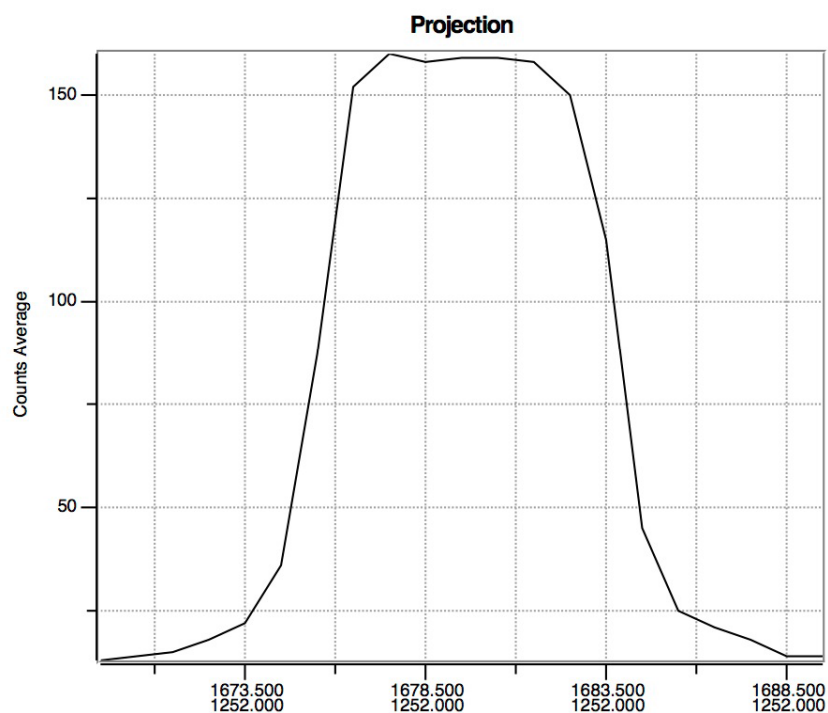
8.1.1. Analýza dat

Pomocí programu DS9 jsem vybral 4 hvězdy v testovaném snímku, na kterých jsem testoval celkovou jasnost hvězdy, střední hodnotu, RMS, směrodatnou odchylku a jasový profil hvězdy. Postup analýzy astronomických dat v prostředí programu DS9 je následující. V prvním kroku importuji daný snímek (file->import>”vybraný formát”). Následuje výběr hvězdy, který uživatel volí dle potřeby. Pro následné měření je nutné vybrat část snímku, ve které se daná hvězda vyskytuje. Jedná se o výběr oblasti tzv. *region*. Tento výběr může být proveden pomocí několika tvarů. Já jsem pro výpočet RMS a celkového jasu hvězdy vybral tvar *Annulus*. Příklad výběru můžete vidět na Obr. č.11. Tento typ oblasti výběru poskytuje statistické informace jako jsou jasnost hvězdy, RMS a směrodatná odchylka. Jasový profil hvězdy lze získat pomocí výběru tvaru *Projection*. Výsledné testy byly provedeny s přesností 8 bitů. Při importu snímku do programu SAOImage DS9 je vždy snímek převeden na snímek černobílý, v případě 16-bitového TIF snímku je převeden na 8-bitový.



Obr. č. 11 - DS9 - Příklad výběru pomocí tvaru Projection (vlevo), příklad výběru okolí hvězdy pomocí tvaru Annulus (vpravo)

Výsledný jasový profil hvězdy je možné zobrazit jako 2D graf. Ukázka jasového profilu hvězdy je uvedena na Obr. č. 12.



Obr. č. 12 - DS9 - Jasový profil hvězdy

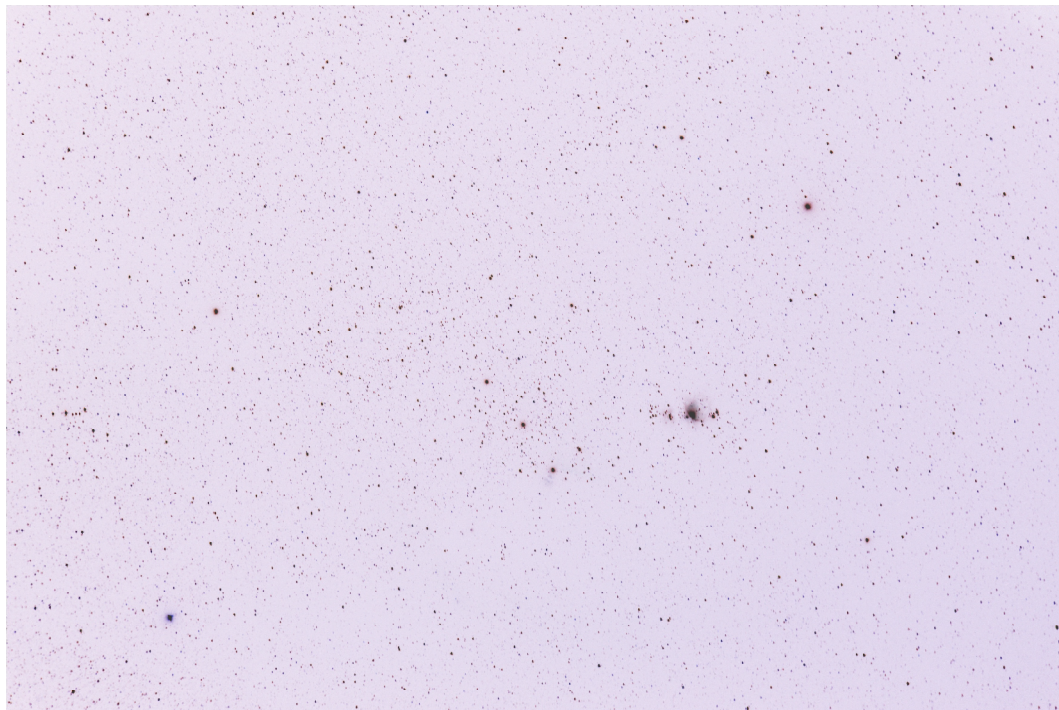
8.2 Výsledky skládání snímků

Pro porovnání efektivity většího počtu zdrojových snímků jsem testy provedl na sadách snímků po 3, 15 a 21 snímcích. Při testování jsem vždy vybral 4 konkrétní hvězdy, které jsem pro jednotlivé metody analyzoval. V této kapitole je uvedena jen část naměřených dat pro prezentaci výsledků. Zbylé naměřené hodnoty jsou uvedeny v přílohách této práce (Příloha č. 5.-12.).

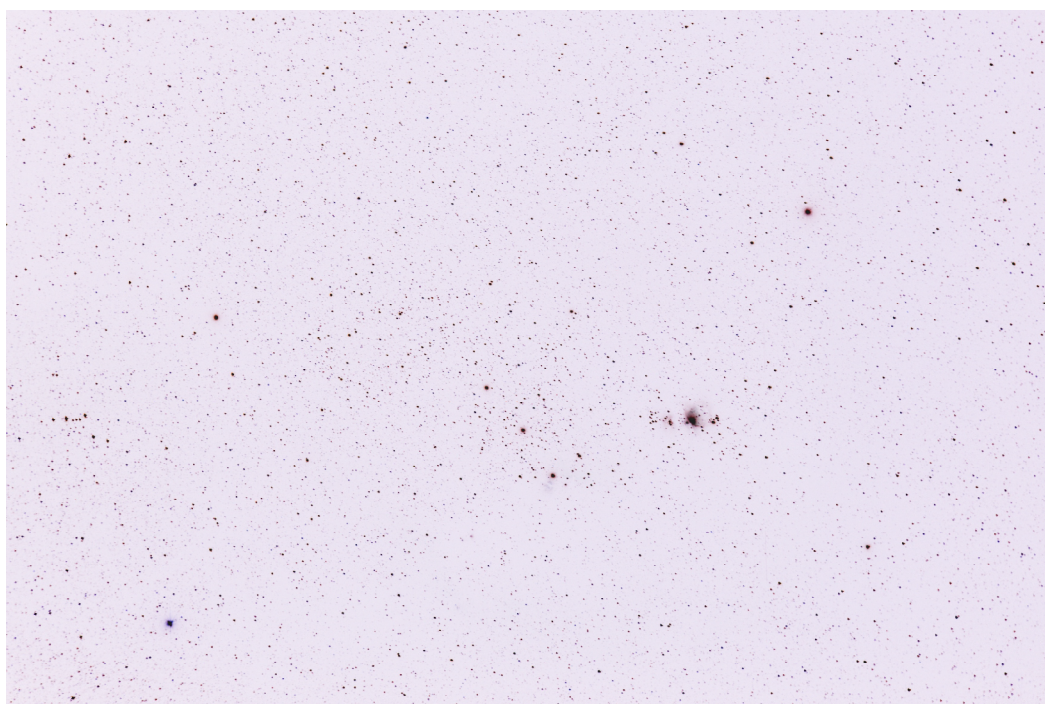
Pro testování jsem vybral 2 sady snímků a to souhvězdí ORION a Plejády (M-45).
Autorem snímků je p. Ing. Petr Skala.

Sada snímků - ORION:

Ukázky sady snímků souhvězdí ORION jsou uvedeny na Obr. č. 13,14.



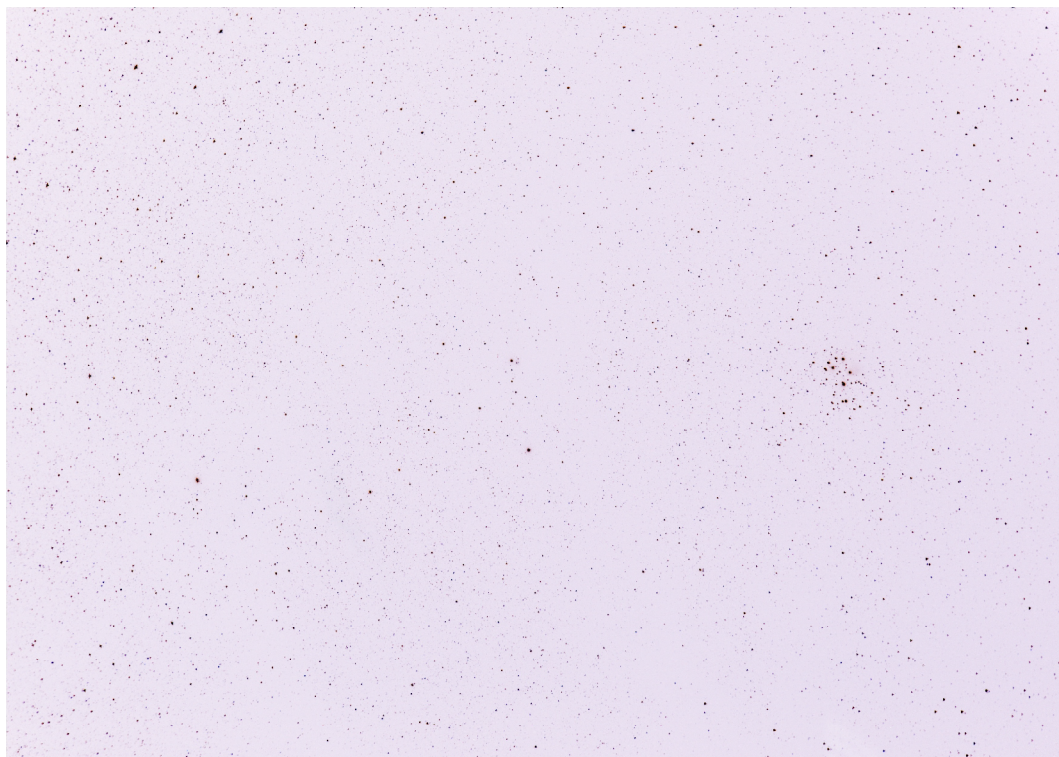
Obr. č. 13 - Ukázka sady snímků souhvězdí Orion, snímek č. 1 - negativní zobrazení



Obr. č. 14 - Ukázka sady snímků souhvězdí Orion, snímek č. 21 - negativní zobrazení

Sada snímků Plejád (M-45):

Ukázky sady snímků Plejád (M-45) jsou uvedeny na Obr. č. 15,16.



Obr. č. 15 - Ukázka sady snímků Plejád M-45, snímek č. 1 - negativní zobrazení



Obr. č. 16 - Ukázka sady snímků Plejád M-45, snímek č. 2 - negativní zobrazení

Sady snímků obsahují každá 21 expozic a byly pořízeny fotoaparátem CANON EOS 20D. Sady expozic jsem použil pro testování metod skládání snímků. V tabulce č. 3 jsou uvedeny výstupní parametry pro jednu konkrétní hvězdu. Jako referenční hodnota je brána hodnota originálního snímku z dané sady. Hodnoty byly naměřeny pomocí programu SAOImage DS9 [25]. Pro hodnotu RMS platí

