

Vlastnosti digitálních fotoaparátů

Oldřich Zmeškal

Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně

Purkyňova 118, 612 00 Brno

e-mail: zmeskal@fch.vutbr.cz

1. Úvod

Počátky digitální fotografie souvisejí s vynálezem integrovaných obvodů umožňujících zaznamenat obraz pomocí elektrických signálů. Princip záznamu spočívá v konverzi světelného záření dopadajícího na jednotlivé obrazové elementy (pixely) světlocitlivého senzoru na elektrický náboj. Počet lokálně generovaných elektronů, následně generovaný elektrický proud (a tedy i hodnota digitalizovaných dat) přitom odpovídá intenzitě dopadajícího světelného záření. V digitálních fotoaparátech se používají k záznamu obrazu buď CCD nebo CMOS obrazové senzory.

CCD senzory (Charge Coupled Devices) jsou elektronické integrované obvody, ve kterých je elektrický náboj vygenerovaný ve fotodiodách obrazových elementů zpravidla přenášen potenciálovými jámami pomocí postupně přikládaných napětí na soustavu elektrod.

CMOS senzory (Complementary Metal Oxide Semiconductors) jsou elektronické integrované obvody, ve kterých je elektrický náboj vygenerovaný ve fotodiodách obrazových elementů zpravidla odváděn pomocí adresovatelné sběrnice.

2. Vlastnosti digitálních fotoaparátů

Vlastnosti digitálních fotoaparátů vyplývají z principu záznamu obrazové informace a z konstrukce fotografického přístroje. Hodnotí se zejména vlastnosti optické soustavy, záznamového prvku a paměťového modulu, možnosti připojení fotoaparátu k vnějším zařízením, kvalita napájecích zdrojů a další rozšiřující funkce zařízení. V následujícím přehledu jsou uvedeny základní parametry, které vlastností digitálních fotoaparátů charakterizují (v závorce jsou uvedeny typické hodnoty pro digitální fotoaparát Kodak DC5000, resp. DX3900)

Optická soustava digitálních fotoaparátů (objektiv) je charakterizována oblastí ostření (Focus Range, např. od 0,5 m do nekonečna), optickým zvětšením (Optical Zoom, např. 2×), případně možností práce a oblastí ostření v makrorežimu (např. 0,07 m - 0,7 m).

Rozlišení a kvalita obrazového záznamu závisí na plošném rozlišení obrazového senzoru (např. 1800 × 1200), resp. na velikosti jeho aktivní plochy, na rozlišení digitalizovaného obrazového záznamu (např. 1760 × 1168 nebo 896 × 592) a na digitálním zvětšení (Digital Zoom, např. 3×).

Osvit (expozice) je fotometrická veličina definovaná součinem intenzity osvětlení a doby po kterou osvětlení působí. Její hodnota závisí na rychlosti mechanické, resp. elektronické závěrky (od 1/2000 s do 16 s) a na číselné (numerické) apertuře objektivu, která je definována jako součin indexu lomu imerzního prostředí (vzduchu) a sinu aperturního úhlu ($NA = n_0 \cdot \sin \alpha_{\max}$). Podle typu objektivu může NA nabývat různých hodnot. Někdy se uvádí pro srovnání s klasickými fotoaparáty citlivost obrazového senzoru podle normy ISO (100, 200, 400). Vhodnou expozicí je možné kompenzovat odrazy (Flash) od fotografovaných objektů (např. červené oči) a to až do vzdálenosti několika metrů (u DC5000 až do 3 m).

Paměťové moduly slouží k ukládání obrazových dat v digitalizované podobě. Dříve byly tvořeny vnitřní elektronickou pamětí, dnes výhradně jako vyměnitelné (např. PCMCIA, CompactFlash, MediaFlash karty). Data jsou do paměti ukládána buď ve speciálních formátech definovaných výrobcem fotoaparátu (např. KDC, RAW) nebo ve formátech

používaných v osobních počítačích (např. pro ukládání obrázků bez ztráty informace pomocí formátu TIFF, pro obrázky uložené se ztrátovou kompresí formát JPEG).

Připojení digitálních fotoaparátů k vnějším zařízením (např. osobním počítačům nebo speciálním tiskárnám) je možné prostřednictvím různých typů digitálních sběrnic (IrDA, USB, RS 232). Některé fotoaparáty jsou vybaveny také analogovými audio a video výstupy.

Napájení digitálních fotoaparátů je zabezpečeno pomocí různých typů baterií, které jsou charakterizovány především kapacitou a životností (alkalické, lithium-iontové, Ni-MH). Při stacionárním použití jsou vhodné napájecí adaptéry.

Speciální doplňky slouží k vyššímu komfortu práce s digitálním fotoaparátem, resp. rozšiřují jeho užité vlastnosti. Patří sem celá řada speciálních objektivů (širokoúhlý objektiv, teleobjektiv, rybí oko), LCD panel (často používaný místo hledáčku), speciální časová spoušť, nástavec na fotografování diapozitivů a filmů, apod. Je možné využít také programové nástroje fotoaparátu umožňující zapsat do digitalizovaného záznamu textové poznámky definující např. místo a čas pořízení obrazového záznamu, doplnit záznam informacemi o nastavení digitálního fotoaparátu, příp. zvukovou poznámkou.

