

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Detekce slabých signálů maticovými detektory
optického záření

Vypracoval: Lukáš Ondroušek
Studijní program: B1701 Fyzika
Studijní obor: Digitální a přístrojová optika
Forma studia: Prezenční
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Řehoř, Ph.D.
Termín odevzdání: červenec 2017

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Zdeňku Řehořovi, Ph.D. za vstřícnou a trpělivou pomoc při psaní této práce. Dále děkuji své rodině za podporu při studiu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Řehoře, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které uvádím v seznamu použité literatury na konci práce.

V Olomouci dne 24. července 2017

.....

Lukáš Ondroušek

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Lukáš Ondroušek
Název práce	Detekce slabých signálů maticovými detektory optického záření
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Katedra optiky
Vedoucí práce	Ing. Zdeněk Řehoř, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2017
Abstrakt	Cílem bakalářské práce je rozbor závislostí ovlivňujících kvalitu příjmu optického signálu v závislosti na vlastnostech maticového detektoru optického záření a parametrech optického signálu.
Klíčová slova	maticové detektory optického záření, temný snímek, detekce slabého signálu, kontrast, rozlišovací schopnost
Počet stran	37
Počet příloh	1x CD
Jazyk	český

Bibliographical identification

Author`s name	Lukáš Ondroušek
Title	Low signals detection with matrix type of optical radiation detectors
Type of thesis	Bachelor
Department	Department of Optics
Supervisor	Ing. Zdeněk Řehoř, Ph.D.
The year of presentation	2017
Abstract	The main aim of the bachelor thesis is analyzis conditions influencing the quality of the optical signal reception depending on the properties of the matrix optical radiation detector and the parameters of the optical signal.
Key words	matrix optical radiation detectors, dark frame, low signal detection, contrast, resolution
Number of pages	37
Number of appendices	1x CD
Language	czech

Obsah:

Úvod	7
1. Charakteristika CCD.....	8
1.1. Struktura čipu.....	8
1.2. Princip činnosti	9
2. Konstrukce CCD.....	11
2.1. Architektura plošných CCD.....	12
2.2. Způsoby vyčítání CCD čipů.....	14
2.3. Výrobní technologie.....	15
3. CMOS technologie	16
4. Vlastnosti ovlivňující poměr signálu a šumu.....	17
5. Zpracování obrazu	21
6. Experimentální měření.....	23
6.1. Prvky měřicí soustavy	23
6.2. Průběh měření	27
6.3. Vyhodnocení šumu pomocí temných snímků.....	28
6.4. Měření kontrastu testu.....	30
6.5. Určení rozlišovací schopnosti	33
Závěr	36
Seznam použité literatury	36

Úvod

Maticové detektory optického záření si za dobu své existence našly uplatnění ve velkém množství oborů. V této bakalářské práci jsou probírány vlastnosti speciálních přesných kamer pro měření slabých zdrojů světla, které díky svým vlastnostem výrazně posunuly možnosti astronomů.

Princip maticových detektorů byl vymyšlen v 60. letech minulého století. Jako první vznikl CMOS detektor, který byl ale technologicky náročný na výrobu. CCD detektory vznikly sice později, ale kvůli problémům prvních CMOS s příliš velkým šumem byly dříve uplatňovány CCD. Dnes se využívají hojně obě technologie, každá má svoje klady a zápory.

CCD (Charge-coupled device) čip vznikl v roce 1969 v Bellových laboratořích díky vynálezci Willardu Boyleovi a Georgi E. Smithovi, jako vedlejší produkt při výzkumu nových počítačových pamětí. Původně mělo jít o vývoj nového typu paměťového registru, který se chová podobně jako CCD čip, ale bez přístupu světla [5]. O důležitosti tohoto vynálezu hovoří i fakt, že za něj dostali Boyle a Smith Nobelovu cenu [4].

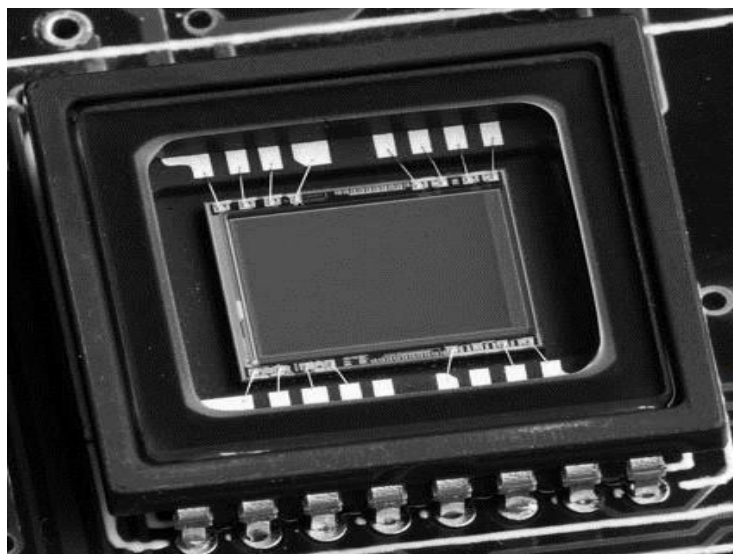
CCD čipy pronikly do řady oborů. Našly využití v lékařství, v digitálních fotoaparátech, webových kamerách, digitálních filmových kamerách a jsou také součástí tabletů a telefonů. V průmyslové automatizaci jsou použity jako vstupní médium pro řadu měřících a řídicích aplikací využívajících technologie strojového vidění [5].

Technologie CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) čipů byla objevena dříve, již v roce 1963 [14]. CMOS čipy byly vyvíjeny již přímo za účelem vytvoření obrazového snímače. V porovnání s CCD byl vývoj náročnější, a tak tato technologie našla své využití až o něco později [3].

V počátcích CMOS snímače byly náchylnější na hladinu šumu při delších expozicích a disponovaly menším dynamickým rozsahem [14], proto se první CMOS čipy začaly objevovat v low-end zařízeních jako jsou webové kamery, jejichž kvalita byla nízká, nesrovnatelná s čipy CCD [13]. Výrobci ale dokázali tyto negativa vyřešit, a tak jsou dnes senzory CMOS vybaveny např. profesionální zrcadlovky nejvyšší třídy [14].

1. Charakteristika CCD

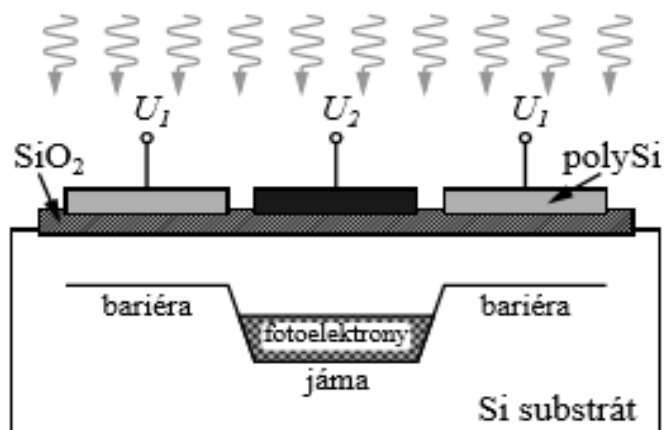
CCD je zařízení, které přeměňuje energii dopadajícího světla na energii elektrického signálu [2]. Název CCD je odvozen od počátečních písmen slovního spojení Charge-Coupled Device, což v překladu znamená zařízení s volně vázanými náboji. Tato elektronická součástka funguje jako posuvný registr vystavený působení světla. CCD využívá akumulace náboje pomocí vnitřního fotoelektrického jevu [4]. Obrovskou výhodou CCD je lineární odezva na světlo (využíváno ve fotometrii) a akumulace náboje po dlouhou dobu [5].



Obr. 1: CCD čip [4]

1.1. Struktura čipu

CCD čip je tvořen soustavou svislých negativních potenciálových valů a vodorovných elektrod, které vznikají díky napětí na elektrodách čipu. Potenciálové valy i elektrody mají negativní náboj a tvoří společně na čipu mřížku. Tato mřížka vytváří na čipu potenciálové studny, které zachycují, shromažďují excitované elektrony a zabraňují jejich pohybu po čipu. Počet nashromážděných elektronů je úměrný intenzitě světla a expoziční době. Každá potenciálová studna reprezentuje jeden obrazový bod – pixel [5], jenž je složen z vodivých kontaktů dopovaného polykrystalického křemíku na křemíkovém polovodiči odděleného izolátorem SiO_2 [3].



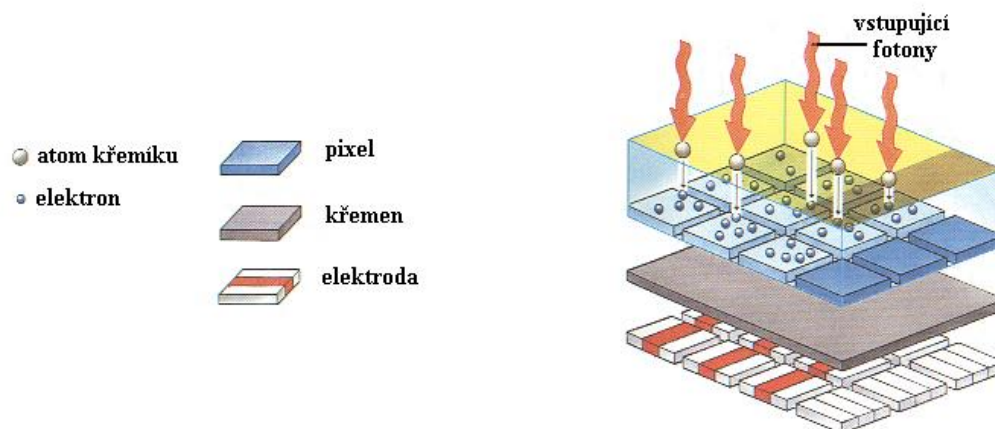
Obr. 2: Materiálové struktura pixelu s kontakty upravující potenciál [3]

1.2. Princip činnosti

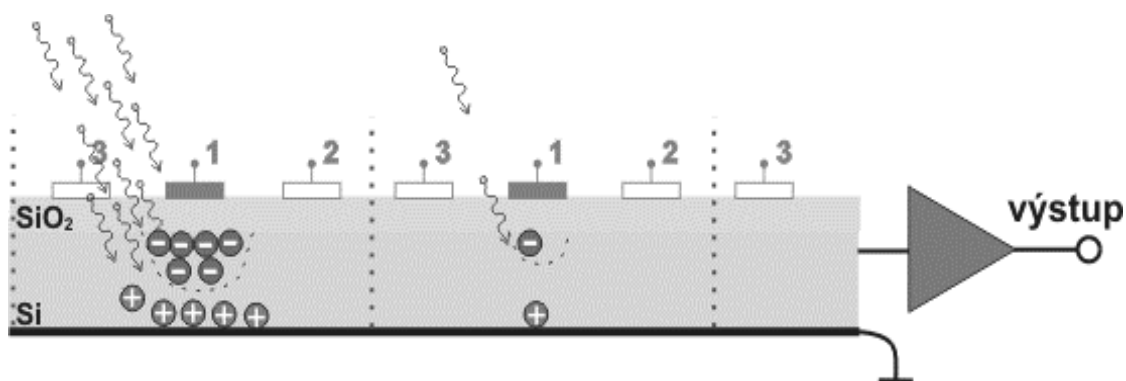
Činnost CCD je popsána ve čtyřech fázích. V první fázi, bez přístupu světla, jsou odebrány volné elektrony, čímž se smaže případný předchozí zaznamenaný obraz. V druhé fázi dochází k expozici obrazu. Ve třetí se sejme obraz a náboj se posune pixel po pixelu k výstupnímu zesilovači. V poslední fázi se obraz digitalizuje.

