

CCD KAMERY PRO SNÍMÁNÍ EXTRÉMNĚ SLABÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

Pavel Cagaš, Roman Cagaš, Jiří Kofránek

Anotace

CCD čipy způsobily technologický přelom v řadě oborů. Používají se v digitálních fotoaparátech, digitálních filmových kamerách a ve webových kamerách, jsou součástí telefonů a tabletů. Jsou vstupním médiem pro řadu řídicích a měřících aplikací v průmyslové automatizaci, využívajících technologii strojového vidění. Zvláštní význam mají speciální přesné CCD kamery pro měření extrémně slabých zdrojů světla, které způsobily zásadní převrat v astronomii, kde výrazně posunuly možnosti nejen profesionálních, ale i amatérských astronomů. Velký přínos těchto speciálních kamer mají aplikace v lékařství a v měřících přístrojích využívaných v molekulárně-genetickém výzkumu, kde se využívají pro přesné kvantitativní vyhodnocení fluorescence, často kombinované s robotizovanou přípravou laboratorních vzorků. Tyto kamery vyrábí jen několik firem na světě. Jednou z nich je i společnost Moravské Přístroje, která je jednou z mála firem na světě, které tuto vysoce složitou technologii zvládly. V propojení s programovým prostředím pro počítačové vidění Vision Lab, které je nadstavbou vývojového nástroje Control Web, se tak nabízí velmi sofistikovaný nástroj pro vývoj robotizovaných biotechnologických zařízení s vysokou přidanou hodnotou.

Klíčová slova:

Analýza obrazu, biotechnologie, CCD kamery, strojové vidění

1. Úvod

Setkáváme se s nimi všichni. Na pokladnách supermarketů nám jejich pomocí snímají čárový kód ze zakoupeného zboží. V chytrých telefonech nám nabízejí možnost mít fotoaparát stále po ruce. Jsou součástí moderních tabletů, ale také i moderních astronomických dalekohledů, včetně Hubbleova teleskopu, který na oběžné dráze snímá hluboký vesmír. Umožňují nám pomocí webových kamer vést videohovory přes Skype. Jsou ukryté v bezpečnostních kamerách, které nás „šmírují“ v bance, v metru a na mnohých jiných místech. Máme je v digitálních fotoaparátech, které nás naučily zapomenout na někdejší šetření omezeného místa políccích barevného kinofilmu. Způsobily, že kamery již nejsou pouze nástrojem pro filmové profesionály, ale se staly masově dostupným zbožím. Jsou také i důležitou komponentou pro řadu speciálních zařízení v průmyslu, lékařství i ve výzkumu, kde jsou vstupním médiem pro řídicí a měřící aplikace, využívající technologii strojového vidění.

Jde o speciální tzv. CCD (Charge Coupled Devices) detektory, které jsou srdcem všech zařízení detekujících světlo. Vznikly v Bellových laboratořích vlastně omylem jako vedlejší produkt při výzkumu nových paměťových

prvků pro počítače. Vynalezli je pánové Williard Boyle a George E. Smith. Práce se původně týkaly vývoje nového typu paměťového registru, který se chová podobně jako CCD čip bez přístupu světla. Bouyle vzpomíná, že v roce 1969 práce na vynálezu CCD fakticky trvala asi hodinu: nejprve se Smithem na tabuli načrtli několik obrázků a pak prostě šli do laboratoře první jednoduché CCD zrealizovat [2]. O sedmáct let později, v roce 2006 za tento vynález dostali Nobelovu cenu.

2. Přesné CCD kamery pro měření extrémně slabých zdrojů světla

Mezi zařízeními, využívajícími CCD detektory mají zvláštní význam speciální přesné CCD kamery pro měření extrémně slabých zdrojů světla, které způsobily revoluci v pozorovací astronomii srovnatelnou s vynálezem dalekohledu. CCD jsou velmi citlivé detektory a jejich odezva na osvětlení je lineární. Jsou mechanicky stabilní a především CCD kamery poskytují snímky přímo v digitální podobě, bezprostředně zpracovatelné pomocí počítačů. Tyto kamery výrazně posunuly možnosti nejen profesionálních, ale i amatérských astronomů.

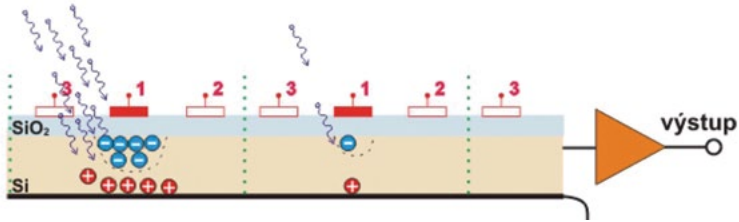
Velký přínos těchto speciálních kamer mají aplikace v lékařství a v měřicích přístrojích využívaných v molekulárně-genetickém výzkumu, kde se využívají pro přesné kvantitativní vyhodnocení fluorescence, často kombinované s robotizovanou přípravou laboratorních vzorků.

3. Princip činnosti CCD čipů

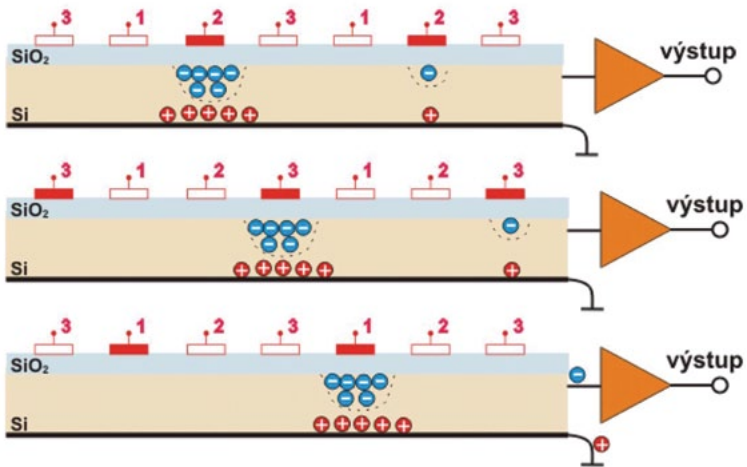
Základní princip práce CCD je poměrně jednoduchý – přicházející světlo vytváří v polovodiči elektrický náboj (elektrony) – viz obr. 1. Elektrony se nemohou volně pohybovat po čipu, neboť na čipu jsou vytvořeny svislé negativní potenciálové valy (odpuzující elektrony). Systém vodorovných elektrod, rovněž s negativním nábojem, vytváří na čipu mřížku tzv. „potenciálových studní“, z nich elektrony nemohou uniknout. Každá potenciálová studna vytváří a reprezentuje jeden obrazový bod (tzv. „pixel“ z anglického picture element), tedy nejmenší čtvereček obrazu. Počet pixelů v horizontálním a vertikálním směru stejně jako velikost pixelu tvoří jednu z nezákladnějších charakteristik CCD čipu. Pixely vystavené většímu množství světla naakumulují více elektronů a naopak. Jedna ze základních výhod CCD čipů ve srovnání s lidským okem tedy je schopnost akumulace náboje po dlouhou dobu. CCD tak mohou postupně nashromáždit dostatek světla i z velmi slabých světelných zdrojů.

Ne každý foton vygeneruje ale v čipu zachytitelný elektron. Jedním z charakteristik čipu je tzv. **kvantová účinnost CCD čipu** (anglicky **quantum efficiency – QE**), která určuje kolik fotonů dopadajících na čip je přeměněno na signál. Např. QE kolem 30% znamená, že přibližně každý třetí foton vygeneruje elektron.