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i)^2} . \quad (9.1)$$

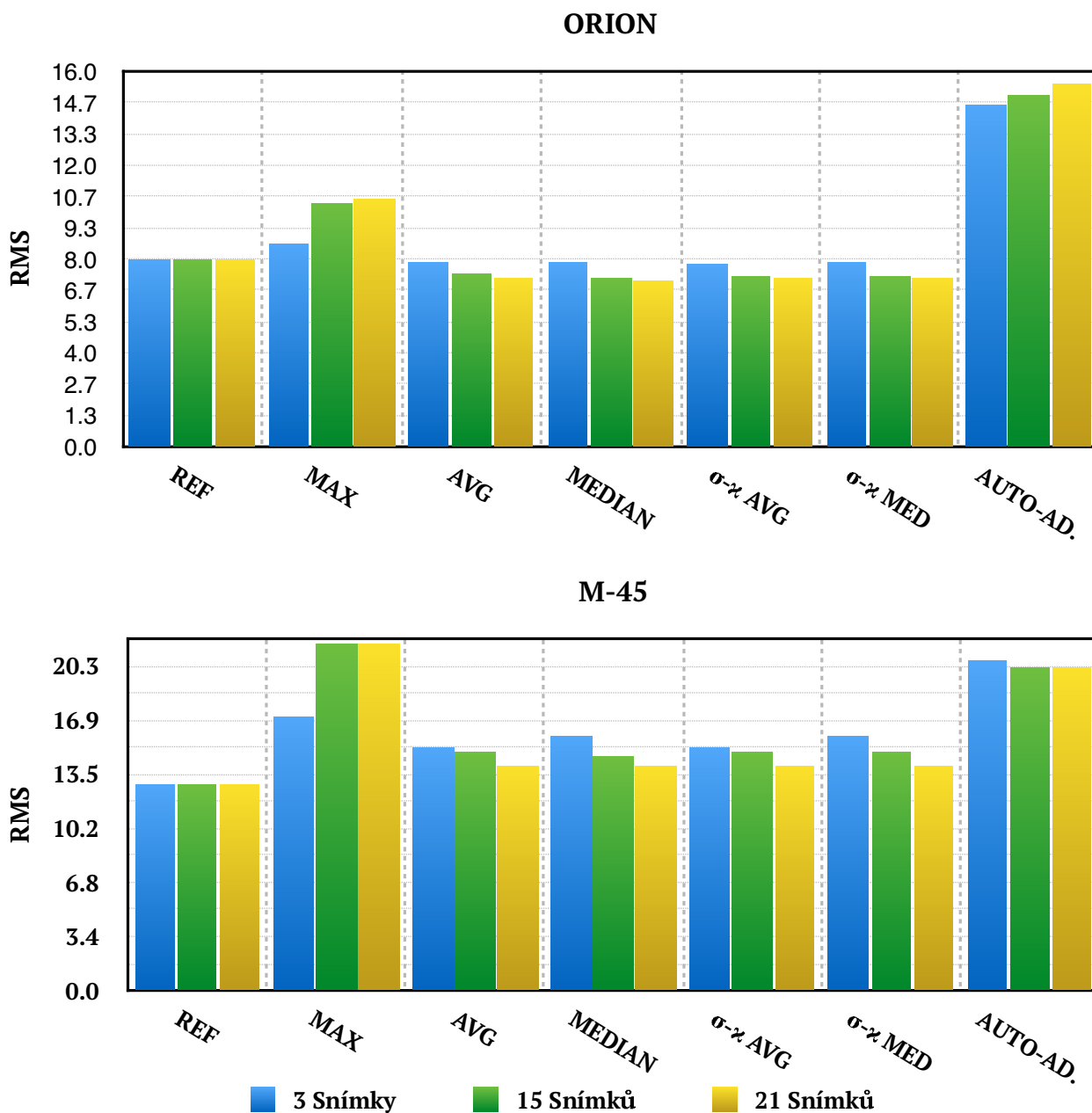
Směrodatná odchylka se vypočte

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - X_{mean})^2} . \quad (9.2)$$

M - 45 (Plejády)				
Snímek	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Reference	7.92819	2981	0.790672	7.96752
Maximum	8.60638	3236	0.8687	8.65011
Střední hodnota	7.81649	2939	0.703974	7.84813
Medián	7.85106	2952	0.675678	7.88009
Sigma-Kappa_avg	7.69415	2893	0.683831	7.72448
Sigma-Kappa_med	7.81383	2938	0.69758	7.84491
Auto-adaptive avg	14.5585	5474	1.04768	14.5962
ORION				
Reference	12.6281	4041	2.46776	12.867
Maximum	16.7781	5369	3.28788	17.0972
Střední hodnota	14.9656	4789	2.85297	15.2351
Medián	15.5875	4988	3.00809	15.8751
Sigma-Kappa_avg	14.9531	4785	2.8517	15.2226
Sigma-Kappa_med	15.5813	4986	3.01242	15.8698
Auto-adaptive avg	20.1438	6446	4.17933	20.5727

Tabulka č. 3 - Naměřená data - počet zdrojových snímků 3

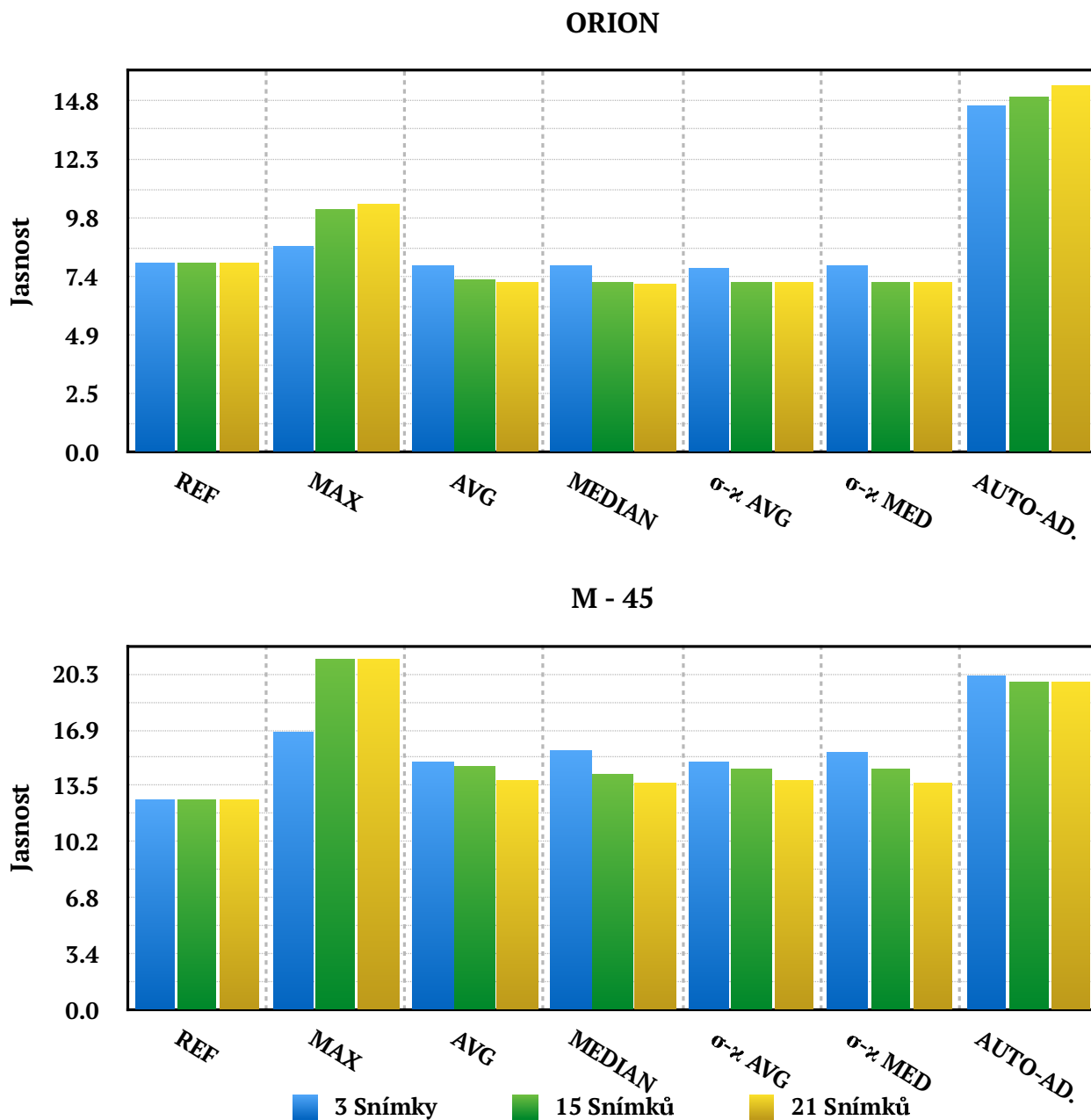
Celková jasnost hvězdy je vypočtena jako průměrná hodnota obrazového bodu ve vybrané oblasti. Měření bylo provedeno na 4 vybraných hvězdách, pro počet zdrojových snímků 3, 15 a 21. Závislost RMS na počtu zdrojových snímků je uvedena na Obr. č. 17.



Obr. č. 17 - Závislost RMS na počtu zdrojových snímků

Metody Maxima a Auto-adaptivní průměr dosahují nejvyšších hodnot RMS. Metoda Maximum, jako jediná z testovaných metod, odpovídá trendu rostoucího RMS spolu s rostoucím počtem zdrojových snímků. Metody σ - κ jsou si velmi podobné, i když metoda výběru konečné hodnoty z daného intervalu κ pomocí průměru získává lepší

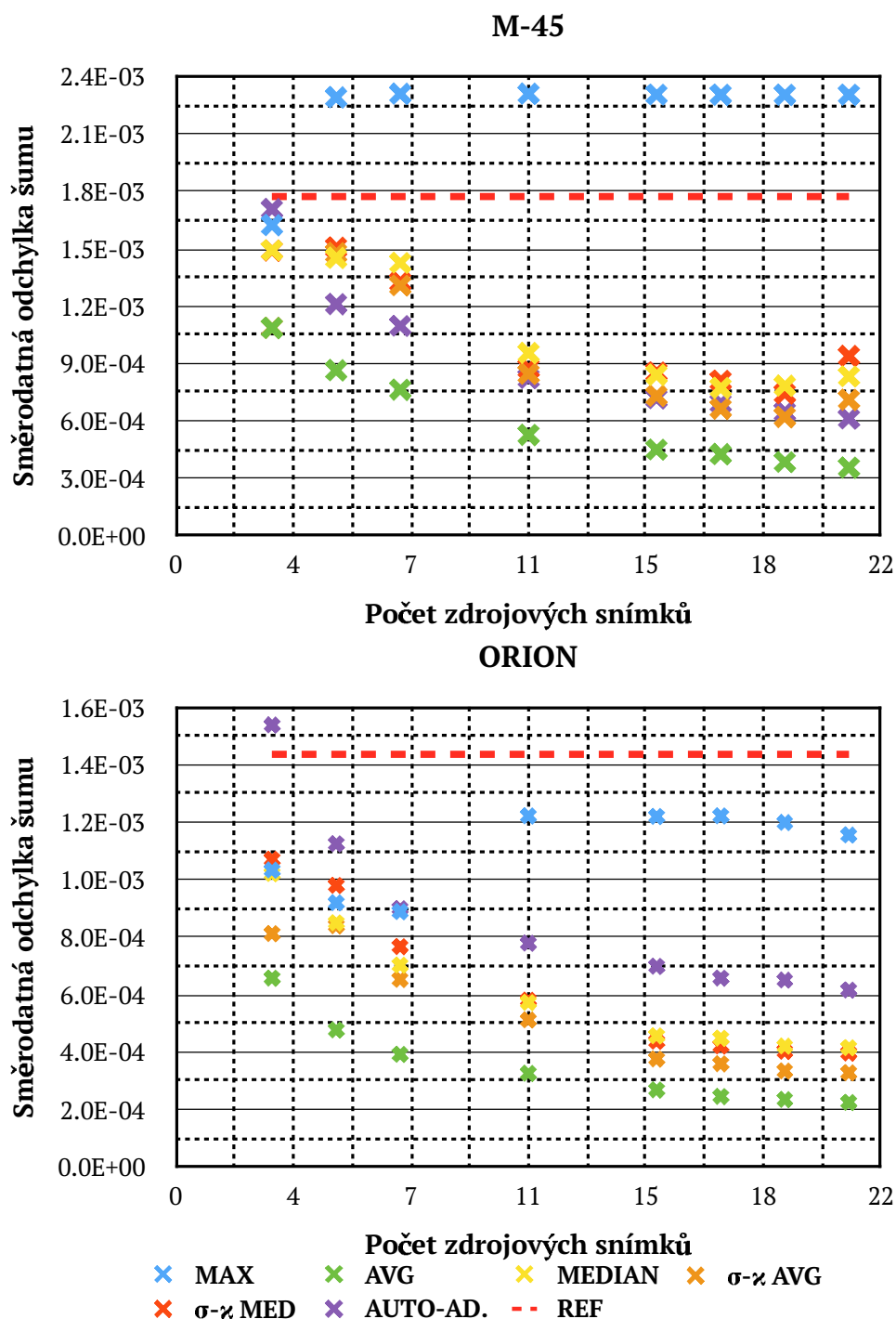
hodnoty RMS. Jakým způsobem je ovlivněná celková jasnost hvězdy v závislosti na počtu zdrojových snímků je uvedeno na Obr. č.18.



Obr. č.18 - Závislost jasnosti hvězdy na počtu zdrojových snímků

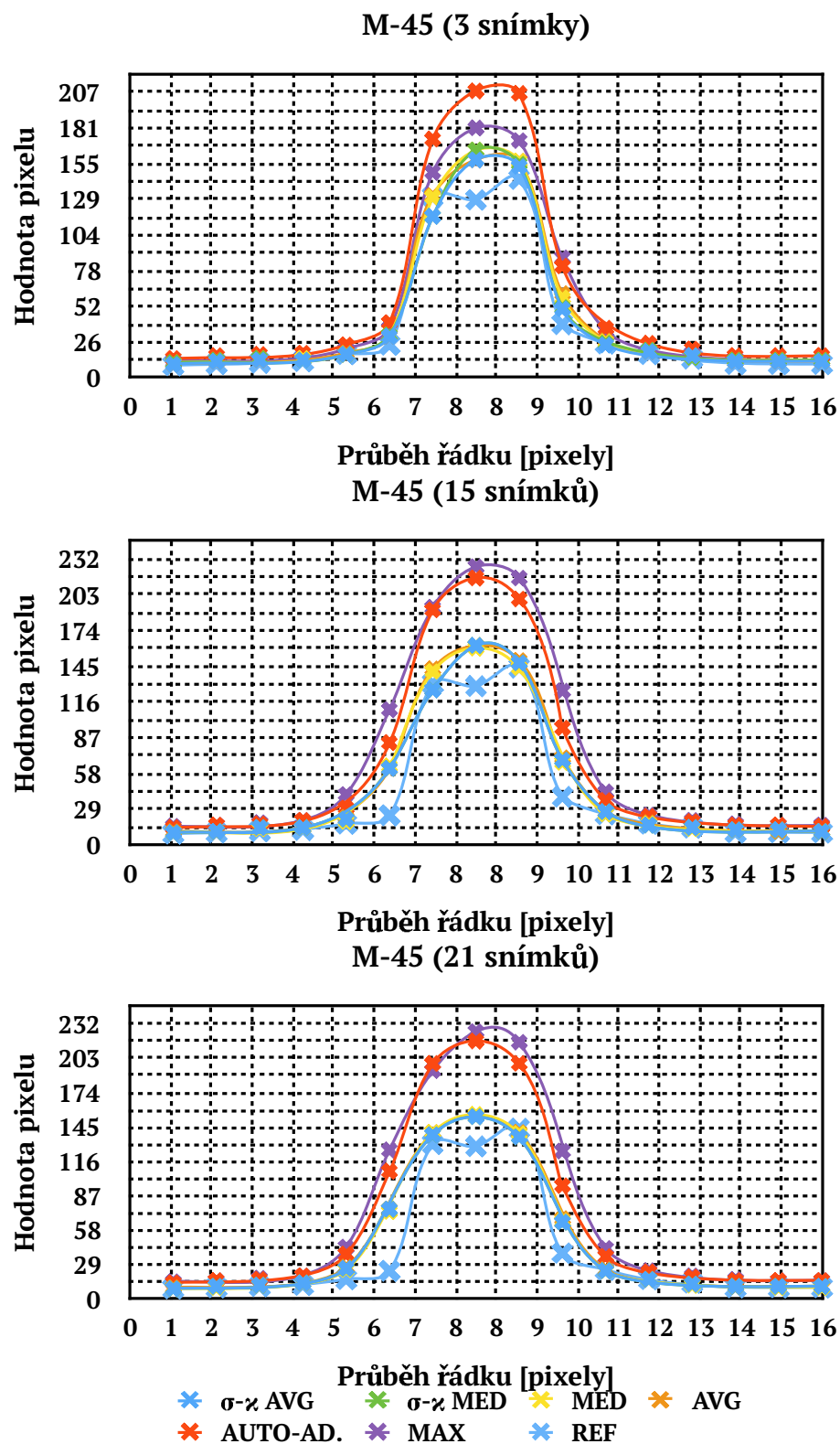
Jestliže srovnáme jednotlivé metody s referenční hodnotou (originálního snímku), je patrné, že všechny testované metody zvyšují celkovou jasnost dané hvězdy. Velikost celkové jasnosti hvězdy resp. její trend vzhledem k počtu zdrojových snímků je velmi podobný jako je tomu u parametru RMS. Nejvyšší jasnosti hvězd dosahuje metoda Maxima a metoda Auto-adaptivního váženého průměru. Otázkou je, jakým způsobem ovlivňuje celkový počet zdrojových snímků jasový profil hvězdy a jaký dopad má na

SNR snímku. Závislost směrodatné odchylky šumu na počtu zdrojových snímků pro jednotlivé metody je uvedena na Obr. č. 20. Pro měření směrodatné odchylky šumu jsem využil programu PixInsight [27]. Velikost směrodatné odchylky šumu je nepřímo úměrná počtu zdrojových snímků. Výjimkou je metoda Maximum, která jednoduše ze sady snímků vždy do výsledného snímku vybere nejvyšší hodnotu. Dosáhne tak velmi vysokých hodnot jasnosti hvězdy, ale na úkor odstupu signálu od šumu. Směrodatná odchylka sady 21 snímků se liší od sady 3 snímků až o řád.