Expozice obrazu

Na elektrody se přivede kladné napětí a na CCD povolíme přístup světlu. Vlivem dopadu fotonů na atomy křemíku uvnitř CCD dochází díky vnitřnímu fotoelektrickému jevu k excitaci elektronů v polovodiči a jejich přitažení ke kladně nabitým elektrodám. Po elektronech zůstávají v polovodiči díry vykazující kladný náboj, které jsou přitaženy elektrodou na spodu CCD [2].



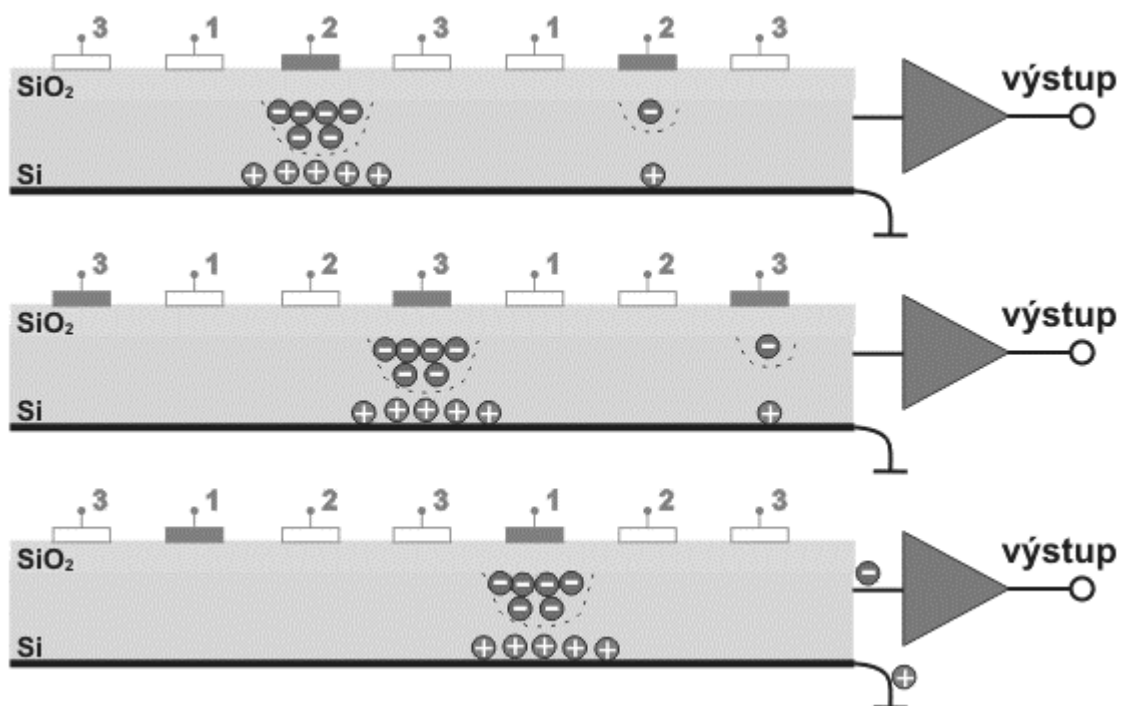
Obr. 3: Dopad fotonů na čip [2]



Obr. 4: Expozice obrazu [4]

Snímání obrazu

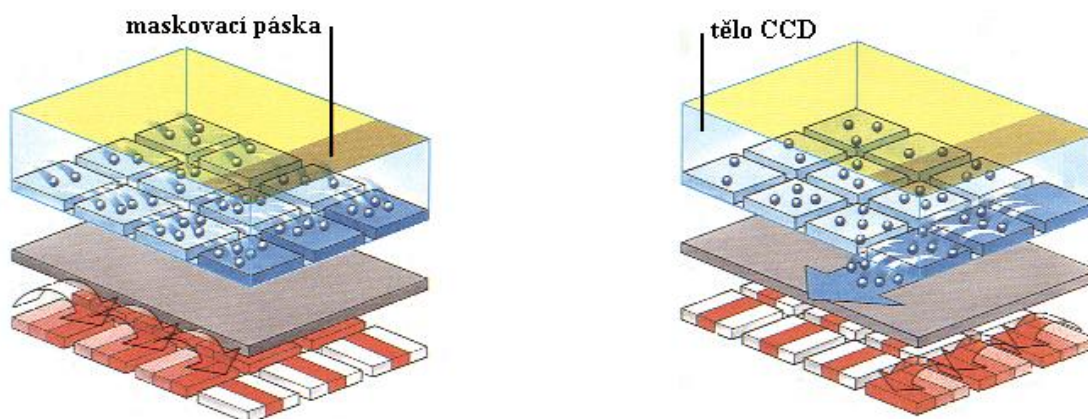
Po expozici obrazu následuje jeho snímání. V této fázi dochází k uzavření závěrky, excitované elektrony jsou díky síti elektrod na svých místech v potenciálových studnách a dochází k vyčítání zaznamenaného obrazu pixel po pixelu. Pohyb náboje v rámci celého čipu lze řídit změnou velikosti napětí na jednotlivých elektrodách. Elektrony se tak přesouvají do místa s nejnižším potenciálem, na elektrodě je vyšší napětí [5].



Obr. 5: Vyčítání pomocí trojfázového hodinového signálu [4]

Po uzavření závěrky díky snižování a zvyšování napětí na jednotlivých elektrodách dochází k paralelnímu posuvu náboje. Shluky elektronů z jednotlivých pixelů se posouvají přes sousední pixely směrem k výstupnímu zesilovači [4]. Elektrony z nejnižšího čidla

sloupce pak putují do sériového registru a jsou postupně posouvány až k A/D převodníku a výstupnímu zesilovači. Až jsou přeneseny všechny elektrony ze sériového registru, dojde opět k posunu náboje v paralelním registru a celý proces se opakuje do doby, dokud nejsou všechny pixely vyčteny.



Obr. 6: Pohyb náboje po CCD čipu [2]

Digitalizace obrazu

Shluky elektronů doputují k výstupnímu nábojovému zesilovači, který transformuje malý náboj odpovídající počtu nacytaných elektronů v jednotlivých pixelech na napětíové úrovně vhodné pro další zpracování obrazu [4].

Toto napětí se objeví na výstupním pinu CCD čipu. Elektronika kamery poté pomocí analogově/digitálního převodníku převádí toto napětí pro každý pixel na číslo, které udává informaci o množství světla naakumulovaném v každém pixelu. Matice těchto čísel tvoří datový soubor reprezentující obrázek [5].

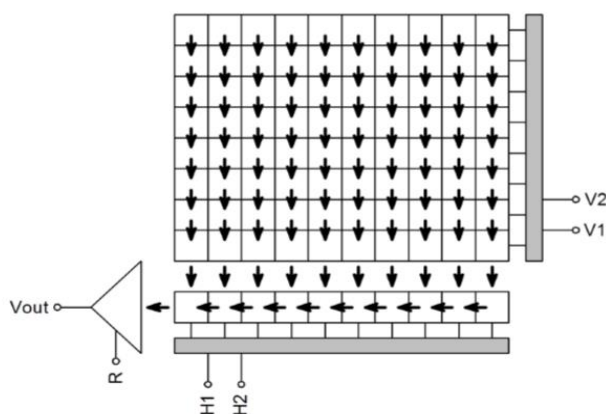
2. Konstrukce CCD

CCD kamery mají široké spektrum využití a pro každou aplikaci je vhodná trochu jiná konstrukce CCD čipu. Konstrukcí můžeme ovlivňovat například kvantovou účinnost, ta udává podíl detekovaných a dopadlých fotonů vyjádřených v procentech [3]. Kvantovou účinnost můžeme ovlivnit zvolením vhodné architektury čipu (omezením zastínění čipu elektrodami) či výrobní technologie.

2.1. Architektura plošných CCD

Full-Frame transfer

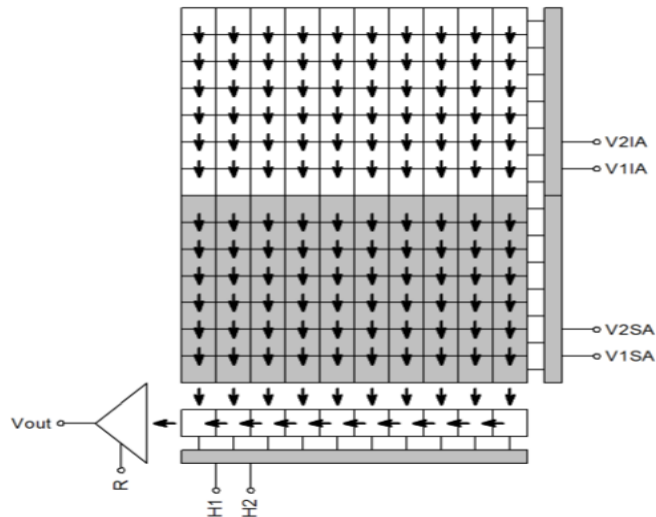
FF čip je vystaven celou svou plochou světlu. Díky této konstrukci má velkou kvantovou účinnost, proto se nejlépe hodí k snímání velmi slabých zdrojů světla [5]. Nevýhodou této architektury je nutnost zablouknění paralelního registru při vyčítání mechanickou clonou [3]. Pokud se mechanická závěrka nepoužije, na čip dopadne při jeho vyčítání světlo, čímž dojde k rozmazání obrazu. Pixely z horní části obrazu budou exponovány delší dobu než pixely ze spodní části. Navíc i při posunu potenciálových jam po čipu bude docházet ke krátkému záznamu v různých místech matice [5].



Obr. 7: Vyčítání Full-Frame transfer čipu [6]

Frame Transfer

Frame Transfer čipy se skládají ze dvou paralelních registrů, jeden je vystaven světlu a druhý je překryt neprůhlednou vrstvou. Jakmile je expozice ukončena, obraz je velice rychle přenesen z registru vystaveného světlu do druhého zastíněného paralelního registru. Výhodou FT čipů je urychlení vyčítacího procesu z důvodu možnosti přenosu i záznamu obrazu současně a funkce elektronické závěrky, jež eliminuje nebezpečí rozmazání dopadajícím světlem při digitalizaci. Elektronická závěrka ale nedovoluje exponovat temné snímky, takže pokud chceme temný snímek pořídít, musíme kameru vybavit mechanickou závěrkou. Problémem je také samovolné přetékání náboje u jasných zdrojů světla do zastíněného paralelního registru a vysoká cena (potřeba dvojnásobná plocha čipu) [5].