CCD čip je pokryt sítí elektrod, která udržuje světlem uvolněné elektrony v pixelech. Ale struktura elektrod je poněkud komplikovanější. Pokud se na



Obrázek 1— Expozice obrazu. Na elektrody označené na obrázku číslem 1 se přivede kladné napětí a na CCD se nechá působit světlo (například v digitálním fotoaparátu se otevře závěrka). Dopadající fotony excitují v polovodiči elektrony, které jsou pak přitahovány ke kladně nabitým elektrodám. Po elektronech zbudou v polovodiči tzv. díry, které vůči svému okolí vykazují kladný náboj a ty jsou naopak přitahovány elektrodou na spodku CCD. Hranice pixelů jsou na obrázku znázorněny svislými tečkovanými čarami. Protože na pixel vlevo dopadlo více fotonů, je u jeho elektrody shromážděno více elektronů než u pixelu vpravo (obrázek převzat z [1] se svolením autora).



Obrázek 2 — Snímání obrazu Po uzavření závěrky se začne na množiny elektrod 1, 2 a 3 přivádět trojfázový hodinový signál (existují i CCD se čtyřfázovým nebo naopak dvoufázovým čtením, podrobněji viz např. v [3]). To v praxi znamená, že na elektrodách 2 se začne pozvolna zvyšovat napětí, zatímco na elektrodách 1 se souběžně snižuje. Díky tomu jsou shluky elektronů přitahovány pod elektrody 2. Následně se celý děj opakuje mezi elektrodami 2 a 3, dále mezi 3 a 1 a tak stále dokola. Shluky elektronů z jednotlivých pixelů se tak posouvají přes sousední pixely směrem k výstupnímu zesilovači (na obrázcích vpravo). Tento zesilovač pak zesílí malý proud odpovídající počtu nacytaných elektronů v jednotlivých pixelech na napětěové úrovni vhodné pro další zpracování obrazu (obrázek převzat z [1] se svolením autora).

elektrody přivede různé napětí, elektrony mohou být „přelévány“ z jedné nábojové studny do sousední (obr. 2). Tak je možné náboj posouvat po ploše čipu. Tento proces je používán, když je potřeba informací z CCD čipu vyčíst. Balíky elektronů, reprezentující jednotlivé pixely, jsou posouvány do výstupního zesilovače, kde je elektrický náboj převeden na napětí. Toto napětí se objeví na výstupním pinu CCD čipu. Elektronika kamery pak musí toto napětí změřit (převést na číslo pomocí analogově/digitálního převodníku, anglicky Analog/Digital Converter – ADC) pro každý pixel. Informace o náboji akumulovaném v každém pixelu (a tedy o množství světla, která do každého pixelu dopadlo) tvoří datový soubor reprezentující obrázek.

Pixely mohou být v CCD čipu organizovány několika způsoby:

Jediná řada pixelů tvoří **lineární CCD**. Lineární CCD bývají používány když je zapotřebí snímat pouze jednorozměrný obraz (např. při detekci spektra). I dvourozměrný obraz ale může být vytvořen s pomocí lineárního snímače – stačí aby se detektor nebo cílový objekt pohyboval a obraz je vytvořen postupným snímáním řádek po řádku. Tento princip je použit např. u skeneru dokumentů – detektor spolu s optikou se posouvá vzhledem ke snímanému dokumentu a obraz se vytváří řádek po řádku. Také kamery v družicích a sondách obíhajících kolem zkoumaných planet často používají tento princip – orbitální pohyb družice je použit k vytváření obrazu povrchu řádek po řádku.

Pixely vytvořené v matici na křemíkovém čipu vytvářejí **maticový CCD**. Maticový CCD detektor snímá obrázek najednou. Používají se v digitálních fotoaparátech, kamerách a také v astronomických CCD kamerách.

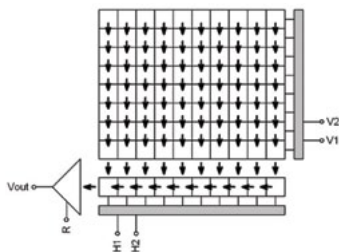
Pixely akumulující světlo jsou v maticových CCD organizovány do sloupců. Změnami napětí na vertikálních elektrodách je možné celý obraz posunout podél obrazových sloupců o jeden řádek dolů. To znamená, že každý řádek se posune o jeden řádek dolů, pouze nejnižší řádek se přesune do tzv. horizontálního registru. Horizontální registr může být posouván pomocí horizontálních elektrod do výstupního zesilovače. Čtení maticového CCD tedy představuje svislý posun obrazu do horizontálního registru prokládaný vodorovným posunem pixelů horizontálního registru do výstupního zesilovače a digitalizací jeho hodnoty.

4. Maticové CCD snímače

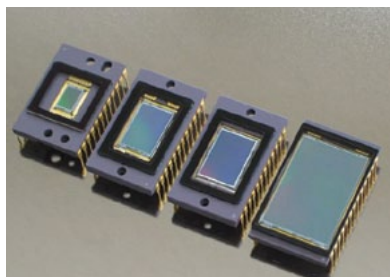
Maticové CCD snímače mají různé konstrukce:

Full Frame (FF) vystavuje celou svou plochu světlu. Během čtení FF čipu je nezbytné použít mechanickou závěrku, jinak by dopadající světlo rozmazalo čtený obraz. FF čipy jsou nevhodnější ke snímání slabých zdrojů světla v astronomii, protože snímají světlo největší plochou (obr. 3 a 4). Všechny CCD čipy se skutečně vysokou kvantovou účinností jsou FF čipy.

Frame Transfer (FT) čipy se skládají ze dvou oblastí. Jedna je vystavena světlu (Imaging Area – IA) a druhá je překryta neprůhlednou vrstvou (Storage Area – SA). Jakmile je expozice ukončena, obraz je velice rychle přenesen



Obrázek 3 — Schéma FF čipu (počet vertikálních a horizontálních elektrod se liší v závislosti na architektuře čipu)



Obrázek 4 — FF CCD čipy firmy Kodak: KAF-0402ME, KAF-1603ME, KAF-3200ME a KAF-6303E

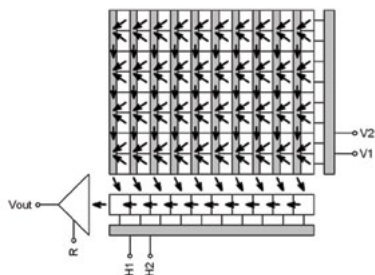
a IA do SA. SA je následně relativně pomalu posouvána do horizontálního registru a digitalizována bez nebezpečí rozmazání dopadajícím světlem. Tato vlastnost je také nazývána „elektronická závěrka“. Nicméně tento způsob vyčítání má své limity. Především elektronická závěrka nedovoluje exponovat temné snímky – kamera musí být vybavena mechanickou závěrkou tak jako tak jinak nebude schopna pořizovat temné snímky automaticky, bez obtěžování pozorovatele zakrýváním tubusu (což může být u otevřeného tubusu dost velký problém). Ačkoliv je SA zakryta před příchozím světlem, zejména u jasných zdrojů světla (jako je např. Měsíc) hrozí přetékání náboje z IA do SA během vyčítání.

Významnou negativní vlastností FT čipů je jejich cena. Výroba velkých křemíkových čipů bez vadných pixelů je velmi drahá a FT čipy mají dvojnásobnou plochu ve srovnání s FF čipy. To je také jeden z důvodů proč se od výroby FT čipů postupně upouští.