Audio a video záznam se v poslední době stává standardem u běžných digitálních fotoaparátů. Provádí se zpravidla s nižším rozlišením než při záznamu stacionárních obrazů, délka sekvence je limitována kapacitou paměťového modulu (cca 40 s). K ukládání se používá především formát MPEG využívající ztrátovou kompresi. Tyto digitální fotoaparáty umožňují také připojení mikrofону a reproduktorku (nebo sluchátek).

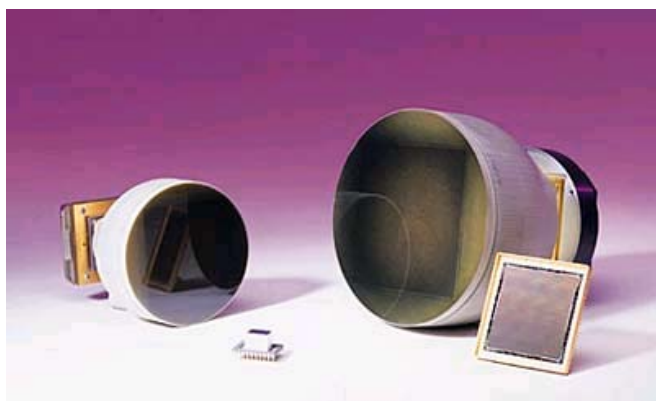
3. Principy záznamu obrazové informace

Proces záznamu obrazu lze rozdělit do pěti kroků, jimž odpovídají jednotlivé prvky optické a elektrické soustavy digitálního fotoaparátu

- vytvoření a transformace obrazu pomocí čoček, zrcadel, svazků optických vláken,
- separace barevných složek pomocí vhodných optických filtrů (např. RGB, CMY),
- zaznamenání barevných složek obrazu pomocí světlocitlivých sensorů (CCD nebo CMOS),
- generace elektrických signálů pro jednotlivé obrazové body (pixely) a barevné složky,
- transformace elektrických signálů na digitální data kvantováním na definovaný počet úrovní (A/D převodníky).

Vytvoření a transformace obrazu

Ve většině zařízeních určených k digitálnímu záznamu obrazu dopadá světlo na záznamový prvek prostřednictvím optických systémů složených z čoček, zrcadel nebo jiných optických prvků. Jejich cílem je zvětšení nebo zmenšení obrazu, separace barevných složek obrazu, konverze do oblasti vlnových délek viditelného spektra nebo zesílení optického signálu.



Obr. 1 Objektivy tvořené svazky optických vláken [3]

Vstupní část digitálních fotoaparátů tvoří zpravidla objektivy. Slouží k vytvoření zmenšeného (někdy zvětšeného) obrazu na záznamové ploše světlocitlivého senzoru. Jsou charakterizovány ohniskovou vzdáleností, tj. zvětšením (optickým zoomem, např. 2× až 6×) a světelností ($f/3,0 \dots f/7,6$). Zaostření do roviny senzoru může být realizováno automaticky nebo ručně (zpravidla od 50 cm do nekonečna, v makrorežimu od 7 – 70 cm). Pro připojení

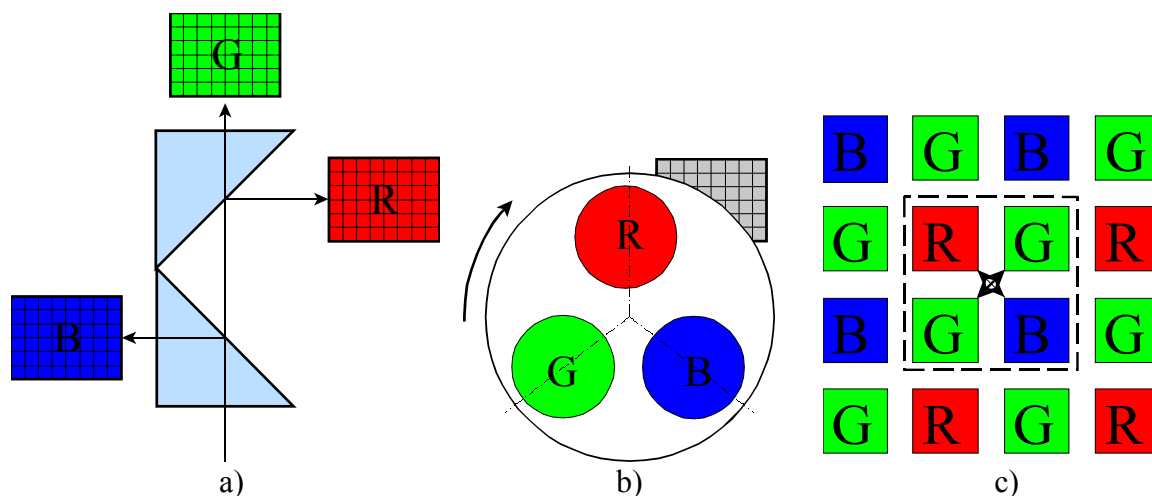
k mikroskopu lze použít zvětšující objektivy ale lépe objektivy mikroskopu (zpravidla 5×, 10×, 20×, 40× nebo 100×).