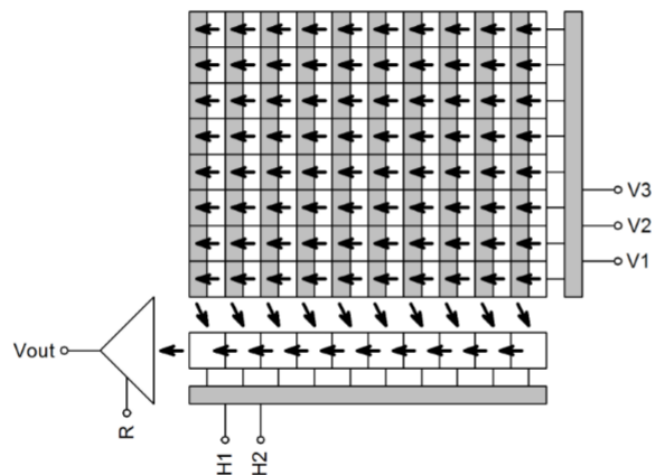


Obr. 8: Vyčítání Frame transfer čipu [6]

Interline Transfer

Tyto čipy mají v sobě zabudovanou elektronickou závěrku. Pracují podobně jako FT čipy, ale jejich zacloněná plocha je tentokrát 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 postupně posouvány do horizontálního registru a digitalizovány, zatímco je načítán nový snímek [3].

Rozkládání aktivních a neaktivních sloupců omezuje plochu vystavenou světlu, kterou čip shromažďuje světlo, tím dochází ke snížení kvantové účinnosti čipu. Tento efekt může být částečně potlačen použitím mikročoček. Výhodou Interline transfer čipů je krátký přesun do ukládacího sloupce, čímž je prakticky eliminováno rozmazání.



Obr. 9: Vyčítání Interline transfer čipu [6]

2.2. Způsoby vyčítání CCD čipů

Interlaced read

Tato metoda je levná a výrobně jednoduchá díky zvládnuté technologii z oblasti TV a videokamer, a proto se používá ve většině digitálních fotoaparátů [5]. Touto metodou jsou nejprve vyčteny liché a pak sudé řádky. Kamera s tímto senzorem rovněž poskytuje obraz, kde jsou sudé i liché snímky nezávislé.

Interleaced čipy jsou osazeny pomocnými vyčítacími registry, do kterých se čip vyčítá nejprve po lichých řádcích a v nich postupuje, kolmo putuje zase do hlavního registru a následně opakuje stejný postup pro sudé řádky. Na konci dochází k složení všech řádků. Nevýhodou technologie je, že vyžaduje mechanickou závěrku, a není tak možné použít extra krátké expoziční časy. Díky pomocným registrům je někdy nutné více interpolovat mezi jednotlivými řádky, což zhorší kvalitu obrazu [7].

Progressive read

Metodou Progressive read se přesouvá náboj řádek po řádku ve sloupcích do hlavního posuvného registru, který pokračuje do zesilovače a AD převodníku. Po vyčtení prvního řádku se začne vyčítat další, dokud se nevyčte celý čip. Obraz se vyčítá ve všech buňkách současně. To umožňuje vyšší přesnost obrazu, ostrost a také rychlost. Je možné využít elektronickou závěrku pro extra krátké expoziční časy. Toto řešení je technologicky složitější, a tedy také nákladnější. Používá se zejména u dražších snímačů [7].

Frame read

Kombinuje oba způsoby vyčítání IT čipů. Nemá-li být podstatně zhoršena dynamika čipu daná kapacitou každého pixelu, musí být zastíněné sloupce prakticky stejně široké, jako aktivní sloupce. Jelikož u Frame read vždy dva aktivní pixely nad sebou sdílí v zastíněném sloupci jediný pixel, můžeme ho tak zúžit na poloviční šířku ve srovnání s aktivním sloupcem, přesto plocha i kapacita pixelu zůstávají stejné. Tímto postupem se nám zvětší světlocitlivá plocha, a tak se získá i lepší kvantová účinnost. Při vyčítání nejsou do zastíněného pixelu sečítány pixely sousedních řádků, ale nejprve je přečten lichý pulsínek, přitom náboj v sudém pulsínku je zachován v aktivních pixelech. Poté je přečten sudý pulsínek. Tento způsob vyčítání vyžaduje použití mechanické závěrky – během

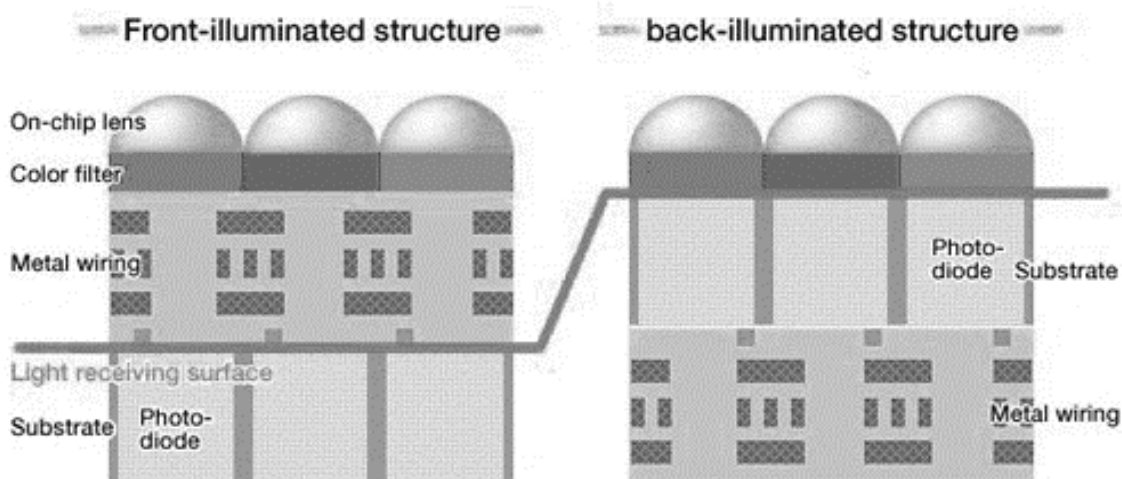
vyčítání lichého pulsů pixely sudého pulsů stále akumulují světlo. Tato architektura čipu se zpravidla užívá u snímačů používaných v digitálních fotoaparátech [5].

2.3. Výrobní technologie

Z hlediska výrobní technologie jde kvantovou účinnost zlepšit použitím transparentních elektrod, matice mikročoček či technologií tenčených zezadu osvětlovaných čipů.

Vytvořením malých cylindrických čoček nad každým obrazovým sloupcem se dosáhne fokusace světla do oblastí citlivých na světlo. Dopadá-li světlo pod větším úhlem, dochází vlivem odrazů ke snížení efektivity tohoto řešení. Velmi účinné je použití mikročoček u skladových sloupců IT čipů. Ale i u čipů Full-Frame dokážou mikročočky velmi zvýšit jejich kvantovou účinnost [3].

Pro dosažení nejvyšší možné kvantové účinnosti se využívají speciálně tenčené zezadu osvětlované čipy. Tato konstrukce je označována jako BI – back illuminated chip. BI čipy jsou zapouzdřeny „vzhůru nohama“, přicházející světlo tak není blokováno elektrodami, jež jsou na spodní straně čipu. Prakticky celá zadní strana čipu je tedy vystavena světlu. Výroba tenčených čipů je velmi náročná, a proto jsou čipy relativně drahé. Osvětlení zezadu také může způsobovat problémy jako je například vznik interferenčních obrazců způsobený infračerveným zářením atmosféry [3].



Obr. 10: Porovnání konstrukčních řešení [8]

3. CMOS technologie

Základním prvkem CMOS čipu je fotocitlivý PN nebo PIN přechod, kapacitor a spínací tranzistor [15]. CMOS se od CCD liší tím, že má převodníky z náboje na napětí u každého pixelu, takže řídí a zpracovává výstupní signál na stejném čipu. K zesilovači se tak trasuje již napěťový signál.

Digitalizace probíhá na každé buňce zvlášť, proto stačí CMOS čipu kratší doba pro přečtení obrazu a zároveň i spotřeba množství energie je menší [15]. Jelikož je A/D převodník a další elektronika přímo na čipu, má CMOS nižší kvantovou účinnost [3].

CMOS senzory jsou podle způsobu implementování zesilovače do struktury čipu děleny na pasivní a aktivní. Pasivní senzory mají zesilovače implementovány v oblasti sloupcových registrů, signál z jednoho sloupce je tak zesilován jednotným zesílením. U aktivních sensorů jsou zesilovače implementovány do každé fotocitlivé buňky, a tak dokážou řídit zesílení signálu jednotlivých buněk individuálně, čímž lépe eliminujeme šum [15].

CMOS je rychlejší, může dosahovat většího zesílení s menšími energetickými nároky, je imunní vůči bloomingu a umožňuje vyčítat jen části matice pixelů (windowing). Windowing umožňuje sledovat pohybující se předmět. Nevýhodou CMOS je nižší kvantová účinnost, nižší dynamický rozsah, větší šum. U CMOS čipů nejde využít binningu [3].

CMOS technologii je proto vhodné zvolit, pokud potřebujeme úsporný, spolehlivý, flexibilní a adaptibilní snímač, jenž snese i nehostinné podmínky. CCD se hodí více pro snímání slabých signálů [3].

Tab. T1: Porovnání CMOS a CCD čipu [15]

	CMOS	CCD
Cena	+	-
Rozměry	+	-
Spotřeba	+	-
Kvalita obrazu	-	+
Rozlišení	-	+
Činná plocha	-	+
Digitální šum	-	+
Rychlost	+	-
Dynamický rozsah	-	+
Možnost výřezu	+	-

4. Vlastnosti ovlivňující poměr signálu a šumu

Poměr signálu a šumu je kvantitativní metodou měření kvality dat [7]. Cílem je získat co největší signál a co nejmenší šum (co největší vzájemný poměr). Zvolením optimálních komponent je možno šum redukovat na minimum, s čímž také výrazně naroste i poměr signálu k šumu.

Výsledný šum kamery se skládá z několika „dílků šumů“, které se spolu sčítají. Z technického hlediska je ovlivňován zejména velikostí světlocitlivých buněk a zesílením signálu. Obecně tedy šum poroste, pokud se bude zvyšovat citlivost čipu (zesilovat signál), zvětšovat rozlišení či zmenšovat rozměry čipu [7].

Šum vzniká mj. díky tepelnému pohybu částic (temný proud), při vyčítání CCD čipu (čtecí šum), při zesilování proudu zesilovačem a konverzi analogových dat do AD převodníku (vyčítací šum). Na velikost šumu má v zásadě vliv i kvalita vlastního zpracování snímku pomocí algoritmů [7].