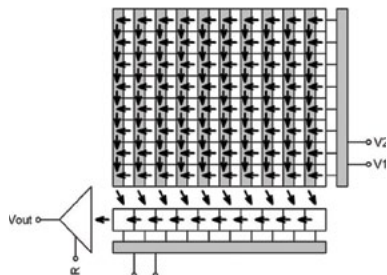
Interline Transfer (IT) čipy pracují podobně jako FT (také jsou vybaveny elektronickou závěrkou), ale jejich zacloněná plocha je prokládána s aktivní citlivou plochou. Každý lichý sloupec akumuluje světlo, sudé sloupce jsou překryty neprůhlednou vrstvou. Jakmile expozice skončí, liché sloupce jsou velice rychle přesunuty do sudých sloupců. Ty jsou pak postupně posouvány do horizontálního registru a digitalizovány. Rozkládání aktivních a neaktivních sloupců omezuje plochu, kterou čip shromažďuje světlo. Tento efekt může být částečně kompenzován pokročilými výrobními postupy (např. aplikací mikročoček) popsanými dále.

Z historických důvodů je televizní signál tvořen nikoliv posloupností jednotlivých obrazů, ale střídajícími se snímky o polovičním počtu řádků, tzv. pálsnímkami. Lichý pálsnímek tak obsahuje řádky 1, 3, 5 atd., sudý pálsnímek pak řádky 2, 4, 6, atd. Těmto konvencím se přizpůsobili i výrobci CCD čipů a pozměnili architekturu snímačů používaných v televizní technice tak, aby tyto CCD čipy rovněž dokázaly vyčítat jednotlivé pálsnímkami.

Ovšem pokud by byl vyčítán vždy pouze každý druhý řádek, citlivost snímače by značně utrpěla (50% informace by se při čtení zahodilo). Proto



Obrázek 5 — Schéma IT čipu s prokládaným čtením (čtení sudého pulsničku)



Obrázek 6 — Schéma IT čipu s progresivním čtením

u klasických „televizních“ CCD čipů jsou exponované řádky elektronicky sečteny (viz. binning) tak, že lichý pulsniček obsahuje nejprve samotný první řádek, následovaný součtem 2. a 3. řádku, součtem 4. a 5. řádku atd. Sudý pulsniček pak sečte 1. a 2. řádek, 3. a 4. řádek atd.

Tato architektura čipu je označována jako – interlaced read (viz obr. 5). Oproti tomu architektura čipu umožňující vyčíst všechny pixely najednou je označována jako progressive read (obr. 6).

Přes implementaci mikročoček zmenšuje zastínění sloupců citlivost IT CCD čipů oproti FF čipům. Nemá-li být podstatně zhoršena dynamika čipu daná kapacitou každého pixelu, musí být zastíněné sloupce prakticky stejně široké, jako aktivní sloupce. Zúžení zastíněných sloupců a tím i zvýšení kvantové účinnosti přináší kombinace obou způsobů vyčítání IT čipů, označované jako frame read. Vždy dva aktivní pixely nad sebou sdílí v zastíněném sloupci jediný pixel. Zastíněný sloupec tak může mít poloviční šířku ve srovnání s aktivním sloupcem a přesto plocha pixelu (a tím i jeho kapacita) zůstávají stejné. Při vyčítání přitom nejsou do zastíněného pixelu sečítány pixely sousedních řádků, ale nejprve je přečten lichý pulsniček, přitom náboj v sudém pulsničku je zachován v aktivních pixelech. Poté je přečten sudý pulsniček.

Poznamenejme, že tento způsob vyčítání vyžaduje použití mechanické závěrky – během vyčítání lichého pulsničku pixely sudého pulsničku stále akumulují světlo. Tato architektura čipu je zpravidla užívána u snímačů používaných v digitálních fotoaparátech.

Řada levných astronomických kamer s nízkým rozlišením používá interlaced CCD čipy pro jejich relativně vysokou citlivost a nízkou cenu. Ovšem pro dlouhé expozice, obvyklé u astronomických snímků, není možné vyčíst pouze jeden pulsniček, je potřeba přečíst obraz v plném rozlišení čipu. Zpravidla i interlaced čipy více či méně dovolují vyčtení obdobné frame read čipům, tedy dvou následujících pulsničků bez sčítání sousedních řádků. Snímky z takových kamer lze ale snadno rozlišit podle kontur prozrazujících prokládání pulsničků, protože takový mód není výrobcí přímo podporován a pulsničky bývají často poněkud rozdílné.

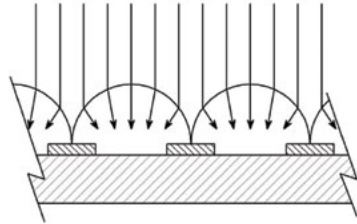
6. Ovlivnění obrazové kvality CCD čipů

Kvantová účinnost (QE) CCD čipů je ovlivňována řadou výrobních technologií:

Efekt zastínění čipu elektrodami na povrchu lze zmírnit použitím transparentního materiálu k výrobě elektrod.

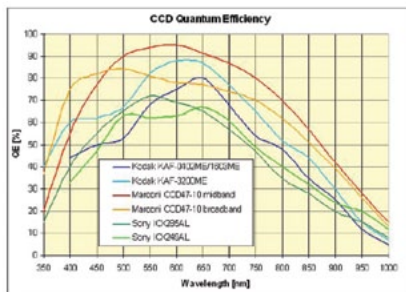
Výrobci mohou vytvořit malé cylindrické čočky nad každým obrazovým sloupcem (obr. 7). Tyto čočky soustředí světlo z oblastí na světlo necitlivých (např. skladové sloupce IT čipů) do oblastí citlivých. Zvláště IT čipy mají z použití mikročoček největší prospěch, ale mikročočky mohou významně zvýšit QE i u FF čipů.

Nejvyšší možné QE lze dosáhnout použitím tenčených čipů osvětlovaných zezadu (anglicky back-illuminated CCD). Tyto čipy jsou zapouzdřeny „vzhůru nohama“, takže elektrody jsou na spodní straně čipu a neblokují přicházející světlo. Čip je velmi ztenčen. Prakticky celá zadní strana čipu je tedy vystavena světlu. Výroba tenčených čipů je ale velmi náročná a čipy jsou relativně drahé. Osvětlení zezadu také může způsobovat některé negativní efekty, jako jsou např. interferenční obrazce způsobené infračerveným zářením atmosféry apod.

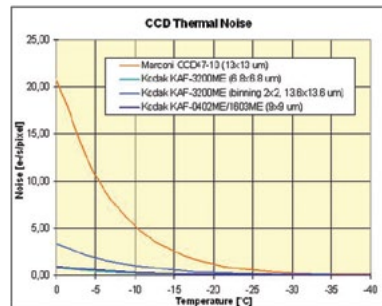


Obrázek 7 — Využití mikročoček pro zlepšení QE

Výsledná obrazová kvalita ale není určena pouze úrovní zachyceného signálu, ale **poměrem signál/šum**. Např. čip s dvojnásobnou QE při čtyřnásobném šumu poskytne obraz s polovičním poměrem signál/šum. To znamená, že i poněkud méně citlivý čip s velmi nízkým tepelným šumem může ve výsledku poskytnout lepší výsledky než srovnatelně chlazený výsoce citlivý čip v velkém tepelném šumem (viz obr. 8 a 9). Např. klasický (zepředu osvětlený) FF čip Kodak KAF-3200ME má mírně menší QE ve srovnání se zezadu osvětlovaným



Obrázek 8 — Kvantová účinnost některých populárních CCD čipů.



Obrázek 9 — Typický temný proud ($v_e-/s/\text{pixel}$) pro zezadu osvětlovaný Marconi CCD47-10 a zepředu osvětlovaný Kodak KAF-3200ME a KAF-1603ME

Marconi CCD47–10, ale při teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ vykazuje pouze 1/12 jeho temného proudu. Dokonce i pokud KAF–3200ME pracuje s binningem 2×2 pixely aby dosáhl podobné velikosti pixelu jako CCD47–10 ($13.6\text{ }\mu\text{m}$ vs. $13\text{ }\mu\text{m}$), temný proud zůstává $3\times$ nižší. V tomto případě je nezbytné chladit CCD47–10 až na $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ aby bylo dosaženo srovnatelného temného proudu a vyšší QE byla zužitkována.

