

# RGB RADIOMETRIE DIGITÁLNÍMI FOTOAPARÁTY

Jan Hollan

*Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST, Vysoké učení technické v Brně*

**Abstrakt:** Autor vyvinul metodu barevné fotometrie využívající běžné fotoaparáty, které jsou schopny ukládat data ve formátu RAW. Výsledný program raw2lum je veřejně dostupný vč. zdrojového textu. Následující text je úvodem do takové fotometrie a nástinem kroků, které je potřeba vykonat, aby se kamera stala měřicím přístrojem. Lze ji pak využít např. pro sledování optických změn stavebních materiálů během let.

## Úvod

V řadě oborů bývá někdy potřeba „měřit světlo“. Nejčastěji ve smyslu, kolik jej dopadá na nějakou plochu, méně často ve smyslu, jaký jas mají různé části pozorované scény. Porovnáním jasů různých ploch lze zjišťovat jejich vlastnosti, případně změny vlastností v čase. Nejznámějšími přístroji k měření světla (pomineme-li expozimetry) jsou luxmetry. Jak plyne z jejich názvu, jsou určeny k měření intenzity osvětlení, ale lze s nimi měřit přibližně i některé jasy. Jinými klasickými přístroji s vysokou citlivostí (vhodné pro měření v noci) jsou fotonásobiče.

V devadesátých letech se široce rozvinulo užívání detektorů založených na čípech CCD a CMOS. Jejich výhodou je, že místo jednoho čísla poskytují celou matici čísel, lineárně závislých na množství světla, které na detektor dopadlo během expozice. Poskytují vlastně mnohočetná měření intenzity osvětlení čipu. Je-li čip v obrazové rovině nějaké optické soustavy, pak je jeho výstup lineární funkcí jasů či září (viz podrobněji [Dodatek 1](#)) jednotlivých elementů scény (odpovídajících elementům obrazu, tzv. pixelům čipu). Tam, kde je zachycení obrazu výhodné, se CCD a CMOS detektory dávno používají jako nejběžnější vědecký detektor světla.

Ve třetím tisíciletí začaly být digitální fotoaparáty s takovými detektory běžnější než fotoaparáty užívající kinofilm. Digitální fotoaparáty nejsou samy o sobě fotometrickými přístroji. Vzhledem k tomu, na jaké technologii jsou založeny, se takovými přístroji ale mohou stát. Podmínkou k tomu je, aby z nich bylo možno získat surová data, tj. hodnoty skutečně vyčtené z jednotlivých pixelů čipu. Mnoho moderních fotoaparátů takovou podmínku splňuje.

Autor nabídl v roce 2002 GAČR projekt (<http://amper.ped.muni.cz/light/grant/>), jehož součástí bylo vyvinout software, který by z běžných fotoaparátů vytvořil vědecké přístroje pro vícebarevnou fotometrii. Projekt nebyl přijat, autor ale na řešení přesto začal pracovat. Na podzim 2003 vývoj pokročil díky grantu Ministerstva životního prostředí ČR VaV/740/3/03, viz <http://amper.ped.muni.cz/noc/> – tehdy byl zveřejněn software pro fotometrické vyhodnocení snímků. Dnes je již možné použít libovolnou kameru, která poskytuje surová data (a ne jen soubory typu jpeg nebo tiff). Software (se zdrojovými kódy, pod GNU licenci), především základní program **raw2lum** je k dispozici na adrese <http://amper.ped.muni.cz/light/luminance/>.

Vývoj softwaru se odehrával během jeho aplikování. V návaznosti na grant MŽP šlo v dalších letech o studie pro Krkonošský národní park (výsledky jsou na téže URL, v adresáři kmap) a měření v různých dalších lokalitách. Použitelnost i meze metody se tím staly zřejmé. Teze a aplikace používaného postupu byly prezentovány na několika konferencích. Metoda byla původně popsána ve zprávě [http://amper.ped.muni.cz/noc/zprava\\_noc.pdf](http://amper.ped.muni.cz/noc/zprava_noc.pdf) na stranách 25-27 a 37-39. Nynější příspěvek metodu shrnuje znovu, nověji a kompaktněji.