V mnoha aplikacích je výhodné použít optické prvky vyrobené z optických vláken (obr. 1). Lze je využít k přímému připojení světelného zdroje k senzoru. Mohou mít různé zvětšení (1×, ..., 6×) jejich maximální rozměr dosahuje až 160 mm. Tyto objektivy mají mnohem větší světelnost než objektivy tvořené čočkami (pro objektivy f/1,2 může být zisk až 10× větší). Zobrazovací vláknová optika je běžně využívána k záznamu obrazu z rentgenových nebo neutronových scintilačních obrazovek, chemoluminiscenčních zdrojů, obrazových zesilovačů nebo zářičů.

K separaci barevných složek obrazu se zpravidla používají speciální optické filtry se spektrálními charakteristikami odpovídajícími charakteristikám lidského oka, polopropustná zrcadla nebo hranoly.

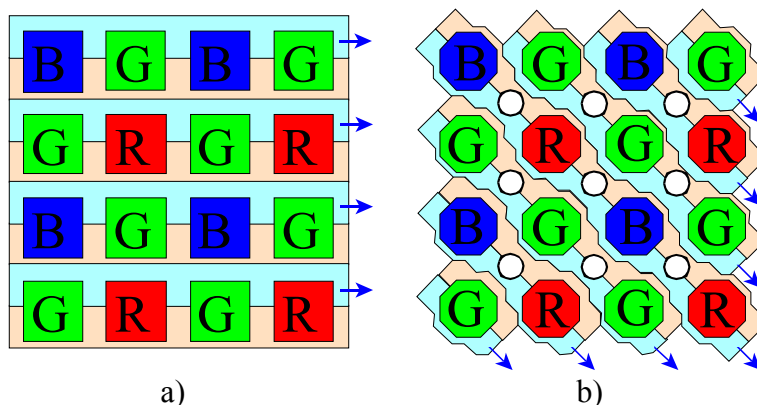
Separace barevných složek

Z hlediska vlastní realizace zařízení pro záznam obrazu mohou být některé prvky sloučeny. Tak např. u profesionálních TV kamer se provádí barevné separace (do složek RGB) pomocí polopropustných zrcadel nebo hranolů a záznam obrazu se provádí pomocí tří oddělených „jednobarevných“ světlocitlivých sensorů (obr. 2a). Při tomto uspořádání jsou všechny tři barevné složky snímány současně, takže se dosahuje jak vynikající kvality záznamu obrazu, ostrosti, barevného souběhu obrazu tak i vysoké záznamové rychlosti. Druhá možnost spočívá v použití jednobarevného senzoru a barevné složky jsou snímány postupně (časový multiplex, obr. 2b). V tomto případě trvá záznam obrazové informace delší dobu, ale na druhé straně lze při použití interferenčních filtrů dosáhnout velmi vysoké kvality záznamu obrazu.



Obr. 2 Principy záznamu obrazu pomocí světlocitlivých sensorů a) bez multiplexu b) časově multiplexované systémy, c) prostorově multiplexované systémy (RGBG filtr)

U digitálních fotoaparátů a spotřebních kamer jsou světlocitlivé senzory tvořeny zpravidla maticí čtvercových obrazových bodů, nad kterou jsou umístěny barevné filtry (např. RGBG). Jejich možné uspořádání je znázorněno na obr. 2c. Z něho je zřejmé, že zelené světlo je snímáno dvojnásobným počtem pixelů než obě zbývající (červené a modré). Toto uspořádání bylo zvoleno s ohledem na spektrální charakteristiky lidského oka, které má dominantní citlivost v oblasti vlnových délek 500 nm. Na rozdíl od předcházejících způsobů, se dosahuje nižší kvality zaznamenaného obrazu, protože výsledná barva je dána interpolací barev sousedních obrazových bodů, a horší rozlišovací schopností, protože na stejné ploše jsou umístěny obrazové body pro všechny barevné složky. Naopak rychlost záznamu obrazu je srovnatelná s prvním způsobem.

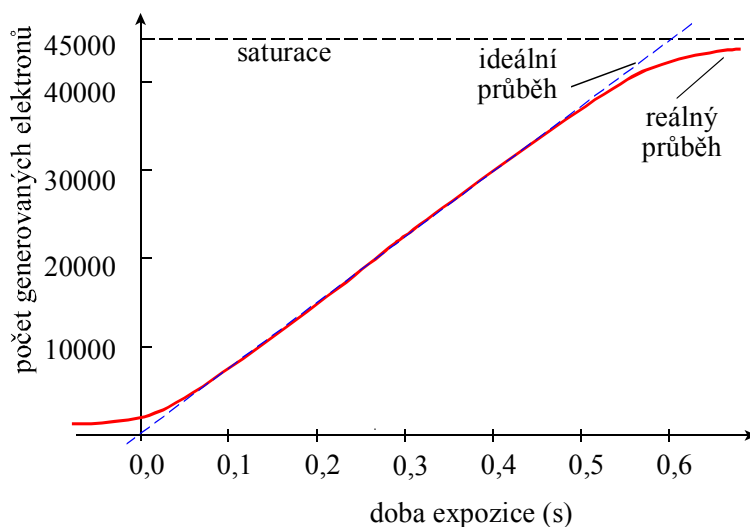


Obr. 3 Záznam obrazu a uspořádání sběrnice elektrického náboje
a) klasického prostorově multiplexovaného systému b) systému firmy FujiFilm