7. Slučování pixelů (binning)

Jedna z důležitých vlastností CCD čipů, často využívaná v astronomických aplikacích, je schopnost „slévat“ náboje okolních pixelů během vyčítání (anglicky je toto slévání označováno binning). Náboj digitalizovaný ve výstupním uzlu tak představuje součet osvětlení pixelů slitých dohromady.

Pixely je možné slévat v horizontálním i vertikálním směru. Horizontální binning vznikne, když je horizontální registr posunut vícekrát aniž by byl mezi jednotlivými posuny inicializován výstupní bod čipu. Vertikální binning vznikne, když je obraz vertikálně posunut do horizontálního registru aniž by byl mezi posuny horizontální registr vyčten. Kombinace horizontálního i vertikálního binningu vede k nahrazení čtverce nebo obdélníku sousedních pixelů jediným bodem obrazu. Například binning 2×2 je kombinací $2\times$ vertikálního a $2\times$ horizontálního binningu. Maximální počet pixelů, které je možno slít, zpravidla závisí na elektronice kamery a na jejím firmware. Některé kamery dovolují jen určité předdefinované kombinace binningu (např. 2×2 a 3×3), případně dovolují libovolně kombinovat binning v určitém rozsahu (např. 1–4 v horizontálním a 1–16 ve vertikálním směru apod.).

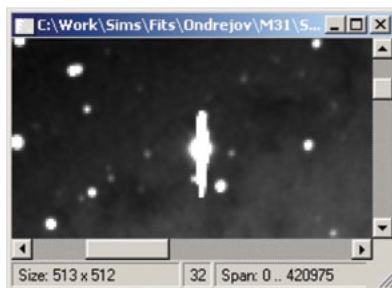
Jakou výhodu přináší vyčítání CCD čipu s binningem? Rozlišení výsledného obrazu (počet pixelů) je menší, ale citlivost čipů výrazně roste. V případě binningu 2×2 představuje každý bod obrazu součet 4 pixelů a signál je tedy $4\times$ větší. Binning je také velmi užitečný pokud jsou pixely kamery podstatně menší než nejmenší detail který daný dalekohled dokáže zobrazit, ať již z důvodu neklidu vzduchu, dlouhé ohniskové vzdálenosti apod. Binning v takovém případě zvýší citlivost, zrychlí digitalizaci a zmenší objem dat, aniž by omezil úhlové rozlišení – obraz v plném rozlišení by byl zbytečně převzorkovaný. Pro moderní CCD kamery s miliony relativně malých pixelů je binning stále důležitější.

Poznamenejme také že moderní software pro zpracování astronomických snímků obsahuje filtry které dokáží efekt rozkvětání odstranit. Aplikování takových filtrů je ale akceptovatelné pouze pro snímky pořízené pro estetické účely.

8. Rozkvětání digitálních fotografií

Tzv. „blooming“ (česky rozkvětání) nastává, když je pixel osvětlen takovým množstvím světla, že generovaný náboj nemůže být uchován v jeho potenciálové studni a elektrony začnou přetékat do sousedních pixelů. Na obraze se pak objeví typické pruhy u jasných bodů (obr. 10).

Některé CCD mají speciální elektrody určené k odvodu přebytečného náboje. Tyto elektrody jsou nazývány „anti-blooming gate“ (zkratka ABG). To může být výhodou u uměleckého fotografování, avšak pro přesná fotometrická měření to může přinášet problémy. U fotometrických měření preferujeme lineární odezvu na světlo. Problém s AGB elektrodami je, že odvádí náboj nikoliv ostře od určité hranice blízko saturace pixelu, ale zakřivují charakteristiku odezvy ještě daleko před dosažením saturace. Toto zakřivení je právě velmi nežádoucí nelinearita. Proto CCD s ABG mají obecně menší citlivost a nejsou vhodné pro fotometrické aplikace.



Obrázek 10 — Efekt přetékání (blooming) saturovaného obrazu hvězdy

Profesionální astronomové a rovněž seriózní amatéři proto preferují CCD bez ABG elektrod. Rozkvetlé hvězdy buď nejsou důležité, protože astronom se zajímá o mnohem slabší objekty mimo přetečený náboj, nebo (pokud je vzhled obrázku důležitý) lze vytvořit obraz jako součet kratších expozic, které ještě nezpůsobují blooming.

9. CCD kamery pro astronomii a pro přesná fotometrická měření

CCD detektory zcela ovládly zobrazování v astronomii, z fotografování na klasický film udělaly zcela zastaralý způsob záznamu obrazu. A nejen v astronomii, ale celé oblast fotografie opouští filmy a využívá elektronické detektory světla, které mají před fotografiemi řadu výhod:

9.1 Vyšší citlivost

Už první CCD čipy nabízely nesrovnatelně vyšší citlivost na světlo ve srovnání s filmem, ale trpěly malou obrazovou plochou, vysokým šumem, vysokou cenou a malým rozlišením. Dnes jsou všechny tyto nevýhody eliminovány – CCDs nabízí lepší rozlišení, obrazové pole srovnatelné s 35 mm filmem, nízký šum a jejich cena se stále snižuje. Zůstávají jen významné výhody:

CCD jsou podstatně citlivější než film. Kvantová účinnost CCD čipů v digitálních fotoaparátech se pohybuje kolem 20 až 30 %. Ale QE CCD čipů používaných v kvalitních astronomických kamerách může být 60 nebo i 80 % a tenčené, zezadu osvětlované čipy mohou dosáhnout QE přes 90 %. Velmi citlivý film dosáhne QE kolem 3 nebo 5 %. Každý astronom, který strávil noci dlouhými expozicemi shromažďujícími světlo přicházející z nějaké vzdálené galaxie, skutečně ocení, když jen 20 fotonů přijde nazmar na místo ztráty 95 až 98 fotonů z každé stovky.

9.2 Lineární odezva na světlo

CCD mají lineární odezvu na světlo. Alespoň CCD čipy bez tzv. „anti-blooming“ elektrod jsou lineární, na rozdíl od filmů, jejichž odezva je velice nelineární. Proč je to důležité? Lineární odezva je klíčová pro precizní fotometrická měření. Pokud srovnáváme signál (hodnotu pixelů) dvou hvězd na CCD snímku, můžeme se spolehnout, že jejich tok záření je ve stejném poměru jako jsou hodnoty pixelů. Tento poměr nebude stejný, pokud by detektor převádějící světelný tok na signál nebyl lineární a měření jasnosti by bylo postiženo značnou chybou.

9.3 Stále mechanické rozměry

Křemíkový čip, na němž je CCD vyroben, má velice stále mechanické rozměry. Precizně definované a stále rozměry dovolují provádět precizní astrometrická měření. Na CCD snímku lze měřit polohu hvězdy (nebo planetky, komety, supernovy apod.) s přesností asi 1/10 úhlového rozměru jednoho pixelu. Každý amatér tak může provádět astrometrická pozorování s rozlišením zlomků úhlové vteřiny. Taková přesnost byla před pár desítkami let vyhrazena pouze několika profesionálním pracovištím.

