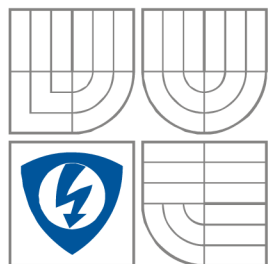


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MĚŘENÍ POLOHY A RYCHLOSTI OBJEKTŮ POMOCÍ ŘÁDKOVÝCH OPTICKÝCH SNÍMAČŮ

MEASUREMENTS OF THE OBJECT POSITION AND VELOCITY BY USING OPTICAL
SCANNERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR UNCAJTIK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO, 2008

- **Originál zadání práce:** originál zadání vydává sekretariát UREL; bez něj nebude práce přijata.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Petr Uncajtik
Bytem: Rokycanova 2153, Pardubice, 53002
Narozen/a (datum a místo): 18. února 1984 v Pardubicích

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Měření polohy a rychlosti objektů pomocí řádkových optických snímačů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: 9.6.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. května 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

MĚŘENÍ POLOHY A RYCHLOSTI OBJEKTŮ POMOCÍ ŘÁDKOVÝCH OPTICKÝCH SNÍMAČŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

Bc. PETR UNCAJTIK

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

ANOTACE

Cílem Diplomové práce je ve spolupráci s firmou PROTOTYPA prozkoumat využití řádkových optických snímačů pro měření polohy a rychlosti objektů. V úvodní části práce je vysvětlen princip činnosti snímacích prvků CCD a fotodiod. Dále jsou rozebrány jednotlivé metody pro snímání objektů. Jsou zde naznačeny různé polohy snímačů a letícího objektu. Následuje úvod do problematiky dopadu paprsků světla na snímač při použití různých variant zdrojů světla a optických soustav. Další část práce představuje dva snímače, které byly vybrány po dohodě s pracovníky firmy PROTOTYPA. Jsou uvedeny technické parametry zařízení a mechanické nákresy. V závěrečné části je popsáno, provedeno a vyhodnoceno základní experimentální měření se snímačem LCCD 2048S-14. Experimenty jsou zaměřeny na statické a dynamické děje. Ve statické části bylo ověřeno zobrazování nepohyblivých předmětů na CCD snímači ve vnitřních prostorech při změně zaostření objektivu, výšky a tvaru předmětu. Pro vyhodnocení bylo použito programu MATLAB. Dynamická část měření je zaměřena na pohybující se objekty.

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MEASUREMENTS OF THE OBJECT POSITION AND VELOCITY BY USING OPTICAL SCANNERS

MASTER'S THESIS

AUTHOR Bc. PETR UNCAJTIK
SUPERVISOR Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

ABSTRACT

The objective of Master's Thesis is to research the utilization of line optical sensors for object location's and speed measurement in cooperation with PROTOTYPA company. At the beginning of the Thesis there is an explanation of CCD sensor components and photodiodes working principals. Further are discussed particular methods of object sensing. There are schematics of different sensor locations and flying object. The other step deals with introduction to the question of ray impact on sensor in the way of using different light sources and optical systems. In the other part of the Thesis are presented two sensors, which have been chosen by PROTOTYPA company workers. Final part of the Thesis deals with description of executed experimental measurement with LCCD 2048S-14 type of sensor. Experiments are aimed for statical and dynamical processes. In statical part was checked displaying of fixed objects on CCD sensor in internal spaces on the assumption that changing of object-lens focalization, object's high and shape. For the evaluation was used of MATLAB program. Dynamical part of measurement is aimed for moving objects.

Klíčová slova:

Optický snímač, lineární řádkový snímač, CCD snímač, fotodiodové pole, obrazový bod

Keywords:

Optical scanners, linear image sensor, CCD sensor, photodiode array, picture element

Bibliografická citace práce

UNCAJTIK, P. Měření polohy a rychlosti objektů pomocí řádkových optických snímačů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření polohy a rychlosti objektů pomocí řádkových optických snímačů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za účinnou metodickou a pedagogickou pomoc a dále děkuji Ing. Bohumilovi Královi za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	- 11 -
2	PRINCIP ČINNOSTI SNÍMACÍCH PRVKŮ CCD	- 12 -
2.1	Buňka prvku CCD	- 12 -
2.2	Mechanismus posuvu náboje	- 13 -
2.3	Snímací prvek CCD typu FT	- 14 -
2.4	Snímací prvek CCD typu IL	- 16 -
2.5	Snímací prvek CCD typu FIT	- 16 -
2.6	Technologie HAD se zvýšenou rozlišovací schopností	- 17 -
2.7	Převod elektrického náboje na barevnou informaci	- 18 -
2.7.1	Barevné filtry	- 18 -
2.7.2	Hranolová optická dělicí soustava	- 19 -
2.8	Řádkový prvek CCD	- 20 -
3	PRINCIP ČINNOSTI FOTODIOD	- 22 -
3.1	Princip fotodiody	- 22 -
3.1.1	P-N přechod	- 22 -
3.1.2	Propustný směr	- 23 -
3.1.3	Závěrný směr	- 23 -
3.1.4	Fotovoltaický jev	- 24 -
3.2	Uspořádání fotodiody	- 24 -
3.3	Optické vlastnosti fotodiody	- 25 -
3.3.1	Citlivost fotodiody	- 25 -
3.3.2	V-A charakteristika fotodiody	- 25 -
3.3.3	Princip zapojení s fotodiodou	- 26 -
4	SROVNÁNÍ METOD PRO SNÍMÁNÍ OBJEKTŮ POMOCÍ ŘÁDKOVÉHO SNÍMAČE CCD	- 28 -
4.1	Návrh pro detekci letícího objektu pomocí snímače CCD	- 28 -
4.2	Návrh pro měření polohy objektu pomocí snímače CCD	- 28 -
4.3	Návrh pro měření rychlosti objektu pomocí snímače CCD	- 29 -
4.4	Návrh s přímým osvětlením snímače CCD	- 30 -
4.5	Návrh s nepřímým osvětlením snímače CCD	- 31 -
4.6	Srovnání výhod a nevýhod jednotlivých metod	- 31 -
5	ZOBRAZENÍ OBJEKTU NA SNÍMAČI	- 33 -
5.1	Zdroje světla a optické systémy	- 33 -
5.2	Systém s jedním bodovým zdrojem světla a lineárním CCD snímačem	- 34 -
5.3	Systém se dvěma bodovými zdroji světla a lineárním CCD snímačem	- 35 -
5.4	Podmínky realizace	- 37 -
5.4.1	Konstrukce světelného zdroje	- 37 -
5.4.2	Refrakce světla v krycím sklu CCD snímače	- 38 -
6	FOTODOVÉ POLE (PDA)	- 39 -
6.1	Základní katalogové údaje PDA S8865-64	- 39 -
6.2	Návrh zapojení na snímače PDA S8865-64 na desku plošných spojů	- 42 -
6.3	Řídící obvod pro fotodiodové pole PDA S8865-64	- 43 -
7	LINEÁRNÍ ŘÁDKOVÝ SNÍMAČ LCCD 2048S-14	- 47 -
7.1	Lineární řádková kamera LCCD 2048S-14	- 47 -
7.2	Základní katalogové údaje kamery	- 47 -

7.3	Rozhraní kamery	- 49 -
7.4	Nákres mechanických částí kamery	- 50 -
7.5	Srovnání optických parametrů PDA S8865-64 a CCD ILX551B.....	- 51 -
8	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	- 53 -
8.1	Blokové schéma experimentálního měření	- 53 -
8.2	Měřicí systém	- 54 -
8.2.1	Popis měřicího systému AVL 460	- 54 -
8.3	Zpracování naměřených dat	- 56 -
8.3.1	Použití programu MATLAB	- 58 -
8.3.2	Získání výstupních dat	- 59 -
8.3.3	Měření polohy a šířky pulzu.....	- 61 -
8.4	Experimentální statické měření ve vnitřních prostorech.....	- 62 -
8.4.1	Vliv výšky a zaostření	- 62 -
8.4.2	Vliv rozostření objektivu.....	- 65 -
8.4.3	Vliv tvaru předmětu	- 65 -
8.5	Experimentální dynamické měření ve vnitřních prostorech	- 66 -
8.6	Experimentální měření ve venkovních prostorech.....	- 68 -
9	ZÁVĚR.....	- 70 -
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 71 -
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	- 72 -
	PŘÍLOHY.....	- 73 -

1 ÚVOD

S měřením polohy a rychlosti objektů se lze dnes setkat v nejrůznějších oborech lidské činnosti. V projektu je pojednáno o možnosti měření polohy a rychlosti v oblasti jednorázových dějů pomocí řádkových optických snímačů. Úkolem projektu je získat teoretické rozbory a výsledky experimentů, které by posunuly hranice stávajících senzorů složených z prvků CCD a také umožnily nalézt a využít nové druhy snímačů složených z fotodiodových polí PDA.

Cílem diplomové práce je získání teoretických a praktických poznatků, které by přispěly k návrhům a konstrukcím nových řešení jednonúčelových případně univerzálnějších zařízení pro oblast zkoušek a diagnostiky jednorázových dějů s využitím CCD snímačů, diodových polí, případně pozičních detektorů (PSD).

Firma PROTOTYPA, která zadala téma diplomové práce, se ve své činnosti zabývá výzkumem, vývojem a výrobou balistických zařízení, výzkumem a vývojem zbraní a munice a slouží jako zkušebna zbraní a střeliva. Jednou z oblastí, kde firma vyvíjí svoji činnost, jsou různé druhy zařízení pro měření rychlosti jako je např. rychlost pohybu funkčních částí zbraně při výstřelu, rychlost pohybu zákluzových mechanismů a v neposlední rychlosti střel nebo střelám podobných objektů (např. bombardování oken kusy ledu apod.). Obecně jde o jednorázové děje, které mohou být lineární nebo nelineární. U střel a střelám podobných objektů se jedná o děj, kde objekt koná zpomalený pohyb po balistické křivce. V krátkém úseku dráhy (např. 1 m) lze považovat rychlost za konstantní. Běžný je elektromagnetický (dvojice cívek) a optický princip (zdroj světla a rychlé PIN diody). CCD snímače nebyly v PROTOTYPĚ pro tento účel dosud použity. Pro tuto diplomovou práci PROTOTYPA zakoupila několik typů optických prvků, které jsou v práci dále popsány, v přípravcích testovány, případně je navrhováno vhodné experimentální využití.

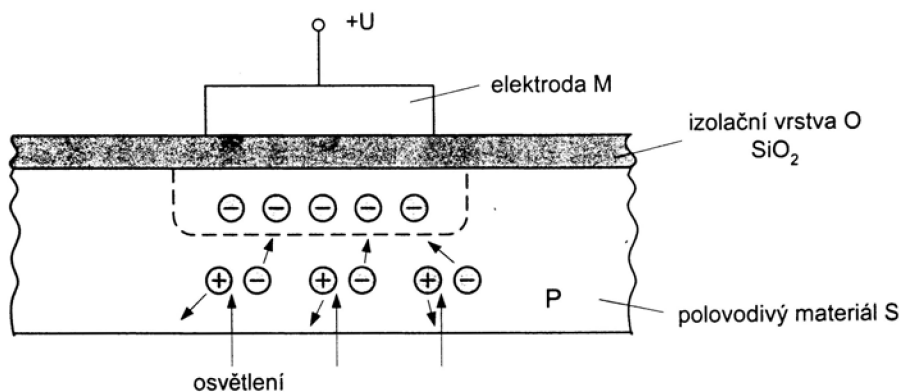
2 PRINCIP ČINNOSTI SNÍMACÍCH PRVKŮ CCD

Označení prvků CCD vychází z podstaty jejich činnosti jako obvodů s nábojovou vazbou (Charge Coupled Devices). Jde o nejběžnější typ snímacího prvku (Obr. 2.1.). V podstatě jde o integrované obvody vyrobené technologií MOS: kovová elektroda M, oxidová izolační vrstva O a vrstva polovodiče S. Jejich činnost jako převodníků světelného obrazu na elektrický signál vychází ze dvou základních vlastností: prvky CCD jsou schopny vytvářet elektrický náboj v závislosti na míře osvětlení a tento náboj představující elektrický obrazový signál dokáží přesouvat stejně jako v posuvném registru a vysouvat z obvodu ven.