Firma FujiFilm modifikovala tvar obrazových bodů světlocitlivého senzoru a uspořádání sběrnice elektrického náboje, čímž dosáhla dvojnásobného rozlišení digitalizovaného obrazového záznamu oproti klasickému uspořádání. V klasickém uspořádání (obr. 3a) jsou totiž hodnoty barevných složek (RGB) jednotlivých pixelů digitalizovaného obrazu vypočteny z hodnot čtveřice sousedních obrazových elementů (RGBG, viz obr. 2c). Jejich počet je tedy přibližně stejný jako je počet aktivních elementů senzoru. Při uspořádání na obr. 3b je sice exponován stejný počet obrazových bodů (RGBG), ale již v průběhu expozice jsou v prostoru mezi nimi vygenerovány další obrazové body. Barevné složky digitalizovaného obrazového záznamu jsou tedy vypočteny z dvojnásobného počtu elementů. Velikost digitalizovaného záznamu je tedy přibližně dvakrát větší než původní počet aktivních pixelů.

Zaznamenání barevných složek obrazu

Dopadající světelné záření způsobuje u všech tří principů lokální generaci elektrického náboje (pár elektron/díra) v místech aktivních obrazových bodů. Maximální množství náboje



Obr. 4 Závislost vygenerovaného elektrického náboje na intenzitě dopadajícího světelného záření

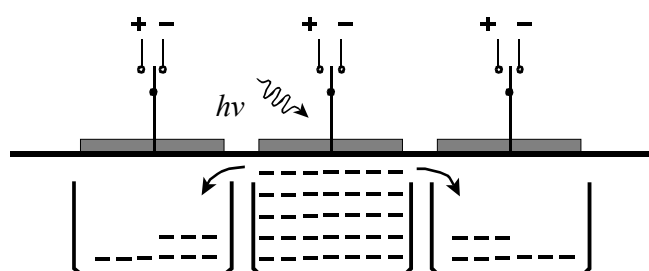
kteří je možno v daném místě vygenerovat definuje veličina nazvaná „plnicí kapacita“ (Full Well Capacity). Pro nízké koncentrace nábojů je závislost mezi dopadajícím světelným zářením a množstvím vygenerovaného náboje lineární, pro vyšší koncentrace dochází k saturaci (viz obr. 4). Plnicí kapacita souvisí s velikostí pixelů. Udává se počtem elektronů, které mohou být v pixelu zachyceny, viz tab. 1

Tabulka 1: Velikosti senzorů a jejich plnicí kapacita [3]

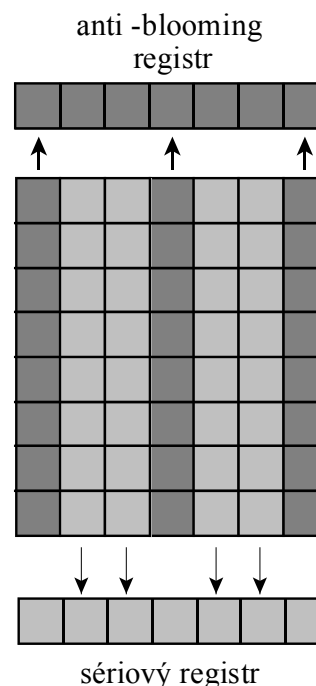
CCD senzor	velikost pixelu (μm)	plnicí kapacita
Kodak KAF 1400	$6,8 \times 6,8$	45 000 elektronů
EEV CCD37 – 10	15×15	160 000 elektronů
Kodak KAF 1000	24×24	630 000 elektronů

Při lokálním přexponování aktivního obrazového bodu může dojít k přetečení elektrického náboje do sousedních pixelů (viz obr. 5). Tento jev, tzv. "blooming", způsobuje zhoršení kontrastu digitalizovaného obrazu.

K odstranění lokálního přetečení náboje v pixelech senzoru se používá metoda nazvaná "anti-blooming". Ta je založena na odčerpání náboje z obrazových bodů, které se po expozici dostanou do oblasti saturace, do speciálních pixelů, a z jejich následného odvedení ze senzoru (obr. 6). Při této operaci dojde sice k nehomogenní změně jasu obrazu, ale jsou odstraněna lokálně přexponovaná místa.



Obr. 5 Přetečení náboje do sousedních pixelů: blooming



Obr. 6 Odčerpání náboje z přexponovaných pixelů: anti-blooming

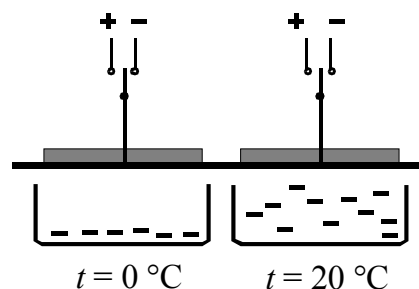
Teplotní šum

Teplotní šum vzniká jednak jako důsledek šumu temnotního proudu, ale také při transportu elektrického náboje z pixelů senzoru.