Pouze fotografie pořízené na skleněné desky vykazují srovnatelnou rozměrovou stabilitu. Film je mnohem méně stabilní a poziční měření na filmu ovlivňuje jeho vlhkost, mechanické namáhání, věk apod. I v případě použití fotografických desek je ale zapotřebí obraz z filmu digitalizovat, aby jej bylo možné zpracovat počítačem. V případě použití CCD čipů je obraz k dispozici přímo v digitální podobě. Takže poslední a velice důležitá výhoda CCD čipů je:

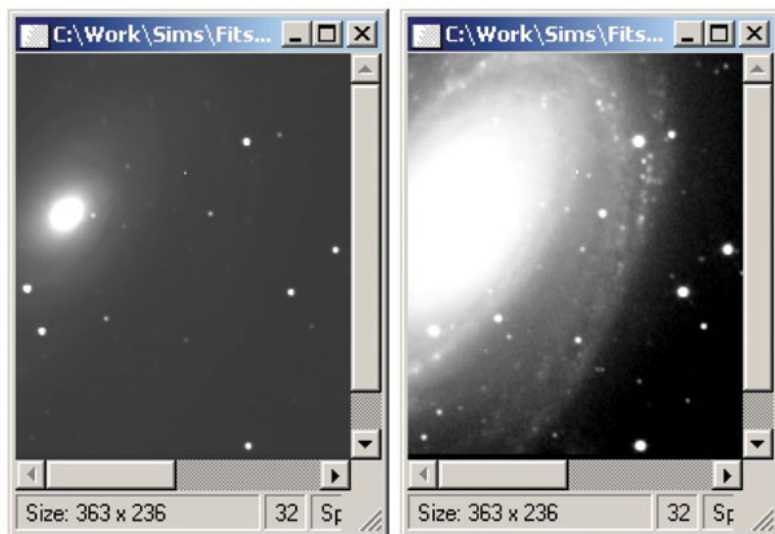
9.4 Výsledkem je datový soubor

Obrazy pořízené CCD kamerou jsou datové soubory, bezprostředně zpracovatelné pomocí počítačů. To je skutečně nedocenitelná výhoda. Astronomové oceňují digitální podobu snímků od okamžiku jejich stažení z kamery do počítače až po jejich finální zpracování a uchování. Snímek je možné prohlédnout jen několik sekund poté co se zavře závěrka kamery. Je snadné se ubezpečit, že objekt je ve středu pole a že dalekohled je správně zaostřen. Objevil se na snímku nový objekt? Dejte vědět kolegům okamžitě, ne až druhý den, nebo po týdnu, až vyvoláte film.

Digitální zpracování dovoluje tzv. „stretching“ (natahování) rozsahu intenzit prohlížených obrazů, aby se eliminoval jas oblohy a zvýraznily části, o které máme zájem (obr. 11).

Jediná expozice může být snadno rozložena do řady kratších expozic a ty mohou být elektronicky sečteny. To dovoluje použití méně stabilních montáží – kratší expozice jsou méně náročné na přesnost chodu. Jedna nešťastná událost, jako např. posvícení svítilnou do tubusu nebo náraz do montáže a roztrpání tubusu, nezničí celou dlouhou expozici, stačí vynechat jeden snímek z řady.

Skládání více expozic také zvyšuje dynamický rozsah snímku. Sečtená výsledná jasnost snadno přesáhne saturační úroveň jediného snímku. Signál



Obrázek 11 — Obraz galaxie M81 zobrazený v celé škále (vlevo) a z nataženými hodnotami černé a bílé (vpravo).

z jasných hvězd může dosáhnout stovek tisíc nebo i milionů jednotek, zatím co slabá galaxie na stejném snímku jen desítek či stovek jednotek.

Jak již bylo řečeno, digitální obraz je okamžitě k dispozici pro zpracování, ať už fotometrické, astrometrické, apod. Velmi důležitý atribut digitálních snímků je skutečnost, že jediný nástroj, který potřebujeme k jejich zpracování, je počítač (a vhodný software), který ale každý tak jako tak již má, aby mohl pracovat s CCD kamerou. Žádné další specializovaná a velmi drahá zařízení, jako např. fotometry, blink-komparátory, mikrometrické mikroskopy apod. nejsou zapotřebí.

Digitální snímky mohou být snadno archivovány, rozmnožovány, odeslány kolegům elektronickou poštou, publikovány na WWW apod.

10. Několik slov o barvách

Lidé jsou zvyklí vidat jen barevné obrazy. Černobílé fotografie zmizely spolu s černobílými časopisy a televizory (samozřejmě s výjimkou fotografií, u nichž je omezená barevnost součástí výtvarného záměru). V případě digitálních fotoaparátů dokonce ani žádné černobílé neexistovaly – už první 1 MPx modely snímaly barevně.

Abychom vytvořili barevný obraz, potřebujeme snímat zvláště ve třech barvách, obvykle v červené, zelené a modré. Ale CCD snímač je citlivý na všechny barvy a dokonce zasahuje i mimo viditelné spektrum do blízké infra-červené oblasti. K detekci pouze požadované barvy je tedy zapotřebí světlo filtrovat.

V principu lze filtry k vytvoření barevného obrazu použít dvěma způsoby:

- Je možné exponovat samostatné snímky s monochromním čipem přes červený, zelený a modrý filtr. Expozice barevného obrazu tímto způsobem chvíli trvá (je nezbytné měnit mezi expozicemi filtry), takže tento princip nelze použít u rychle se pohybujících objektů.
- Je také možné aplikovat filtry přímo na CCD pixely. Barevný obraz je pak možné získat jedinou expozicí. Nevýhodou je, že rozlišení a citlivost takového CCD čipu ve srovnání s monochromním je nižší.

Obě řešení mají své výhody a nevýhody, oba způsoby jsou používány v různých situacích. Veškeré video kamery, digitální fotoaparáty, webové kamery apod. používají detektory s barevnou maskou. První barevné CCD snímače pracovaly s celým sloupcem pixelů zakrytým jednou barevnou maskou – první sloupec byl červený, druhý zelený, třetí modrý, čtvrtý opět červený atd. Obrazový bod s úplnou barevnou informací byl vytvořen ze tří sousedních pixelů. Ačkoliv pixely u takových čipů byly protáhlé do výšky, přeci jen bylo vodorovné rozlišení takového čipu omezeno.

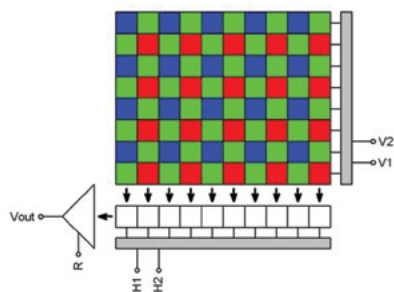
Dnešní barevné CCD čipy používají tzv. Bayerovy masky. Tato maska kryje jednotlivé pixely různými filtry ve vzoru šachovnice (viz obr. 12).

Zpracování obrazů z barevného čipu spoléhá na skutečnost, že lidské oko je mnohem citlivější na změnu jasu než na změnu barvy (stejně jako běžný televizní signál, který přenáší barevnou informaci s pouhou 1/4 šířky pásma ve srovnání s jasovou informací). Bayerova maska téměř zachová rozlišení čipu v jasové složce – je ji možné dopočítat pro každý pixel z barevné informace okolních pixelů jen s malou chybou. Barevná informace je pro každý pixel dopočítána rovněž z okolních pixelů s již znatelně větší chybou, to ale lidskému oku nevádí.

Poznámka:

Každý červený (Red), zelený (Green) a modrý (Blue) filtr propustí asi 1/3 viditelného spektra. Je ale možné použít jiné barevné schéma s doplňkovými barvami – modrozelená (Cyan), fialová (Magenta) a žlutá (Yellow) – a vytvořit z něj úplnou barevnou informaci. Výhodou CMY filtrů je, že každá doplňková barva propouští 2/3 viditelného spektra. Každý pixel překrytý C, M nebo Y filtrem tak zachytí 2× více světla ve srovnání s RGB filtry. Takže CMY barevné čipy mohou být až 2× citlivější ve srovnání s RGB čipy.