Prvky CCD obsahují velký počet samostatných funkčních buněk představovaných navzájem izolovanými kovovými elektrodami, které společně s izolační vrstvou oxidu křemičitého SiO_2 a souvislou vrstvou základního polovodiče (substrátu) typu P nebo N tvoří miniaturní kondenzátor. Ačkoliv princip činnosti prvků CCD vychází z tranzistorů řízených polem se strukturou MOS, neuplatňuje se u nich schopnost zesilovat, ale využívá se schopnost uschovávat a přemísťovat vzniklý elektrický náboj [1].

2.1 Buňka prvku CCD

Princip činnosti řádkových CCD snímačů je v podstatě stejný ať hovoříme o řádkových snímacích prvcích nebo o maticovitých prvcích používaných v digitálních přístrojích. Jestliže se na elektrodu přivede kladné napětí, budou z oblasti pod elektrodou odpuzovány kladné majoritní nosiče (díry) hlouběji do polovodiče. Pod elektrodou vznikne ochuzená oblast označovaná jako potenciálová jáma, v níž není (téměř) žádný elektrický náboj. Vystavíme-li polovodič vlivu vnějšího osvětlení nebo dopadne-li na něj z objektivu kamery obraz snímaného předmětu, budou v něm v důsledku vnitřního fotoelektrického jevu vznikat volné páry elektron-díra, tedy volné nosiče záporného náboje (elektrony) a kladného náboje (díry).

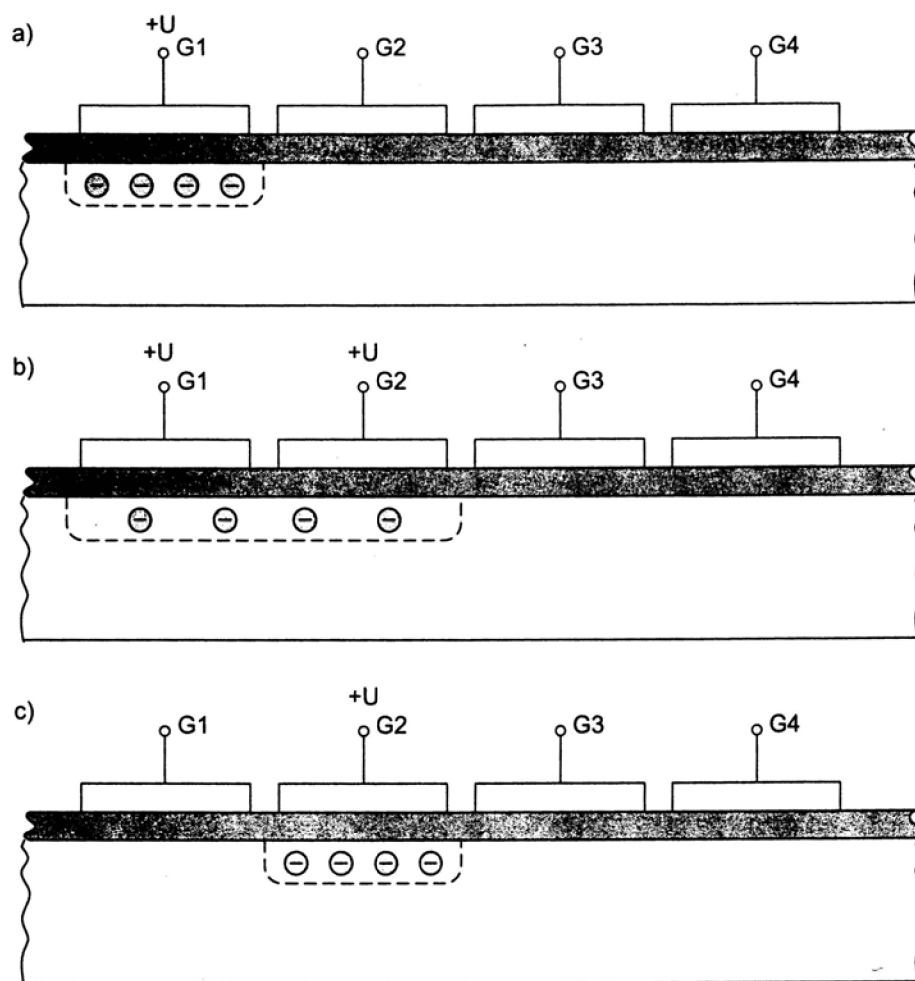


Obr. 2.1. Buňka prvku CCD [1].

Vnitřní fotoelektrický jev zvětšuje vodivost polovodičových materiálů. U prvků CCD jsou kladné nosiče odpuzovány od elektrody, záporné nosiče jsou jejím kladným napětím přitahovány a vtaženy do potenciálové jámy. Množství záporných nábojů v jámě je přímo úměrné velikosti osvětlení příslušného obrazového bodu. Užitečný náboj nemůže zůstat v potenciálové jámě libovolně dlouho, protože volné nosiče nábojů vznikají také vlivem teploty. Potenciálová jáma by se teplotními náboji zaplnila za dobu několika milisekund, takže užitečný náboj musí být z prvku CCD rychle odveden například v podobě obrazového signálu [1].

2.2 Mechanismus posuvu náboje

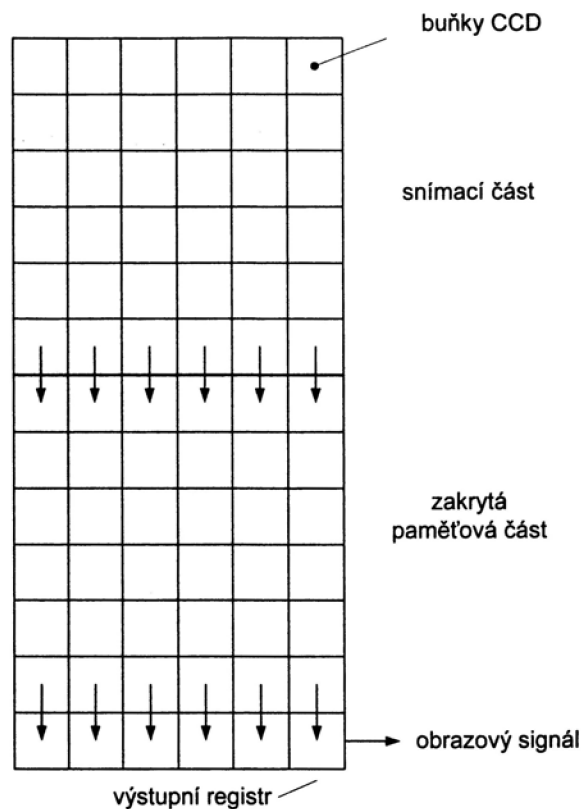
Mechanismus posuvu náboje je obdobný posuvným registrům, prvky CCD se také často jako posuvné registry využívají. Na obrázku 2.2. a je znázorněno několik buněk CCD vedle sebe. Pod elektrodou G1 jsou užitečné náboje, které je třeba posunout směrem k elektrodě G4. Nejdříve přivedeme na elektrodu G2 stejné napětí jako je na G1. Pod elektrodou G2 vznikne další potenciálová jáma, která se spojí s jámou pod G1 (Obr. 2.2.b). Ve vzniklé velké jámě se náboje rovnoměrně rozloží. Nyní se musí postupně snižovat napětí na elektrodě G1, potenciálová jáma pod G1 se bude zmenšovat a veškerý náboj přejde pod elektrodu G2 (Obr. 2.2.c). Postupné snižování napětí na elektrodě G1 je důležité proto, aby se náboje přesunuly směrem k elektrodě G2 a nikoliv opačným směrem. Jáma pod G1 se proto zmenšuje pomalu a náboje se doslova přelijí od jedné elektrody k druhé. Uvedený postup se velmi rychle opakuje, dokud se náboj nepřesune až k poslední elektrodě [1].



Obr. 2.2. Mechanismus posuvu náboje v buňkách CCD [1].

2.3 Snímací prvek CCD typu FT

Nejjednodušším typem snímacího prvku CCD je systém s pulsnímkovým přenosem (Field Transfer, FT), který se skládá ze dvou shodných částí (Obr. 2.3.). Na horní část dopadá osvětlení neboli obraz snímané scény, které vytváří užitečný elektrický náboj, jehož reliéf odpovídá rozložení jasu snímaného obrazu. Dolní část je zakryta proti přístupu světla a je použita jako paměť pro náboje z horní části. Náboje z horní části se během pulsnímkového zatemňovacího intervalu rychle přesunou do dolní části, přičemž jednotlivé světlocitlivé buňky slouží při přesunu nábojů jako posuvné registry. V následujícím pulsnímku vznikají v horní části nové náboje, zatímco náboje v dolní části se postupně během řádkových zatemňovacích intervalů přesouvají do výstupního registru, z něhož je odebrán obrazový signál.

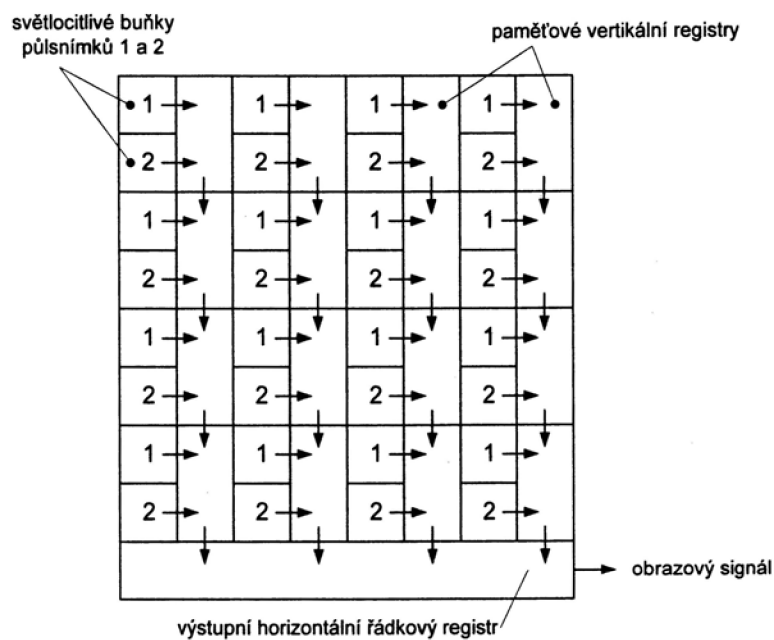


Obr. 2.3. Snímací prvek CCD typu FT [1].

Prvky CCD typu FT trpí zásadním nedostatkem, kterým je mazání obrazu ve svislém směru (vertical smearing) při snímání velmi světlých míst, zejména zdrojů světla. Příčinou mazání je dvojitá funkce každé buňky: jako světlocitlivý prvek a zároveň jako součást svislého posuvného registru přenášejí generované náboje trvale osvětlenou plochou prvku CCD. Jestliže se na prvek CCD zobrazí velmi světlý předmět, ať již jasný odlesk nebo světelný zdroj, vzniká v přesvětleném místě nadměrné množství generovaných nábojů, které se přidávají ke všem nábojům přenášeným svislým posuvným registrem. Nadměrné množství nábojů v přesvětlených buňkách dosáhne nasyceného stavu, který se v obraze projeví jako svislý pruh. Mimoto po celé svislé dráze přesunu náboje zůstávají zbytky přebytečných nábojů, které se nestačí odvést do dolní paměťové části a při následujícím přenosu nábojů do paměťové části se přidávají také k nábojům z buněk umístěných i pod přesvětleným místem. Důsledkem je protažení světlého svislého pruhu po celé výšce stínítka nad i pod obrazem světelného zdroje. Jednou z možností jak zabránit tomuto nežádoucímu jevu je zakrýt světlocitlivé buňky během přenosu náboje do paměťové části [1].