Temný proud

Temný proud vzniká v pixelech vlastní náhodnou fluktuací náboje tepelným pohybem částic krystalové mřížky polovodiče [7]. Tento pohyb zapříčiňuje nahodilé uvolnění elektronu bez působení dopadajícího světla (fotonu). Na čipu se tedy generuje náboj, i když je čip zcela ve tmě. Uvolněný elektron je přitažen k expoziční elektrodě, a tím je zahrnut do světelné expozice dané buňky, takže je vyhodnocen jako skutečný signál dopadajícího světla. Velikost temného proudu závisí na okolní teplotě, architektuře čipu, velikosti pixelu a výrobní technologii [5].

Temný proud přidává v jednotlivých pixelech náhodně hodnoty s Poissonovým rozdělením (liší se buňku od buňky a expozici od expozice), takže je ho nemožné z obrázků stoprocentně odstranit [4]. Vyjadřujeme ho jako počet elektronů za sekundu na jeden pixel při definované teplotě. Roste přibližně exponenciálně s teplotou. Přestože jsou CCD kamery většinou vybaveny chlazením, určitá hladina temného proudu je vždy přítomna [11].

Horké a temné pixely

Kromě temného proudu se na odchylkách čipu podílí i horké pixely (hot pixels). Horké pixely vznikají při vybuzení elektronů z buňky vlivem dopadu energetické částice na čip, či při tepelném pohybu částic krystalové mřížky polovodiče při delších expozicích. Dochází u nich k úplné saturaci jednotlivých pixelů [7]. Temné pixely jsou pixely špatně citlivé na světlo, zůstávají pohaslé nebo na něj nereagují vůbec.

Vyčítací a čtecí šum

Tento typ šumu je charakteristický pro daný čip a je vyjádřen v elektronech, které jsou tímto procesem vytvořeny, popřípadě zaniknou. Z čipu tak není možné vyčíst obraz s menší úrovní signálu, než je úroveň šumu, daná hodnotou $e-RMs$ (RMs značí směrodatnou odchylku), bez ohledu na teplotu [5]. Vyčítací šum se skládá z čtecího šumu a šumu elektroniky.

Čtecí šum vzniká při přenosu mezi sousedními pixely. Ke ztrátě signálu dochází mezi každým přelitím pixelu, což může vést k výraznému úbytku signálu hlavně u pixelů, které jsou na opačné straně, než je výstup z čipu (musí putovat dlouhou cestu k výstupu). Aby se neztratila při tomto přenosu veškerá informace, musí jeho účinnost dosahovat hranice takřka 100 % [11].

Výstupní napětí čipu je digitalizováno elektronikou kamery, která taktéž zavádí určitou úroveň šumu. Velmi dobrá elektronika generuje natolik malý šum, že vyčítací šum celého systému odpovídá čtecímu šumu CCD čipu samotného. Čtecí šum je vyjadřován v elektronech, zatímco šum elektroniky je obvykle vyjadřován jako směrodatná odchylka ve voltech. Každý výstupní uzel CCD čipu je tedy charakterizován převodním poměrem „volty/elektron“.

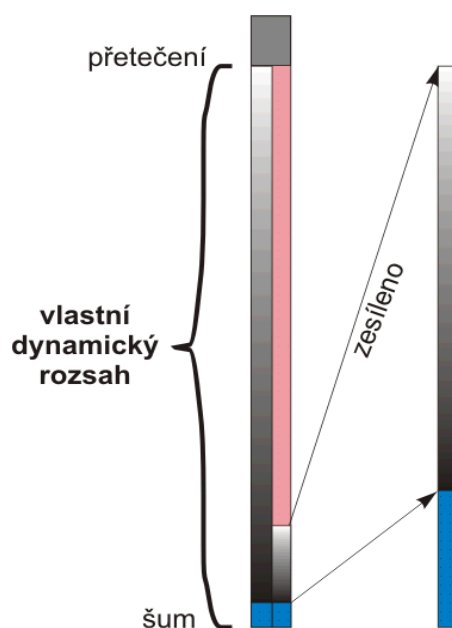
Převodový poměr

Při generování matice čísel A/D převodníkem dochází k převádění elektronů na číselný výstup převodníku v ADU jednotkách. Výstupní uzel CCD čipu konvertuje náboj na napětí v určitém poměru a elektronika kamery konvertuje napětí na čísla (ADU jednotky) rovněž v určitém poměru. Výsledný poměr se pak udává v $e-/ADU$ a určuje kolik elektronů zachycených v potenciálové jámě čipu je třeba k zvýšení inkrementu čísla ve výsledném obraze [6].

Citlivost

Citlivost je odezva detektoru na dopadající světlo [7]. Elektrický náboj v pixelu je limitován z jedné strany působením vnějších vlivů a z druhé strany technickými vlastnostmi CCD a jeho buněk, které udávají nejvyšší možné napětí, které je buňka senzoru schopna přenést [12]. Pro velké intenzity dochází k saturaci a detektor již nemá lineární odezvu. Vzhledem k tomu, že hladina šumu je u CCD prvku konstantní, zvýšením citlivosti zesílením se zvyšuje mimo užitečného obrazového signálu i šum. S rostoucí citlivostí obvykle klesá dynamický rozsah čipu [7].

Při ovládání citlivosti čipu pomocí procesoru přiřadíme změně hodnoty ADU jinou hodnotu napětí. Jestliže hodnota napětí bude menší (větší), dojde k zvýšení (snížení) citlivosti snímače. Pokud CCD prvek nastavíme na vyšší citlivost, snížíme tím jeho odstup od šumu a také jeho dynamický rozsah bude menší a obrázek bude méně kvalitní.



Obr. 11: Zesílení citlivosti čipu [4]

Analogově digitální převodník

Analogově digitální převodník klasifikuje vzorky analogového (spojitého) napětí na každém pixelu a převádí je do několika diskretních úrovní. Jelikož je vše zaznamenáno v binární soustavě logického obvodu, je použito pouze dvou úrovní daných číslicemi 0 a 1. Nulovému signálu napětí, a tedy i jasu, odpovídá zcela černá barva. Úplnému napětí odpovídá bílá barva [7].

Převodník dokáže rozlišit i mnoho meziúrovní. N-bitový A/D převodník je schopen převést signál do 2^n úrovní jasu. S rostoucím počtem bitů ale také roste náročnost zpracování, což celý proces zpomaluje. Při volbě A/D převodníku je vhodné se zaměřit zejména na dynamický rozsah čipu.

ADU (Analog Digital Unit) je bezrozměrná instrumentální jednotka signálu na výstupu A/D převodníku. Hodnota ADU určuje hodnotu jasu pixelu v závislosti na počtu úrovní daných velikostí A/D převodníku. Signál nabývá hodnot od 0 do $(2^n - 1)$ ADU, kde n je počet bitů A/D převodníku (10-16). U CCD kamer to bývá 65 535 ADU a u digitálních fotoaparátů 4095 ADU.

Dynamický rozsah čipu

Dynamický rozsah čipu je poměrem největšího a nejmenšího možného zachytitelného signálu, a tedy skutečným rozsahem zaznamenaného náboje (převedeného poté na napětí) na jednotlivých pixelech [7]. Problém s dynamickým rozsahem nastává u malých čipů, například v mobilních telefonech, kde malé pixely nejsou schopny zachytit dostatečné množství fotonů, a tak i poměr největšího a nejmenšího zachytitelného signálu bude nízký. Velké čipy jsou naopak schopny naakumulovat větší množství fotonů, proto dokážou plně využít i větších A/D převodníků, které jsou poté schopny rozpoznat velké množství úrovní jasu.

Blooming

Dynamický rozsah je z jedné strany omezován vlastním šumem buňky a z druhé strany saturací. K saturaci dochází za předpokladu, že je generovaný náboj na pixel větší jak jeho kapacita. Pixel je tak osvětlen takovým množstvím světla, že generovaný náboj nemůže být uchován v jeho potenciálové studni a elektrony začnou přetékat do sousedních pixelů, dochází tak k přetečení náboje do sousedních pixelů a rozkvetení fotografie (bloomingu), který se projevuje typickými pruhy v obraze u jasných bodů [5].



Obr. 12: Příklad bloomingu

Technologií anti-blooming gate lze tomuto přetékání předejít. Velkou slabinou těchto speciálních elektrod určených k odvodu přebytečného náboje je fakt, že zakřivují charakteristiku odezvy daleko před dosažením saturace, což způsobuje nelineární odezvu (nelinearita se projevuje zejména v horní třetině odezvy) na světlo. Proto se nepoužívají pro přesné fotometrické aplikace ani u astrofotografií. Své využití naopak nacházejí u uměleckého fotografování. V astrofotografii se k potlačení bloomingu využívá místo jedné dlouhé expozice součtu několika expozic kratších, které jsou ve výsledném obraze sečteny [3].

Binning

Binning je hardwarové sdružování pixelů, které lze použít výhradně u CCD čipů [3]. Je to schopnost slévat náboje okolních pixelů během vyčítání, takže náboj digitalizovaný ve výstupním uzlu představuje součet osvětlení pixelů slitých dohromady. Pixely je možné slévat v horizontálním směru, ve vertikálním směru či v obou směrech dohromady. Maximální počet pixelů, které je možno slít dohromady, zpravidla závisí na elektronice kamery a na jejím firmwaru [5]. Důsledky použití binningu jsou: zmenšení počtu zobrazovacích elementů (rozlíšení), zvýšení dynamického rozsahu sdružených pixelů, zrychlení odečtu informace (zmenšení objemu dat) a zlepšení poměru signálu k šumu [3]. Binning se může provádět buď přímo na čipu nebo softwarově. Oba přístupy jsou si rovnocenné a každý má své klady a zápory. Binning přímo na čipu umožňuje redukci nežádoucích vlivů na signál vlivem čtecího šumu. Softwarový binning zabraňuje přetečení náboje do sousedních pixelů. Binning přímo na čipu jde se softwarovým binningem i vzájemně kombinovat. Z hlediska detekce slabých signálů je lepší použít binning přímo na čipu, jelikož při slabém signálu není pravděpodobné přetékání náboje.

5. Zpracování obrazu

Ve vyčteném surovém obraze (Raw image) jsou různé rušivé prvky, které souvisí s vlastnostmi snímače (např. temné a horké pixely). Následným zpracováním obrazu se dají potlačit temné či horké pixely, nechtěné gradienty pozadí, redukovat šum, obraz zaostřit případně zdůraznit detaily apod. Toto zpracování ale pozmění informace o poloze a jasnosti objektů. Avšak existuje také zpracování obrazu, které zlepšuje vzhled obrazu, ale zvyšuje jeho vědeckou hodnotu (kalibrace obrazu). Kalibrace obrazu se skládá obecně ze dvou částí,

odečtení temného snímku a aplikace flat fieldu, tj. odezvy celé snímací soustavy (dalekohled, filtry, CCD čipy) na rovnoměrné osvětlení [5].