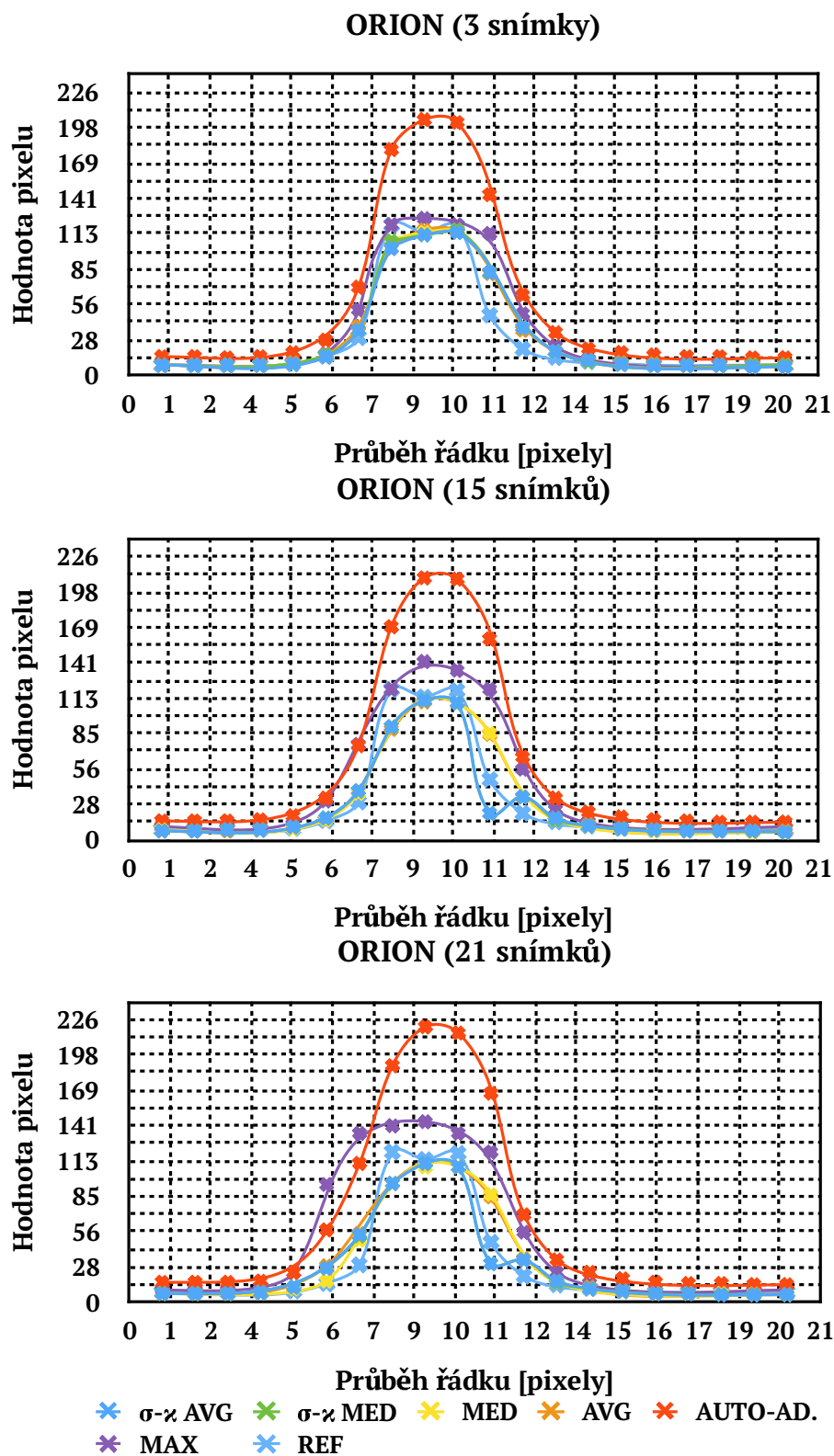
Obr. č. 20 - Závislost směrodatné odchylky šumu v obraze na počtu zdrojových snímků

Pro testování byly vybrány celkem 4 hvězdy. Důležité bylo zjistit, jakým způsobem jednotlivé metody ovlivňují tvar hvězdy. Graf jasových profilů jednotlivých metod je uveden na Obr. č. 21.



Obr. č. 21 - Vliv počtu zdrojových snímků na jasový profil hvězdy. Hvězda (1685 px, 1117 px)

Je patrné, že s rostoucím počtem zdrojových snímků se tvar hvězdy mírně roztáhne “rozpíje”. Největší vliv na jasový profil má metoda Auto-adaptivního váženého průměru a metoda Maxima. Na Obr. č. 22 jsou uvedené jasové profily 2. sady snímků.



Obr. č. 22 - Vliv počtu zdrojových snímků na jasový profil hvězdy. Hvězda (1758 px,1310 px)

Oproti testování na sadě snímků Plejád, zde není metoda Maxima natolik dominantní. Jestliže srovnáme originální profil dané hvězdy spolu s profily jednotlivých metod, můžeme si všimnout, že originální tvar hvězdy je ve svém centru mírně zdeformován. Tento nedostatek všechny použité metody redukují.

8.3 Výsledky HDR

Pro testování tvorby HDR snímků byly použity 3 typy dat. Prvním typem jsou snímky multimediální, druhým typem jsou astronomická data a třetím typem je optická Fourierova transformace. HDR snímek byl vytvořen pomocí lineární metody tvorby HDR snímků a pomocí klasické metody. V případě klasické metody byly použity všechny implementované tónovací operátory a vždy byla uložena mapa jasů ve formátu .hdr. Výsledné snímky jsou uloženy na DVD, které je součástí práce.

8.3.1 Multimediální data:

Jako testovací sada expozic byla vybrána sada snímků *Izmir Harbor* pořízena fotoaparátem NIKON D7000 s clonou f/11 a citlivostí ISO 100. Snímky byly pořízeny s expozičními hodnotami: 1/15s, 1/30s, 1/60s, 1/100s, 1/200s a 1/400s. Ukázka sady expozic je uvedena na Obr. č. 23.



Obr. č. 23. Ukázka sady snímků Izmir Harbor [28]

Prezentace výsledků:



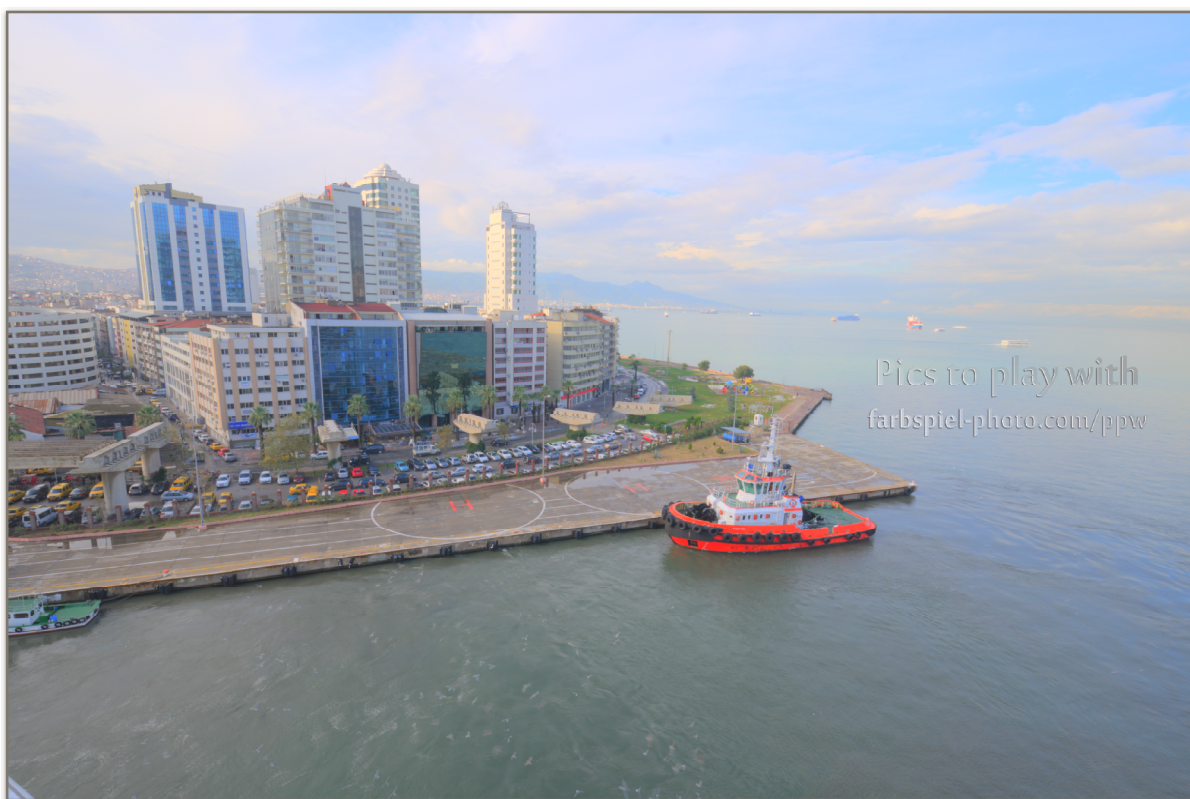
Obr. č. 24 - Lineární metoda tvorby HDR snímků, interval linearity <1000, 60 000>.



Obr. č. 25 - Aplikace Globálního fotografického operátoru.



Obr. č. 26 - Aplikace Globálního exponenciálního operátoru



Obr. č. 27 - Aplikace adaptivního logaritmického globálního operátoru

8.3.2 Astronomická data

Pro tvorbu HDR jsem použil sadu expozičních mlhoviny M-42. Jednotlivé snímky byly předzpracovány (registrace), a poskládány z více snímků (*Image stacking*). V astronomii se často udává celková expoziční doba, která odpovídá součtu jednotlivých expozičních dob snímků před složením. Proto se často “expoziční hodnoty” pohybují i v rámci hodin. Expoziční časy jednotlivých snímků jsou uvedeny v tabulce č. 4.

SNÍMEK	Počet snímků	Expozice [s]
1	6	10
2	6	20
3	6	40
4	6	80
5	6	160
6	35	300

Tabulka č. 4 - Expoziční časy sady snímků M-42

Pro skládání snímků byla použita metoda průměrování. Autorem snímků je p. Jiří Los. Ukázky sady snímků jsou uvedeny na Obr. č. 28.



Obr. č. 28 - Ukázka sady snímků mlhoviny M-42, snímek :1, 4, 5, 6

Prezentace výsledků:

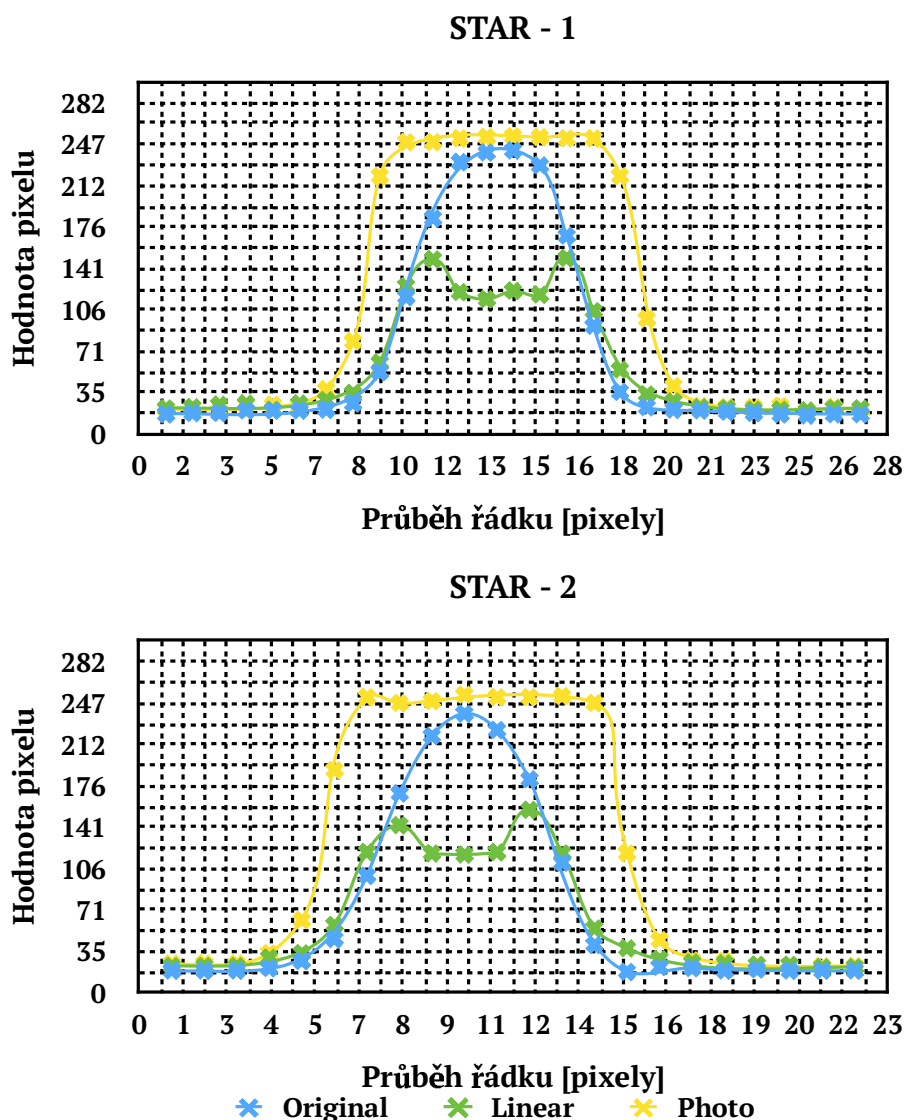


Obr. č. 29 - HDR-Lineární metoda

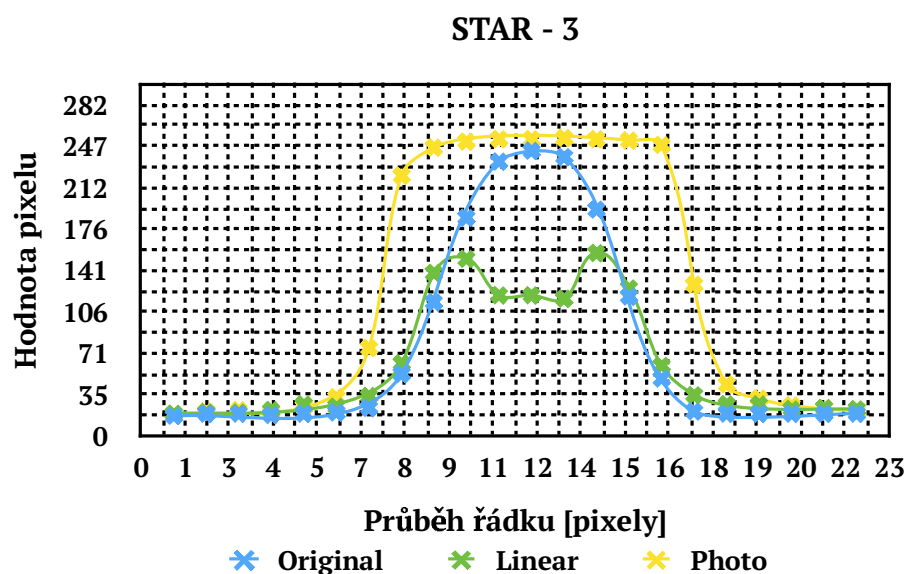


Obr. č. 30 - HDR - Globální fotografický operátor

Na Obr. č. 29 je výsledek lineární metody tvorby HDR snímku. Cílem HDR v astronomii je zachytit pokud možno co nejširší dynamický rozsah. V ideálním případě dosáhnout výsledku, kdy je na snímku prokreslena mlhovina a zároveň jsou vidět hvězdy v ní obsažené. U lineární metody dochází k vytvoření jistých map v oblasti středu mlhoviny. U Globálního fotografického TMO (Obr. č. 30) dochází k přeexponování samotné mlhoviny. Výsledný snímek po aplikaci Exponenciálního a Adaptivního logaritmického operátoru je prakticky nepoužitelný. Hlavní příčinou bude samotná volba typu tónovacího operátoru (Globální). Provedl jsem rovněž test jasového profilu hvězd. Pro testování jsem vybral 3 hvězdy v daném snímku. Snímek s názvem "ORIG" je 4. snímek ze sady. Jednotlivé jasové profily jsou uvedeny na Obr. č. 31, 32.



Obr. č. 31 - HDR: jasové profily hvězd. Hvězda (2684 px, 1939 px), Hvězda (2720 px, 1863 px)



Obr. č. 32 - HDR: jasové profily hvězd. Hvězda (2641 px, 1758 px)

Z průběhů jasových profilů je naprosto zřejmé, že obě metody, jak lineární metoda, tak klasická metoda velmi zřetelně deformují jasový profil hvězdy. Výsledný profil u fotografického tónovacího operátoru je roztažený do stran a přechod mezi maximem hvězdy a jejím minimem je příliš rychlý. U lineární metody dokonce dochází ke “zborcení” středu hvězdy. Takovéto deformace by mohly vést k chybě při dalším zpracování astronomických dat. Dále jsem provedl měření jasnosti vybraných hvězd, směrodatné odchylky a RMS. Obě metody tvorby HDR zvyšují jasnost hvězdy a metoda Globálního fotografického operátoru má nejvyšší RMS. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 5, 6 a 7.

STAR - 1				
	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Original	20.1219	6439	2.71008	20.3036
Linear	24.7	7904	3.99734	25.0214
Global Photo.	26.9031	8609	10.0536	28.7203

Tabulka č.5 - Parametry, hvězda (2684 px, 1939 px)

STAR - 2				
	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Original	18.9811	8048	1.13255	19.0149
Linear	22.8066	9670	1.63261	22.865
Global Photo.	23.3821	9914	2.17409	23.4829

Tabulka č.6 - Parametry, hvězda (2720 px, 1863 px)

STAR - 3				
	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Original	19.9127	5018	2.41529	20.0586
Linear	24.1944	6097	3.8604	24.5005
Global Photo.	26.8333	6762	9.43377	28.4433

Tabulka č.7 - Parametry, hvězda (2641 px, 1758 px)

8.3.3 Optická Fourierova transformace

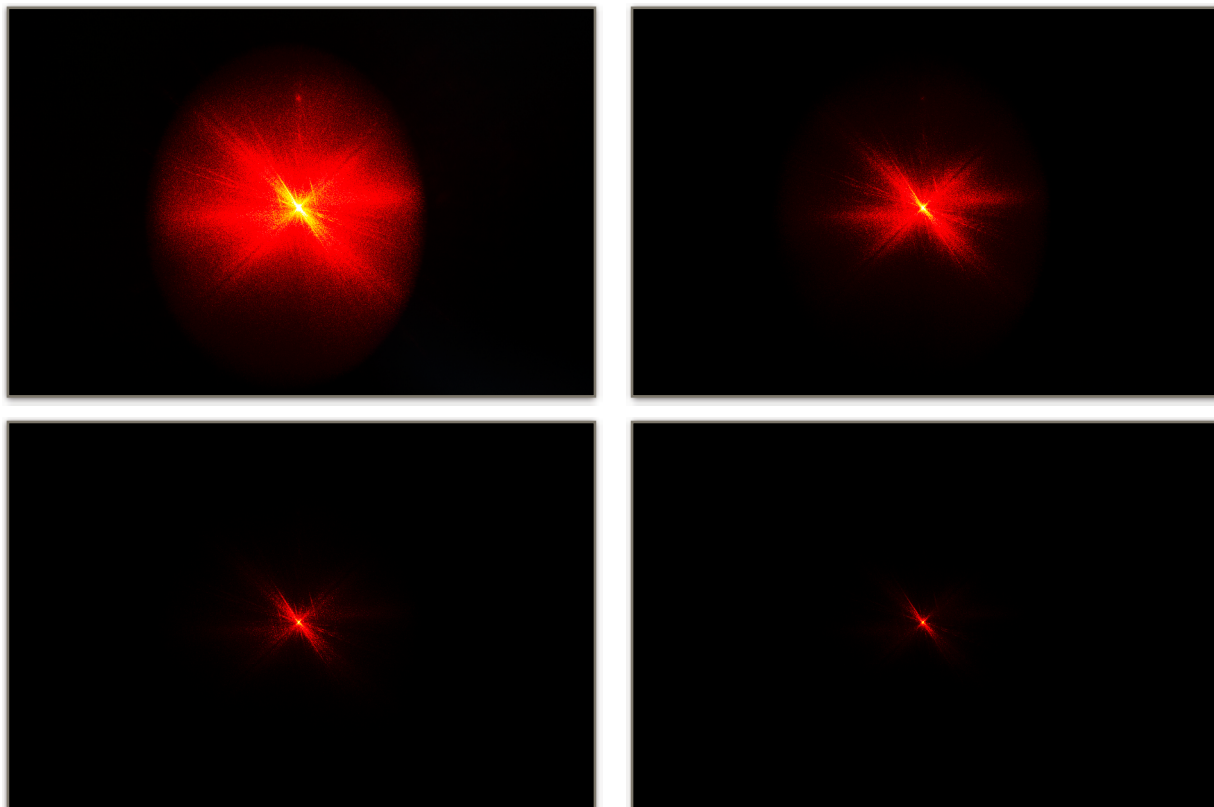
Posledním typem testovaných snímků jsou snímky optické Fourierovi transformace. Snímky zachycují spektrum optické Fourierovi transformace a byly pořízeny v Optické laboratoři Katedry radioelektroniky FEL ČVUT v Praze, autorem snímků jsou: Ing. Jan Bednář a Ing. Petr Janout. Snímky spektra optické Fourierovi transformace se používají například pro testování kvality optických členů. Prochází-li světlo zkoumaným vzorkem, je jeho amplituda i fáze ovlivněna materiálem. Jedná-li se o krystalický materiál, pak takový materiál může obsahovat různé nehomogenity, jako jsou nečistoty v materiálu, bodové či čárové dislokace apod. Rozměry těchto nehomogenit jsou výrazně menší než rozměry zkoumaného vzorku i než měřícího světelného svazku. Při použití optické Fourierovi transformace na takto ovlivněný světelný svazek dostáváme prostorové spektrum, jehož vysokofrekvenční části jsou dány právě těmito nehomogenitami. Toto spektrum můžeme zaznamenat a z množství energie ve vysokofrekvenční části lze usuzovat na množství nehomogenit. Z rekonstrukce tohoto spektra pak můžeme určit jejich umístění a tvar. Jednotlivé

expoziční časy jsou uvedeny v tabulce č. 8. Snímky byly pořízeny fotoaparátem NIKON D5100 s citlivostí ISO 100.

Snímek	Expoziční doba [s]
1	1/15
2	1/30
3	1/60
4	1/125
5	1/250
6	1/500
7	1/1000
8	1/2000
9	1/4000

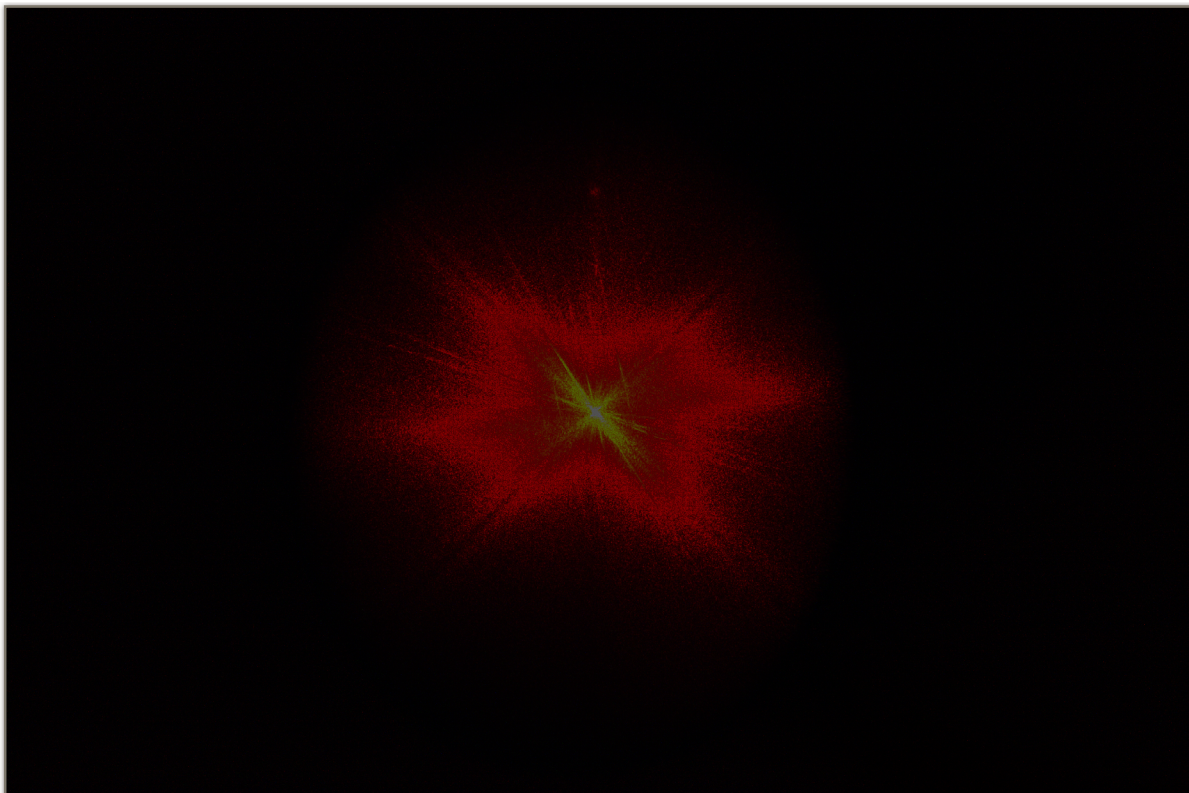
Tabulka č. 8 - Sada snímků optické Fourierovy transformace -expoziční časy

Ukázky sady snímků jsou uvedeny na Obr. č. 33.