2.4 Snímací prvek CCD typu IL

Nedostatky typu FT se snaží odstranit prvek CCD s meziřádkovým přenosem (Interline,IL) na obrázku 2.4. U typu IL jsou mezi sloupce světlocitlivých buněk vloženy paměťové svislé posuvné registry. Posuvné registry jsou ovšem zakryty neprůhlednou vrstvou, aby jejich obsah nebyl ovlivněn vnějším osvětlením. Každá buňka posuvného registru je přiřazena dvěma snímacími buňkami a má proto dvojnásobnou velikost. Řádky snímacích buněk mohou být přiřazeny jednotlivým pulsům, takže při lichém pulsu se do registru přesunou náboje ze snímacích buněk 1, při sudém pulsu se přesune náboj z buněk s označením 2. Z posuvných registrů se náboje přesouvají po celou dobu pulsů postupně v řádkovém rytmu do výstupního horizontálního řádkového registru, z něhož se odebírá obrazový signál. Ačkoliv jsou posuvné registry prvků IL zakryty, trpí i tyto prvky svislým mazáním obrazu při přesvětlení [1].

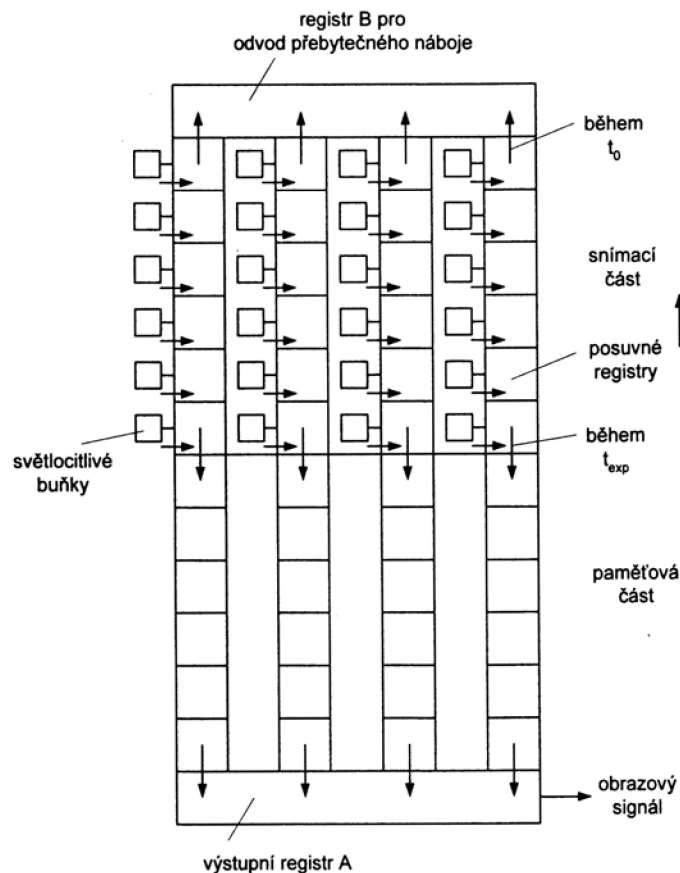


Obr. 2.4. Snímací prvek CCD typu IL [1].

2.5 Snímací prvek CCD typu FIT

Kombinací základních prvků FT a IL vznikl snímací prvek FIT (Field-Interline Transfer), jehož cílem je odstranit svislé mazání při snímání objektů s nadměrným jasnem (Obr. 2.5.). Prvky obsahují zobrazovací i paměťovou část a výstupní registr stejně jako prvky FT, zobrazovací část obsahuje navíc svislé posuvné registry zakryté proti působení světla objektivu. Registr B na obrázku 1.5. je určen pro elektronickou závěrku a při základní funkci

prvku CCD se nepoužívá. Signálové náboje se přenáší ze světlocitlivých buněk do svislých posuvných registrů a jimi do paměťové části, vše během pulsnímkového zatemnění. Do posuvných registrů prvku FIT se sice mohou přimísit nežádoucí náboje stejně jako u prvků IL, ovšem v podstatně menší míře. Paměťová část prvku FIT je zakryta neprůhledným materiálem, takže do ní přenesené náboje jsou zcela chráněny proti vlivu nežádoucího osvětlení [1].



Obr. 2.5. Snímací prvek CCD typu FIT [1].

2.6 Technologie HAD se zvýšenou rozlišovací schopností

Skutečná struktura prvků CCD je na rozdíl od schématických obrázků podstatně složitější, protože k zajištění funkce světlocitlivých buněk musí prvek obsahovat řídicí hradla, oddělovací hradla, čtecí hradla, hradla pro odvod přebytečného náboje atd. Mnohé z uvedených hradel jsou umístěny přímo na čelní ploše prvku CCD, kde zabírají plochu určenou především pro světlocitlivé buňky, takže se snižuje jak citlivost prvku CCD (nevyužívá se všechno světlo dopadající na povrch), tak jeho rozlišovací schopnost (na povrch prvku nelze umístit dostatečný počet světlocitlivých buněk).

Při technologii HAD (Hole Accumulated Diode, dioda kumulující díry) je na základním polovodičovém substrátu typu N nanasena silně obohacená vrstva P v takové úpravě, že zároveň tvoří hradlo odvádějící přebytečné náboje (díry) vzniklé při nadměrném přesvětlení. Tím, že na čelní ploše nemusí být umístěna hradla pro odvádění přebytečného náboje, uvolnil se prostor pro umístění většího počtu světlocitlivých buněk, jejichž počet se u typu IL i FIT zvětšil přibližně z 500 na 750. Aktivní světlocitlivá plocha prvku CCD se zvýšila z 22% na více než 30% [1].

2.7 Převod elektrického náboje na barevnou informaci

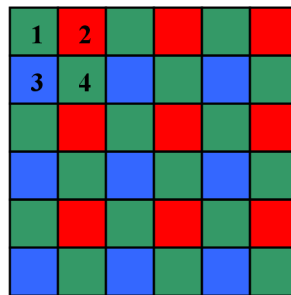
V běžné praxi hovoříme o tom, že CCD má určitý počet pixelů. Zde je ovšem nutné rozlišovat pixel na CCD a pixel na digitálním snímku. Jedná se totiž o zcela něco jiného. Pixel na CCD je součást hardwaru snímacího prvku, kdežto pixel na snímku je barevný obrazový bod, z něhož se snímek skládá.

2.7.1 Barevné filtry

Jednotlivé buňky CCD prvku zachycují světlo a mění energii dopadajících fotonů na elektrický náboj. Nejsou tedy samy o sobě schopny měřit barvu dopadajícího světla, čili jeho vlnovou délku, ale pouze intenzitu světla. Základem je použití barevných filtrů ve třech základních barvách RGB, které dohromady dají bílou barvu a ve vzájemném poměru jsou schopny vyjádřit libovolnou další barvu. Aby bylo možné provést měření všech základních barev současně v průběhu jedné krátké expozice světlem, jsou na snímači současně všechny tři filtry uspořádané do mozaiky. Nejde o filtry celistvé, uložené přes celou plochu snímače. Nad každou buňkou je umístěn jeden miniaturní filtr, který je napařen již při výrobě. Nejčastěji používaný je vzor G-R-G-B Bayer, který vychází ze 4 sousedních bodů. Dva z nich mají zelený filtr, jeden červený a jeden modrý. Tento vzor se opakuje po celé ploše snímače (Obr. 2.6.). Poměr barev 2:1:1 vychází z fyzikálních vlastností světla, jeho vnímání lidským okem a také tvaru čtverce 2x2. Každý filtr propustí pouze svoji barevnou složku spektra a zbytek odrazí zpět. Vznikne tak elektrický náboj, jehož velikost nezávisí jenom na intenzitě světla, nýbrž na jeho barevném složení. Tento náboj je v převodníku A/D vyhodnocen a převeden do digitální podoby. Procesor, který vyhodnocuje informaci získanou z CCD ví, že buňky 1 a 4 čtou pouze informaci o pouze intenzitě zelené barvy, buňka 2 měří intenzitu červené a buňka 3 modré barvy. Pokud použijeme všechny informace získané dohromady ze 4 buněk, můžeme určit barvu dopadajícího světla. Procesor poté porovnává informace v sousedních čtveřicích buněk a vznikají pixely na digitálním snímku.

Bohužel každá buňka měří jiný dopadající paprsek, což přináší několik nevýhod. Barevné rozlišení snímače je výrazně nižší než jeho schopnost rozlišovat jas. Barva je vypočítávána ze čtyř nebo více bodů pomocí vzorců a postupů, které mohou jen s určitou přesností určit barvu jednotlivých bodů. Při mozaikovém uspořádání se hůře koriguje nepřesné snímání barev způsobené různými vlnovými délkami světla, případně jiná zkreslení. Samozřejmě existuje celá řada postupů, jak zmenšovat chybu vznikající jako důsledek uspořádání.

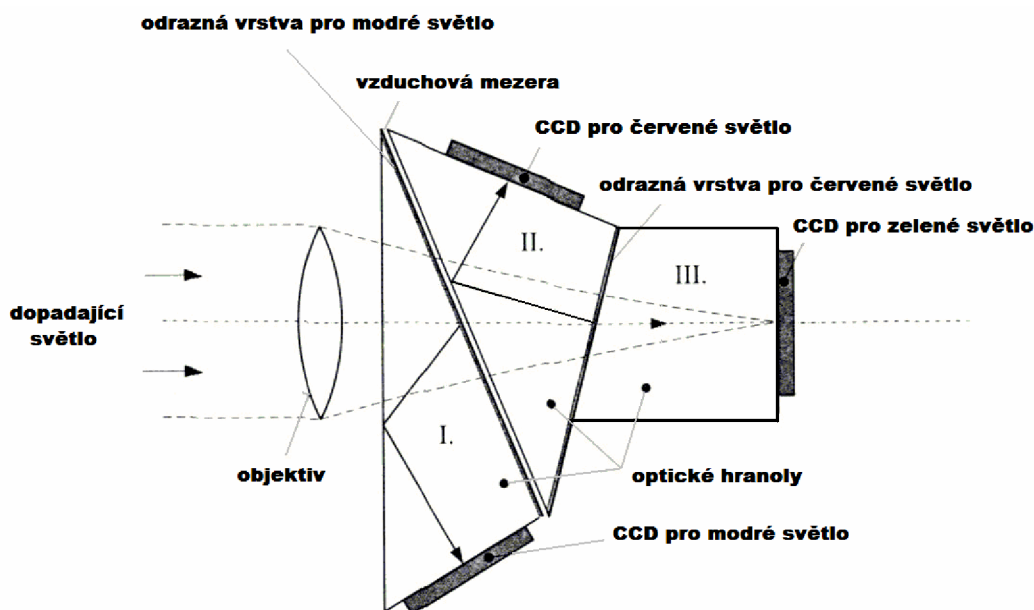
Tato technologie je vhodná pouze pro plošné snímací prvky a to zejména v digitální fotografii nebo pro záznam videa. Existuje celá řada vylepšení a jednotlivé snímače a příslušná elektronika se různí výrobce od výrobce. Dva snímače se stejným uspořádáním a rozlišením mohou poskytovat různě kvalitní obraz v závislosti na zpracování [2].



Obr. 1.6. Barevný filtr [2].

2.7.2 Hranolová optická dělicí soustava

V televizní technice se například používá hranolová optická dělicí soustava (Obr. 2.7.) obsahující v základním jednoduchém provedení tři hranolové bloky. Zadní plochy prvního a druhého hranolu jsou pokryty dichroickou zrcadlovou vrstvou, odrážející modrou případně červenou složku světla. Druhý odraz nastává na přechodu sklo - vzduch u předních ploch hranolu I a II. Odraz mezi prvním a druhým hranolem je umožněn tenkou vzduchovou mezerou mezi oběma hranoly. Přímá zelená složka světla prochází bez odrazu. Korelační filtry a snímací prvky CCD jsou přitmeleny na výstupních plochách jednotlivých hranolů. V tomto řešení je každému základnímu barevnému optickému obrazu pevně přiřazen jeden snímací prvek, z něhož se odebírá červený, zelený a modrý elektrický signál [1].