Temný snímek (Dark frame)

Dark frame je snímek pořízený při uzavřené mechanické závěrcce (čip musí být zcela zacloněn). Je exponovaný stejnou dobu a za stejných podmínek jako raw image při uzavřené závěrcce [11]. Dark frame se používá k regulaci temného proudu detektoru. Jelikož je velikost temného proudu za daných podmínek stále stejná či velice podobná, může se temný snímek od raw image jednoduše odečíst, čímž se získá kvalitnější obraz [5].

Pro potlačení náhodných jevů se pořídí větší množství dark framů, které se pak zprůměrují a vytvoří výsledný master dark frame, který se pak odečte od raw image. Nejlepší možností je nasnímat polovinu dark framů před expozicí a polovinu po ní [11]. Pokud ale elektronika kamery dokáže udržet teplotu čipu v rozmezí 0,1 °C, stačí k odečtu pouze jediný dark frame. Závislost temného proudu na teplotě je hlavní důvod, proč astronomické CCD kamery vyžadují regulované chlazení [5].

Chlazení CCD čipů

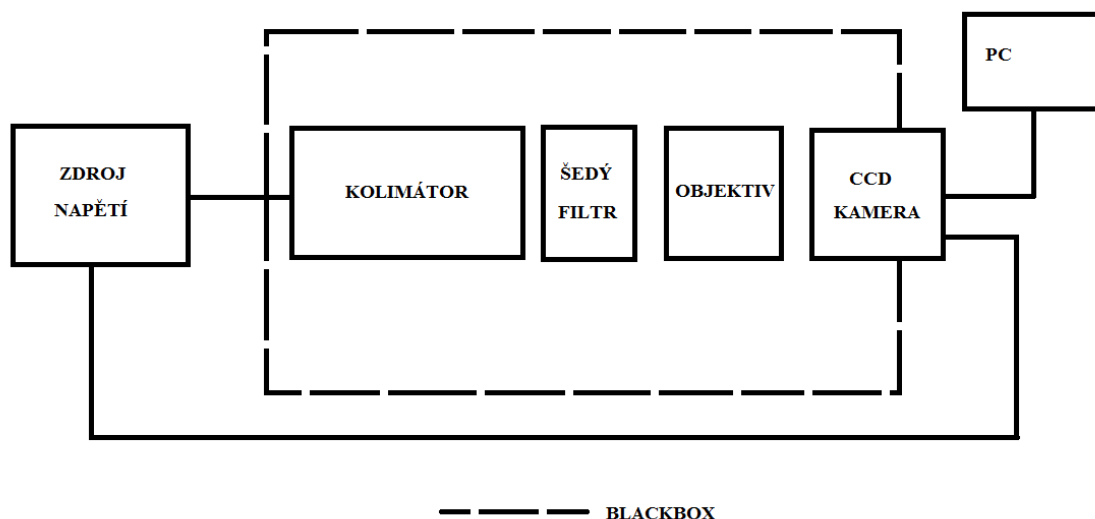
Při nízké teplotě klesá intenzita šumu. Z tohoto důvodu se používá u CCD chlazení. Nejlepší způsob chlazení je pomocí zkapalněných plynů (nejčastěji se používá helium a dusík). Toto chlazení je ovšem dost drahé, a proto se využívá o něco dostupnější suchý led (pevný oxid uhličitý). Avšak nejlevnější a nejpohodlnější metodou je chlazení Peltierovým článkem, jenž pracuje na principu termoelektrického Peltierova jevu. K odvedení ohřátého vzduchu napomáhá větráček [11].

Aplikace flat fieldu

Snímek flat fieldu slouží ke korekci defektů (např. vinětace, prach na senzoru), které způsobují nerovnoměrné osvětlení obrazového pole, estetické kazy a nepřesnost měření [6]. Flat field se získá vyfotografováním a zprůměrováním série snímků nějaké rovnoměrně osvětlené plochy. Je třeba dbát, aby byla konfigurace všech prvků aparatury stejná jako při fotografování daného objektu, aby se zajistil stejný chod paprsků. Expozici se volí tak, aby se zaplnily pixely z poloviny jejich kapacity [11].

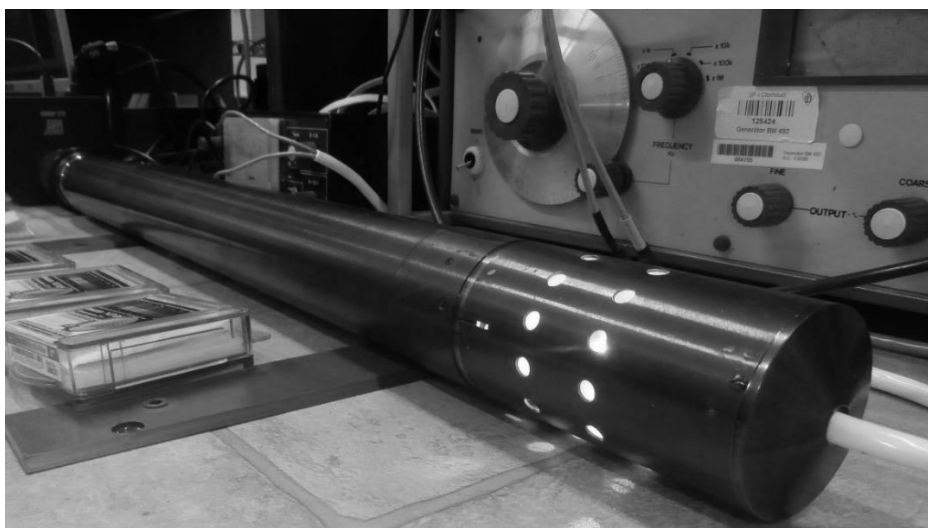
6. Experimentální měření

6.1. Prvky měřicí soustavy



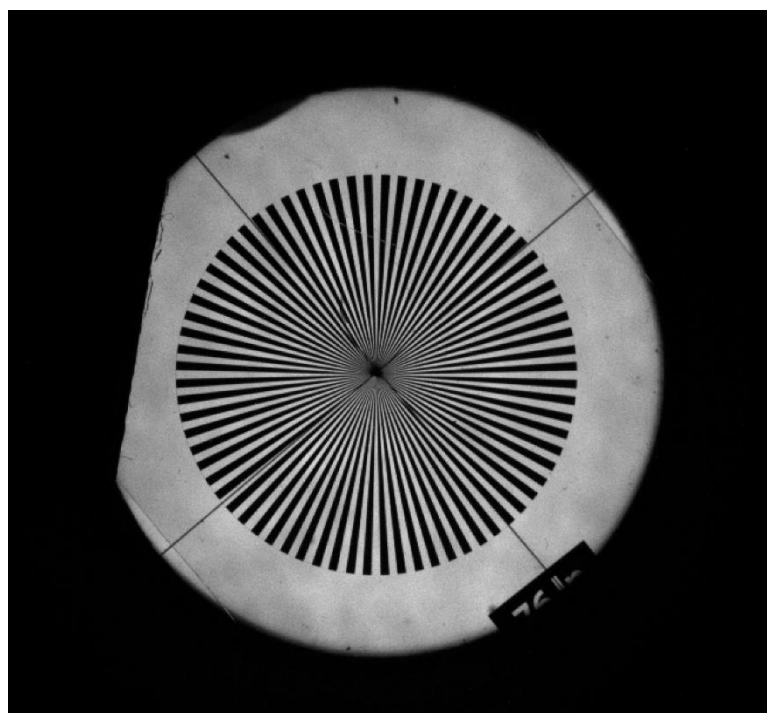
Obr. M1: Blokové schéma soustavy

Měřicí soustava se skládá z kolimátoru, testu, analyzované kamery s objektivem a napájecího zdroje. Kolimátor o ohniskové vzdálenosti 1000 mm, v jehož ohnisku je test Siemsenovy hvězdy, který je osvětlen zdrojem. Pro potlačení rušivého vnějšího osvětlení při měření je sestava umístěna ve stíněném boxu (Black boxu). K prosvětlení kolimátoru je použita nízkonapěťová žárovka (12 V), jejíž vyzařování je stálejší v čase než u typické žárovky na 230 V. Na výstupu kolimátoru je připojená zkoumaná CCD kamera připojená k počítači a externímu napájení.



Obr. M2: Fotografie měřicí soustavy

V ohnisku kolimátoru je umístěna Siemensova hvězda s pravoúhlnou modulací (72 lp). Tento test je vhodný mimo jiné k určení rozlišovací schopnosti optické soustavy. Pozorovatel při sledování testu vidí uprostřed kruhového testu nerozlišenou šedou oblast, jejíž průměr je přímo úměrný rozlišovací schopnosti. Nerozlišená plocha by měla být ideálně kruhová. Pokud není tvar nerozlišené plochy kruhový, optický systém je zatížen optickými vadami (astigmatismem).



Obr. M3: Test Siemensovy hvězdy

Vlastnosti měřené kamery

K dispozici pro měření mi byla kamera G2 – 4000 od společnosti Moravské přístroje, používající nízkošumový „Interline Transfer“ CCD detektor Kodak KAI-4022. Pokročilé výrobní postupy umožňující vyrobit transparentní elektrody a mikročočky na povrchu čipu zajišťují absolutní kvantovou účinnost až 55 %. Temný proud těchto čipů je velice nízký, takže výsledný poměr signál/šum je velice příznivý [10]. K této kameře je připojen objektiv o ohniskové vzdálenosti 125 mm. Celé měření je realizováno při konstantní hodnotě clony (clonové číslo 8).