## Co zaznamenávají fotoaparáty

Na rozdíl od vědeckých digitálních kamer, jejichž detektory jsou širokospektrální a vkládají se před ně dle potřeby vhodné spektrální filtry, pořizují běžné fotoaparáty snímek rovnou ve třech různých barvách R, G a B (některé starší fotoaparáty ve čtyřech, YCGM, z nichž pak počítají odhady barev RGB). Až na jednu výjimku (čip Foveon, který barvy odděluje jen přibližně, dle registrované hloubky zachytu fotonů v polovodičové vrstvě) se toho docílí umístěním barevné mřížky před čip (v nejběžnějším uspořádání se označuje jako Bayerova matice). Až čtveřice pixelů čipu pak zaregistruje „jeden barevný bod“: pixely registrující zelenou jsou přitom dva. Jsou-li ve scéně detaily úhlových rozměrů menších, než je onen úplný „čtyřbod“ snímače, je fotometrická informace o takových detailech neúplná a automatizovaný odhad R, G a B jasů detailu může být zavádějící. Fotometrie takových detailů je možná buď tak, že je dostatečně rozostříme (to je možné u hvězd na mnohem temnějším pozadí), nebo statisticky tak, že použijeme mnoho snímků vhodně posunutých (řádově o jeden pixel).

Nejde-li o fotometrii malých detailů (bodů či čar), barevná matice před čipem žádnou zásadní překážku pro fotometrické vyhodnocení snímků nepředstavuje. Problém je ale v tom, že standardní fotometrické programy předpokládají, že všechny pixely zaznamenávají tutéž barvu. Takovou překážku lze obejít rozdělením snímku na čtyři „děravé“, každý pro jednu barvu (zelené snímky jsou pak dva, posunuté vůči sobě). Neznám ale program, který by automaticky konvertoval RGB snímek na čtveřici ve standardním vědeckém fotometrickém formátu FITS.

Zvolil jsem jinou cestu, totiž vytvoření vlastního programu, který pracuje přímo s RGB snímky uloženými ve formátu pgm (portable graymap). Pozice barev R, G a B (nebo Y, C, G, M) se programu zadávají jako vstupní parametr. Kamery ovšem snímky neukládají v tomto formátu, používají své vlastní formáty, kterých je desítky typů. Pro jejich převedení do pgm naštěstí existuje program dcraw (jeho dřívější verze to přímo neumožňovaly, musel jsem zdrojový kód programu upravit; takovou úpravu z roku 2003 dosud používám pro fotoaparát Fuji S5000, který má Bayerovu matici otočenou o 45 stupňů).

Ne všechny digitální fotoaparáty jsou schopny poskytnout přímý výstup ze svého A/D převodníku (desetibitový až čtrnáctibitový). Některé poskytují jen snímky, v nichž jsou pro každý pixel dopočítány zbylé dvě barvy, což je ovšem operace, která informaci mění, vymýšlí. Dále pak přepočítávají data utajenou nelineární transformací do osmibitového formátu. Přesto jsou autoři, kteří takové snímky vyhodnocují: nelineární vztah hodnot snímku a jasů scény se snaží najít empiricky, přičemž buď doufají, že se nemění, nebo dokonce každý snímek kalibrují samostatně (to jde tehdy, když jsou na snímku hvězdy známé jasnosti). Takové zpracování je ale pracné a dosažitelná přesnost je nevalná.