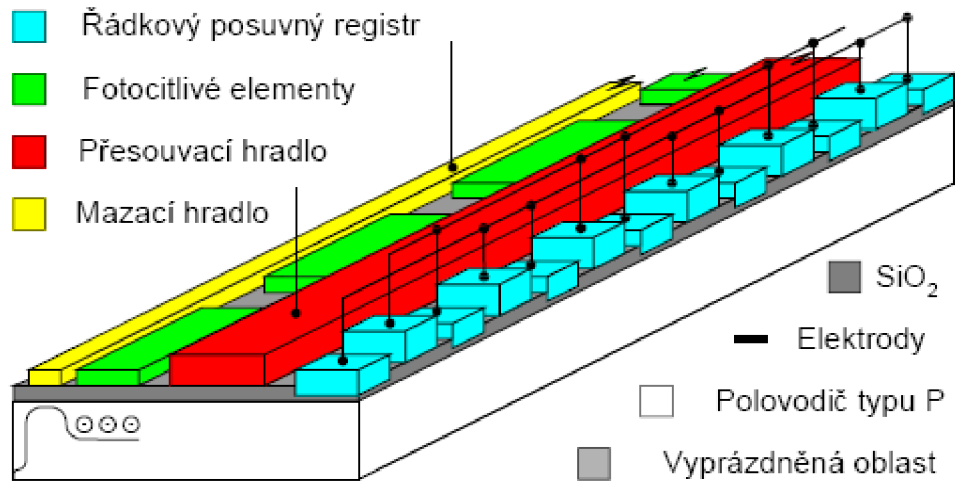


Obr. 2.7. Hranolová optická dělicí soustava [1].

2.8 Řádkový prvek CCD

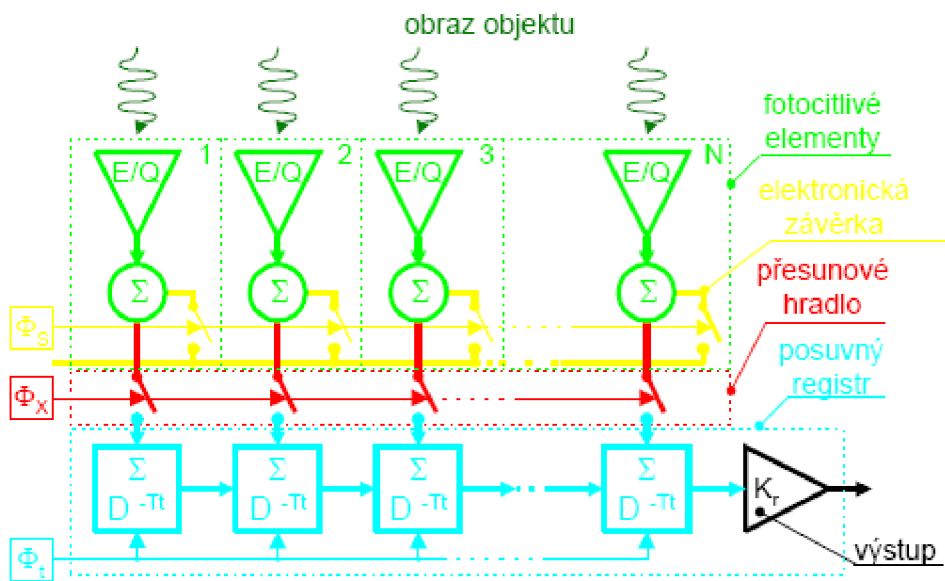
Řádkový prvek CCD obsahuje světlocitlivé buňky uspořádané do jediného řádku, pomocí kterého snímá obraz. Aby byla dosažena vysoká rozlišovací schopnost, může řádkový prvek CCD obsahovat vedle sebe 1024, 2048, 4096 a dokonce i 12000 světlocitlivých buněk. Standardní přesun nábojů může ovšem při tomto velkém počtu buněk vést ke zkreslení hodnot jednotlivých nábojů.

Strukturu řádkového prvku CCD (Obr. 2.8.) je možné popsat pomocí signálového modelu (obr. 2.9.). Barvy na obrázku 2.9. souhlasí s barvami na obrázku 2.8. a popisují stejné části snímače. Fotocitlivý element je modelován jako konvertor E/Q se zásobníkem (zelená barva). Zde dochází po určitou dobu k integraci náboje pod fotocitlivými elementy. Přesouvací hradlo je modelováno N přepínači řízenými jedním signálem (červená barva). Řádkový posuvný registr reprezentuje zpoždění T_1 (modrá barva). Mazací hradlo je reprezentováno N přepínači, které jsou spojené se zemí (žlutá barva). Děje probíhající v jednotlivých částech snímače jsou popsány na obrázku 2.8 [3].



- P přesun náboje z fotocitlivých elementů do posuvného registru,
- x x vysunutí náboje ze snímače přes nábojový detektor, C mazání snímače
- Tx integrace náboje pod fotocitlivými elementy po dobu T_x

Obr. 2.8. Řez řádkovým snímačem CCD [3].



Obr. 2.9. Signálový model řádkového CCD snímače [3].

3 PRINCIP ČINNOSTI FOTODIOD

Detektory přeměňují optické záření na odpovídající elektrický signál. Podle typu aplikace pracují detektory optického záření v různých oblastech světelného záření od ultrafialové do infračervené.

Fotodiody jsou používány k měření osvětlení, snímání dat (v minulosti se tak například snímala data z děrných štítků), v automatizaci. Rychlé fotodiody jsou používány v optických spojích, opronech apod. Dále lze fotodiody použít jako zdroje napětí. Napájení malých spotřebičů (například kalkulačky), výroba elektrické energie pro domácnost (solární panely na střeše domku). Speciálně se fotodiodová pole používají v oblasti spektrometrie.

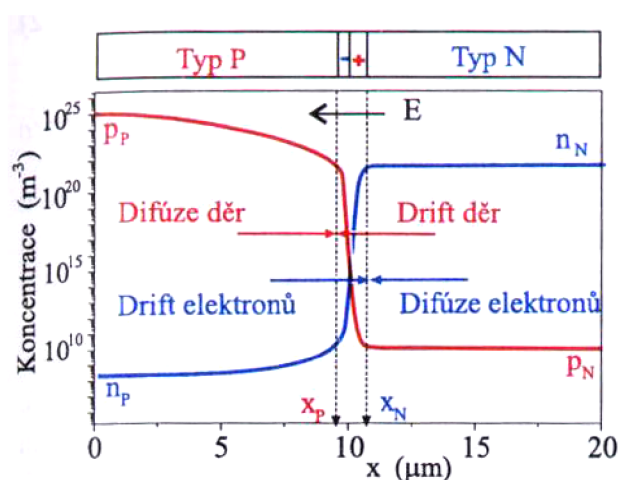
3.1 Princip fotodiody

Polovodičové detektory optického záření využívají ke své činnosti vlastnosti P-N přechodu, případně usměrňující přechod kov-polovodič. Fotodioda je součástka s přechodem P-N zapouzdřená tak, aby na přechod mohlo dopadat světlo. Má okénko nebo plastickou čočku, která soustřeďuje světlo do oblasti přechodu P-N a lze ji tedy použít jako fotocitlivý detektor. Často používanými polovodičovými materiály jsou křemík (Si), gallium arsenid (GaAs), antimonid india (InSb), ardsenid india (InAs) a další. Tyto materiály absorbují světelné záření v rozsahu např. 250nm až 1100nm – křemík, 800nm až 2 μ m GaAs.

3.1.1 P-N přechod

Předpokládejme, že polovodič má pokojovou teplotu. V polovodiči P o několik řádů převažuje koncentrace děr nad koncentrací elektronů, zatímco v polovodiči N je tomu naopak. V oblasti přechodu dochází k difúzi děr do oblasti N a elektronů do oblasti P. Díry, které odejdou z oblasti P, zanechají po sobě nepohyblivé ionizované akceptory, jejichž záporný náboj není kompenzován. Elektrony, které odejdou z oblasti N, zanechají po sobě nepohyblivé ionizované donory, jejichž kladný náboj také není kompenzován. Výsledkem je vznik nábojové dvojvrstvy s vysokou intenzitou elektrického pole E. Současně s probíhající difúzí odsává vzniklé elektrické pole minoritní nosiče náboje z oblasti N a P. To znamená, že nastává drift elektronů z P do N a děr z N do P ve směru opačném ke směru difúze. Když se driftová proudová hustota elektronů vyrovná difúzní proudové hustotě elektronů a analogická situace nastane i pro díry, ustaví se na P-N přechodu rovnováha. Bez přiloženého vnějšího napětí se tak polovodič nachází v rovnovážném stavu (neteče jím proud). Tento stav je zajištěn vzájemnou kompenzací difúzního proudu majoritních nosičů a driftového proudu minoritních nosičů náboje na hranici OPN. Difúze elektronů a děr přes přechod je kompenzována jejich

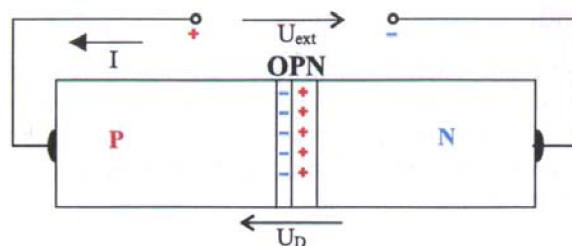
driftem v elektrickém poli (Obr. 3.1.). V oblasti přechodu vzniká úzká oblast prostorového náboje (OPN), kterou nazýváme P-N přechod [4].



Obr. 3.1. Vytvoření PN přechodu [4].

3.1.2 Propustný směr

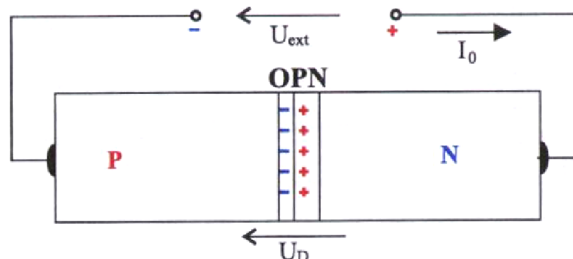
Přivedeme-li na anodu kladné napětí U_{ext} oproti katodě, působí toto napětí proti difúznímu napětí U_D , dojde ke snížení energetické bariéry a zúžení přechodu OPN (Obr. 3.2.). Výsledkem je injekce děr do oblasti N, kde se stanou minoritními a na určité vzdálenosti zrekombinují s majoritními elektrony. Analogickým způsobem probíhá transport elektronů, avšak opačným směrem. Jelikož P-N přechod při této polaritě vnějšího napětí propouští velké množství elektronů a děr, teče diodou velký proud a tato polarita se nazývá propustné napětí.



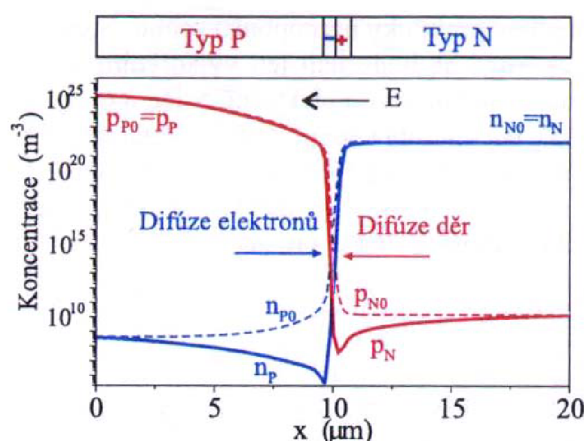
Obr. 3.2. Zapojení diody v propustném směru [4].

3.1.3 Závěrný směr

Přivedeme-li na anodu záporné vnější napětí oproti katodě, působí vnější napětí U_{ext} souhlasně s difúzním napětím U_D a dojde ke zvýšení energetické bariéry a rozšíření OPN (Obr. 3.3.). Transport majoritních nosičů náboje není možný. Naopak přiložené závěrné napětí U_{ext} působí na minoritní nosiče náboje jako propustné. Jelikož je koncentrace minoritních nosičů malá, vzniklý proud bude také velmi malý v řádech desítek nA. Tento proud je přímo úměrný koncentraci minoritních nosičů (Obr. 3.4.).



Obr. 3.3. Zapojení diody v závěrném směru [4].



Obr. 3.4. Extrakce minoritních nosičů náboje při polarizaci přechodu v závěrném směru [4].

3.1.4 Fotovoltaický jev

Zásluhou vnitřního elektrického pole v okolí P-N přechodu jsou elektrony a díry vzniklé působením optického záření odděleny takovým způsobem, že elektrony přejdou do oblasti typu N a díry do oblasti typu P. Elektrony neopouštějí polovodič (na rozdíl od vnějšího fotoefektu, kdy dopadající foton dodá elektronu energii dostatečnou k překonání tzv. výstupní práce a elektron opustí látku).