Temnotní šum (Dark Noise, DN) je způsobem tepelnými kmity krystalické mřížky senzoru. Je závislý teplotě senzoru (má Poissonovo rozložení) a na době expozice. Ovlivňuje hodnotu aktivního signálu. Uvádí se jako počet elektronů generovaných v pixelu za dobu expozice (pro senzor KAF 1400 se uvádí hodnota 1 elektron/pixel při expozici 2s). Teplotní šum lze snížit chlazením (viz obr. 7) kapalným chladícím médiem (např. glycerol/voda, metanol/voda), prouděním vzduchu (ventilátory) nebo termoelektricky (Peltierův jev).

Čtecí šum (Reading Noise, RN) vzniká vlivem fluktuací způsobených při čtení dat (při generaci páru elektron/díra a při přenosu dat senzorem). Je závislý na teplotě (má opět Poissonovo rozložení) a na frekvenci čtení dat, nezávisí na době expozice. Uvádí se jako počet elektronů generovaných v pixelu při určité čtecí frekvenci (pro senzor KAF 1400 se uvádí hodnota 13 elektronů/pixel pro frekvenci čtení dat 1 MHz). Rozptyl čtecího šumu závisí na úrovni čtecího signálu (Read Signal, $RN = \sqrt{RS}$).

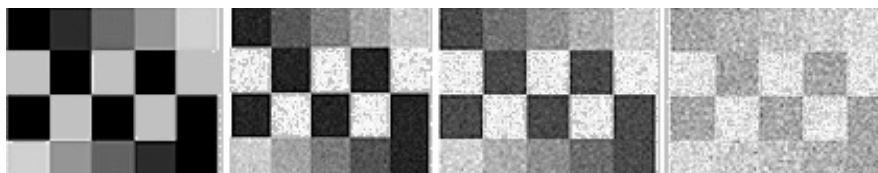
Celkový šum (Total Noise, $TN = \sqrt{RN^2 + DN^2}$) je pro krátké expoziční časy ovlivněn především čtecím šumem, pro dlouhé expoziční časy je dominantní temnotní šum (viz obr. 8, tab. 2)



Obr. 7 Vliv teploty na velikost šumu temnotního proudu

Tabulka 2: Temnotní a čtecí šum senzoru KAF 1400

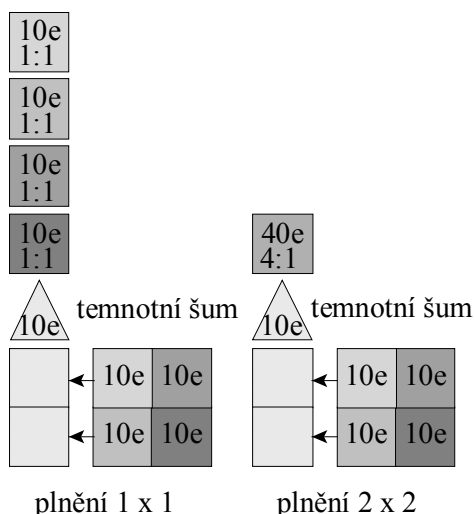
expozice	$t = 2 \text{ s}$	$t = 4 \text{ s}$	$t = 8 \text{ s}$	$t = 16 \text{ s}$	$t = 32 \text{ s}$	$t = 64 \text{ s}$
$RS \text{ (e/p)}$	169	169	169	169	169	169
$RN \text{ (e/p)}$	13	13	13	13	13	13
$DN \text{ (e/p)}$	1	2	4	8	16	32
$TN \text{ (e/p)}$	13,04	13,15	13,60	15,26	20,62	34,54



Obr. 8 Teplotní šum [3]

Dynamický rozsah (Dynamic Range, DR) je veličina definována jako poměr lineárního plnění (plnicí kapacity) a čtecího šumu ($DR = RS/RN$). Je tedy úměrný druhé odmocnině

čtecího signálu ($DR = \sqrt{RS}$). Dynamický rozsah lze zvětšit zvýšením plnicí kapacity sloučením nábojů ze sousedních pixelů (vytvářením tzv. superpixelů, tj. matic 2×2 , 3×3 , ..., $n \times n$ původních pixelů), ovšem za cenu snížení plošného rozlišení (rozlišovací schopnosti) senzoru. Proces slučování pixelů do superpixelu se nazývá plnění (binning, viz obr. 9).



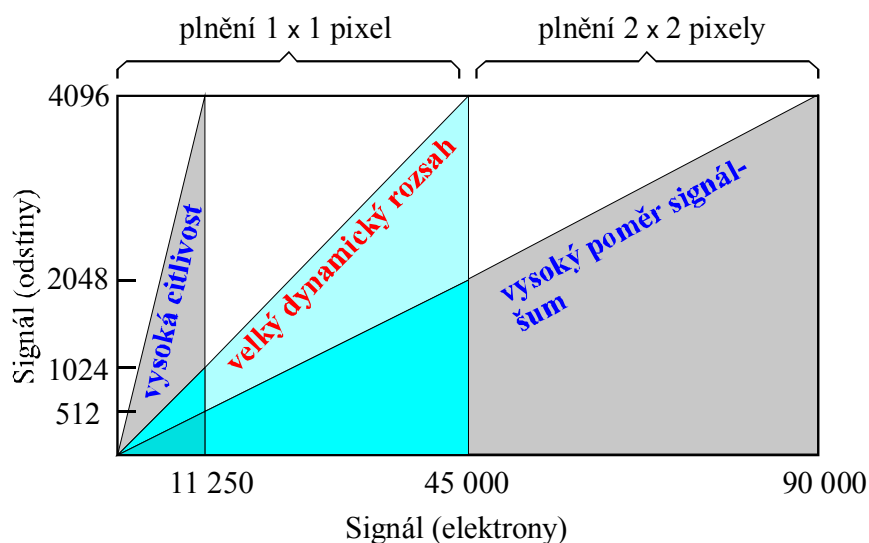
Obr. 9 Slučování pixelů do superpixelů - plnění (binning)