Věnoval jsem se proto jen zpracování snímků, kde data dodatečným transformacím nepodléhala. Nebo téměř nepodléhala: ukázalo se totiž, že mnohé fotoaparáty bohužel odečítají ze snímků konstantu, která odpovídá střední hodnotě nebo mediánu pixelů snímku pořízeného se zakrytým objektivem. Téměř polovina pixelů málo exponovaných snímků je pak nulová a nenesou žádnou fotometrickou informaci. Některé kamery (např. Nikon D70) data dále neznámým způsobem filtrují, zřejmě aby se ve snímcích napohled snížil šum (staré fotoaparáty Nikon, které se do režimu ukládání surových dat přepínají speciálním softwarem, takovými nečinnostmi netrpí). Pro důkladně exponované oblasti snímků jsou ale všechny „RAW“ formáty zcela vyhovující. Pro málo exponované oblasti jsou plnohodnotné jen ty formáty, které mají vždy naprostou většinu pixelů nenulových; to není bohužel případ Fuji (až na kameru S2Pro) a formátu NEF pro Nikon. Pro Fuji S5000 jsem do programu raw2lum začlenil statistickou kompenzaci tohoto nedostatku (viz [Dodatek 2](#)).

## Základní fotometrická kalibrace kamer

Je-li hodnota pixelu lineárně závislá na jasů elementu předmětu, který se na pixel zobrazuje, je snadné změnit lineární závislost na přímou úměrnost: stačí odečíst snímek pořízený se stejnou expozicí, ale s vyloučením světla. Tedy snímek se zakrytým objektivem, tzv. černý (darkframe).

Bez jakékoliv kalibrace pak lze říci, jaký je poměr jasů téže scény vyvolaný změnou jejího osvětlení nebo ztmavnutím či vyblednutím materiálů za nějakou dobu (použijeme-li referenční materiál, který se nezměnil). Lze přitom použít stejného expozičního nastavení nebo se spolehnout na správnost údajů kamery. Signál je pak úměrný expozici, kterou lze brát jednoduše jako „ISO × délka expozice / (1 s × clonové číslo na druhou)“. Dle mých zkušeností je přesnost a reprodukovatelnost těchto údajů, pokud se na kameře nastavují ručně, velmi dobrá, na úrovni několika procent (výjimku jsem našel jen u nejkratších expozičních časů kamery Nikon 990). Funguje-li kamera v automatickém režimu, může ale použít i jiné hodnoty nastavení, než zaznamená do hlavičky snímku – porovnání různých snímků není pak spolehlivé.

Snímky pořízené v manuálním režimu je možné jasově zkalibrovat později. Klíčem k tomu je snímek bílé plochy známého jasů. Úlohu lze rozdělit do několika etap.

První etapou je nalezení takových koeficientů pro barvy R a B, aby dávaly pro bílou plochu tutéž hodnotu jako G (to je zpravidla filtr, ve kterém bývají surové hodnoty nejvyšší). Tyto koeficienty lze pak užívat pro výpočet správného barevného obrazu z původního šedého snímku pořízeného přes barevnou matici.

Druhou etapou může být stanovení koeficientu, kterým je třeba násobit součin expozice a kterékoliv z normalizovaných (tj. vzájemně rovných pro bílou barvu) hodnot R, G a B, aby pro bílou barvu vyšel správný jas.

Třetí etapou je nalezení jednotkové lineární kombinace (součet koeficientů je roven jedné), která dá správný jas i pro jinou než bílou barvu. Byla by to taková lineární kombinace, která by dávala spektrální citlivost stejnou, jako má lidské vidění. Pro reálné spektrální citlivosti pixelů R, G a B taková ideální kombinace neexistuje, spektrální citlivosti zraku se lze jen přiblížit. Lze postupovat tak, že jas různobarevných zkoumaných ploch zjišťujeme luxmetrem (či přímo jasoměrem), který má spektrální citlivost dostatečně blízko lidskému vidění. Alternativou, kterou jsem použil já, bylo změření spektrálních citlivostí jednotlivých barev kamery a následné zvolení takových koeficientů, aby spektrální citlivost složená z těchto barev byla co možná blízká citlivosti denního lidského vidění (tzv. fotopického).