Vznikne tak na každé straně P-N přechodu elektrický náboj, který je možné na vývodech fotodiody detekovat. Tento přesun elektrického náboje je nazýván vnitřní „fotovoltaický jev“. Účelem fotodiody je převést náboje vzniklé působením optického záření na její elektrody předtím, než budou mít možnost nekombinovat. generované nosiče náboje, mající omezený čas života (než se vrátí na původní energetickou úroveň) [5].

3.2 Uspořádání fotodiody

V horní části diody je průhledná antireflexní vrstva, následuje vrstva s vodivostí typu P a oblast s vodivostí typu N. Plocha velmi tenké průhledné oblasti s vodivostí typu P určuje velikost aktivní oblasti fotodiody. Aktivní oblast je pokryta antireflexní vrstvou, která

v rozsahu požadovaných vlnových délek omezuje odraz optického záření od povrchu fotodiody. Tloušťka antireflexní vrstvy je optimalizována pro žádanou citlivost na různé vlnové délky optického záření. Na čelní ploše fotodiody je umístěn malý kontakt anody, na celou spodní stranu diody je nanesena kontaktní kovová vrstva katody [5].

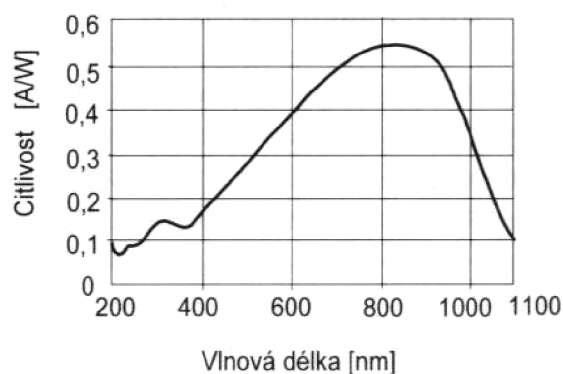
3.3 Optické vlastnosti fotodiody

3.3.1 Citlivost fotodiody

Citlivost fotodiody na optické záření je uváděna jako poměr výstupního proudu fotodiody I_f a přijímané světelné energie P (ve wattch). Světelná energie je obvykle měřena ve W/cm^2 a proud fotodiody v A/cm^2 .

$$R = \frac{I_f}{P} \quad [A.W^{-1}] \quad (1)$$

Obr. 3.5. znázorňuje typický průběh spektrální charakteristiky Si fotodiody. Tato fotodiody má největší citlivost kolem vlnové délky 800 nm, tedy v oblasti červeného a infračerveného záření. Dokáže však absorbovat optické záření v celém rozsahu viditelného záření. Diody je dobré používat v rozsahu vlnových délek (300-1100) nm. Citlivost fotodiody je pro malou intenzitu optického záření omezena velikostí šumových napětí, při velkých intenzitách optického záření saturační úrovní, nad kterou změny osvětlení mají malý vliv na proud fotodiody. Spektrální charakteristika je ovlivněna vrstvou antireflexního povrchového povlaku [5].

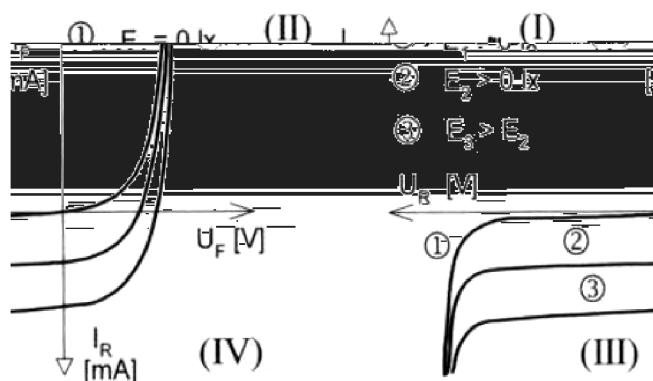


Obr. 3.5. Spektrální charakteristika křemíkové diody [5].

3.3.2 V-A charakteristika fotodiody

Voltampérová charakteristika (Obr. 3.6.) neosvětlené fotodiody je podobná charakteristice usměrňovací diody. Vliv osvětlení přechodu můžeme sledovat v polarizaci

diody v závěrném směru, kdy dochází k lineárnímu růstu anodového proudu (anoda) do záporných hodnot při rovnoměrném zvětšování osvětlení. Od charakteristiky usměrňovací diody se liší tím, že neprochází počátkem a vykazuje proud I_R v závěrném směru. Dioda se tedy chová jako pasivní součástka, jejíž elektrický odpor v závěrném směru je závislý na osvětlení. Intenzita osvětlení fotodiody může být udávána v luxech (viditelná oblast spektra), častěji je udávána ve W/cm^2 . Fotodiody reaguje na změny osvětlení velmi rychle, řádově 10^{-6} – 10^{-9} s [5].



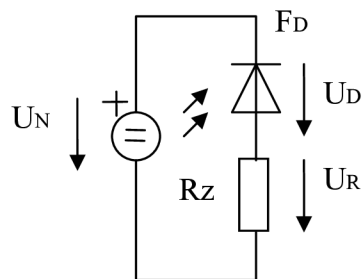
Obr. 3.6. V-A charakteristika fotodiody [5].

3.3.3 Princip zapojení s fotodiódou

Z V-A charakteristiky je zřejmé, že fotodiody může pracovat ve III. a ve IV. kvadrantu, z čehož vyplývají dva základní režimy činnosti.

a) Odporový (fotovodivostní) režim

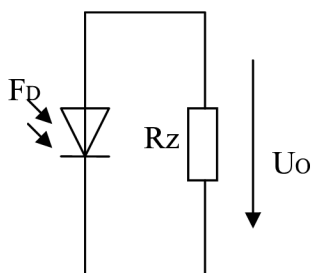
V odporovém (fotovodivostním) se fotodiody chová jako spotřebič v obvodu napájeném vnějším zdrojem napětí. Na fotodiody zapojenou v sérii se zatěžovacím rezistorem je připojen v závěrném směru zdroj napájecího napětí U_N (Obr. 3.7.). Při intenzitě osvětlení E_a pracuje dioda ve III. kvadrantu a platí $U_R + U_D = U_N$. Při zvětšení osvětlení na hodnotu E_b pracuje dioda ve IV. kvadrantu a napětí na zatěžovacím odporu má velikost $U_R = U_N + U_D$. V odporovém režimu je z důvodu závěrné polarizace na P-N přechodu vyšší intenzita elektrického pole, ochuzená oblast je širší a proto generované volné elektrony driftují vyšší rychlostí ke kontaktu katody a díry ke kontaktu anody. S rostoucí rychlostí nosičů se zvyšuje přenosová rychlost fotodiody a zkracuje se doba odezvy na změnu osvětlení. Vzhledem k těmto vlastnostem je v obvodech sloužících k měření a detekci optického záření používán tento princip zapojení [5].



Obr. 3.7. Zapojení ve fotoodporovém režimu.

b) Fotovoltaický (hradlový) režim

Nezaměnitelné místo mají speciální fotodiody, kterých se používá ke konverzi energie záření na energii elektrickou. Fyzikální princip funkce nejlépe vysvětlíme, představíme-li si fotodiodu nezapojenou do obvodu (Obr. 3.8.). Není-li ozářena, je proud majoritních nosičů každé polaritě přes přechod PN kompenzován proudem minoritních nosičů stejné polaritě přes přechod opačným směrem (viz 3.1.1). Ozáříme-li nyní fotodiodu, zvýšíme koncentraci minoritních nosičů v polovodičích obou typů vodivosti a v důsledku toho stoupne proud minoritních nosičů přes PN přechod. Vzhledem k tomu, že jsme předpokládali diodu nezapojenou do obvodu, musí být celkový proud přes přechod roven nule právě tak jako v případě bez ozáření. To je možné jenom tak, že klesne energetická bariéra v blízkosti přechodu P-N a umožní tak zvýšení proudu majoritních nosičů přes přechod. Krystal však tak přestává být v rovnováze, fermiho hladina se deformuje, a rozdíl mezi původní velikostí difuzního potenciálu a velikostí této bariéry po ozáření se objeví na svorkách diody jako napětí; na anodě fotodiody bude kladný pól a na katodě záporný pól. Uzavřeme-li nyní elektrický obvod tím, že k fotodiodě připojíme rezistor jako spotřebič, bude obvodem protékat elektrický proud - fotodioda bude fungovat jako sluneční článek. Proud, který můžeme ze slunečního článku odebírat, je přímo závislý na množství minoritních nosičů generovaných ozářením; bude tedy tím větší, čím větší ozářenou plochu bude článek mít. Ve fotovoltaickém (hradlovém) režimu pracuje fotodioda ve IV. kvadrantu [5].



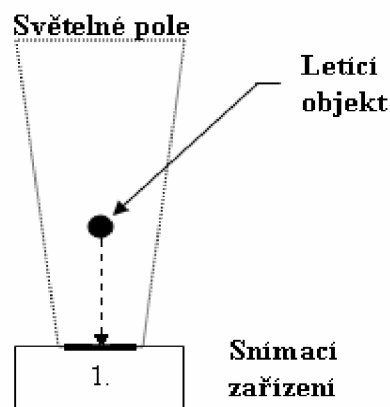
Obr. 3.8. Zapojení ve fotovoltaickém režimu.

4 SROVNÁNÍ METOD PRO SNÍMÁNÍ OBJEKTŮ POMOCÍ ŘÁDKOVÉHO SNÍMAČE CCD

Jednotlivé metody snímání objektů pomocí řádkového snímače CCD se liší zejména počtem použitých snímačů. Důležitá je také jejich vzájemná poloha vůči ostatním snímačům a měřeným objektům. Od toho se odvíjí složitost celého zařízení. Samozřejmě složitější zařízení v sobě kombinují principy těch jednodušších.

4.1 Návrh pro detekci letícího objektu pomocí snímače CCD

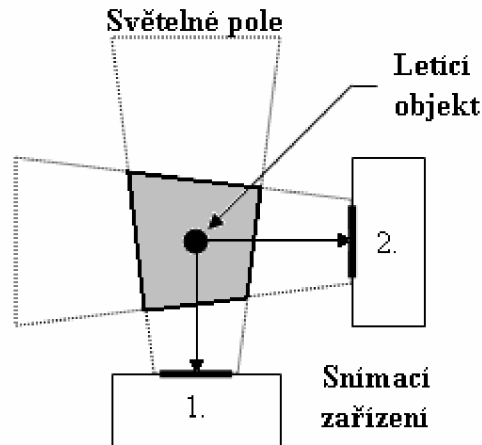
Pro měření nám postačí pouze jeden snímač CCD. Dráha měřeného objektu se musí křížit se světelným polem, které snímá snímací zařízení. Toto je nejjednodušší konfigurace, pomocí níž ověříme hlavně funkčnost zařízení reagovat na pohyb ve snímaném světelném poli, tím že generuje impulzy.



Obr. 4.1. Návrh pro detekci letícího objektu pomocí snímače CCD.

4.2 Návrh pro měření polohy objektu pomocí snímače CCD

Pro určení polohy objektu v 2D prostoru potřebujeme znát souřadnice X a Y . Souřadnici X získáme ze snímače č.1, který bude rovnoběžně s dráhou letícího objektu. Snímač č.2 umístíme kolmo ve vertikálním směru a dostaneme souřadnici Y . Světelné pole obou snímačů se musí překrývat a vytvořit tak dostatečně velkou oblast, kterou protne letící objekt. Jestliže budeme mít tyto systémy paralelně za sebou, je možné měřit sklon letu. Pro měření letícího objektu potřebujeme zachytit kdekoliv na snímači jeho odraz, ale zde je nutné určit přesně body, na které objekt vrhne svůj stín. Důležité je, jakým směrem se bude paprsek odrážet.