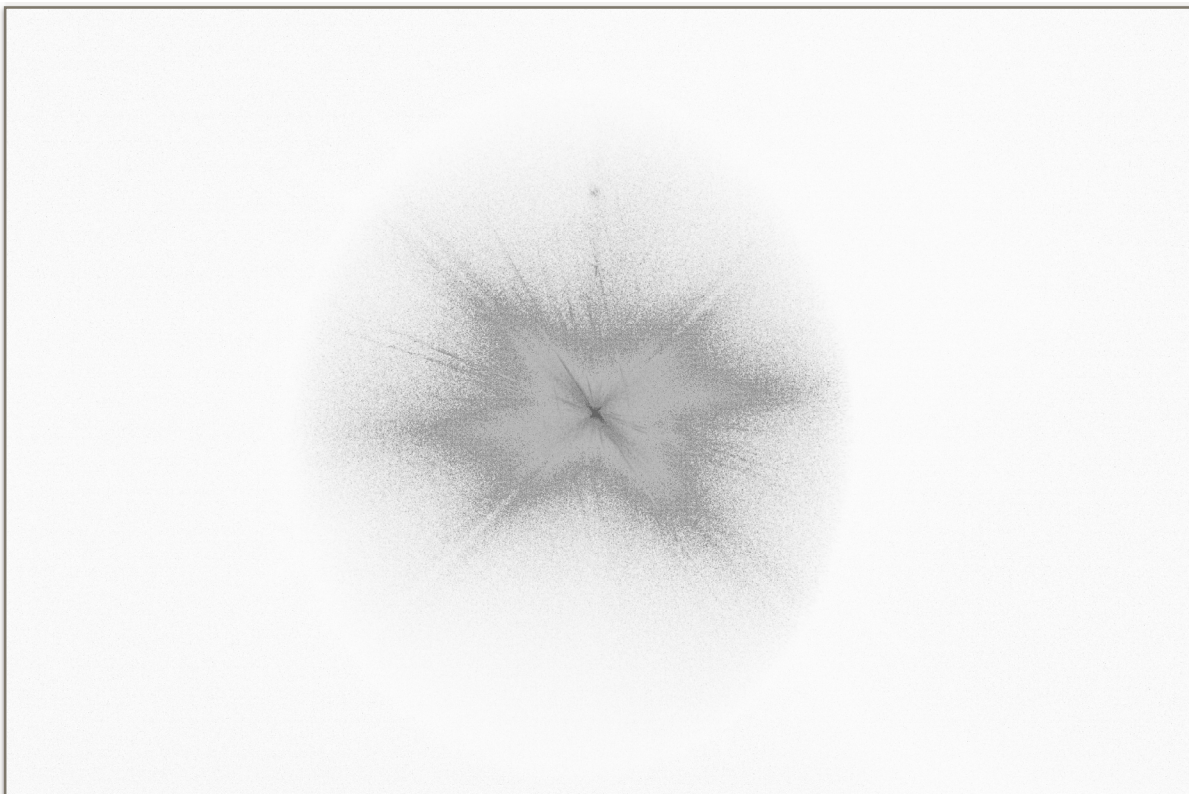


Obr. č. 33 - Ukázky sady optické Fourierovy transformace

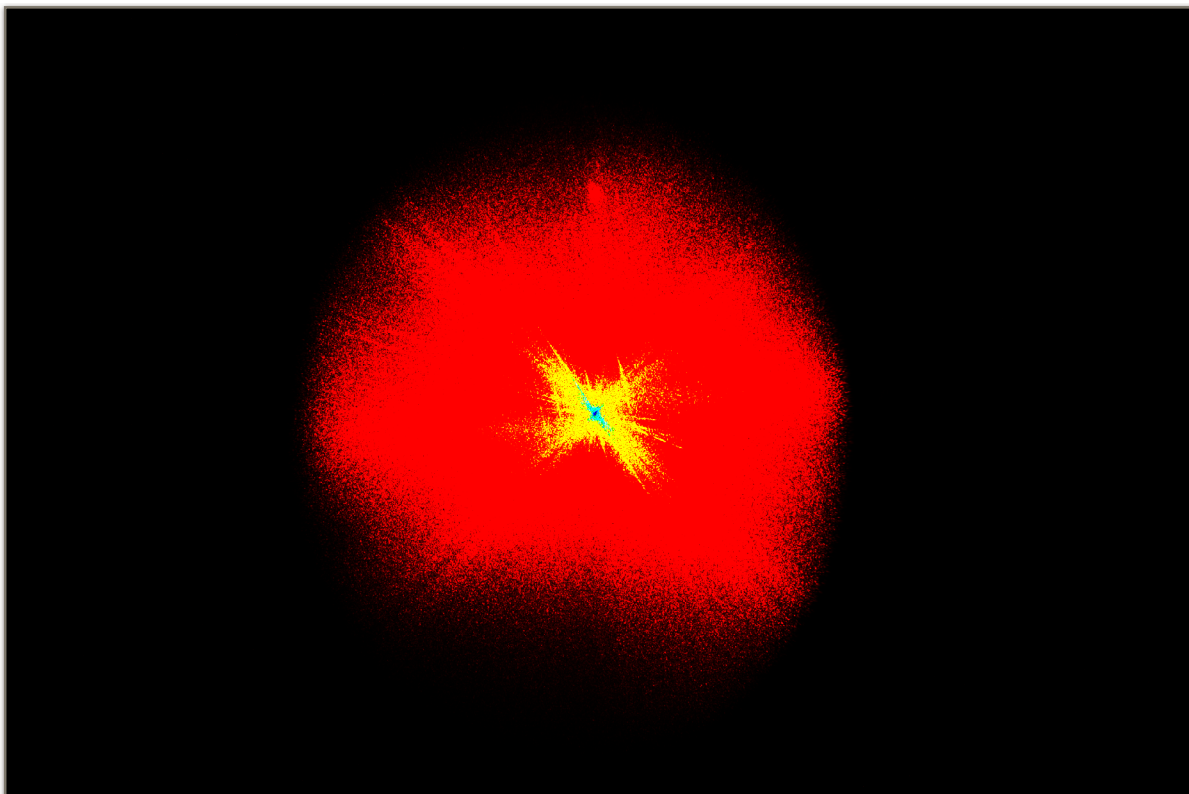
Prezentace výsledků :



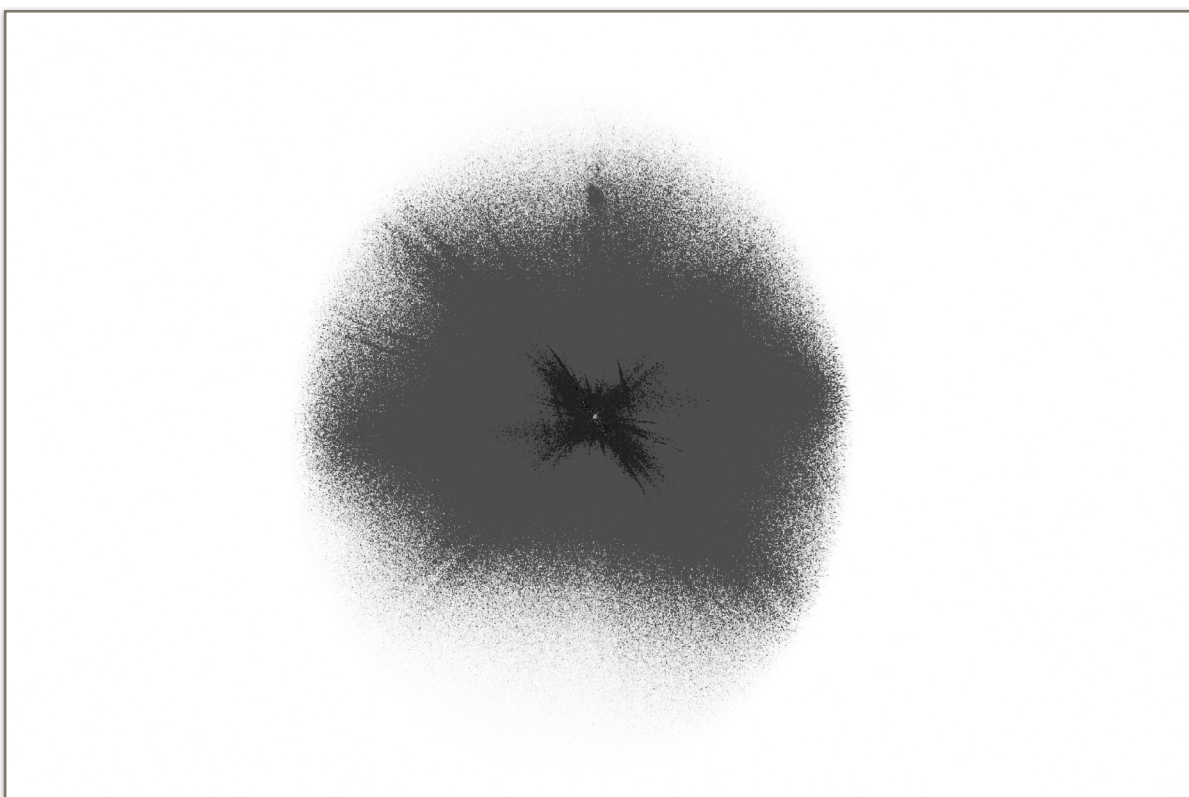
Obr. č. 34 - Lineární metoda HDR, interval linearity <1 000,50 000>



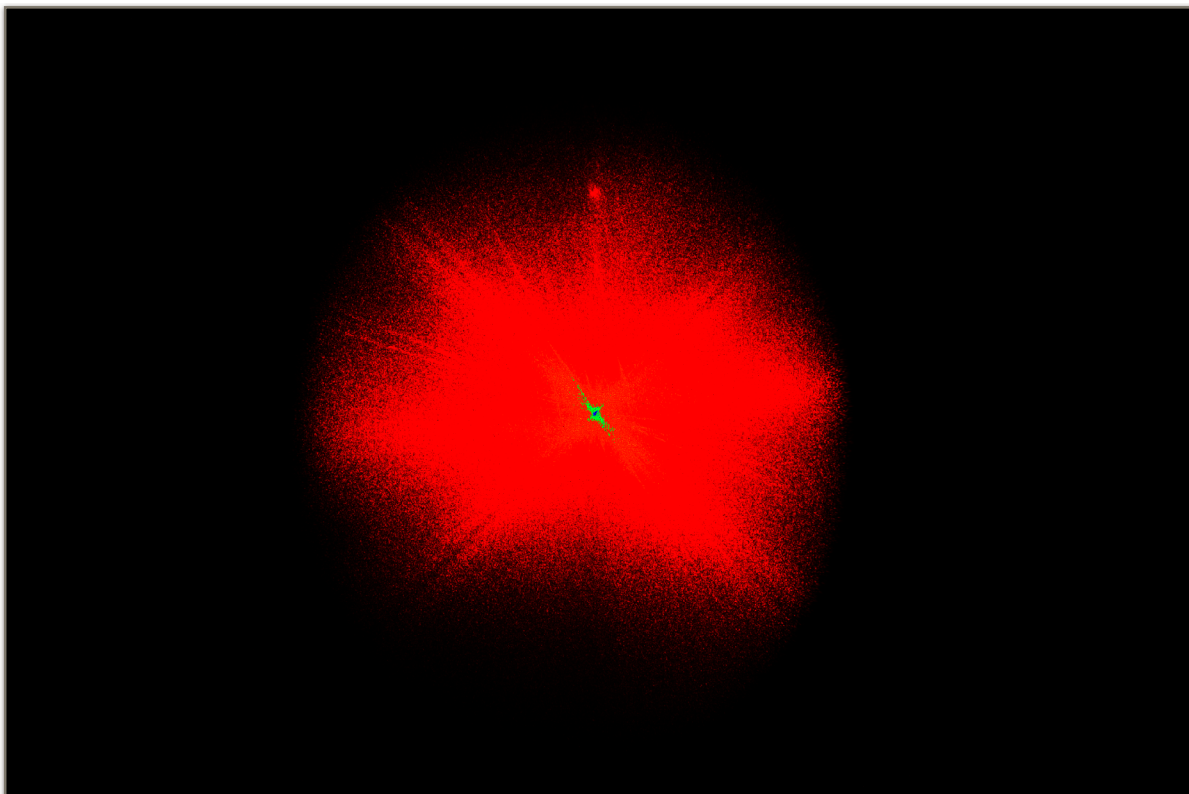
Obr. č. 35 - Lineární metoda HDR, interval linearity <1 000,50 000>, negativní zobrazení
černobílé kopie



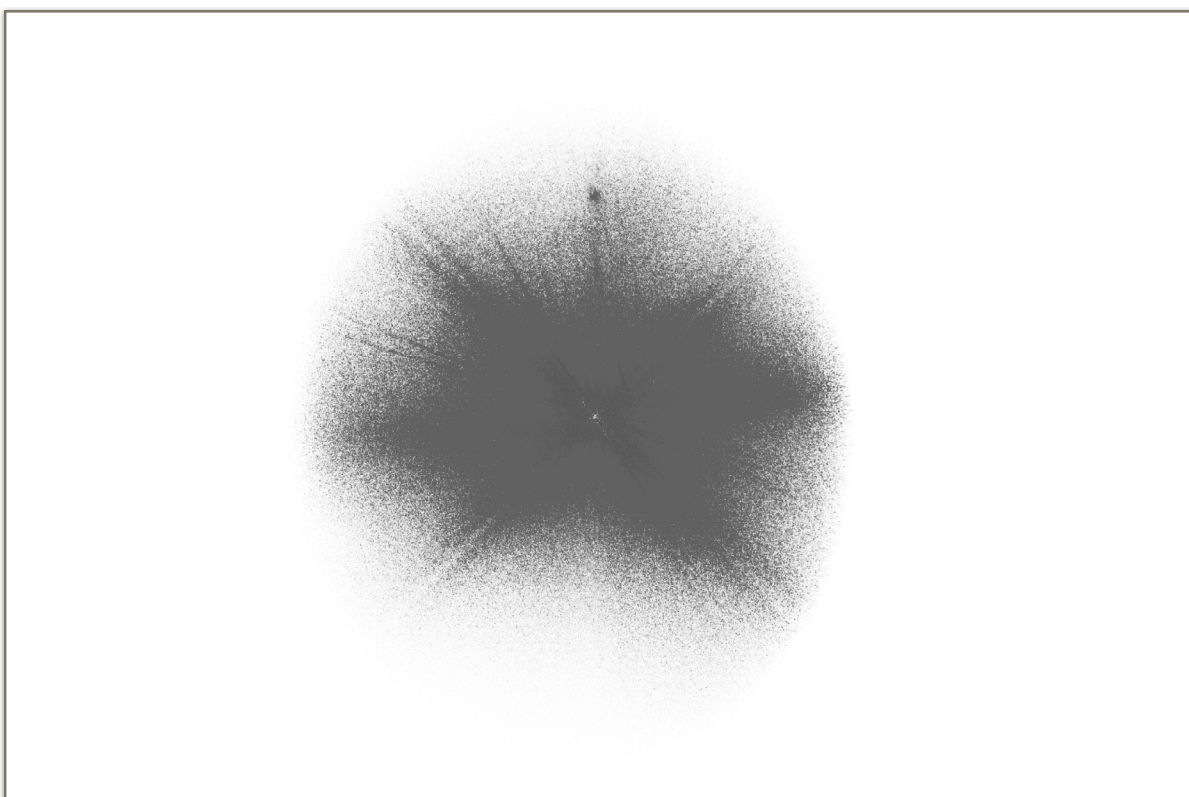
Obr. č. 36 - Globální fotografický operátor