Věci ale nejsou tak jednoduché. Vyrobit filtry propouštějící R, G a B případně C a Y světlo je relativně snadné. Ale fialová (M) je doplněk k zelené, takže filtr propouštějící fialovou by měl propustit červenou, blokovat zelenou a opět propustit modrou barvu. Výroba takového filtru jako kombinace skel



Obrázek 12 — Bayerova maska

(např. v 1,25'' objímce) je stále relativně dostupná. Ale vyrobit takový filtr na vybraných pixelech CCD čipu je velice náročné.

Někteří výrobci proto kombinují CMY filtry se zeleným filtrem (čip je šachovnicově pokryt prokládanými M, G, M, G, ... a C, Y, C, Y, ... řádky). Barevná reprodukce stále není perfektní a CMYG čipy jsou určeny spíše pro citlivé video kamery s nízkým rozlišením.

Ačkoliv se barevné CCD čipy výborně hodí pro digitální fotoaparáty a videokamery, astronomové jich používají jen velmi výjimečně. Zejména amatéři, zajímající se o snímání hezkých obrázků oblohy s co nejmenším úsilím, dávají přednost kamerám s barevnými čipy. Ale většina amatérů, stejně jako všichni profesionálové používají monochromní čipy a separátní filtry. Stejně tak kamery na družicích a vesmírných sondách jsou vybaveny monochromními čipy. Tyto čipy jsou obecně vhodnější pro astronomické aplikace a pro měřicí aplikace z řady důvodů:

Především monochromní čip může s použitím filtrů vytvořit barevný obraz. Tento obraz je zpravidla vyšší kvality než obraz z barevného čipu. Ale barevný čip může vytvořit monochromní obraz jen za cenu ztráty rozlišení a omezení citlivosti.

Barevný CCD čip má jednu pevnou masku barevných filtrů bez možnosti filtry měnit nebo zcela odstranit. Řada aplikací vyžaduje snímání bez filtrů s maximální citlivostí a barevná informace není podstatná. Jiné aplikace vyžadují snímání v jediné oblasti spektra. Monochromní čip může pořízovat úzkopásmové snímky v čáře H α , OIII, etc. Profesionálové preferují standardní sadu (U)BVRI filtrů pro fotometrická měření na místo (L)RGB filtrů vhodných pro barevnou fotografii apod.

Barevné čipy mají menší kvantovou účinnost než monochromní. Omezení QE barevnými filtry z 80 % na asi 25 % v řadě aplikací plýtvá světlem.

Objektivy digitálních fotoaparátů jsou zpravidla vyrobeny tak, že nejmenší zobrazené detaily zabírají na použitých CCD čipech několik pixelů. Jediný pixel tedy není příliš důležitý, nejmenší detaily jich tak jako tak zaberou několik. To v astronomii neplatí. Hvězda vykreslená na CCD čipu zabírá jen několik pixelů. Interpolace barev a jasu z okolních pixelů tak zavádí významnou chybu a zabraňuje preciznímu měření polohy a jasnosti.

Barevné CCD čipy nedovolují požit binning. Binning by pomíchal pixely různých barev barevná informace by byla ztracena.

Barevné čipy nedovolují tzv. Time Delay Integration (nebo Drift-Scan Integration). Obraz putuje po vertikálních linkách CCD čipu synchronizované s vertikálním posunem obrazu v čipu. Obraz je pak vyčítán v přesných intervalech řádek po řádku. TDI dovoluje snímat dlouhé pruhy oblohy o šířce dané šířkou CCD čipu a délkou danou jen dobou expozice. Posun obrazu zpravidla zajišťuje rotace Země. TDI lze tedy používat na statických dalekohledech na montáži bez motorového posunu.

Monochromní čipy mohou snímat barevné obrazy nejen snímáním přes barevné RGB filtry. Je možné kombinovat vysoce kvalitní jasový snímek

pořízený bez filtru s kratšími barevnými expozicemi poskytujícími jen barevnou informaci (taková technika se označuje LRGB). Protože barevná informace je méně důležitá, je možné zvýšit citlivost čipu při snímání barevných částí binningem za cenu ztráty rozlišení a pouze jasovou složku snímat při plném rozlišení. Výhoda monochromních čipů s barevnými filtry se poněkud vytrácí, pokud je nutno filtry měnit ručně. Filtrové kolo (nejlépe integrované přímo v kameře) dovoluje programovou výměnu filtrů. Pro automatizované dalekohledy je to přímo nezbytné.

11. Temný proud, čtecí šum a A/D jednotky

Nevýhoda CCD technologie je fakt, že elektrony vznikají v pixelech nejen v důsledku dopadajícího světla, ale také náhodně v závislosti na okolní teplotě, velikosti pixelu, architektuře čipu a výrobní technologii. Tento tepelně generovaný náboj bývá nazýván „temný proud“ (generuje signál, i když čip je zcela ve tmě) nebo také tepelný šum. Temný proud je obvykle vyjádřen v elektronech za sekundu na pixel při definované teplotě. Např. Kodak KAF-0400 CCD produkuje $1e-/s$ na pixel při 0°C .

Positivní věc na temném proudu je, že je za daných podmínek stále stejný (nebo velice podobný). Pokud přečteme z kamery obraz nějakého astronomického objektu, bude obsahovat signál generovaný osvětlením i signál generovaný temným proudem. Je ale možné provést tu samou expozici ještě jednou, ale s uzavřenou závěrkou. Takový obraz bude obsahovat pouze signál generovaný temným proudem – nazýváme jej temný snímek (anglicky dark frame). Poté je možné oba snímky prostě odečíst a tím obraz generovaný temným proudem vyrušit. Tomuto postupu se budeme věnovat později v kapitole o kalibraci.

Odečítání temných snímků není výsada astronomických kamer, ale můžeme se s ním setkat i u digitálních fotoaparátů. Pokud fotoaparát dovoluje provádět delší expozice (např. 15 s a více), na display fotoaparátu se po takové expozici objeví nápis „Busy“ po stejnou dobu jako trvala samotná expozice. Elektronika fotoaparátu pořizuje temný snímek, aby jej mohla odečíst od předchozí expozice a potlačit tak tepelný šum.

Temný proud není jediným zdrojem nežádoucího šumu u CCD snímačů. Již jsme popsali mechanismy vyčítání CCD čipů – náboj je posouván po čipu a poté ve výstupním uzlu přeměněn na napětí. Ovšem žádná elektronika nepracuje zcela bez šumu. Tento čtecí šum je charakteristický pro daný čip a je vyjádřen v elektronech. Např. čtecí šum zmíněného čipu Kodak KAF-0400 CCD je $15 e\text{-RMS}$ (zkratka RMS značí Root Mean Square, tedy směrodatnou odchylku). Jednoduše řečeno, z čipu není možné vyčíst obraz s menší úrovní šumu než $15 e\text{-RMS}$, bez ohledu na teplotu. Je také potřeba zdůraznit, že výstupní napětí čipu je digitalizováno elektronikou kamery, která taktéž zavádí určitou úroveň šumu. Velmi dobrá elektronika generuje natolik malý šum, že čtecí šumem CCD čipu převládá a čtecí šum celého systému odpovídá čtecímu šumu CCD čipu samotného.

Za zmínku stojí, že čtecí šum elektroniky jsme rovněž vyjadřovali v elektronech. Ale šum elektroniky je obvykle vyjadřován jako směrodatná odchylka ve voltech. Vztah je velmi jednoduchý: každý CCD čip (tedy jeho výstupní uzel) je charakterizován převodním poměrem „volty/elektron“. Například Kodak KAF-0400 CCD má výstupní uzel, který převede 1 elektron na 10 μV .

Výsledkem čtení CCD čipu je obraz – matice čísel, z nichž každé reprezentuje obrazový bod (pixel). Čísla jsou generována A/D převodníkem použitým v elektronice kamery. Zde se objevuje jeden ze základních parametrů CCD kamery – převodový poměr vyjádřený v elektronech na ADU (ADU znamená Analog to Digital Unit, tedy číselný výstup převodníku). Výstupní uzel CCD čipu konvertuje náboj na napětí v určitém poměru a elektronika kamery konvertuje napětí na čísla (ADU jednotky) rovněž v určitém poměru. Můžeme tedy spočítat výsledný poměr e^-/ADU .