Jak jsem postupoval konkrétně? Za bílé se považuje denní světlo, pokud je slunce vysoko na jasném nebi. Jde o rozptýlené světlo oblohy (různě sytě modré) a přímé světlo ze Slunce (zeslabené rozptylem zejména modré složky; přímé sluneční světlo je proto nažloutlé). K dennímu světlu je pak potřeba mít ještě bezbarvou rozptylující plochu. Za takovou může sloužit bílý papír (ten ale zpravidla obsahuje tzv. optický zjasňovač, který z ultrafialového záření generuje modré světlo), lepší je plocha natřená síranem barnatým, ideální je fotometrický bílý standard (užíval jsem Spectralon firmy Labsphere, pohlcující pouhé jedno procento dopadajícího světla). Program raw2lum udává jako výstup mediány a průměry hodnot R, G a B ve zvolených políčkách, normalizační koeficienty pro R a B složku se získají vydělením hodnot G hodnotami R resp. B, pro políčko uvnitř patřičné bílé plochy.

Druhá etapa, tj. absolutní kalibrace kamery, je zjevná, pokud jde o plochu dokonale rozptylující a pokud je známa intenzita jejího osvětlení. Ta je známa pro případ, kdy je Slunce vysoko na bezoblačném nebi. Slunce je totiž zdroj velmi konstantní (s odchylkami málokdy překračujícími jedno promile) a proměnlivost podílu přímé a rozptýlené složky nehraje velkou roli, pokud jde o osvětlenost vodorovné plochy v otevřené krajině. Malá proměnnost je dána pohlcováním vodní parou v oblasti kolem 590 nm; rozptyl na aerosolu, jakkoliv se jeho obsah mění, je převážně dopředný, tj. nakonec vedoucí rovněž k osvětlení vodorovného povrchu. Formule pro osvětlenost za jasného počasí zahrnují např. skripty pro generování grafů na <http://amper.ped.muni.cz/weather>. Zpřesnění je možné docílit měřením hloubky stínů (to poskytuje i nekalibrovaná digitální fotografie) nebo měřením tzv. zenitové extinkce. K jejímu zjištění stačí série snímků bílé plochy orientované ke slunci, pořízená ve velkém rozsahu výšek Slunce. Já jsem využil k tomuto účelu luxmetr. Znalost zenitové extinkce (zeslabení přímého světla pro Slunce v zenitu) umožňuje stanovit intenzitu přímého osvětlení bílé plochy s přesností jednoho procenta. Intenzitu osvětlení bílé plochy lze i přímo měřit luxmetrem, ten má ovšem většinou nižší přesnost.

Intenzita osvětlení plochy souvisí obecně s jejím jasem prostřednictvím tzv. BRDF funkce, udávající poměr jas/osvětlenost v závislosti na směru dopadu světla a směru pozorování plochy. Mnohé plochy lze ale při vhodně zvolených obou úhlech považovat za dokonale rozptýlné – u papíru je to dost hrubé přiblížení, u lesklé bílé kachle lepší (až na zrcadlovou složku odrazu na glazuře), u standardu Spectralon je to přiblížení velmi dokonalé. Jas je pak roven součinu albeda a osvětlenosti dělené „pí steradiánů“.

Pro nedostatečně rozptýlnou plochu je možné použít i jiného postupu, totiž přímého měření jejího jasu jasoměrem nebo přibližně luxmetrem. Alternativou je výpočet osvětlenosti objektivu vzdálenou, úhlově dostatečně malou plochou na základě výpočtu ze snímku a porovnání s měřením ve stejném místě luxmetrem. Tak jsem to dělal pro případ průhledu oknem, kdy zbytek scény měl jasy o dva řády menší. V mém případě nešlo o plochu bílou, nýbrž barevnou, a postupoval jsem tak až po zjištění spektrální citlivosti jednotlivých barev kamery.

Jasová kalibrace pro bílé světlo může uvedenými postupy docílit přesnosti jednoho až pěti procent. Jejím opakováním pro světlo výrazně odlišných barev lze najít i vhodné koeficienty pro lineární kombinaci jasů R, G a B, aby dávaly dobrou reprezentaci jasu fotopického.