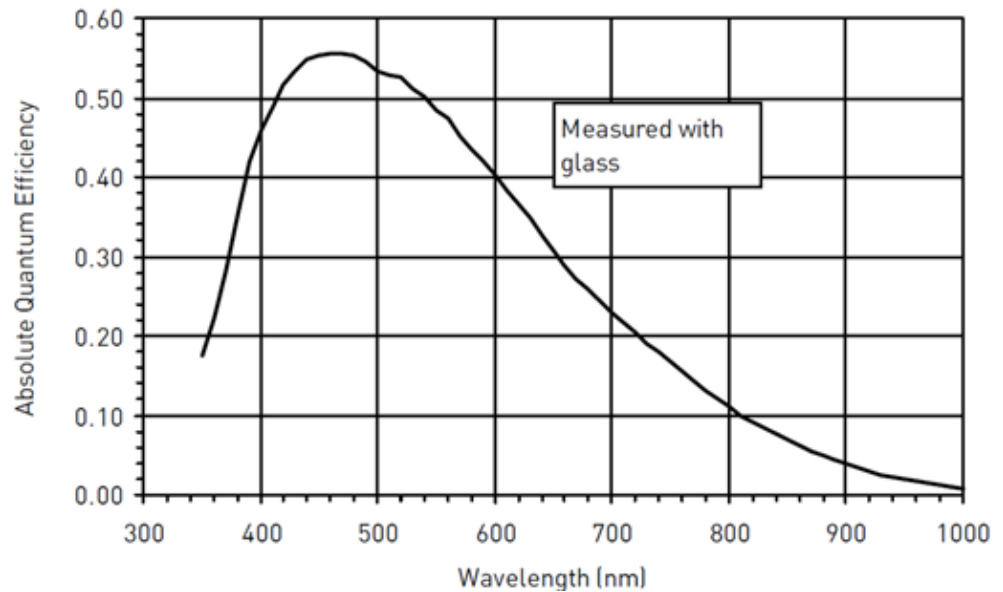


Obr. M4: Kamera G2-4000 připojená k měřicímu kolimátoru

Tab. 1 Specifikace čipu KAI-4022 podle výrobce [10]:

Rozlišení	2056 (H) × 2062 (V) pixelů
Velikost pixelu	7,4 μm (H) × 7,4 μm (V)
Obrazová plocha	15,2 × 15,3 mm
Plná kapacita pixelu	~40 000 e ⁻
Temný proud	40 e ⁻ /s/pixel při -40 °C

Quantum Efficiency
 Monochrome Quantum Efficiency
 with microlens



Obr. M5: Kvantová účinnost udávaná výrobcem [10]

Elektronika kamery

Elektronika kamery obsahuje 16 bitový A/D převodník s korelovaným dvojitým vzorkováním zajišťujícím vysoký dynamický rozsah. Vyčítací šum je limitovaný pouze samotným CCD čipem. Kamera umožňuje kombinovat binning v obou osách až po 4x4. Při Low-noise (LN) čtení má elektronika nižší systémový čtecí šum, ale doba stažení obrazu je vyšší [10].

Tab. 2: Specifikace elektroniky kamery G2-4000 [10]

Zesílení	0,4 e ⁻ /ADU (1 × 1 binning)
	0,8 e ⁻ /ADU (ostatní binning)
Systémový čtecí šum	7 e ⁻ RMS (LN čtení)
	9 e ⁻ RMS (standardní čtení)
Stažení plného obrazu	6,8 s (LN čtení)
	5,7 s (standardní čtení)

Chlazení čipu

O chlazení čipu se stará regulované dvoustupňové termoelektrické chlazení s nuceným oběhem vzduchu zajišťující pokles teploty čipu až o 50 °C pod okolní teplotu a přesnost regulace 0,1 °C [10].

Tab. 3: Specifikace chlazení čipu [10]

Chlazení CCD čipu	Termoelektrické (Peltierovy moduly)
TEC moduly	Dva stupně
Max. rozdíl teplot	50 °C pod okolí maximálně
	45 °C pod okolí typicky
Přesnost regulace	+/-0,1 °C
Chlazení horké strany	Nucený oběh vzduchu (50 mm ventilátor)

Softwarové zpracování

Pro řízení kamery a manipulaci se snímky jsem využil program SIPS (Scientific Image Processing System), pomocí nějž jsem řídil expozici, chlazení, binning a odečítal temné snímky.

6.2. Průběh měření

Na začátku měření je změřena výstupní úroveň osvětlení na výstupu kolimátoru. Její hodnota je 10 luxů. Pro snížení osvětlení v měřeních jsou použity šedé neutrální filtry s konstantním útlumem pro rovnoměrné ztmavení obrazu pro všechny vlnové délky viditelného světla. Použil jsem filtry o propustnosti 25 %, 12,5 %, 1,5 % a jejich kombinace.

Proces měření dále spočívá v expozici daného testu CCD kamerou. Expoziční čas je u všech měření zvolen na 1 sekundu. Při prvním měření je kamera nechlazena, takže se teplota čipu pohybuje kolem 23,5 °C. Nejprve je exponován temný snímek pro různé binningy. Dále jsou exponovány snímky pro různé hodnoty osvětlení čipu, tj bez filtru a s filtrem (bez a pro stejné binningy). Následně je čip ochlazen Peltierovým článkem a celý proces se opakuje. Čip je chlazen postupně na teploty 20 °C, 15 °C, 10 °C, 5 °C a 0 °C.



Obr. M6: Filtry s různou propustností

6.3. Vyhodnocení šumu pomocí temných snímků

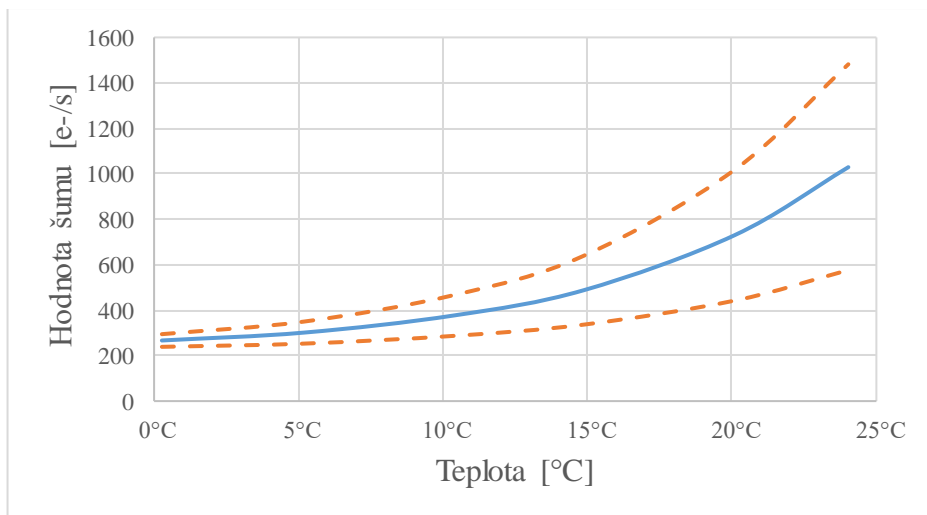
Při tomto měření nás zajímají pouze temné snímky, počítáme, jak se mění při změně teploty a použití binningu střední hodnota šumu (SHŠ), která udává průměrnou hodnotu šumu jednotlivých pixelů. Náboj zde vzniká jen díky temnému proudu, veškerý náboj vygenerovaný na čipu má tedy charakter šumu. Dalším parametrem je směrodatná odchylka (SO). Směrodatná odchylka je mírou statistické disperze. Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot od jejich aritmetického průměru.

Tab. 4: Hodnoty dark framu u chlazené kamery

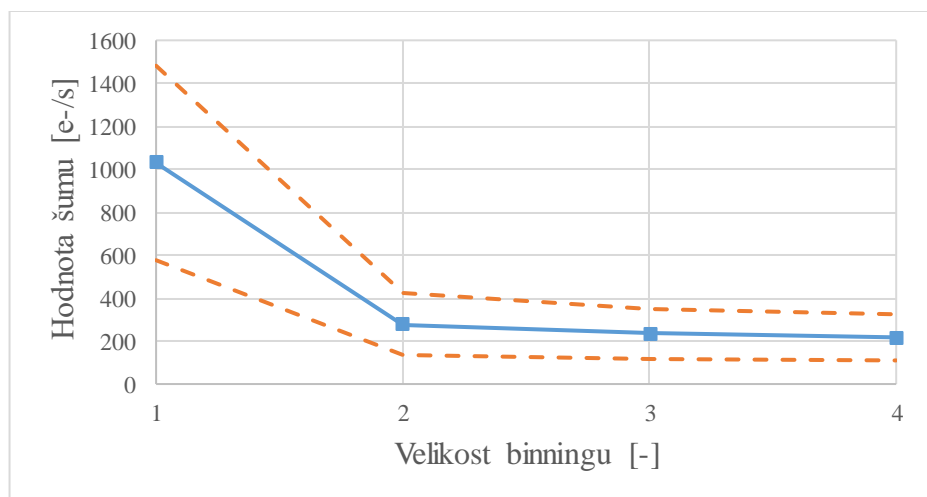
Teplota	0,27 °C	5,19 °C	10,40 °C	14,88 °C	20,09 °C	24,03 °C
Střední hodnota šumu [e-/s]	266,579	301,373	377,108	488,127	729,609	1029,05
Směrodatná odchylka [e-/s]	27,9014	48,4267	89,9262	151,634	287,572	452,737
Střední hodnota šumu [ADU]	437,015	494,054	618,21	800,209	1196,08	1686,96
Směrodatná odchylka [ADU]	45,74	79,388	147,42	248,58	471,43	742,191

Tab. 5: Hodnoty dark framu u nechlazené kamery při použití binningu

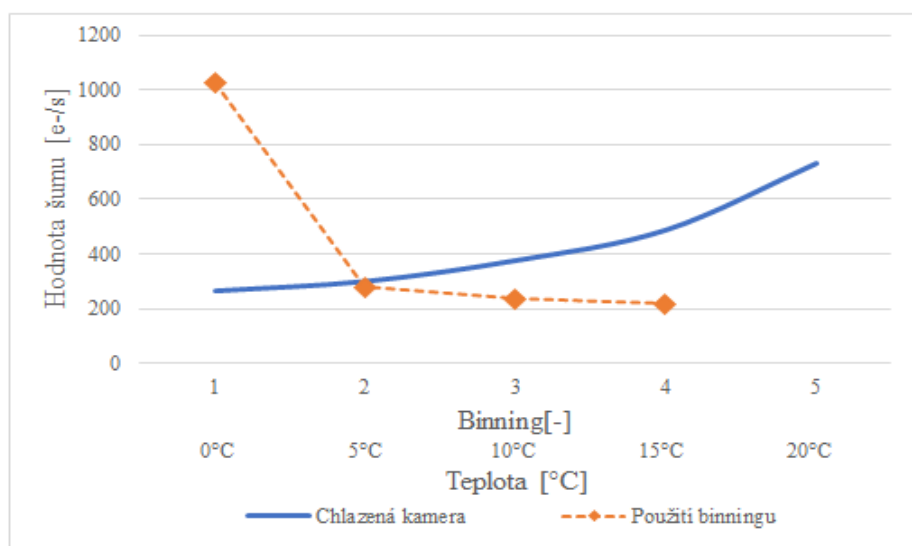
Binning	1x1	2x2	3x3	4x4
Střední hodnota šumu [e-/s]	1029,05	277,7928	234,2717	217,202
Směrodatná odchylka [e-/s]	452,737	141,5676	116,0964	107,342
Střední hodnota šumu [ADU]	1686,96	455,398	384,052	356,069
Směrodatná odchylka [ADU]	742,191	232,078	190,322	175,971



Graf 1: Závislost šumových hodnot na chlazení kamery



Graf 2: Závislost šumových vlastností u nechlazené kamery při použití binningu



Graf 3: Porovnání chlazení a binningu

Plná čára v grafu 3 ukazuje, jak se mění střední hodnota šumu se snižujícím se chlazením. Čárkovaná čára ukazuje změnu při použití binningu u nechlazené kamery (24 °C). Z grafu můžeme vyhodnotit, že bude mít na snížení střední hodnoty šumu přibližně stejný účinek ochlazení kamery o 20 °C jako použití binningu 2x2.