Stanovme poměr e^-/ADU pro nějakou hypotetickou kameru:

Předpokládejme, že kamera je vybavena 16 bitovým A/D převodníkem se vstupním rozsahem 2 V. To znamená že 2 V signál je rozdělen na 65 536 jednotek. 1 jednotka reprezentuje $2\text{ V} / 65\,536 = 30,5\ \mu\text{V}$.

Předpokládejme že výstupní uzel použitého CCD snímače generuje napětí 10 μV na elektron.

Výsledný poměr je $(30,5\ \mu\text{V} / \text{ADU}) / (10\ \mu\text{V} / e^-) = 3\ e^- / \text{ADU}$. To znamená že každé 3 elektrony v potenciálové jámě pixelu způsobí jeden inkrement čísla ve výsledném obrazu.

Je důležité zdůraznit, že tyto výpočty platí jen statisticky, pro velké množství pixelů a elektronů. Často se lze setkat s kamerami s převodním poměrem třeba $2,3\ e^- / \text{ADU}$ nebo $1,5\ e^- / \text{ADU}$. To pochopitelně neznamená, že musíme dělit elementární částice :-).

Z těchto poměrů lze odvodit několik zajímavých parametrů kamery. Například čtecí šum 15 elektronů RMS a převodní poměr 3 elektrony na ADU znamená, že z kamery nelze vyčíst obraz s menším šumem než 5 ADU RMS.

Převodní poměr elektrony na ADU je také důležitý ve vztahu ke kapacitě pixelů. Každá potenciálová studna reprezentující CCD pixel má nějakou maximální kapacitu, zpravidla závislou na velikosti pixelu. Malé pixely (o straně kolem 6 μm) mohou typicky uchovat okolo 50 000 e^- . Střední pixely (o straně kolem 10 μm) uchovají asi 100 000 e^- a velké pixely (o straně asi 25 μm) pojmu až 300 000 e^- .

CCD kamery zpravidla používají 16 bitový A/D převodník s rozlišením 65 536 jednotek. Je zřejmé že převádět 50 000 e^- na 65 536 úrovní nedává smysl a 15 nebo dokonce 14 bitový převodník vyhoví k digitalizaci takového čipu. Na druhá straně převedení 300 000 e^- na 65 536 úrovní vyžaduje zesílení 4 až 5 e^-/ADU , což je docela vhodné.

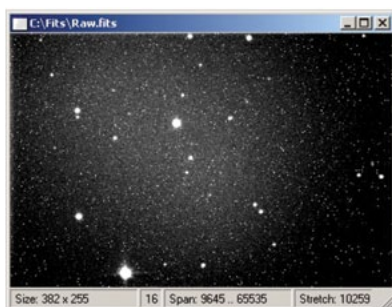
Ne jen každý pixel, ale také horizontální posuvný registr a výstupní uzel má limitovanou kapacitu. Tuto skutečnost musíme brát do úvahy zejména pokud používáme binning. Vezměme jako příklad CCD čip Kodak KAF-0400: kapacita

pixelu je 100 000 e⁻, kapacita pixelů v horizontálním registru je 200 000 e⁻ a kapacita výstupního uzlu je 220 000 e⁻. Zřejmě je tedy možné použít 2 × 2 binning pokud v každém pixelu není více jak asi 50 000 e⁻. Ale pokud jsou pixely zaplněny téměř na maximum kapacity, vertikální binning spojí pixely nad sebou do pixelů s nábojem 200 000 e⁻, což ještě horizontální registr zvládne. Ale následný horizontální binning spojí dva pixely do výstupního uzlu, čímž ale přesáhne jeho kapacitu a výstupní uzel bude saturován. Tento problém jde obejít kombinací binningu v čipu a následného programového binningu. Obraz je vyčten s binningem 1 × 2 a poté je proveden binning 2 × 1 už v počítači. Výsledný obraz odpovídá binningu 2 × 2, ale nemá saturované pixely. Je ale načítán téměř 2× takovou dobu. Maximální hodnota pixelu pak může přesahovat 16 bitový rozsah.

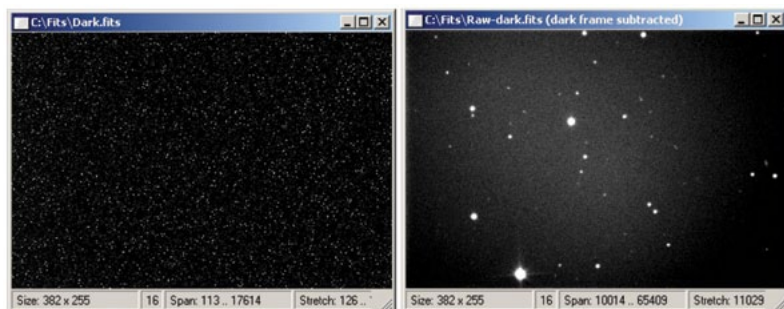
12. Kalibrace snímků

Obraz bezprostředně stažený z kamery je označován jako **syrový** (anglicky **raw image**) – viz obr. 13. Často je překvapivě nehezky, zejména ve srovnání s plně zpracovanými snímky, které se objevují v časopisech nebo na www stránkách. Zpracování obrazu dokáže odstranit temné nebo horké pixely, nechtěné gradienty pozadí, redukovat šum, obraz zaostřit případně zdůraznit detaily apod.

Takové zpracování obrazu jej zkrášlí, ale také pozmění informaci v obrazu obsaženou. Může být prováděno pouze s obrazy zamýšlenými pro publikaci, protože znemožní získat ze snímků věrohodné informace (polohy a jasnosti objektů). Přesto existuje zpracování obrazu, které sice také zlepšuje jejich vzhled, ale současně zvyšuje jejich vědeckou hodnotu na místo, aby ji snižovalo – kalibrace. V podstatě každý CCD snímek by měl být zkalibrován.



Obrázek 13 — Surový snímek je ovlivněn tepelným šumem a nerovnoměrným osvětlením pole



Obrázek 14 — Temný snímek odpovídajícího surového snímku (vlevo) a výsledek po jeho odečtení (vpravo)

V závislosti na CCD kameře, dalekohledu (nebo objektivu) a objektu může být kalibrace složitější nebo jednodušší. V některých případech se dokonce lze bez kalibrace obejít.

V zásadě zahrnuje kalibrace dva kroky:

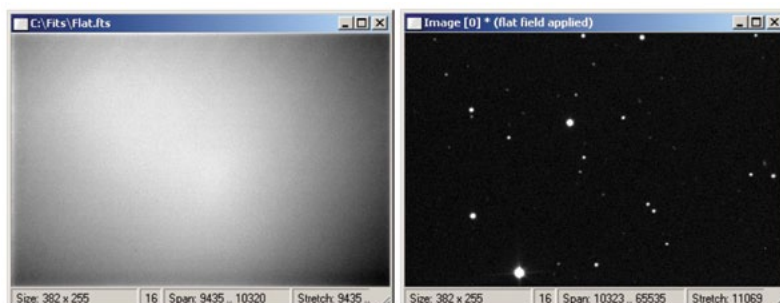
- odečtení **temného snímku**
- aplikace tzv. **flat field**, tj. odezvy celé snímací soustavy (dalekohled, filtry, CCD čipy) na rovnoměrné osvětlení.