Jak řečeno, použil jsem jinou metodu, totiž přímé stanovení spektrální citlivosti. Vyfotografoval jsem sluneční spektrum užitím DVD disku jakožto transmisní mřížky. Nešlo o běžný disk, ale o takový, který někdy bývá pod štosem DVD-R, bez barevné či aluminiové vrstvy. Dopadá-li sluneční záření na disk téměř tečně, stává se úhlová tloušťka Slunce zanedbatelná, a disk tak funguje jako bezšterbinový spektroskop. Prohnutí vrypů na disku vede k tomu, že při pohledu z vhodného směru se zdroj úhlově krátký stává ve spektru dlouhou čarou: snadno tak lze vidět spoustu Fraunhoferových čar. (Alternativou je užití běžného CD s aluminiovou vrstvou jako mřížky reflexní.) Na snímku je několik spektrálních čar vidět také. Pro všechny barvy kamery lze pak vynést registrované hodnoty v závislosti na poloze na čipu (vzhledem k prohnutí čar je vhodné vybrat jen úzký pruh), a dále aplikovat obvyklý vzorec pro spektrografy, totiž najít patřičné koeficienty, udávající závislost souřadnice na vlnové délce: k tomu slouží známé vlnové délky čar ve slunečním spektru. Výsledkem je graf, kde je na vodorovné ose vlnová délka. Přímé sluneční světlo není bílé, jeho intenzita směrem ke krátkovlnnému kraji spektra klesá. Průběh je ale znám, zejména pro standardní „vzdušnou hmotu 1,5“. Tu jsem použil i já (tak svítí u nás slunce, když je asi 42 stupňů vysoko). Stačí pak teoretickým průběhem spektra vydělit změřené závislosti, a po vyhlazení získáme kýžené spektrální citlivosti. Tak jsem okalibroval kamery Nikon 990, Fuji S5000 a Canon D60. Pro ně jsem pak stanovil jednotkové kombinace normalizovaných barev, odpovídající fotopickému jasu: Nikon 990: 1,3 Y - 0,3 G, Fuji S5000: 0,65 G + 0,35 R, Canon D60: 0,7 G + 0,3 R.

Křivka takto vypočítaná se neshoduje v detailech s křivkou fotopické citlivosti, ale odchylky jsou lokálně jen do třiceti procent. V praxi by se mohly projevit jen u čarových světelných zdrojů zvláštního spektrálního složení nebo u výrazně barevných ploch.

## Druhý kalibrační úkol: flatfield či vinětace

Výše uvedené postupy předpokládaly, že vztah jas-signál je nezávislý na poloze pixelu na snímku. Tak tomu ale není, v rozích snímku je signál vždy menší. Tento jev se označuje jako vinětace, anglicky vignetting nebo light fall-off. Jeho zdroje zahrnují např. to, že úhel dopadu světla na rohy čipu je již dosti odlišný od nuly (zejména pro širokoúhlé záběry), i to, že se apertura objektivu v tak extrémních směrech skutečně zmenšuje (vinětace v užším slova smyslu). Klesá též průzračnost optiky objektivu, barevné matice před čipem i pohltivost čipu. Ve vědecké fotometrii zobrazující malá zorná pole se úloha řeší tím, že se zaznamená scéna rovnoměrného jasu, zvaná flatfield a tou se dělí rozdíl zkoumané scény a darkframu. Docílit scény rovnoměrného jasu není snadné, ale pro malá zorná pole je to reálné. Využití flatfieldu řeší i problém důležitý pro fotometrii detailů scény: rozdílnou citlivost jednotlivých pixelů a přítomnost nečistot v optické soustavě.

Program raw2lum zatím flatfield neumí použít. Nenašel jsem totiž způsob, jak takový snímek běžně pořídit při velkém zorném poli, zejména pak přesahuje-li 180 stupňů (s rybím

okem). Lze jej pořídit v průzoru velké integrační koule, tu jsem ale neměl k dispozici. Neřešil jsem proto problém nehomogenity citlivosti, pokud jde o detaily, ale jen problém vinětace. Použil jsem k tomu hlavně snímky zdi osvětlené zataženou oblohou nebo vzdálenou lampou, přičemž jsem měnil zamíření kamery. Cílem bylo najít takovou funkci úhlové vzdálenosti od středu zobrazení, při jejíž aplikaci by už vypočtené jasy různých míst scény nezáležely na namíření kamery. Doopravdy jsem tuto úlohu vyřešil jen pro několik optických konfigurací dvou kamer, v obou případech s maximální aperturou – pro Nikon 990 s rybí předsádkou a Fuji S5000 (pro dvě extrémní ohniskové délky a jednu střední, pro niž je vinětace nejmenší).