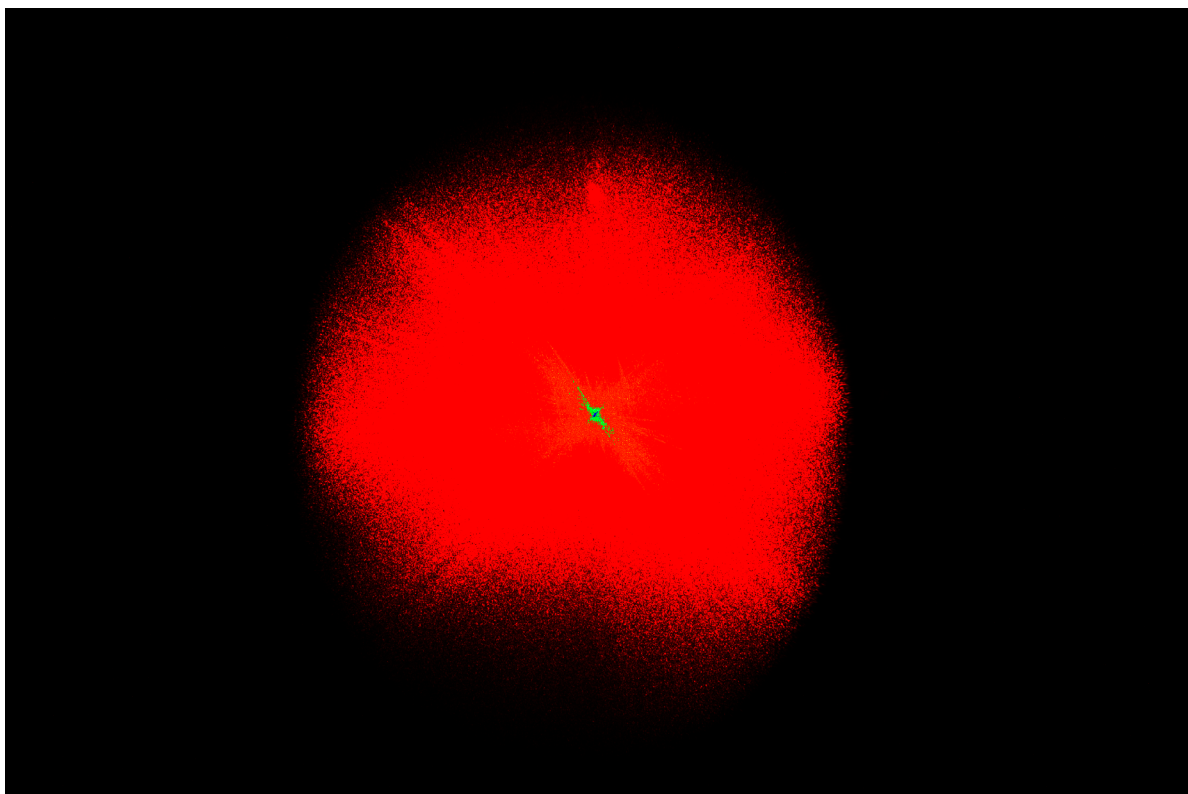
Obr. č. 37 - Globální fotografický operátor, negativní zobrazení černobílé kopie



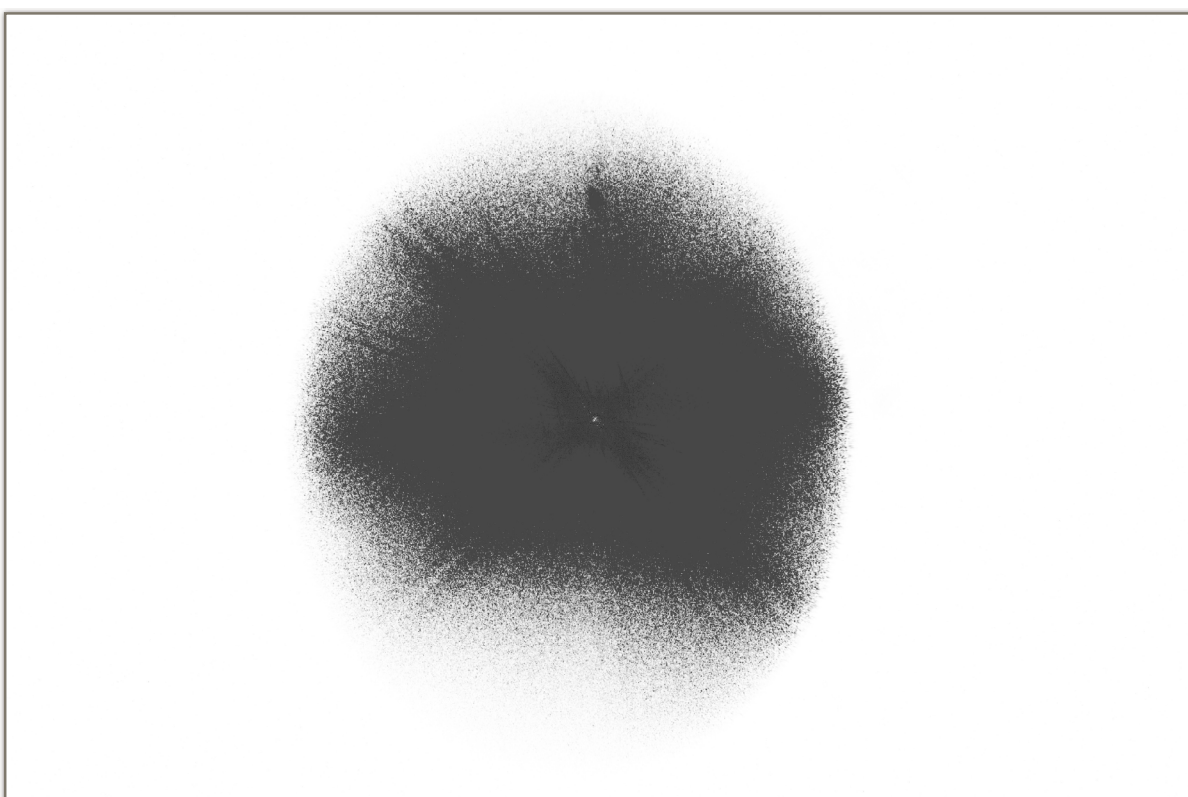
Obr. č. 38 - Adaptivní logaritmický globální operátor



Obr. č. 39 - Adaptivní logaritmický globální operátor, negativní zobrazení černobílé kopie



Obr. č. 40 -Globální exponenciální operátor



Obr. č. 41 -Globální exponenciální operátor, negativní zobrazení černobílé kopie

Když porovnáme zdrojové snímky s HDR snímky získanými lineární metodou a pomocí globálního fotografického operátoru, jsou na HDR snímcích zobrazeny jak detaily v jasnější částech snímku (střed), tak v tmavších oblastech. Exponenciální operátor a Adaptivní logaritmický operátor nedosahují takové kvality. Za nejefektivnější metodu pro zpracování dat optické Fourierovi transformace považují lineární metodu tvorby HDR.

9 Závěr

V první části diplomové práce jsem se zabýval problematikou zachycení vysokého dynamického rozsahu snímané scény. Řešením tohoto problému se zabývá kapitola *High Dynamic Range*, která popisuje tvorbu HDR snímků pomocí klasické metody a pomocí metody lineární. V kapitole *Metody skládání snímků* byl podán přehled algoritmů používaných v astronomii pro potlačení šumu v obraze a pro zvýšení dynamického rozsahu. Podkapitola *Potlačení šumu CCD senzoru* se zabývá procesem předzpracování astronomických snímků pomocí snímků korekčních.

V rámci práce jsem vytvořil program, který umožňuje pořízení snímků pomocí robotického dalekohledu CELESTRON CPC 800 a fotoaparátu NIKON D5100. Fotoaparát může být k dalekohledu připojen do primární ohniskové vzdálenosti dalekohledu, nebo je umístěn na samotném těle dalekohledu. Ovládání dalekohledu je zajištěno prostřednictvím programu RTS2. Pro komunikaci s programem RTS2 jsem použil knihovnu *curlpp a libjson*. Program je optimalizovaný pro operační systém Ubuntu 11.10 z důvodu kompatibility s programem RTS2. Samotný program se spouští přímo z terminálu a umožňuje uživateli vložit všechny parametry ručně, nebo je načíst z xml souboru. V programu je implementováno 5 metod skládání snímků, lineární metoda a klasická metoda tvorby HDR snímků spolu s třemi tónovacími operátory.

Výslednou mapu jasů lze uložit jako HDR snímek ve formátu *.hdr*. Program poskytuje uživateli možnost načíst větší matice při opětovném zpracování snímků z yml souboru, a tak urychlit zpracování snímků. Pro knihovnu OpenCV jsem napsal podporu RAW formátu *.NEF*. Použil jsem knihovnu *libraw*. Tato knihovna uživateli rovněž umožňuje načíst expoziční časy z metadat snímků. Program je napsán v programovacím jazyce C++.

Implementované algoritmy pro skládání snímků byly otestovány na astronomických datech. K dispozici jsem měl 2 sady snímků souhvězdí ORION a Plejád (M-45). Pro registraci a předzpracování snímků byl použit program IRIS a výsledná analýza dat byla provedena pomocí programů SAOImage DS9 a PixInsight. Všechny implementované metody kromě metody výběru maxima s rostoucím počtem zdrojových snímků potlačují šum v obraze. Pro zpracování astronomických snímků

bych doporučil metodu Průměru, Mediánu a metody σ - κ . Největší potlačení šumu bylo naměřeno pro metodu Průměru.

Pro testování implementovaných algoritmů pro tvorbu HDR snímků jsem vybral tři typy snímků: multimediální snímky, astronomické snímky a snímky optické Fourierovy transformace. Výsledné HDR snímky pro multimediální data jsou prezentovány v podkapitole 9.3.1. Pro zpracování multimediálních dat je dle mých výsledků vždy lepší použít klasický postup pro tvorbu HDR snímku. Pro zpracování HDR snímků byla použita sada snímků mlhoviny M-42. Při použití klasické metody tvorby HDR snímků a Globálního fotografického operátoru dochází v oblasti mlhoviny k “přepalům”. U zbylých implementovaných operátorů jsou výsledky prakticky nepoužitelné. Usuzuji, že hlavním problémem je samotný typ operátoru a to typ globální. Výsledný tónovaný jas je vypočten z celého snímku. Lineární metoda dopadla o poznání lépe, i když uvnitř mlhoviny se vytvořily jisté mapy, které výsledný snímek degradují. V případě klasické tvorby HDR snímků se jasový profil hvězdy zpravidla zploští a v případě lineární metody dojde v místě maxima ke zborcení hvězdy. Jedná se o nepříjemný fakt, který by v následném zpracování dat mohl představovat problém.

Výhodu programu vidím v uložení mapy jasů do formátu .hdr. Osobně jsem vyzkoušel tuto 32 bitovou mapu nahrát do programu Photoshop CC, který umožňuje aplikaci řady tónovacích operátorů. Proto bych doporučil jako možné pokračování práce implementaci lokálních tónovacích operátorů. Další možné pokračování práce bych také viděl ve vytvoření přívětivějšího uživatelského prostředí.

10 Zdroje informací

- [1] - *OpenCV 3.0.0-dev documentation* [online]. opencv dev team.[vid. 13.2.2014]. Dostupné z: http://docs.opencv.org/trunk/doc/tutorials/photo/hdr_imaging/hdr_imaging.html
- [2] - McCann, John J. Rizzi, Alessandro. Section B: Measured Dynamic Ranges. In: McCann, John J. Rizzi, Alessandro. *Art and Science of HDR Imaging* [online]. John Wiley & Sons, Ltd., 2011. s. 89-121. eISBN: 9781119951476. [vid. 13.2.2014]. Dostupné z: www.ebrary.com
- [3] - Keith Wiley. How Image Stacking Works. In: *keithwiley* [online]. Keith Wiley.[vid. 13.2.2014]. Dostupné z: <http://keithwiley.com/astroPhotography/imageStacking.shtml>
- [4] - Astronomia [online]. RNDr. Randa Miroslav, Ph.D. 2010. [vid. 13.2.2014]. Dostupné z: <http://astronomia.zcu.cz/astrofoto/zpracovani/877-matematicke-skladani-snimku>
- [5] - doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D. *Obrazové senzory I. část* [přednáška]. Praha: ČVUT, 7.11.2013.
- [6] - Jak pořídit hezký CCD snímek. [online]. Lenka Šarounová. [vid. 13. 2. 2014]. Dostupné z: <http://www.asu.cas.cz/~lenka/prednasky/318ccd.htm>
- [7] - PÁTA Petr, Martin Blažek, *Metody předzpracování obrazu* [cvičení z předmětu *Obrazová technika*], Praha: ČVUT.
- [8] - FREEMAN, Michael. Dynamický rozsah scény. In: Michael FREEMAN, *Základy HDR: fotografie a vysoký dynamický rozsah*. Místo vydání: Brno, Zoner Press, 2008, s. 12-13. ISBN: 8086815951.
- [9] - GERMAN A., M. R. Jenkin, Y. Lespérance. Entropy-based image merging. In: *Computer and Robot Vision, 2005. Proceedings. The 2nd Canadian Conference on* [online]. 2005, s. 81-86, ISBN:0-7695-2319-6. [vid. 17.2.2014]. Dostupné z: <http://www.cse.yorku.ca/~lesperan/papers/CRV05entropy.pdf>
- [10] - *NGVS MegaPipe documentation* [online]. Government of Canada. [vid. 17.2.2014]. Dostupné z: <http://www2.cadc-ccda.hia-ihp.nrc-cnrc.gc.ca/gsky/docs/ngvsdoc.html>
- [11] - *DeepSkyStacker* [online]. DeepSkyStacker group. [vid 17.2014]. Dostupné z: <http://deepskystacker.free.fr/english/index.html>

- [12] - *CCD data reduction: Bias, Dark and Flat* [online]. Mischa Schirmer. [vid. 17.2.2014]. Dostupné z: <http://www.astro.uni-bonn.de/~mischa/datareduction/biasdarkflat.html>
- [13] - DEBEVEC Paul E., Jitendra Malik. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. In: *Proceeding SIGGRAPH '97 Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* [online]. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. New York, NY, USA, 1997. [vid. 17.4.2014]. Dostupné z: <http://www.pauldebevec.com/Research/HDR/debevec-siggraph97.pdf>
- [14] - *HW4: High Dynamic Range Imaging and Tone-mapping* [online]. Northwestern University. [vid 17.4.2014]. Dostupné z: <http://users.eecs.northwestern.edu/~ollie/eecs395/HW4/HW4.htm>
- [15] - Huawei [online]. *High Dynamic Range Imaging*. 2014. [vid. 17.2.2014]. Dostupné z: http://www.ldv.ei.tum.de/uploads/media/Vorlesung_7_HDRI_v1.pdf
- [16] - Ing. Karel Fliegel, Ph.D. *Speciální metody pro snímání a reprodukci obrazu (HDR a Superresolution)* [přednáška]. Praha: ČVUT, 27.2.2014
- [17] - Petr Kubánek. *Remote Telescope System - 2nd version* [software]. Říjen 2012. [přístup 4.6.2014]. Dostupné z: <http://www.rts2.org>
- [18] - *Celestron CPC 800: Manual*. [online] [vid. 4.6.2012]. Dostupné z: [http://www.celestron.com/browse-shop/astronomy/telescopes/cpc-800-gps-\(xlt\)-computerized-telescope](http://www.celestron.com/browse-shop/astronomy/telescopes/cpc-800-gps-(xlt)-computerized-telescope)
- [19] - *Projekt GLORIA* [online]. GLORIA Project. [vid 6.5.2014]. Dostupné z: <http://gloria-project.eu/cs/>
- [20] - *OpenCV* [knihovna]. [přístup: 25.4.2014]. Dostupné z: www.opencv.org
- [21] - *Mac Os. X 10.9.2* [operační systém]. [přístup: 25.2.2014]. Dostupné z: www.apple.cz
- [22] - *Ubuntu 11.10* [operační systém]. [přístup: 13.10.2011]. Dostupné z: www.ubuntu.com
- [23] - *Gphoto2* [knihovna]. [přístup: 23.3.2014]. Dostupné z: www.gphoto.org
- [24] - *Libraw* [knihovna]. [přístup: 18.1.2014]. Dostupné z: www.libraw.org
- [25] - *SAOImage DS9* [software]. [přístup: 15.4.2013]. Dostupné z: <http://ds9.si.edu/site/Download.html>

[26] - *IRIS* [software]. [přístup:6.12.2011]. Dostupné z: <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>

[27] - *PixInsight* [software-trial]. [přístup: 19.8.2009]. Dostupné z: <http://pixinsight.com>.