Vyšším plněním lze dosáhnout lepšího poměru mezi aktivním signálem a teplotním šumem ($SNR = RS/\sqrt{RN^2 + DN^2}$). Z obr. 98 je zřejmé, že při plnění 1×1 je pro aktivní signál 10 elektronů a temnotní šum 10 elektronů (při zanedbatelném čtecím šumu) poměr signál šum $1 : 1$. Při zvýšení plnění (na 2×2 pixely) se aktivní signál zvýší $4\times$, zatímco temnotní šum zůstane stejný, poměr signál šum se tedy zvýší na $4 : 1$.

Digitální fotoaparáty umožňují zpravidla možnost volby záznamu obrazu v některém z následujících módů.

- **Mód s velkým dynamickým rozsahem** (High Dynamic Range Mode) je nastaven tak, aby rozsah A/D převodníku odpovídal plné kapacitě pixelů. Tento mód umožňuje záznam obrazů vyznačujících se velkými dynamickými změnami. Pro velké expozice může docházet ke zkreslení obrazu způsobené přetečením pixelů (blooming).
- **Mód s vysokou citlivostí** (High Sensitivity Mode) je nastaven tak, aby rozsah A/D převodníku odpovídal čtvrtině elektronů v pixelech. Tento mód je určen pro záznam obrazů podsvětlených aplikací s pomalými změnami intenzity světla.
- **Mód s vysokým poměrem signál – šum** (High Signal to Noise Ratio Mode) je nastaven tak, aby bylo dosaženo maximálního poměru mezi aktivním signálem a teplotním šumem. Lze toho dosáhnout zvýšením plnění. Snižuje se v něm plošné rozlišení (rozlišovací schopnost) senzoru.

Na obr. 10 je vynesena závislost výstupního signálu 12 bitového A/D převodníku (odpovídajícího rozlišením odstínům zaznamenaného obrazu) na plnění kapacit senzoru (počtu fotoelektronů jednotlivých pixelů, resp. superpixelů) pro možné pracovní módy CCD senzoru KAF 1400.



Obr. 10. Plnění kapacita v různých módech záznamu obrazu [3]