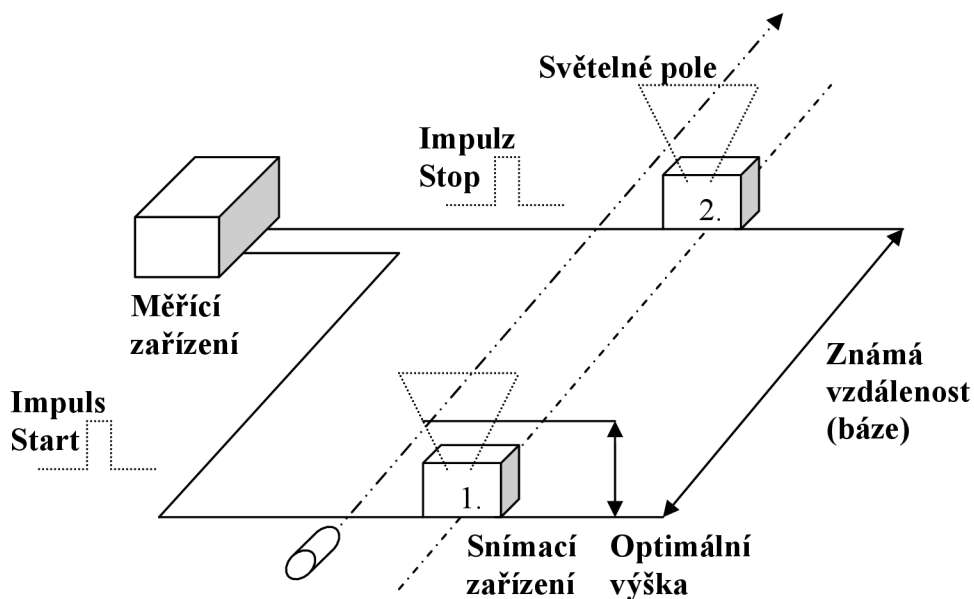
Obr. 4.2. Návrh pro měření polohy objektu pomocí snímače CCD.

4.3 Návrh pro měření rychlosti objektu pomocí snímače CCD

Pro měření rychlosti použijeme dva snímače, které rozmístíme v jedné ose za sebou. Letící objekt bude nasměrován rovnoběžně s touto osou tak, aby se jeho dráha křížila se světelnou oblastí, která je vytvořena pomocí úzkého zdroje světla před prvním snímačem. V okamžiku protnutí zachytí snímač CCD č.1 odraz od objektu a vyšle impulz, který dá příkaz start a spustí čítač. Tento děj se opakuje při průletu nad druhým snímačem č.2, kde dostáváme druhý impulz, který dá čítači pokyn stop pro zastavení čítání. Známe-li tedy čas letu objektu mezi dvěma snímači a jejich vzájemnou vzdálenost, můžeme podle vzorce (2) vypočítat přesnou rychlost objektu.

Fyzikální vzorec pro výpočet rychlosti z dráhy a času:

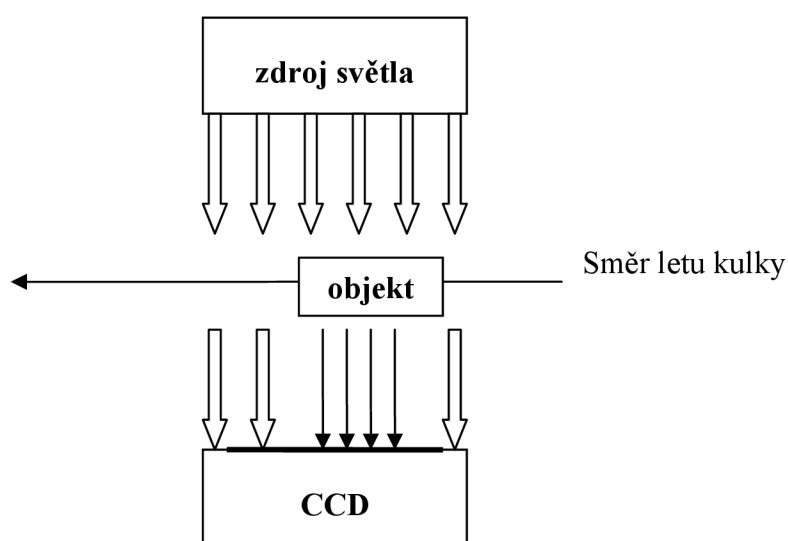
$$v = \frac{s}{t} [m \cdot s^{-1}] \quad (2)$$



Obr. 4.3. Návrh pro měření rychlosti objektu pomocí snímače CCD.

4.4 Návrh s přímým osvětlením snímače CCD

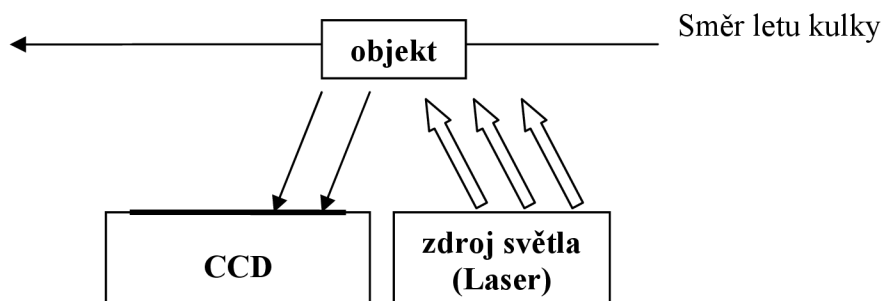
V tomto případě se snažíme o zachycení stínu letícího objektu. Snímač měří dopadající světlo. Při průletu objektu nad snímačem vznikne stín, který je vržen na snímač a ten ho musí zachytit. Problém u této konfigurace je pravděpodobně v tom, že snímač by se po dopadu světla, ještě před přiletem objektu, nasytil vygenerovanými náboji a objekt by tedy nezachytil.



Obr. 4.5. Zjednodušený náčrt metody s přímým osvětlením.

4.5 Návrh s nepřímým osvětlením snímače CCD

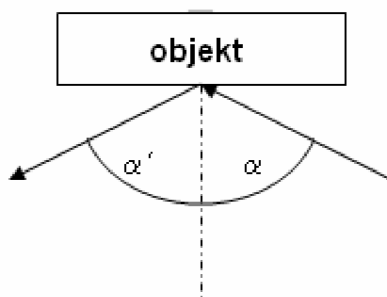
Těsně před snímač umístíme úzký zdroj světla, který vytvoří světelné pole. Při průletu objekt nejdříve protne úzký zdroj světla a poté se snažíme zachytit jeho odraz na zatemněném CCD snímači. Jako zdroj světla by mohl být použit laser.



Obr. 4.6. Zjednodušený náčrt metody s nepřímým osvětlením.

Snažíme se využít fyzikálního zákona odrazu, který patří mezi základní zákon geometrické (paprskové) optiky. Mezi úhlem dopadajícího paprsku α a úhlem odraženého α' platí vztah:

$$\alpha = \alpha' \quad (3)$$



Obr. 4.7. Zjednodušený náčrt odrazení paprsku od objektu.

4.6 Srovnání výhod a nevýhod jednotlivých metod

Přímé snímání rychlosti CCD snímačem je vhodné zejména tam, kde jde o kontinuální děj s relativně malými změnami rychlosti (běžící pás, plnicí linka atd.). Podmínkou je, aby doba integrace odpovídala pohybu sledovaného předmětu. V takovém případě lze využít metodu TDI (time delay integration), která zajišťuje lineární vztah mezi rychlostí pohybu tělesa a rychlostí pohybu obrazu na CCD čipu. Tato metoda se hodí zejména pro malé rychlosti a určování malých odchylek rychlosti.

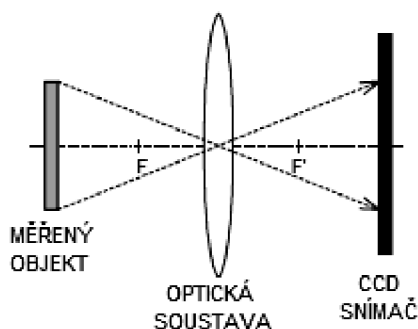
Pro nerovnoměrný pohyb je však vhodnější určování polohy světelného bodu, odraženého od pohybujícího se předmětu, nebo stínu, vrženého předmětem a určení rychlosti z derivace dráhy. I v takovém případě je třeba pečlivě volit dobu integrace ve vztahu k rychlosti předmětu a případně celý děj synchronizovat řízením elektronické závěrky a řízením impulzního osvětlení scény, kde nestačí stacionární zdroj světla.

5 ZOBRAZENÍ OBJEKTU NA SNÍMAČI

V této kapitole bude naznačeno, jakým způsobem dopadají paprsky světla na snímač přes hrany měřeného objektu. Tento objekt je ve statické poloze na rozdíl od systému, ve kterém bychom chtěli zaznamenat pohybující se objekty. Nicméně je to vhodná ukázka dějů, které mohou mít vliv na měření. Jedná se o systém s přímým osvětlením snímače. Velikost měřeného objektu je stanovena z jeho stínu vrženého na CCD snímač. Obvykle se používá světelný zdroj kolimovaných paprsků. Pro dosažení kvalitního zdroje světla musíme použít optickou soustavu s čočkami. To zvyšuje rozměry zařízení a cenu. Řešením může být použití více bodových světél bez nutnosti přidat čočky.

5.1 Zdroje světla a optické systémy

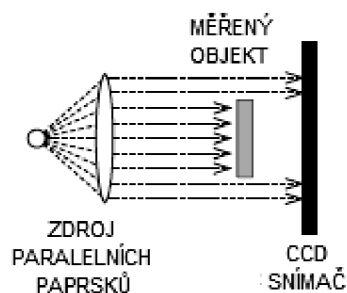
Řada zařízení s CCD snímačem používá pro měření objektu bezdotykové rozměrové zobrazování a v takovém případě musí být vybaveny čočkami (Obr. 5.1.).



Obr. 5.1. Měřicí systém vybavený čočkami [6].

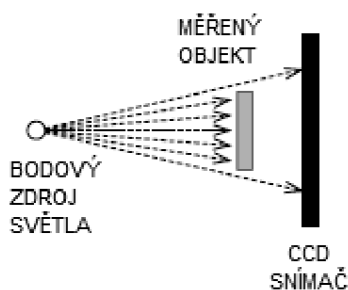
Vzdálenost mezi CCD snímačem a měřeným objektem je v tomto případě rovna nebo je větší než 4 ohniskové vzdálenosti použité čočky. Další nevýhodou je zvětšení objektu pohybujícího se podél optické osy.

Jestliže použijeme zdroj světla s paralelními paprsky, pak může být rozměr měřeného objektu stanoven z rozměru stínu vrženého objektem na CCD snímač bez použití čoček (Obr. 5.2.). Konstrukce takového zdroje ovšem vyžaduje opět optickou soustavu. To zvyšuje, stejně jako v předcházejícím případě, velikost a cenu zařízení [6].



Obr. 5.2. Měřicí systém se světelným zdrojem kolimovaných paprsků [6].

Je zde však další jednodušší řešení, které používá jeden nebo několik světelných zdrojů (Obr. 5.3.). Nevýhodou této metody je, že rozměr měřeného objektu musí být vypočítán pomocí více komplexních rovnic než při použití zdroje světla s kolimovanými paprsky. Za tímto účelem můžeme využít mikrocontroller používaný pro řízení měřicího systému. [6]



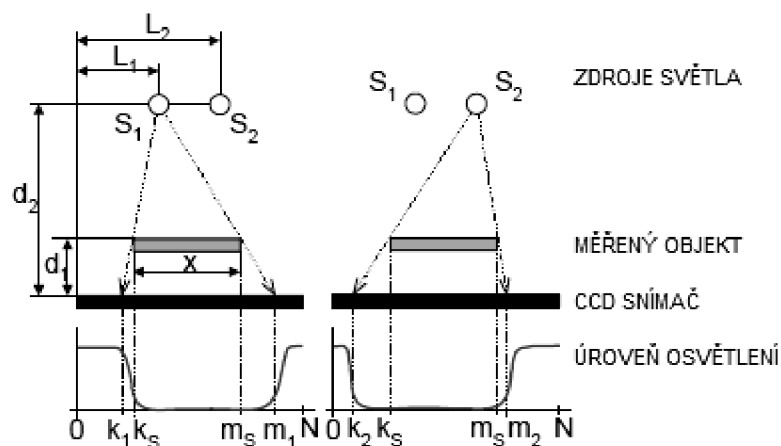
Obr. 5.3. Měřicí systém s bodovým zdrojem světla [6].