[28] - *Farbspiel photography* [online]. Klaus Herrmann. [vid. 5.6.2014]. Dostupné z: <http://farbspiel-photo.com/learn/hdr-pics-to-play-with/izmir-harbor-ppw>

11 Seznam použitých obrázků

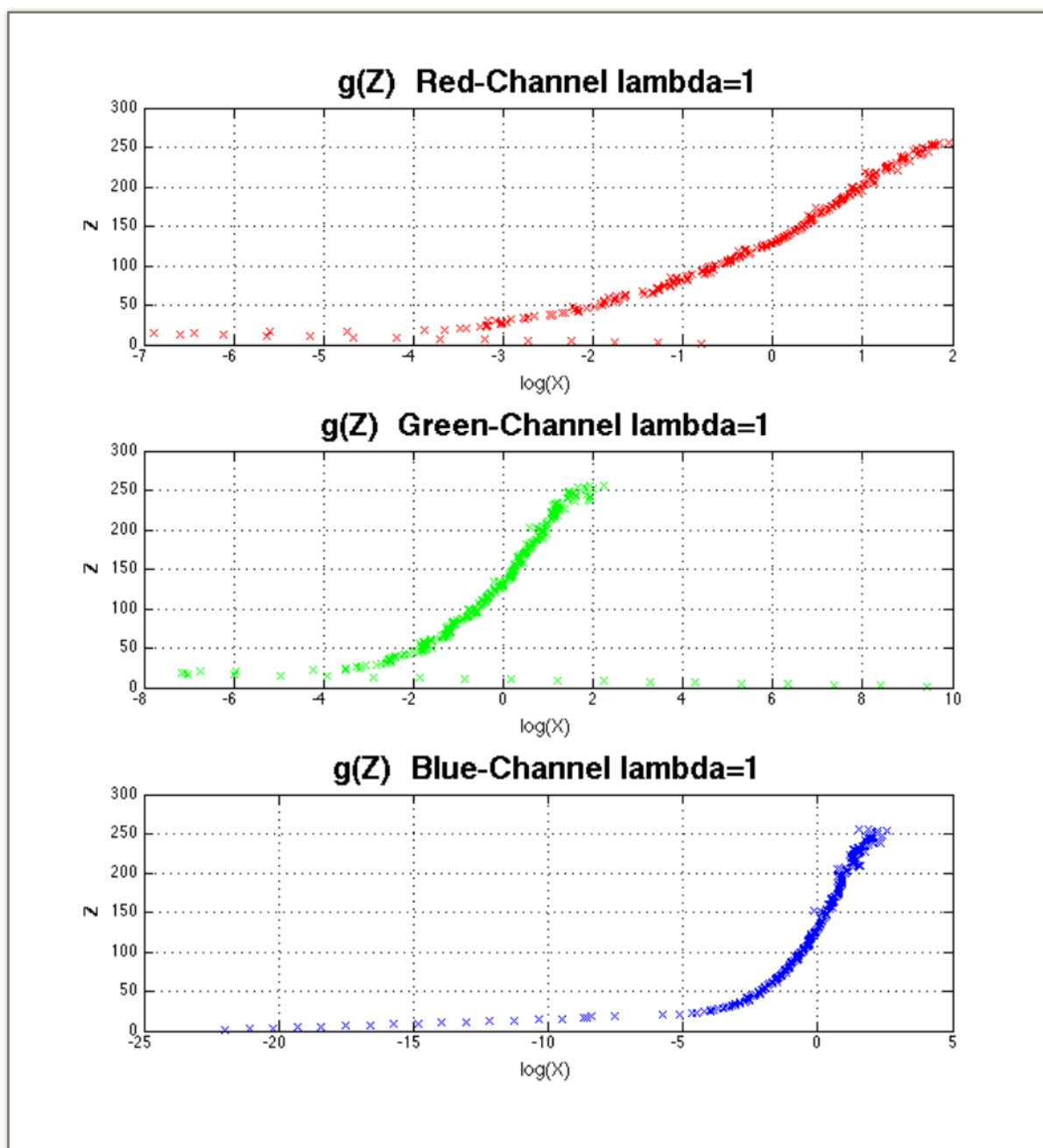
Obr. č 1 - Omezení dynamického rozsahu senzoru CCD [3].....	12
Obr. č. 2 - Kalibrace snímku [11]	14
Obr. č. 3 - HDR proces [15].....	20
Obr. č. 4 - Příklad přenosové funkce kamery.....	20
Obr. č. 5 - Schéma získání hodnoty obrazového bodu z jasové hodnoty snímané scény [13].....	21
Obr. č. 6. - RTS2 monitorovací okno	27
Obr. č. 7. - Dalekohled CELESTRON CPC 800 [18].....	29
Obr. č.8 - Vývojový diagram, Hlavní menu	32
Obr. č. 9. - Vývojový diagram - Observe Menu	34
Obr. č. 10. - Vývojový digram - Post-processing menu.....	36
Obr. č. 11 - DS9 - Příklad výběru pomocí tvaru Projection (vlevo), příklad výběru okolí hvězdy pomocí tvaru Annulus (vpravo)	39
Obr. č. 12 - DS9 - Jasový profil hvězdy	39
Obr. č. 13 - Ukázka sady snímků souhvězdí Orion, snímek č. 1 - negativní zobrazení	40
Obr. č. 14 - Ukázka sady snímků souhvězdí Orion, snímek č. 21 - negativní zobrazení	40
Obr. č. 15 - Ukázka sady snímků Plejád M-45, snímek č. 1 - negativní zobrazení	41
Obr. č. 16 - Ukázka sady snímků Plejád M-45, snímek č. 2 - negativní zobrazení	41
Obr. č. 17 - Závislost RMS na počtu zdrojových snímků	43
Obr. č.18 - Závislost jasnosti hvězdy na počtu zdrojových snímků.....	44
Obr. č. 20 - Závislost směrodatné odchylky šumu v obraze na počtu zdrojových snímků.....	45
Obr. č. 21 - Vliv počtu zdrojových snímků na jasový profil hvězdy. Hvězda (1685 px, 1117 px)	46
Obr. č. 22 - Vliv počtu zdrojových snímků na jasový profil hvězdy. Hvězda (1758 px,1310 px)	47
Obr. č. 23. Ukázka sady snímků Izmir Harbor [28]	48
Obr. č. 24 - Lineární metoda tvorby HDR snímků, interval linearity <1000, 60 000>.	49
Obr. č. 25 - Aplikace Globálního fotografického operátoru.	49
Obr. č. 26 - Aplikace Globálního exponenciálního operátoru	50
Obr. č. 27 - Aplikace adaptivního logaritmického globálního operátoru	50
Obr. č. 28 - Ukázka sady snímků mlhoviny M-42, snímek :1, 4, 5, 6	51

Obr. č. 29 - HDR-Lineární metoda	52
Obr. č. 30 - HDR - Globální fotografický operátor	52
Obr. č. 31 - HDR: jasové profily hvězd. Hvězda (2684 px, 1939 px), Hvězda (2720 px, 1863 px).....	53
Obr. č. 32 - HDR: jasové profily hvězd. Hvězda (2641 px, 1758 px)	54
Obr. č. 33 - Ukázky sady optické Fourierovy transformace	56
Obr. č. 34 - Lineární metoda HDR, interval linearity <1 000,50 000>.....	57
Obr. č. 35 - Lineární metoda HDR, interval linearity <1 000,50 000>, negativní zobrazení černobílé kopie	57
Obr. č. 36 - Globální fotografický operátor	58
Obr. č. 37 - Globální fotografický operátor, negativní zobrazení černobílé kopie	58
Obr. č. 38 - Adaptivní logaritmický globální operátor.....	59
Obr. č. 39 - Adaptivní logaritmický globální operátor, negativní zobrazení černobílé kopie	59
Obr. č. 40 -Globální exponenciální operátor	60
Obr. č. 41 -Globální exponenciální operátor, negativní zobrazení černobílé kopie	60

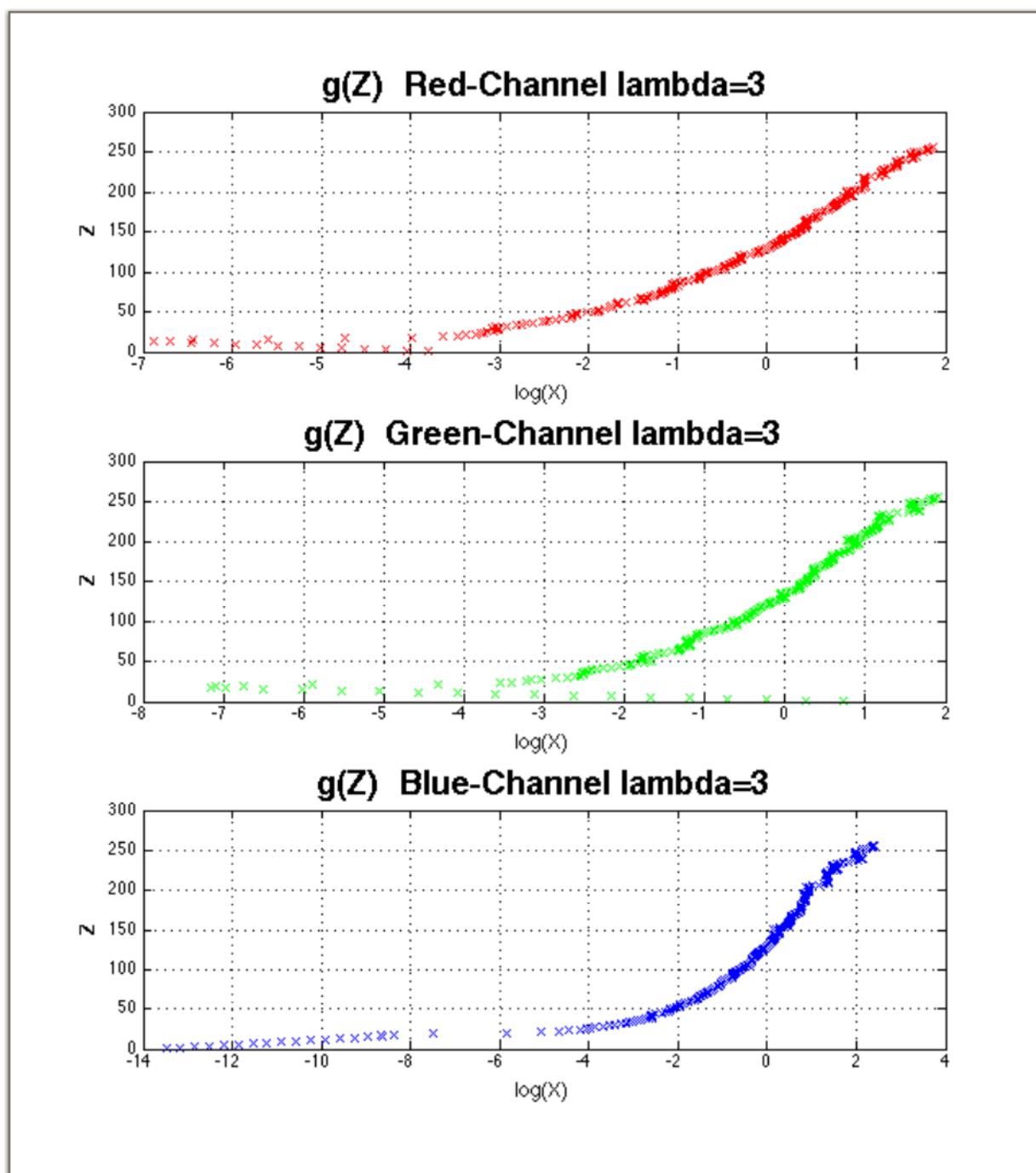
12 Seznam příloh

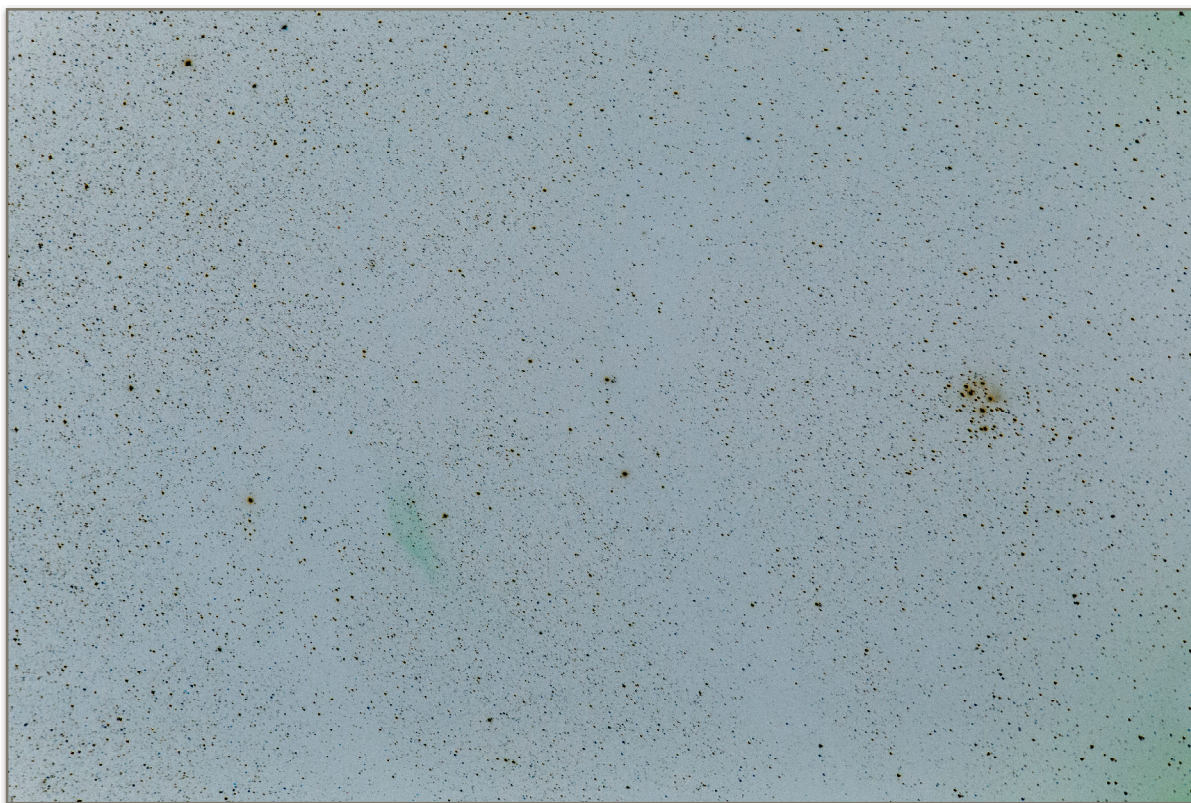
Příloha č. 1 - Inverzní přenosová funkce $g(Z)$, $\lambda=1$	70
Příloha č. 2 - Inverzní přenosová funkce $g(Z)$, $\lambda=3$	71
Příloha č. 3 - Snímek před korekcí a registrací	72
Příloha č. 4 - Snímek po korekci a registraci	72
Příloha č. 5 - ORION, Hvězda 1	73
Příloha č. 6 - ORION, Hvězda 2	74
Příloha č. 7 - ORION, Hvězda 3	75
Příloha č. 8 - ORION, Hvězda 4	76
Příloha č. 9 - M-45, Hvězda 1	77
Příloha č. 10 - M-45, Hvězda 2	78
Příloha č. 11 - M-45, Hvězda 3	79
Příloha č. 12 - M-45, Hvězda 4	80