Význam temného snímku byl vysvětlen – eliminace (nebo aslespoň redukce) tepelného šumu CCD (viz obr. 14). Tepelný šum je závislý na teplotě. Zdvouje se přibližně s každými 6 až 7 °C, v závislosti na architektuře čipu. Například Kodak KAF-0400 zdvojnásobí tepelný šum s každými 6,3 °C. Náboj akumulovaný v pixelech je také závislý na expoziční době (temný proud je vyjádřen v elektronech na pixel za sekundu při definované teplotě). Aby se tepelný šum obrazu redukoval, temný snímek musí být pořízen po stejnou dobu a za stejné teploty, jako vlastní syrový snímek.

Protože tepelný šum závisí lineárně na teplotě a expoziční době, je možné spočítat temný snímek pro zadanou teplotu a expoziční čas z jiných temných snímků, pořízených za jiných teplot a expozičních časů. Některé programy vyžadují, aby jeden ze snímků byl pořízen nulovým časem (tzv. snímek posunutí – bias frame), jiné programy na expozici nekladou žádné nároky. Stačí nasnímat dva temné snímky při různých teplotách a software interpoluje temný snímek pro zadanou teplotu. Stejně pravidlo platí pro expoziční časy.

Závislost temného proudu na teplotě je hlavní důvod, proč astronomické CCD kamery vyžadují regulované chlazení. Pokud elektronika kamery dokáže udržet teplotu čipu v rozmezí 0,1 °C, pořizování více temných snímků není nutné. Interpolovaný temný snímek je vždy méně přesný než temné snímky pořízené za daných podmínek.

Také stojí za zmínku, že pořízení temných snímků vyžaduje mechanické zaclonění čipu (tzv. elektronická závěrka, kterou disponují FT a IT CCD čipy, při pořizování temných snímků nepomůže). Je tedy nutné zaclonit dalekohled (pokud má dalekohled konstrukční tubus, zaclonění může být docela obtížné)



Obrázek 15 — Flat field odpovídající surovému obrazu (vlevo) a výsledek po jeho aplikaci (vpravo)

kdykoliv je zapotřebí pořídit temný snímek. U robotických dalekohledů tak kamera bez mechanické závěrky není použitelná.

Tedy regulované chlazení a mechanická závěrka by při výběru kamery měly být na seznamu vlastností „musí mít“.

Obrazové pole je dalekohledem často osvětleno nerovnoměrně – intenzita snímku na okrajích může být menší než u středu, např. kvůli menšímu sekundárnímu zrcátku. Také prachové částice na filtrech, nebo na krycích sklech kamery, či samotném CCD čipu vrhají typické prstencovité stíny. Všechny tyto efekty mění intenzitu osvětlení čipu a způsobují nejen estetické kazy, ale také redukovují přesnost měření. Jejich vliv je možné eliminovat aplikací tzv. „flat field“ obrazu (viz obr. 15).

13. Jenom čip nestačí

Přesné kamery pro snímání extrémně slabých zdrojů světla pro astronomické i jiné vědecké fotometrické aplikace jsou složitá kompaktní zařízení, jejichž kvalita není určena jen použitým CCD čipem.

Výroba přesných vědeckých CCD kamer klade velmi vysoké nároky na řídicí a vyhodnocovací elektroniku, která, mimo jiné, musí být navržena tak, aby její šum musel být mnohem nižší, než je šum vlastního krystalu. Obtížným úkolem jsou i konstrukce mechanických částí kamery (včetně mechanických závěrek, chlazení apod.), které musí být zkonstruovány s vysokou přesností a spolehlivostí. Vysoké nároky klade i vlastní montáž zařízení – jediné mikroskopické zrno prachu může kameru znehodnotit, proto požadavky na montážní bezprašné a antistatické prostory jsou obdobné jako při výrobě čipů. Moravské přístroje všechna tato úskalí zvládají a zařadily se mezi několik světových firem, které jsou schopny tato vysoce sofistikovaná zařízení vyrábět a nabízet širokou paletu jejich typů (viz).

Je třeba zdůraznit, že kromě Moravských přístrojů obdobné kamery vyrábí jen několik firem na světě. V USA jsou pouze tři výrobci těchto kamer: SIBG (<http://www.sbig.com>), Apogee (<http://www.ccd.com>) a FLI (<http://www.flicamera.com>). V Číně firma QHY (<http://www.qhyccd.com/>) vyrábí přesné kamery konkurující ostatním výrobcům nízkou cenou, ale ne vždy kvalitou. V Evropě, krom Moravských přístrojů, nabízejí chlazené kamery dvě firmy: ATIK (<http://www.atik-cameras.com/>) a Starlight Xpress (<http://www.starlight-xpress.co.uk/>) – jejich kamery, ale zpravidla postrádají některé složitější prvky (např. mechanické závěry apod.) a jsou určeny spíše pro širokou vrstvu amatérských astronomů, než pro přesná vědecká měření.

14. Závěr

Přesné a citlivé CCD kamery nemají uplatnění jen v astronomii.

Jednou z velmi perspektivních oblastí pro jejich využití jsou specializované přístroje využívané v molekulárně-genetickém výzkumu. V těchto přístrojích, často využívajících robotizovanou přípravu laboratorních vzorků, se kvantitativně vyhodnocují změny optických vlastností biomateriálu – od měření absorpce světla při určité vlnové délce až po přesné kvantitativní

vyhodnocování fluorescence navázané luminiscenční látky, pro jejíž detekci je ale třeba vysoce citlivý luminometr.

Nezřídka se detekuje velmi slabé luminiscenční záření na určitých částech subcelulárních struktur živých buněk, kde se navázala nějaká značkovácí substance (třeba specifická bílkovina s navázanou fluorescenční látkou). V těchto případech je potřeba pracovat s velmi nízkými koncentracemi luminiscenční látky, aby se buňky nezahubily – a klíčovým je zde opět přesná CCD kamera schopná vyhodnotit extrémně slabé zdroje světla.

Pro sofistikované výrobky Moravských přístrojů se proto i v této oblasti rýsují další možnosti uplatnění. V propojení s programovým prostředím pro počítačové vidění Vision Lab, které je nadstavbou vývojového nástroje Control Web, se tak nabízí velmi sofistikovaný nástroj pro vývoj robotizovaných biotechnologických zařízení s vysokou přidanou hodnotou.

Tržní síla výrobku vzroste, pokud se špičkové zařízení (jakou je vědecká CCD kamera) stane součástí zařízení, kde se využije další know-how – např. když se stane jednou ze součástí robotického zařízení pro biotechnologické aplikace. Každé biotechnologické měřicí zařízení je v podstatě programovatelný automat spojený s detekční sondou (např. vědeckou CCD kamerou) a vyhodnocovacím softwarem. Ve vysoké ceně tohoto zařízení jsou pak obsaženy i mezioborové znalosti, které z něj činí výrobek s vysokou přidanou hodnotou.

Literatura

- [1.] Charge –coupled device, [Online] http://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device
- [2.] CCD – The History of CCDs or Charge Coupled Devices [Online] <http://inventors.about.com/od/cstartinventions/a/CCD.htm>
- [3.] Kodak CCD Primer, [Online] <http://www.kodak.com/US/en/digital/pdf/ccdPrimerPart1.pdf> a <http://www.kodak.com/US/en/digital/pdf/ccdPrimerPart2.pdf>
- [4.] Vědecké CCD kamery [Online] <http://ccd.mii.cz>

Kontakt:

Ing. Pavel Cagaš

Ing. Roman Cagaš

Moravské přístroje a.s.,

Masarykova 1148

763 02 Zlín – Malenovice

e-mail: rc@mii.cz

<http://mii.cz>

doc. MUDr. Jiří Kofránek, CSc.,

Oddělení biokybernetiky,

Ústav patologické fyziologie 1. LF UK

U nemocnice 5, 128 53 Praha 2

tel: +420 777686868

e-mail: kofranek@gmail.com

<http://physiome.cz>