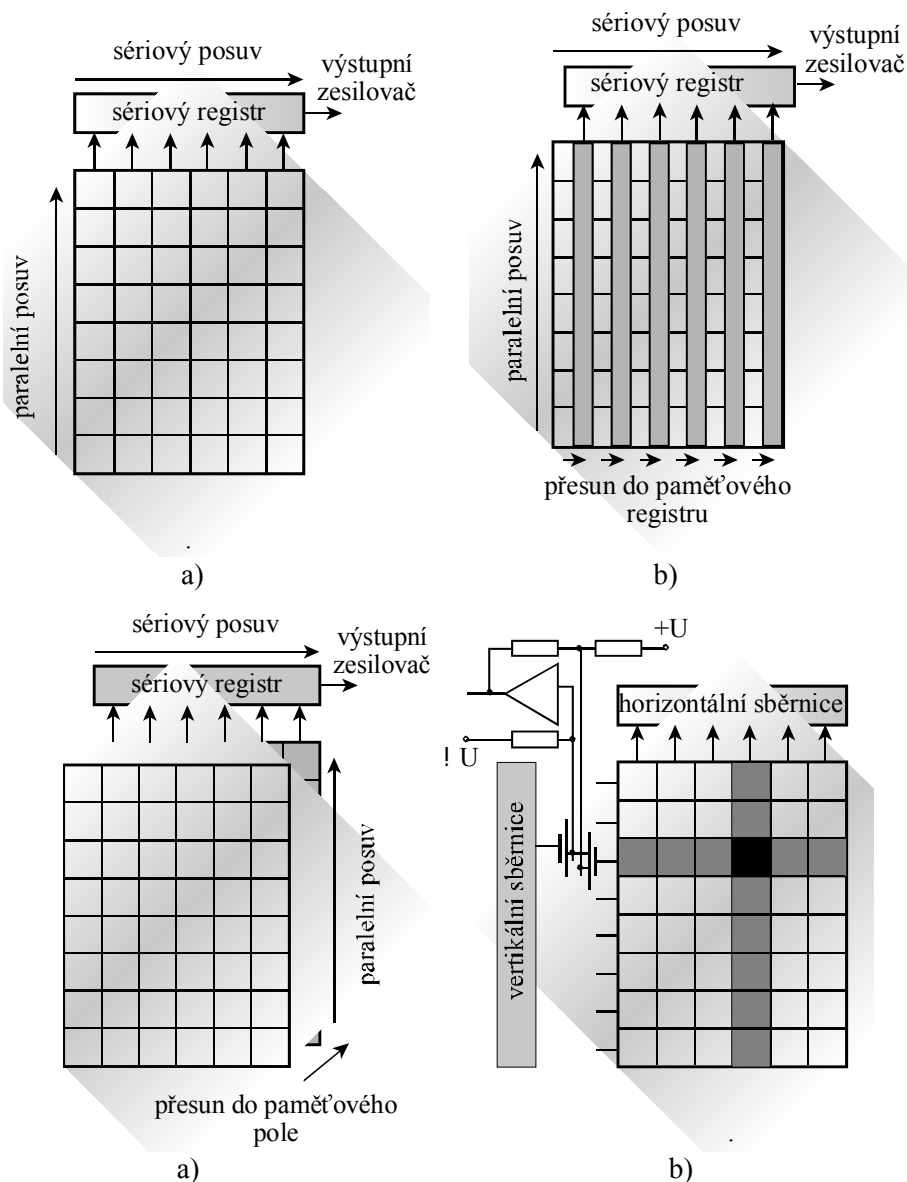
Přenos elektrického náboje

Po expozici jednotlivých pixelů obrazového senzoru dochází k transportu generovaného elektrického náboje strukturou do A/D převodníku, kde dochází k digitalizaci odpovídajícího elektrického signálu. Používají se čtyři odlišné principy (viz obr. 9)

- s mechanickou závěrkou (Full Frame CCD),
- s meziřádkovým přenosem náboje (Interline-Transfer CCD),
- s přenosem snímků (Frame - Transfer CCD),
- s přímou adresací pixelů (Charge Injection Devices – CID).

Systémy s mechanickou závěrkou (progresivní sken, obr. 11a) mají velmi jednoduchou architekturu. Využívají stejné obrazové pole pro expozici fotonem, integraci náboje i jeho přenos. K řízení expozice a blokování dopadu světla na senzor během čtení je použita mechanická závěrka. Pixely jsou zpravidla čtvercové, takže nedochází ke zkreslení obrazu při detekci. Senzory je možné osvětlovat jak z čelní tak i zadní strany. Zařízení s osvětlením se zadní strany mají větší kvantovou účinnost, protože není třeba, aby se světlo šířilo přes celou strukturu fotocitlivé vrstvy detektoru.

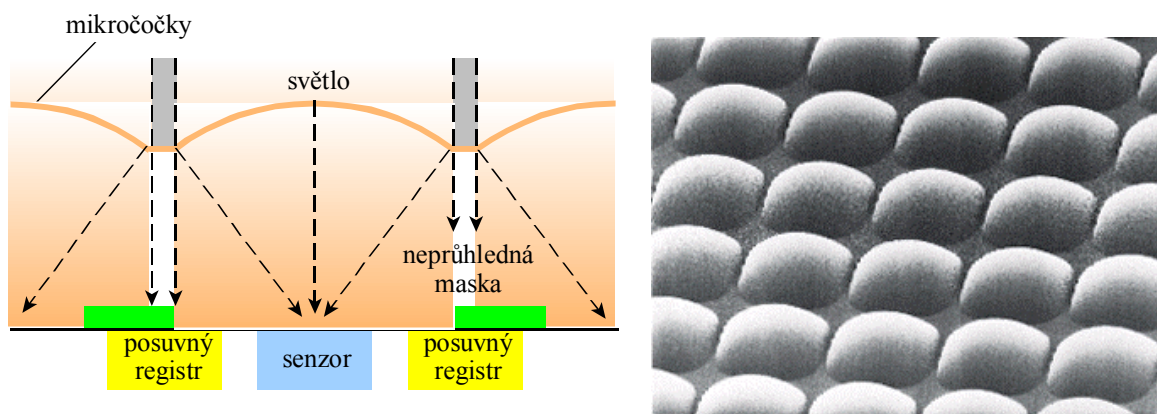
Systémy s meziřádkovým přenosem (prokládaný sken, obr. 11b) mají paralelní registr rozdělen na pruhy tak, že neprůhledný paměťový registr se nachází mezi sloupci pixelů. Elektronický obraz se akumuluje na exponované ploše paralelního registru. Během čtení CCD se celý obraz přesune prostřednictvím meziřádkové masky do skrytého posuvného registru. CCD s meziřádkovým přenosem vykazují relativně špatnou citlivost, protože velká část každého pixelu je pokryta neprůhlednou maskou. Ke zvýšení kvantové účinnosti lze použít mikročochky (obr. 12), které soustřeďují světlo z velké plochy na fotodiodu.