13 Přílohy



Příloha č. 1 - Inverzní přenosová funkce $g(Z)$, $\lambda=1$

Příloha č. 2 -Inverzní přenosová funkce $g(Z)$, $\lambda=3$



Příloha č. 3 - Snímek před korekcí a registrací



Příloha č. 4.- Snímek po korekci a registraci

Počet zdrojových snímků = 3				
Snímek	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Reference	7.92819	2981	0.790672	7.96752
Maximum	8.60638	3236	0.8687	8.65011
Střední hodnota	7.81649	2939	0.703974	7.84813
Medián	7.85106	2952	0.675678	7.88009
Sigma-Kappa_avg	7.69415	2893	0.683831	7.72448
Sigma-Kappa_med	7.81383	2938	0.69758	7.84491
Auto-adaptive avg	14.5585	5474	1.04768	14.5962
Počet zdrojových snímků = 15				
Reference	7.92819	2981	0.790672	7.96752
Maximum	10.2367	3849	1.79089	10.3922
Střední hodnota	7.2766	2736	0.604139	7.30163
Medián	7.10106	2670	0.67272	7.13286
Sigma-Kappa_avg	7.16489	2694	0.695305	7.19855
Sigma-Kappa_med	7.17021	2696	0.720347	7.20631
Auto-adaptive avg	14.9016	5603	1.03831	14.9377
Počet zdrojových snímků = 21				
Reference	7.92819	2981	0.790672	7.96752
Maximum	10.367	3898	1.80377	10.5228
Střední hodnota	7.15957	2692	0.602357	7.18487
Medián	7.02128	2640	0.687715	7.05488
Sigma-Kappa_avg	7.10106	2670	0.707407	7.13621
Sigma-Kappa_med	7.10372	2671	0.723751	7.1405
Auto-adaptive avg	15.4468	5808	1.04288	15.482

Příloha č. 5. - ORION, Hvězda 1

Počet zdrojových snímků = 3				
Snímek	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Reference	8.40385	3496	2.30184	8.71338
Maximum	9.1851	3821	2.81853	9.60781
Střední hodnota	8.33894	3469	2.10152	8.59967
Medián	8.34375	3471	2.28385	8.65067
Sigma-Kappa_avg	8.22837	3423	2.37237	8.56354
Sigma-Kappa_med	8.30529	3455	2.35351	8.63231
Auto-adaptive avg	15.3846	6400	3.62034	15.8048
Počet zdrojových snímků = 15				
Reference	8.40385	3496	2.30184	8.71338
Maximum	11.1851	4653	4.86865	12.1988
Střední hodnota	7.63221	3175	2.32706	7.97909
Medián	7.54808	3140	2.17782	7.85598
Sigma-Kappa_avg	7.55048	3141	1.98125	7.80609
Sigma-Kappa_med	7.53846	3136	1.97787	7.79361
Auto-adaptive avg	15.8005	6573	4.30017	16.3752
Počet zdrojových snímků = 21				
Reference	8.40385	3496	2.30184	8.71338
Maximum	11.2332	4673	4.87694	12.2462
Střední hodnota	7.50481	3122	1.95625	7.75558
Medián	7.40865	3082	1.54774	7.5686
Sigma-Kappa_avg	7.44952	3099	1.52774	7.60456
Sigma-Kappa_med	7.4399	3095	1.54461	7.59855
Auto-adaptive avg	16.1538	6720	3.85437	16.6073

Příloha č. 6. - ORION, Hvězda 2

Počet zdrojových snímků = 3				
Snímek	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Reference	9.83388	5979	8.21206	12.8118
Maximum	10.8043	6569	9.3014	14.2565
Střední hodnota	9.53289	5796	7.42654	12.0843
Medián	9.56579	5816	7.54672	12.1843
Sigma-Kappa_avg	9.37829	5702	7.47529	11.993
Sigma-Kappa_med	9.51151	5783	7.54416	12.1401
Auto-adaptive avg	17.5329	10660	13.0633	21.8644
Počet zdrojových snímků = 15				
Reference	9.83388	5979	8.21206	12.8118
Maximum	13.1431	7991	10.8625	17.051
Střední hodnota	8.8602	5387	6.56385	11.0267
Medián	8.73191	5309	6.68946	10.9998
Sigma-Kappa_avg	8.71875	5301	6.11928	10.6519
Sigma-Kappa_med	8.69408	5286	6.05527	10.595
Auto-adaptive avg	17.9967	10942	12.3927	21.8509
Počet zdrojových snímků = 21				
Reference	9.83388	5979	8.21206	12.8118
Maximum	13.5	8208	11.7517	17.8984
Střední hodnota	8.72039	5302	6.30978	10.7638
Medián	8.52632	5184	5.9983	10.4249
Sigma-Kappa_avg	8.58882	5222	5.92486	10.4342
Sigma-Kappa_med	8.58553	5220	5.96943	10.4568
Auto-adaptive avg	18.6135	11317	12.4491	22.3929

Příloha č. 7. - ORION, Hvězda 3

Počet zdrojových snímků = 3				
Snímek	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Reference	9.83388	5979	8.21206	12.8118
Maximum	12.3396	8539	4.99005	13.3104
Střední hodnota	11.2991	7819	3.89328	11.9511
Medián	11.3295	7840	3.90473	11.9835
Sigma-Kappa_avg	11.1416	7710	3.94766	11.8203
Sigma-Kappa_med	11.289	7812	3.93043	11.9537
Auto-adaptive avg	20.565	14231	6.93301	21.7022
Počet zdrojových snímků = 15				
Reference	9.83388	5979	8.21206	12.8118
Maximum	15.2919	10582	6.82471	16.7457
Střední hodnota	10.8757	7526	4.0362	11.6005
Medián	10.7312	7426	3.9953	11.4508
Sigma-Kappa_avg	10.7948	7470	4.14144	11.562
Sigma-Kappa_med	10.7948	7470	4.14807	11.5643
Auto-adaptive avg	21.5188	14891	7.73558	22.8669
Počet zdrojových snímků = 21				
Reference	9.83388	5979	8.21206	12.8118
Maximum	15.8656	10979	8.95352	18.2177
Střední hodnota	10.9292	7563	4.48915	11.8152
Medián	10.7818	7461	4.25353	11.5905
Sigma-Kappa_avg	10.8367	7499	3.84462	11.4985
Sigma-Kappa_med	10.8382	7500	3.87184	11.509
Auto-adaptive avg	22.6431	15669	8.96129	24.3519

Příloha č. 8. - ORION, Hvězda 4

Počet zdrojových snímků = 3				
Snímek	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Reference	12.6281	4041	2.46776	12.867
Maximum	16.7781	5369	3.28788	17.0972
Střední hodnota	14.9656	4789	2.85297	15.2351
Medián	15.5875	4988	3.00809	15.8751
Sigma-Kappa_avg	14.9531	4785	2.8517	15.2226
Sigma-Kappa_med	15.5813	4986	3.01242	15.8698
Auto-adaptive avg	20.1438	6446	4.17933	20.5727
Počet zdrojových snímků = 15				
Reference	12.6281	4041	2.46776	12.867
Maximum	21.1687	6774	4.43173	21.6277
Střední hodnota	14.6156	4677	2.99464	14.9193
Medián	14.2438	4558	2.9267	14.5413
Sigma-Kappa_avg	14.5531	4657	3.01201	14.8615
Sigma-Kappa_med	14.5594	4659	3.02121	14.8695
Auto-adaptive avg	19.8188	6342	4.02162	20.2227
Počet zdrojových snímků = 21				
Reference	12.6281	4041	2.46776	12.867
Maximum	21.1687	6774	4.43173	21.6277
Střední hodnota	13.75	4400	2.93258	14.0592
Medián	13.6844	4379	2.81132	13.9702
Sigma-Kappa_avg	13.7438	4398	2.94692	14.0561
Sigma-Kappa_med	13.6687	4374	2.80228	13.953
Auto-adaptive avg	19.7688	6326	4.15891	20.2015

Příloha č. 9. - M-45, Hvězda 1

Počet zdrojových snímků = 3				
Snímek	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Reference	11.3077	1176	2.42613	11.565
Maximum	16.4135	1707	6.6933	17.7257
Střední hodnota	13.9423	1450	3.71542	14.4289
Medián	14.3077	1488	2.95504	14.6097
Sigma-Kappa_avg	13.9038	1446	3.69386	14.3862
Sigma-Kappa_med	14.2596	1483	2.94826	14.5612
Auto-adaptive avg	18.6154	1936	4.87203	19.2424
Počet zdrojových snímků = 15				
Reference	11.3077	1176	2.42613	11.565
Maximum	20.1154	2092	8.03036	21.6591
Střední hodnota	13.4327	1397	3.74105	13.9439
Medián	13.0096	1353	3.25664	13.411
Sigma-Kappa_avg	13.5	1404	3.65324	13.9856
Sigma-Kappa_med	13.4808	1402	3.68464	13.9753
Auto-adaptive avg	18.375	1911	4.9287	19.0245
Počet zdrojových snímků = 21				
Reference	11.3077	1176	2.42613	11.565
Maximum	20.5	2132	9.0032	22.3899
Střední hodnota	12.875	1339	3.9848	13.4775
Medián	12.5192	1302	3.42777	12.98
Sigma-Kappa_avg	12.7115	1322	3.70206	13.2397
Sigma-Kappa_med	12.4615	1296	3.3222	12.8968
Auto-adaptive avg	18.4615	1920	5.5952	19.2908

Příloha č. 10. - M-45, Hvězda 2

Počet zdrojových snímků = 3				
Snímek	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Reference	11.375	1547	2.81785	11.7188
Maximum	16.7781	2108	3.67624	15.93
Střední hodnota	13.5956	1849	3.03019	13.9292
Medián	14.0441	1910	3.01679	14.3645
Sigma-Kappa_avg	13.5221	1839	2.85937	13.8211
Sigma-Kappa_med	13.9779	1901	2.87603	14.2708
Auto-adaptive avg	18.1765	2472	3.98689	18.6086
Počet zdrojových snímků = 15				
Reference	11.375	1547	2.81785	11.7188
Maximum	19.2132	2613	4.7425	19.7899
Střední hodnota	13.1324	1786	3.13146	13.5005
Medián	12.8382	1746	2.92107	13.1664
Sigma-Kappa_avg	13	1768	3.24264	13.3983
Sigma-Kappa_med	13.0294	1772	3.23115	13.4241
Auto-adaptive avg	18.0147	2450	4.14797	18.4861
Počet zdrojových snímků = 21				
Reference	11.375	1547	2.81785	11.7188
Maximum	19.2868	2623	4.84451	19.8859
Střední hodnota	12.4853	1698	2.99014	12.8384
Medián	12.2868	1671	2.87461	12.6186
Sigma-Kappa_avg	12.3971	1686	2.90608	12.7331
Sigma-Kappa_med	12.2059	1660	2.84429	12.5329
Auto-adaptive avg	17.9412	2440	4.26126	18.4403

Příloha č. 11.- M-45, Hvězda 3

Počet zdrojových snímků = 3				
Snímek	Jasnost [úrovně]	Σ pixels [počet]	σ [úrovně]	RMS [úrovně]
Reference	11.8289	899	2.99732	12.2028
Maximum	16.7632	1274	6.29718	17.9069
Střední hodnota	14.3026	1087	3.84578	14.8106
Medián	14.4079	1095	3.3371	14.7893
Sigma-Kappa_avg	14.1316	1074	3.68618	14.6044
Sigma-Kappa_med	14.2895	1086	3.21107	14.6458
Auto-adaptive avg	19.0263	1446	5.08086	19.693
Počet zdrojových snímků = 15				
Reference	11.8289	899	2.99732	12.2028
Maximum	20.75	1577	7.20585	21.9656
Střední hodnota	13.7632	1046	3.65941	14.2413
Medián	13.2763	1009	3.31503	13.6839
Sigma-Kappa_avg	13.6184	1035	3.67412	14.1053
Sigma-Kappa_med	13.5395	1029	3.71852	14.0408
Auto-adaptive avg	18.7105	1422	4.84175	19.3268
Počet zdrojových snímků = 21				
Reference	11.8289	899	2.99732	12.2028
Maximum	20.9737	1594	7.55676	22.2935
Střední hodnota	13.1316	998	3.86394	13.6883
Medián	12.75	969	3.44935	13.2084
Sigma-Kappa_avg	12.9605	985	3.66865	13.4698
Sigma-Kappa_med	12.6711	963	3.36541	13.1104
Auto-adaptive avg	18.7632	1426	5.49849	19.5522

Příloha č. 12. - M-45, Hvězda 4