5.2 Systém s jedním bodovým zdrojem světla a lineárním CCD snímačem

Použitím bodového zdroje světla není velikost stínu vrženého měřeným objektem na lineární CCD snímač stejná jako velikost měřeného objektu (Obr. 5.4.). To je způsobeno rozbíhavostí světelných paprsků ze zdroje. Skutečná velikost může být vypočítána z velikosti stínu a vzdálenosti světelného zdroje se snímačem, a objektu se snímačem. Samozřejmě musíme brát v úvahu tvar objektu. Pro jednoduchý případ, kdy má objekt obdélníkový průřez, můžeme použít následující vzorec:

$$x = (m_s - k_s)p = (m - k) \left(1 - \frac{d_1}{d_2} \right) p \quad (4)$$

kde p je rozestup obrazového bodu, význam ostatních proměnných je na obrázku 3.4.



Obr. 5.6. Měření při použití dvou bodových zdrojů světla [6].

Měření je rozděleno do dvou kroků. V prvním kroku je zdroj světla S_1 zapnut a zdroj S_2 vypnut. Změříme hranice mezi světlem a stínem k_1 a m_1 . Ve druhém kroku je zdroj světla S_1 vypnut a zdroj S_2 zapnut a opět změříme hranice k_2 a m_2 . Nakonec je měřená velikost vypočítána z těchto okrajů a z pozice světelných zdrojů. Tato situace je ukázána na obrázku 5.6. a je popsána následujícími rovnicemi:

$$\frac{L_1 - k_1}{d_2} = \frac{k_s - k_1}{d_1} \quad (6)$$

$$\frac{L_2 - k_2}{d_2} = \frac{k_s - k_2}{d_1} \quad (7)$$

$$\frac{m_1 - L_1}{d_2} = \frac{m_1 - m_s}{d_1} \quad (8)$$

$$\frac{m_2 - L_2}{d_2} = \frac{m_2 - m_s}{d_1} \quad (9)$$

Z těchto rovnic je odvozená výsledná rovnice:

$$x = \left(\frac{L_1 m_2 - L_2 m_1}{L_1 - L_2 + m_2 - m_1} - \frac{L_2 k_1 - L_1 k_2}{L_2 - L_1 + k_1 - k_2} \right) p \quad (10)$$

kde p je rozestup obrazového bodu, význam ostatních proměnných je na obrázku 3.6.

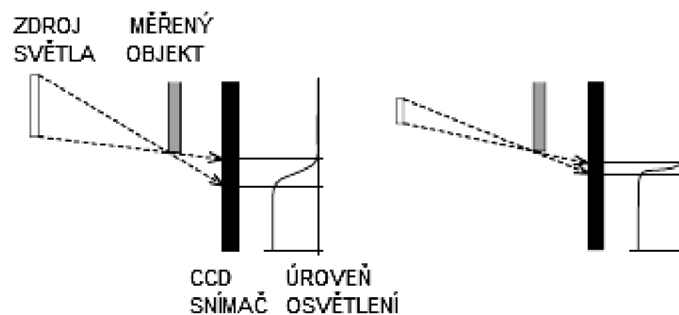
Rovnice je platná pro objekt s obdélníkovým průřezem. Jak vyplývá z rovnice (10), rozměr určený z této metody nezávisí na vzdálenosti světelných zdrojů a CCD snímače a na vzdálenosti měřeného objektu a CCD snímače (s předpokladem, že se tyto vzdálenosti nemění během měření) [6].

5.4 Podmínky realizace

Pro realizaci je třeba brát v úvahu několik hledisek.

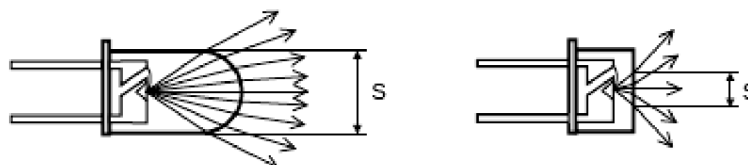
5.4.1 Konstrukce světelného zdroje

Realizace zdroje je podstatná věc pro dobrou přesnost měření. Zdroj světla pro výše uvedenou metodu by měl být ideální světelný bodový zdroj. Reálný zdroj není bodový a má určitou plochu vyzařování. Čím větší tato plocha bude, tím širší budou hranice mezi světlem a stínem na CCD snímači (Obr. 5.9.).



Obr. 5.9. Efekt světelné plochy zdroje na šířku hranice [6].

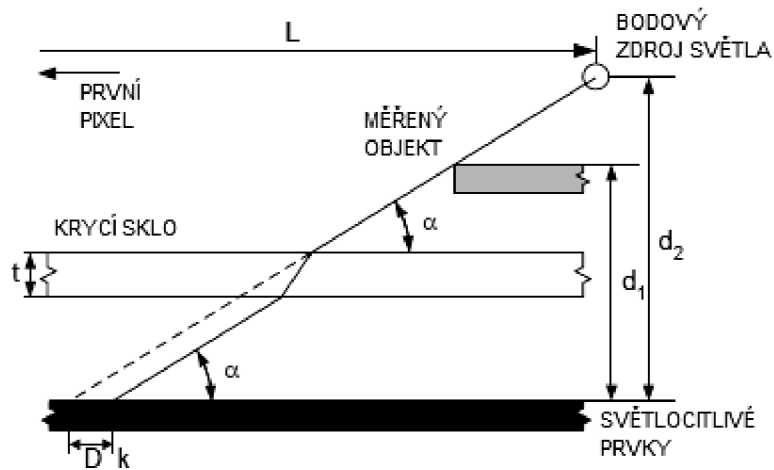
Šířka hranice se také zvyšuje s rostoucí vzdáleností mezi měřeným objektem a snímačem, nebo když se vzdálenost snímače a zdroje světla snižuje. Jako zdroj světla můžeme použít standardní LED diodu. Je ale nutné změnit její vyzařovací charakter omezením její čočky (Obr. 5.10.) [6].



Obr. 5.10. Efekt světelné plochy zdroje na šířku hranice [6].

5.4.2 Refrakce světla v krycím sklu CCD snímače

Protože úhel mezi paprsky světla a povrchem snímače není kolmý, nastává lom v krycím sklu (Obr. 5.11.).



Obr. 5.11. Refrakce světla v krycím sklu CCD a snímače [6].

Následkem toho se změní bod dopadu světelných paprsků na senzor o vzdálenost D oproti paprsku, který by neprošel přes krycí sklo. Vzdálenost D lze stanovit podle rovnice:

$$D = t \sin \alpha \left(\frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{n_r \cos \left[\arcsin \left(\frac{1}{n_r} \sin \alpha \right) \right]} \right) \quad (11)$$

kde: $\alpha \cong \arctg \frac{(L-k)p}{d_2}$,

n_r index lomu krycího skla, p je obrazová vzdálenost, význam ostatních proměnných je na obrázku 5.11 [6].

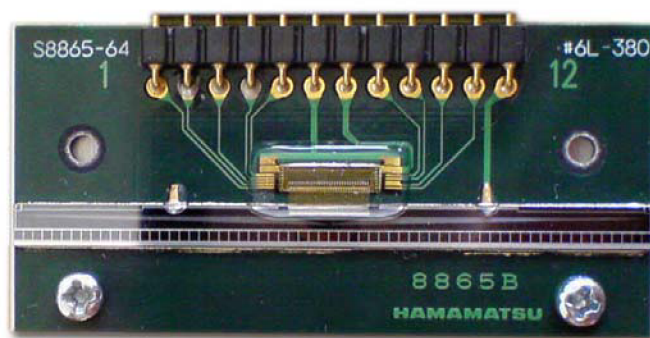
6 FOTODOVÉ POLE (PDA)

Velmi často se jsou tato pole používána ve spektrometrii. Ve spektrometrech jsou umístěna do roviny obrazu spektrometru, což umožňuje snímat velký rozsah vlnových délek. V důsledku toho lze PDA považovat za elektronickou verzi fotografického filmu. Snímače jsou užitečné zvláště pro zachycení celého UV spektra. Po určité integrační době je náboj v každém prvku následně vyčten. Absorbované vzorky jsou poté navzorkovány. Podobného využití bychom chtěli dosáhnout při měření polohy a rychlosti objektů.

Fotodiodové pole je řadové pole složené z jednotlivých fotodiod umístěných v integrovaném obvodu. Řadové pole může mít podle typu součástky počet prvků v rozsahu od 64 do 1024.

6.1 Základní katalogové údaje PDA S8865-64

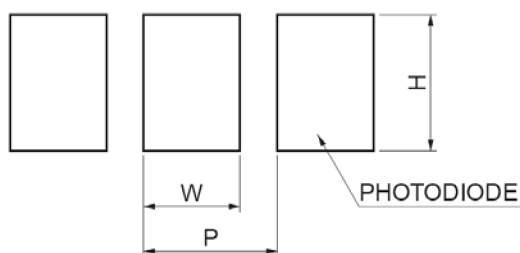
Jako nový optický prvek k ověření návrhu detekce letících objektů bylo vybráno a firmou PROTOTYPA zakoupeno fotodiodové pole od firmy Hamamatsu S8865-64 (Obr. 6.1.). Toto zařízení obsahuje křemíkové fotodiodové pole s 64 (Tab. 6.1.) prvky v kombinaci s integrovaným obvodem pro zpracování signálu. Tento obvod je vyroben technologií CMOS a obsahuje generátor časových impulsů (Tab. 6.2.), posuvný registr, nábojový zesilovač pole a obvod pro vnější nastavení zařízení. Pole lze používat najednou v kombinaci s více poli v řadě. Výrobce také nabízí přídavné zařízení, které v kombinaci s fotodiodovým polem umožňuje snímat rentgenové záření. Blokový schéma fotodiodového pole je ukázáno na obrázků 6.4. a nákres rozměrů fotodiodového pole je na obrázku 6.5.. Rozsah provozních parametrů je uveden v tabulce 6.4. Spektrální charakteristika je uvedena na obrázku 6.3..



Obr. 6.1. Fotodiodové pole S8865-64 [7].

Tab. 6.1. Parametry snímacího pole S8865-64 [7].

Parametr	Symbol	Hodnota
Element pitch (vzdálenost bodů) [mm]	P	0,8
Element width (šířka bodu) [mm]	W	0,7
Element height (výška bodu) [mm]	H	0,8
Numer of elements (počet prvků) [-]	-	64
Aktive area length (délka snímacího pole) [mm]	-	51,2

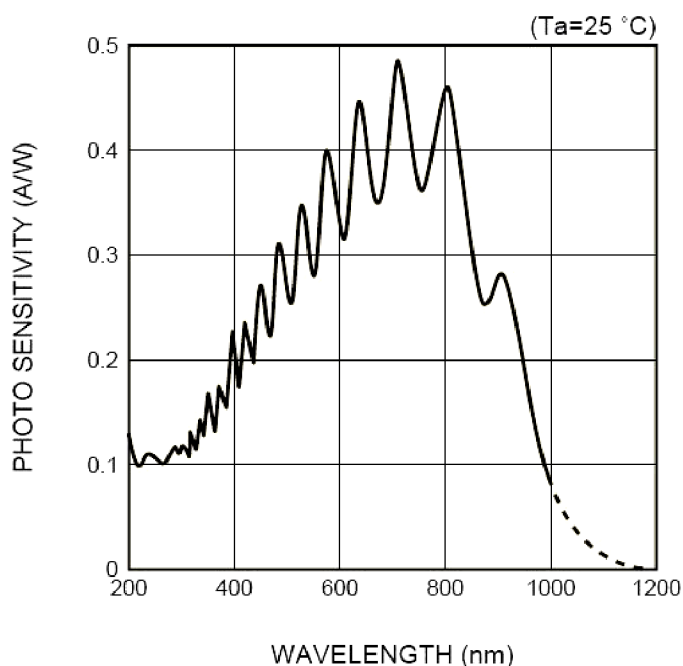


Obr. 6.2. Schéma snímacího pole [7].

Tab. 6.2. Elektrické parametry fotodiodového pole S8865-64 [7].