6.4. Měření kontrastu testu

Měření kontrastu testu je pouze doplňkové měření. Pomocí kontrastu testovacího obrazce je posuzován vliv šumu v obraze na kvalitu přijatého signálu. Pro vyhodnocení kontrastu testu jsem využil programu Matlab, ve kterém jsem zprůměroval hodnoty pixelů světlé oblasti (I_{max}) a hodnoty pixelů tmavé oblasti (I_{min}) testu okrajů výseče Siemensovy hvězdy. Pro kontrast k testu pak platí:

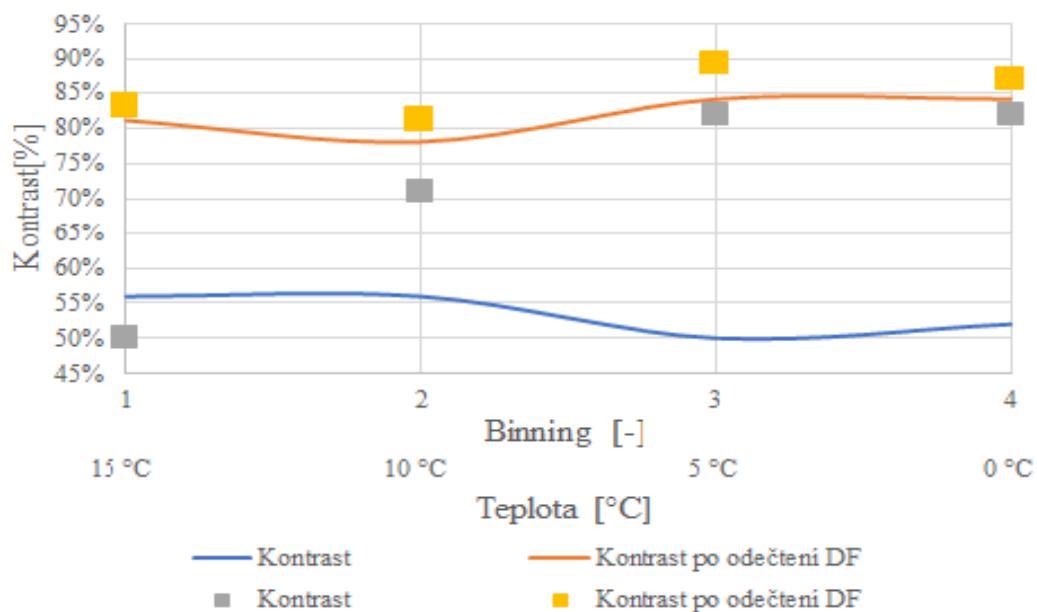
$$k = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (1.1)$$

Tab. 6: Hodnoty pro kontrast testu bez použití filtru při změně teploty

Teplota čipu	15 °C	10 °C	5 °C	0 °C
Kontrast	56 %	56 %	50 %	52 %
Kontrast po odečtení DF	81 %	78 %	84 %	84 %

Tab. 7: Hodnoty pro kontrast testu bez použití filtru při teplotě 20 °C a změně binning

Binning	1x1	2x2	3x3	4x4
Kontrast	50 %	71 %	82 %	82 %
Kontrast po odečtení DF	83 %	81 %	89 %	87 %

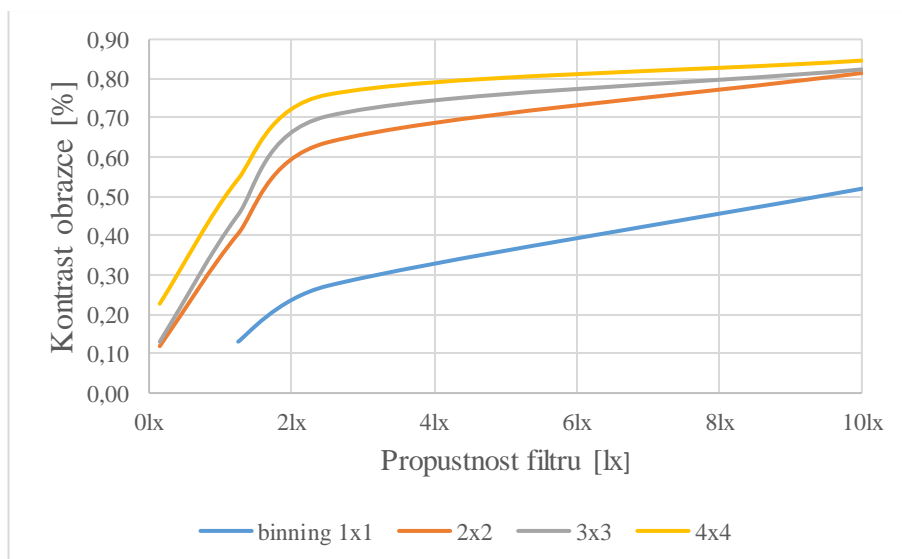


Graf 4: Porovnání kontrastu před a po odečtení temného snímku

V grafu 4 odpovídají plné čáry změně teploty a znaky použití binningu. Teplota má na kontrast testu nízký vliv. Měření je zatíženo určitou chybou, a proto hodnoty kontrastu testu s měnící se teplotou kolísají. Z grafu je patrné, že odečtení temného snímku má pozitivní vliv na kontrast testu zejména u obrazů, ve kterých nebyl použit binning.

Tab. 8: Vliv binningu na kontrast testu při chlazení kamery na 0 °C za různého osvětlení.

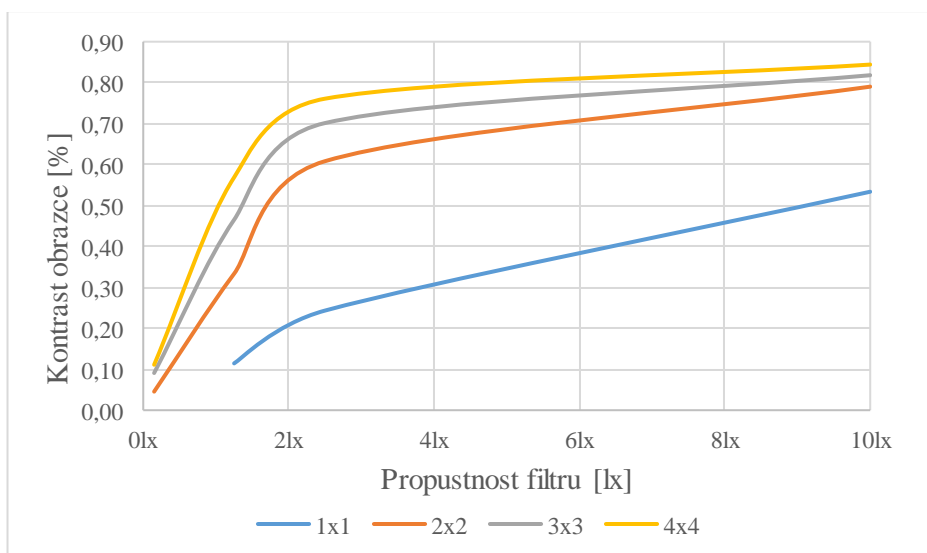
Osvětlení/binning	1x1	2x2	3x3	4x4
10lx	0,52	0,81	0,82	0,85
2,5lx	0,27	0,64	0,70	0,76
1,25lx	0,13	0,41	0,45	0,54
0,15lx		0,12	0,13	0,23



Graf 5: Vliv binningu na kontrast testu při teplotě 0 °C

Tab. 9: Vliv binningu na kontrast testu při teplotě 20 °C za různého osvětlení

Osvětlení/binning	1x1	2x2	3x3	4x4
10lx	0,53	0,79	0,82	0,84
2,5lx	0,24	0,61	0,70	0,76
1,25lx	0,11	0,33	0,47	0,57
0,15lx		0,05	0,09	0,11



Graf 6: Vliv binningu na kontrast testu při teplotě 20 °C za různého osvětlení

Z naměřených hodnot je patrné, že když se bude zvyšovat osvětlení, kontrast rychle poroste. Při porovnání naměřených hodnot vidíme, že nechlazená kamera s binningem má na kontrast lepší vliv než chlazená kamera bez binningu, zejména u velmi slabých signálů.

Například při propustnosti filtru 1,5 % bez binningu byl kontrast tak malý, že se ztratil v šumu i při ochlazení kamery na 0 °C. Pokud je použit binning, tak i bez chlazení, jsem pro tuto nízkou hodnotu osvětlení schopen zaznamenat signál a vyhodnotit kontrast testu.

6.5. Určení rozlišovací schopnosti

Rozlišovací schopnost udává minimální vzdálenost dvou ještě rozlišitelných bodů. S ohledem na primární určení kamery (měření jasu hvězd) bude dále zjišťována úhlová rozlišovací schopnost, tj. elementární úhel, které svírají dva od sebe ještě rozlišitelné body. Čím je menší hodnota rozlišovací schopnosti tím jemnější detaily jsme schopni rozlišit.

Určení rozlišovací schopnosti je v mém měření pouze doplňkové. Standardní je pro vyhodnocení kvality optické soustavy. V mém měření sleduji, jak se mění úhlová velikost minimálního rozlišitelného segmentu v obrazu v závislosti na šumu a intenzitě signálu. Výpočet rozlišovací schopnosti probíhá ve třech fázích.

V první fázi potřebujeme vypočítat ideální úhlovou rozlišovací schopnost systému z. Jestliže r je velikost strany pixelu kamery a f je ohnisková vzdálenost použitého objektivu, pak platí pro dostatečně malý úhel vztah:

$$z = \frac{r}{f} [rad]. \quad (2.1)$$

Ve druhé fázi vypočítáme úhel odpovídající hustotě testu Siemensovy hvězdy na okraji v obrazové rovině snímače. K určení periody testu odečteme průměr D v pixelech a počet výsečí Siemensovy hvězdy. Dosazením do vztahu získáme počet pixelů připadajících na jednu periodu testu:

$$t = \frac{\pi \cdot D}{p} [-]. \quad (2.2)$$

Hledaný odpovídající úhel je pak dán vztahem:

$$h_0 = z \cdot t [rad]. \quad (2.3)$$

Ve třetí fázi se určí rozlišovací schopnost z průměru nerozlišeného středu hvězdy N :

$$h = \frac{z \cdot t \cdot N}{D} = \frac{z \cdot \pi \cdot D \cdot N}{p \cdot D} = \frac{\pi \cdot z \cdot N}{p} [rad]. \quad (2.4)$$

Tab. 10: Hodnoty veličin pro výpočet rozlišovací schopnosti

Veličina	Symbol	Hodnota
Velikost pixelu*	r	7,9 μ m
Ohnisková vzdálenost	f	125mm
Počet výsečí hvězdy	p	72

*velikost pixelu je při použití binning rovna součinu binningu a jeho původní velikosti

Tab. 11: Tabulka závislosti rozlišovací schopnosti na osvětlení a binningu při teplotě 0 °C