Obr. 11 Systém a) s mechanickou závěrkou, b) s meziřádkovým přenosem
c) s přenosem snímků, d) s přímou adresací pixelů

Systémy s přenosem snímků (plošný sken, obr. 11c) mají oddělené obrazové a paměťové pole. Zaznamenaný latentní obraz je nejprve přesunut z obrazového pole do paměťového pole a během další expozice obrazového pole rychle přesunut ($\sim 300 \mu\text{s}$) k okraji senzoru, kde je digitalizován. Paměťové pole má obvykle stejnou velikost jako obrazové pole a je odděleno neprůhlednou maskou jako štít proti osvětlení pixelů. Tento typ CCD umožňuje přenášet obraz spojitě bez závěrky a to vysokou přenosovou rychlostí. CCD s přenosem snímků mohou být také užity ve spojení s mechanickou závěrkou k rychlému zaznamenání dvou po sobě následujících snímků. Toho lze využít např. při záznamu dvou obrazů s rozdílnou excitační nebo emisní vlnovou délkou při některých obrazových experimentech.

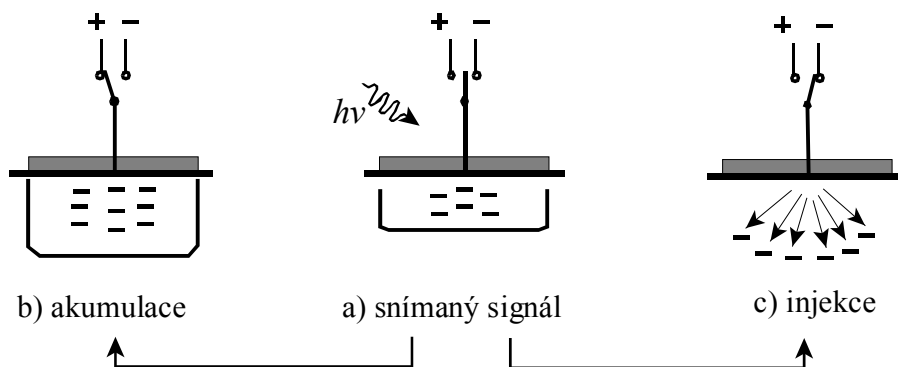
Systémy s přímou adresací pixelů (obr. 11d) umožňuje přímý přístup k jednotlivým pixelům senzoru. Elektrický náboj je generován v pixelech sestávajících ze dvou kolmých elektrod (MOS tranzistorů), které slouží k uložení i přenosu fotogenerovaného náboje. Tento princip, využívaný jak v CCD, tak i v CMOS senzorech, umožňuje destruktivní (elektrický náboj je injektován do kontaktu) nebo nedestruktivní (náboj zůstává v pixelu a je možné provádět další expozici) čtení obrazu, viz obr. 13.



Obr. 12 Kondenzory (soustava mikročoček) [4]

Digitalizace signálu

Vlastní digitalizace signálu se provádí pomocí A/D převodníku (Analog Digital Unit – ADU). Počet kvantovacích úrovní digitalizovaného signálu určuje tzv. barevnou hloubku zaznamenaného obrazu, ze které vyplývá počet různých barev, které lze na obrázku rozlišit. Nejčastěji se provádí záznam obrazů ve 24 bitové nebo 36 bitové barevné hloubce (na každý barevný kanál RGB připadá 8 bitů, resp. 12 bitů), pomocí které lze rozlišit až 16,7 milionů (68,7 miliard) barev. U digitálních fotoaparátů je informace ukládána v paměti (např. v Compact Flash 1, 2) buď ve formátech definovaných výrobcem (např. RAW) nebo ve formátech využívaných u osobních počítačů (např. bezztrátový formát TIFF, resp. formát se ztrátovou kompresí JPEG).



Obr. 13 Destruktivní (a → c) a nedestruktivní (a → b) čtení obrazu

Závěr

V příspěvku jsou shrnuty vlastnosti digitálních fotoaparátů, a to především z pohledu záznamu obrazové informace. Jsou zde uvedeny principy používaných senzorů (CCD a CMOS), jejich výhody a nevýhody. Při přípravě příspěvku byly využity monografie zabývající se problematikou digitálního zobrazování [1] a správy barev [2], encyklopedie Roper Scientific [3] a Imaging Resource [4] a dostupné zdroje jednotlivých výrobců digitálních fotoaparátů.

Literatura

- [1] Gonzales R. C.: Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, USA, 1987
- [2] Giorgiany E. J., Madden T. E.: Digital Color Management, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, USA, 1997
- [3] Encyklopedie, Roper Scientific, Inc., 2001, www.roperscientific.com
- [4] Digital Cameras, Imaging Resource, Inc., 2001, www.imaging-resource.com

www odkazy na výrobce digitálních fotoaparátů

Canon – www.canon.com
FujiFilm – www.home.fujifilm.com
Kodak – www.kodak.com
Minolta – www.minolta.com
Nikon – www.nikon.com
Olympus – www.olympus.com
Sony – www.sony.co.jp
Toshiba – www.toshiba.com

Slovníček pojmů

Digitální fotoaparáty jsou zařízení umožňující zaznamenat statické barevné obrazy pomocí elektrických signálů (s využitím světlocitlivých záznamových prvků) a v digitalizované podobě je uložit na paměťovém médiu (např. v magnetické, elektronické, optické paměti).

Digitální fotografie pak představuje grafický výstup digitalizovaného obrazového záznamu pomocí zobrazovacích zařízení (např. pomocí LCD displeje nebo monitoru), příp. zaznamenané na plošném médiu (např. pomocí tiskárny nebo osvitem).