### Třetí kalibrace: geometrie zobrazení

Pro snímky s dlouhou ohniskovou délkou je možné předpokládat, že zobrazení je gnómonické (středové promítání na rovinu). Tak zobrazuje dírková komora. Širokoúhlé objektivy a zejména pak rybí oka tak zobrazovat nemohou, a vzdálenost od středu snímku není prostě  $f \times \text{tg}(z)$ , kde  $z$  je úhlová vzdálenost daného bodu předmětu od optické osy kamery a  $f$  je její ohnisková vzdálenost. Geometrii zobrazení jsem studoval pro kameru Nikon 990 pro nejkratší ohniskovou délku. Použil jsem k tomu snímky hvězdného nebe, pro něž jsem pak počítal takové hvězdné mapy, aby pozice hvězd souhlasily. Výsledná zobrazení jsem zařadil do svého programu `map_bsct`:

ekvidistantní od pólu projekce	$z$
úhlojevná (stereografická)	$2 \text{ tg}(z/2)$
gnómonická (centrální promítání)	$\text{tg}(z)$
plochojevná (ekvivalentní)	$2 \sin(z/2)$
Nikon 990 s konvertorem FC-E8	$2,4 \sin(z/2,4)$
Nikon 990	$1,4 \text{ tg}(z/1,4)$
snad pro Pentax	$1,2 \text{ tg}(z/1,2)$

Porovnáním snímku hvězdného pole a mapy lze zjistit i ohniskovou délku  $f$ , či obecně podíl rozteče pixelů (většinou známé) a ohniskové délky (v případě použití konvertoru fish-eye to bylo důležité, hodnoty se od předpokládaných lišily).

### Celková kalibrace

Je-li známa geometrie zobrazení i průběh vinětace, a patřičné parametry se zabudují do vyhodnocovacího softwaru, jasovou kalibraci lze převést na měření intenzity osvětlení: ze snímku, zejména pak ze snímku pořízeném rybím okem (pokud zahrnuje plný poloprostor) lze vypočítat intenzitu osvětlení roviny objektivu a tutéž hodnotu pak změřit luxmetrem. Neobsahuje-li scéna přeexponované body, musí obě hodnoty souhlasit. Obsahuje-li takové body, lze pro kalibraci pořídit sadu snímků s různými expozičními časy, stačí v krocích po mocninách šestnácti. Z každého snímku se pak berou jen body s jasy v patřičném rozmezí.

Takovou úplnou kalibraci jsem provedl jen pro Nikon 990, se kterým jsem řešil nejvíce úloh a vyvíjel pro něj software pro případ zobrazení většího prostorového úhlu než  $2\pi$  srad.

### Dodatek 1: Fotometrie a radiometrie

Digitální fotoaparáty, přesně vzato, nabízejí jen tříbarevnou nebo čtyřbarevnou radiometrii. Po spektrální kalibraci s užitím slunečního nebo jiného referenčního spektra lze pak udávat záře v daném několikabarevném radiometrickém systému. Jde tehdy o integrály spektrální záře přes spektrální citlivost dané barvy kamery (ve watttech na metr čtvereční a steradián). Přepočtení na jiný systém, např. fotopické nebo skotopické jasy je vždy jen přibližný, skutečné spektrální citlivosti budou rozdílné, pokud se náhodou některá ze křivek spektrálních citlivostí kamery dobře neshoduje s žádoucí standardní křivkou.