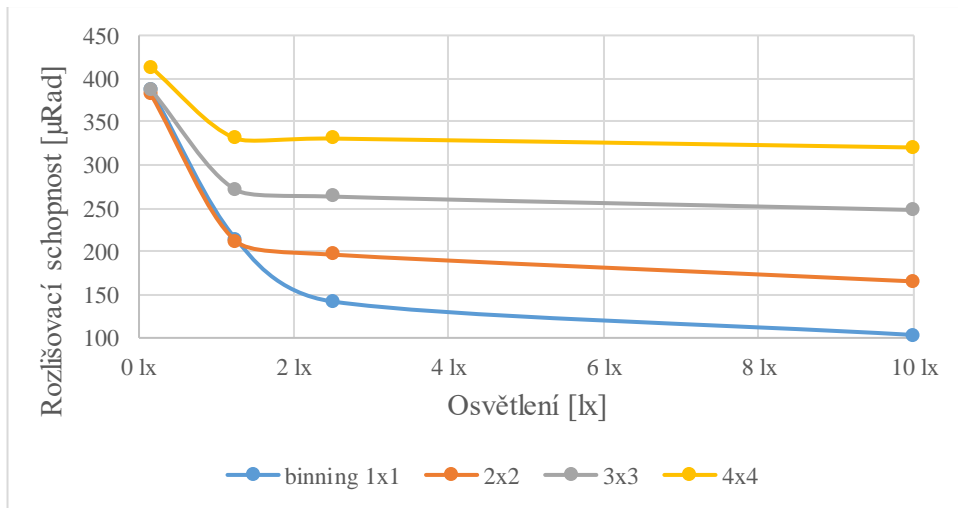
Rozlišovací schopnost při 0 °C [μ Rad]				
Binning/osvětlení	1x1	2x2	3x3	4x4
10,00lx	103,32	165,312	247,968	320,292
2,50lx	142,065	196,308	263,466	330,624
1,25lx	214,389	211,806	271,215	330,624
0,15lx	387,45	382,284	387,45	413,28

Tab. 12: Tabulka závislosti rozlišovací schopnosti na osvětlení a binningu při teplotě 10 °C

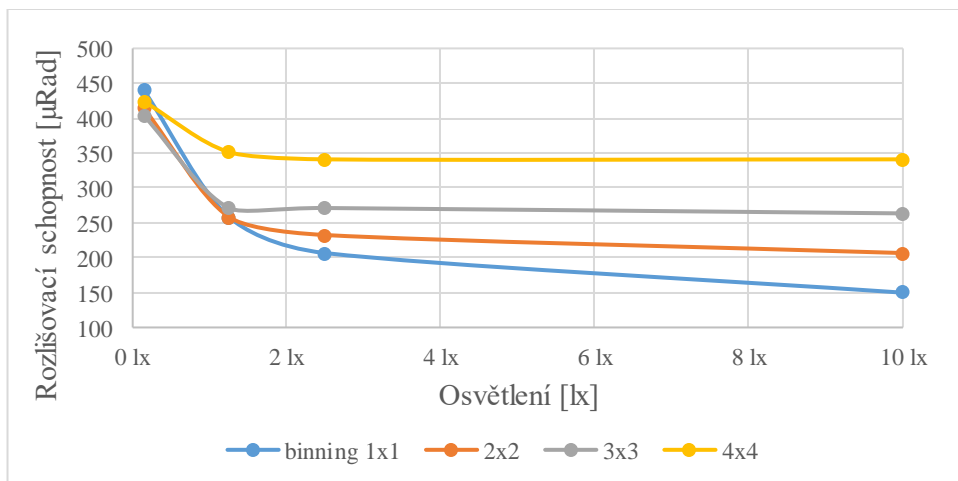
Rozlišovací schopnost při 10 °C [μ Rad]				
Binning/osvětlení	1x1	2x2	3x3	4x4
10,00lx	149,814	206,64	263,466	340,956
2,50lx	206,64	232,47	271,215	340,956
1,25lx	258,3	258,3	271,215	351,288
0,15lx	439,11	413,28	402,948	423,612

Tab. 13: Tabulka závislosti rozlišovací schopnosti na osvětlení a binningu při teplotě 20 °C

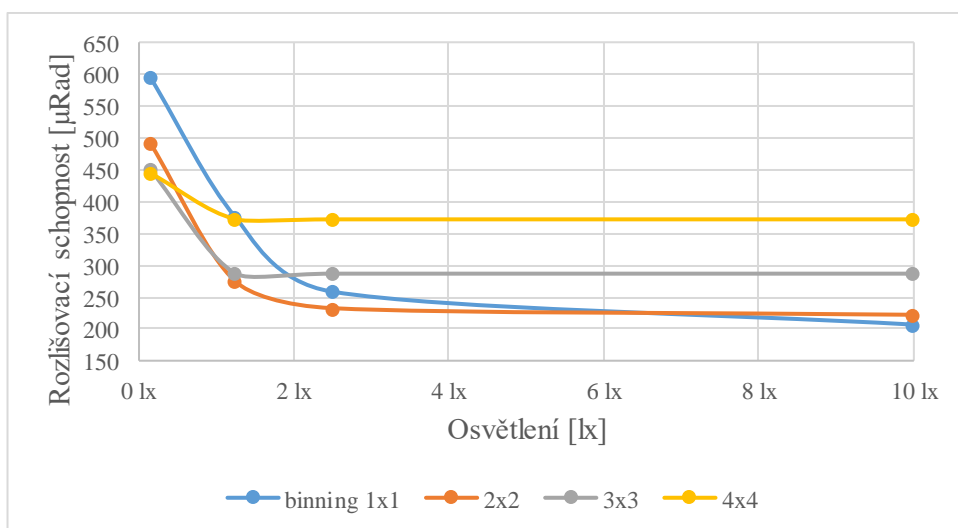
Rozlišovací schopnost při 20 °C [μ Rad]				
Binning/osvětlení	1x1	2x2	3x3	4x4
10,00lx	206,64	222,138	286,713	371,952
2,50lx	258,3	232,47	286,713	371,952
1,25lx	374,535	273,798	286,713	371,952
0,15lx	594,09	490,77	449,442	444,276



Graf 7: Graf závislosti rozlišovací schopnosti na osvětlení a binningu při teplotě 0 °C



Graf 8: Graf závislosti rozlišovací schopnosti na osvětlení a binningu při teplotě 10 °C



Graf 9: Graf závislosti rozlišovací schopnosti na osvětlení a binningu při teplotě 20 °C

Jak je z měření patrné, rozlišovací schopnost systému klesá se slábnoucím osvětlením a zvyšující se teplotou čipu. Nejlepší rozlišovací schopnosti dosáhneme při dostatečném osvětlení bez binningu, jenž má při dobrém osvětlení na rozlišovací schopnost velmi negativní vliv. Ovšem když dosáhneme určité úrovně velmi slabého osvětlení, rozlišovací schopnost se díky binningu nezhorší, ba dokonce na ni bude mít binning pozitivní vliv.

Závěr

V bakalářské práci jsou shrnuty úskalí a přednosti dvou základních typů maticových detektorů optického záření CCD a CMOS čipů. V práci jsem se snažil objasnit základní princip maticových detektorů, upozornit na specifika detektorů, vhodnost využití a úskalí spojené s šumy v detektorech. V experimentální části byla zkoumaná CCD kamera podrobená testu, jehož cílem bylo objasnit, jak tato kamera bude reagovat na různé podmínky měření. Cílem měření potom bylo porovnat vliv chlazení a binningu za různých úrovní osvětlení. Hodnotícími faktory pak byly velikost střední hodnoty šumu temného snímku, kontrast rozlišovací schopnost testu Siemensova hvězda.

U měřené kamery je možné dosáhnout snížení šumu odpovídajícího chlazení i za pomoci binningu. Z výsledku měření vyplývá, že binning 2x2 odpovídá změně teploty chlazením o 20 °C. Současně byl potvrzen význam využití temného snímku ke snížení šumu v obraze. Odečtení temného snímku zlepšuje odstup signálu od šumu a tím i kontrast obrazu a rozlišovací schopnost se bude více blížit teoretické.

Seznam použité literatury

- [1] URBAN, František. *Optoelektronika. 2.*, přeprac. vyd. Brno: Ediční středisko VUT, 1989, 314 s. Učební texty vysokých škol
- [2] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETEČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/748-ccd-zakladni-princip>
- [3] HADERKA, Ondřej. *Skriptum* [elektronická skripta]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://jointlab.upol.cz/haderka/ds/detsvet.pdf>

- [4] *Charge-coupled device*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2017-04-25].
Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device
- [5] CAGAŠ, Pavel; CAGAŠ, Roman; KOFRÁNEK, Jirí. *CCD KAMERY PRO SNÍMÁNÍ EXTRÉMNĚ SLABÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ*.
- [6] CAGAŠ, Pavel. *CCD kamery v astronomii* [online]. [cit. 2017-04-26].
Dostupné z: <http://pozorovanislunce.eu/userfiles/files/dokumenty/workshop-II-ccd-v-astronomii-uprava.pdf>
- [7] *Víme, proč máte na fotkách ošklivý šum. Jak pracuje snímací čip v digitálu*. [online]. 2007 [cit. 2017-04-25].
Dostupné z: http://technet.idnes.cz/vime-proc-mate-na-fotkach-osklivy-sum-jak-pracuje-snimaci-cip-v-digitalu-1ni-/tec_foto.aspx?c=A070625_094646_tec_foto_jlb
- [8] *Digitální kamery a jejich funkce* [online]. [cit. 2017-04-26].
Dostupné z: <http://www.videoproduce.cz/videokamery.htm>
- [9] HOWELL, Steve. *Basics of Charge Coupled Devices* [online]. [cit. 2017-04-26].
Dostupné z: https://www.noao.edu/meetings/gdw/files/Howell_CCDs.pdf
- [10] CCD kamery G2-2000 a G2-4000. *Moravské přístroje, CCD kamery pro astronomii* [online]. [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <http://www.gxccd.com/art?id=361&lang=405>
- [11] BÍLEK, Michal. *Fotometrická analýza nedokonalého CCD obrazu*. Praha, 2009. Bakalářská práce. Astronomický ústav UK. Vedoucí práce Doc. RNDr. Marek Wolf, CSc.
- [12] ŽBÁNKOVÁ, Pavla. *CCD senzory* [online]. 2002 [cit. 2017-05-03].
Dostupné z: http://www.fch.vut.cz/~zmeskal/obring/presentace_2002/07_ccd_senzory.pdf
- [13] *Historie digitální fotografie* [online]. [cit. 2017-07-15].
Dostupné z: <http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2004/xkadlec2.htm>
- [14] LUKEŠ, Martin. *Skončí CCD a CMOS snímače na smetišti?* [online]. [cit. 2017-07-15].
Dostupné z: <https://www.megapixel.cz/skonci-ccd-a-cmos-snimace-na-smetisti>
- [15] Snímače CMOS. *HPM Wiki* [online]. [cit. 2017-07-24]. Dostupné z: <http://noel.feld.cvut.cz/vyu/a2b31hpm/index.php/Uzivatel:Aubreja3>