Vyjadřování fotometrické, tj. v jednotkách odvozených od jednotky kandela a tedy od citlivosti lidského zraku, je ale pro barevnou radiometrii ve viditelných vlnových délkách velmi praktické. V programu raw2lum jsem zavedl konvenci, že pro osluněnou bílou plochu se barevné záře přepočítávají na barevné jasy tak, že jsou všechny stejné, rovné fotopickému jasu.

Trochu podrobněji: fotometrie definuje jen jasy fotopické a skotopické (tedy platné pro denní, resp. noční vidění). Již v roce 2004 jsem navrhl, aby další jas, platný pro receptory startující denní a noční fázi metabolismu aneb synchronizující cirkadiánní rytmus organismu se skutečným dnem a nocí (jde o nezobrazující buňky s krátkovlnnou citlivostí) byl definován jednoduše tak, že pro bílé světlo má tytéž hodnoty jako jas fotopický (to se liší od definice jasu skotopického, který se považuje za totožný s fotopickým pro světlo s vlnovou délkou 555 nm). Obdobně to navrhuji pro jasy R, G, B a další, které spadají do viditelné oblasti spektra.

Problémem definice je, co má být oním standardním bílým světlem. Osluněná bílá plocha dává i při slunci vysoko na jasné obloze přece jen mírně proměnlivé spektrální složení světla (v závislosti na průzračnosti ovzduší). Není ovšem příliš rozdílná od CIE illuminantu D65 – lze tedy, přísně vzato, normalizovat jasy na tento průběh spektrální záře.

## **Dodatek 2: Kompenzace nulových pixelů**

Mnoho digitálních fotoaparátů „ořezává“ snímky na úrovni mediánu černého snímku. V případě fotometrie to znamená problém. Představme si, že od snímku velmi málo exponovaného odečítáme darkframe. Oba snímky se liší jen velmi málo, rozdíl je dán fotony zachycenými prvním ze snímků. Jenže: vzhledem k tomu, že téměř polovina pixelů má hodnotu nulovou, zachycené fotony se mohou projevit jen v oněch nenulových pixelech. Skutečné množství zachycených fotonů je zřejmě úměrné střední hodnotě rozdílu snímků krát (počet pixelů celkem / počet nenulových pixelů).

V opačném případě hodně exponované scény by bylo na místě neodečítat darkframe vůbec, neboť ten, kdyby jeho „dolní polovina“ nechyběla (byla by kódována zápornými čísly), měl by střední hodnotu zhruba nulovou.

U málo exponovaných oblastí scény ale něco odečítat potřeba je. Jediné řešení, které jsem našel, je odečítat darkframe a pak k dané množině pixelů zase připočítat nějakou konstantu. U hodně exponovaného snímku by to byla prostě střední hodnota darkframe. U méně exponované oblasti, jejíž střední hodnota je menší než hodnota pro percentil 99 darkframe, je potřeba přidat „něco menšího“. Přidávám tedy hodnotu integrálu funkce „hodnota percentilu“ až po ten percentil, jehož hodnota se rovná střední hodnotě dané oblasti. Je-li střední hodnota oblasti vyšší než hodnota pro percentil 99, integrace končí na tomto percentilu (výsledek je téměř stejný jako střední hodnota darkframe).

Číselně je tento postup v programu raw2lum aplikován zatím jen pro jednu kameru, totiž pro Fuji S5000, pro níž jsem hodnoty určitých integrálů od nuly po daný percentil aproximoval polynomem. Samozřejmě, takovou kompenzaci lze uplatnit jen statisticky, dobře funguje pro oblasti s rovnoměrným jasnem zahrnující tisíce pixelů. V programu raw2lum ji nouzově uplatňuji už pro skupiny šestnácti čtyřpixelů (v barevném kódování jasů). Více k problému a jeho řešení viz [http://amper.ped.muni.cz/noc/krnap/2006/low\\_exp.htm](http://amper.ped.muni.cz/noc/krnap/2006/low_exp.htm).

## **Literatura**

vesměs jen hypertextové odkazy, dostupné z elektronické verze tohoto příspěvku na adrese <http://amper.ped.muni.cz/light/luminance/czech>