Parametr	Symbol	Hodnota
Clock pulse frequency [kHz] (frekvence hodinových pulzů)	f(CLK)	40 až 4000
Output impedance (výstupní impedance) [kΩ]	Z _o	3
Power consumption (spotřeba) [mW]	P	100

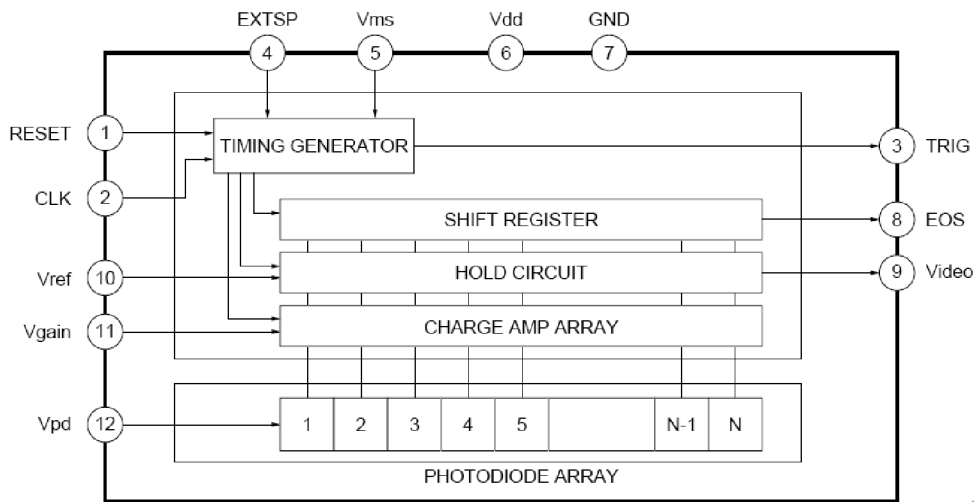
Pozn: Rychlost přenosu obrazu je 1/4 frekvence hodinových pulzů f (CLK).



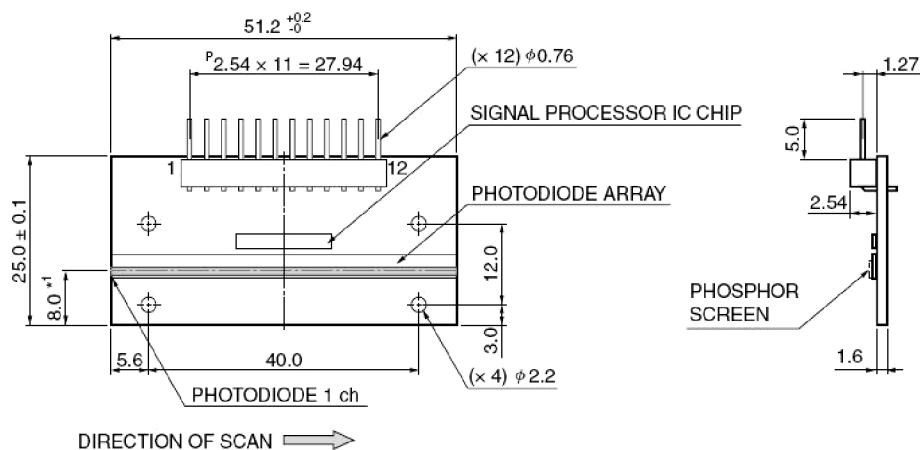
Obr. 6.3. Spektrální charakteristika fotodiodového pole PDA S8865-64 [7].

Tab. 6.3. Zapojení pinů fotodiodového pole S8865-64 [7].

Pin	Symbol	Název	Poznámka
1	RESET	Reset pulse	Pulse input
2	CLK	Clock pulse	Pulse input
3	Trig	Trigger pulse	Positive-going pulse output
4	EXTSP	External start pulse	Pulse input
5	Vms	Master/slave selection supply voltage	Voltage input
6	Vdd	Supply voltage	Voltage input
7	GND	Ground	
8	EOS	End of scan	Negative-going pulse output
9	Video	Video output	Negative-going output with respect to Vref
10	Vref	Reference voltage	Voltage input
11	Vgain	Gain selection terminal voltage	Voltage input
12	Vpd	Photodiode voltage	Voltage input



Obr. 6.4. Blokový schéma fotodiodového pole S8865-64 [7].



Pozn: *¹Vzdálenost od hrany desky do středu aktivní oblasti

Obr. 6.5. Nákres rozměrů fotodiodového pole S8865-64 [7].

Tab. 6.4. Provozní parametry fotodiodového pole S8865-64 [7].

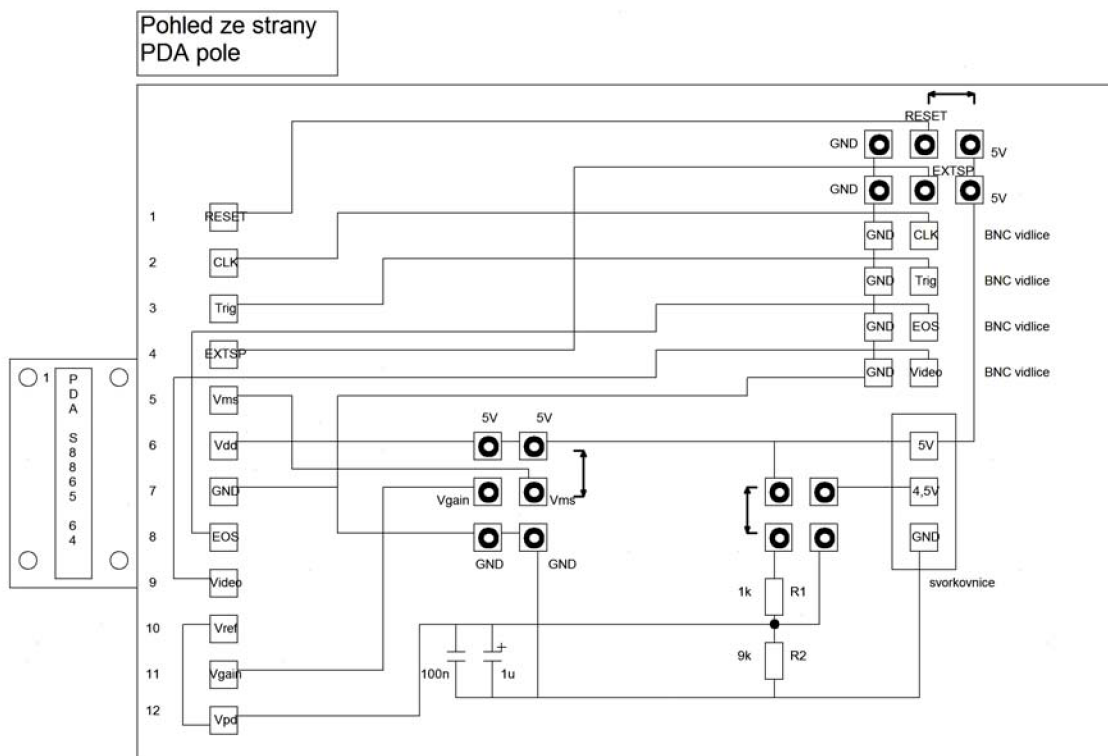
Maximální rozsahy provozních parametrů			Doporučené rozsahy provozních parametrů			
Parametr	Symbol	Rozsah hodnot		Min.	Typ.	Max.
Supply voltage[V] (napájecí napětí)	Vdd	-0,3 až +6		4,75	5	5,25
Reference voltage [V] (referenční napětí)	Vref	-0,3 až +6		4	4,5	Vdd
Photodiode voltage [V] (napětí na fotodiodách)	Vpd	-0,3 až +6		-	Vref	-
Gain selection terminal voltage [V] (zesilovací napětí)	Vgain	-0,3 až +6	High gain	Vdd-0,25	Vdd	Vdd+0,25
			Low gain	0	-	0,4
Master/slave selection voltage [V] (napětí časového generátoru)	Vms	-0,3 až +6	High gain* ³	Vdd-0,25	Vdd	Vdd+0,25
			Low gain* ⁴	0	-	0,4
Clock pulse voltage [V] (úroveň hodinových pulzů)	V(CLK)	-0,3 až +6	High gain	Vdd-0,25	Vdd	Vdd+0,25
			Low gain	0	-	0,4
Reset pulse voltage [V] (úroveň resetovacího pulzu)	V(RESET)	-0,3 až +6	High gain	Vdd-0,25	Vdd	Vdd+0,25
			Low gain	0	-	0,4
External start pulse [V] (vnější spouštěcí pulz)	V(EXESP)	-0,3 až +6	High gain	Vdd-0,25	Vdd	Vdd+0,25
			Low gain	0	-	0,4
Operating temperature [°C]	Topr	-5 až +60	-			

Pozn: *³High level-paralelní čtení z paměti

*⁴Low level-sériové čtení z paměti

6.2 Návrh zapojení na snímače PDA S8865-64 na desku plošných spojů

Z důvodu snadné obsluhy byl snímač PDA navržen na univerzální jednostrannou desku plošných spojů (Obr. 6.6.). Samotný snímací prvek má 12 pinů pro připojení napětí, vstupních a výstupních signálu (Tab. 6.3.). Napájecí napětí Vdd +5V se přivádí na svorkovnici. Referenční napětí Vref a napětí na fotodiodách Vpd potřebují +4,5V, které lze přivést do obvodu ze samostatného zdroje nebo úpravou napájecího napětí přes dělič rezistorů. Volba se provádí na jednom ze tří pinových polí. Zesilovací napětí Vgain a napětí časového generátoru Vms mohou nabývat hodnoty 5V nebo 0V. Nastavení se provádí opět přes pinové pole. Signály RESET a EXESP se mohou přivést do obvodu přes třetí pinové pole. Hodinový signál CLK lze připojit ke snímači pomocí BNC vidlice z externího zařízení. Výstupní pulzy Trig, EOS a analogový signál Video jsou vyvedeny BNC kabely.

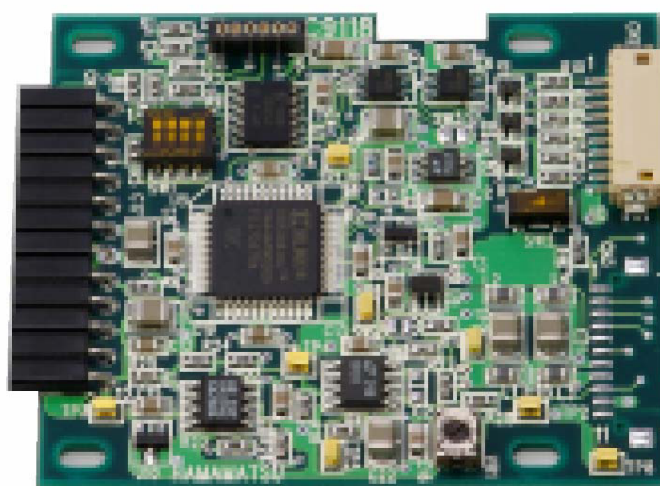


Obr. 6.6. Návrh zapojení snímače PDA S8865-64 na desku plošných spojů.

Tento experimentální návrh je nutné brát jako pokus o nenákladné řešení bez nutnosti zakoupit od výrobce drahý řídicí obvod. Jako zdroj řídicích signálů byla použita deska lineární řádkové kamery LCCD 2048S-14. Opakovanými pokusy za spolupráce s pracovníky firmy PROTOTYPA se toto zařízení nepodařilo oživit a zjistit tak základní chování tohoto snímače. Proto bylo doporučeno zakoupení kompletního řídicího obvodu C9118, který je představen níže. Do doby dokončení diplomní práce se nepodařilo obchodní případ zrealizovat.

6.3 Řídicí obvod pro fotodiodové pole PDA S8865-64

Řídicí obvod C9118 (Obr. 6.7.) CMOS je navržen pro fotodiodová pole série S8865. Tento obvod ovládá snímač pomocí dvou signálů M-CLK a M-RESET napájí jej +5V. Zařízení je navrženo na desku plošných spojů o rozměrech 48x56mm. Blokové schéma řídicího obvodu C9118 je zobrazeno na obrázku 6.8. a nákres rozměrů je na obrázku 6.9.. Rozsah provozních parametrů je uveden v tabulce 6.5.. K řídicímu obvodu lze připojit jeden snímač, ale jednotlivé řídicí obvody lze spojovat paralelně nebo sériově (Obr. 6.10.). Časové průběhy výstupních signálů jsou ukázány na obrázku 6.11. a 6.12..

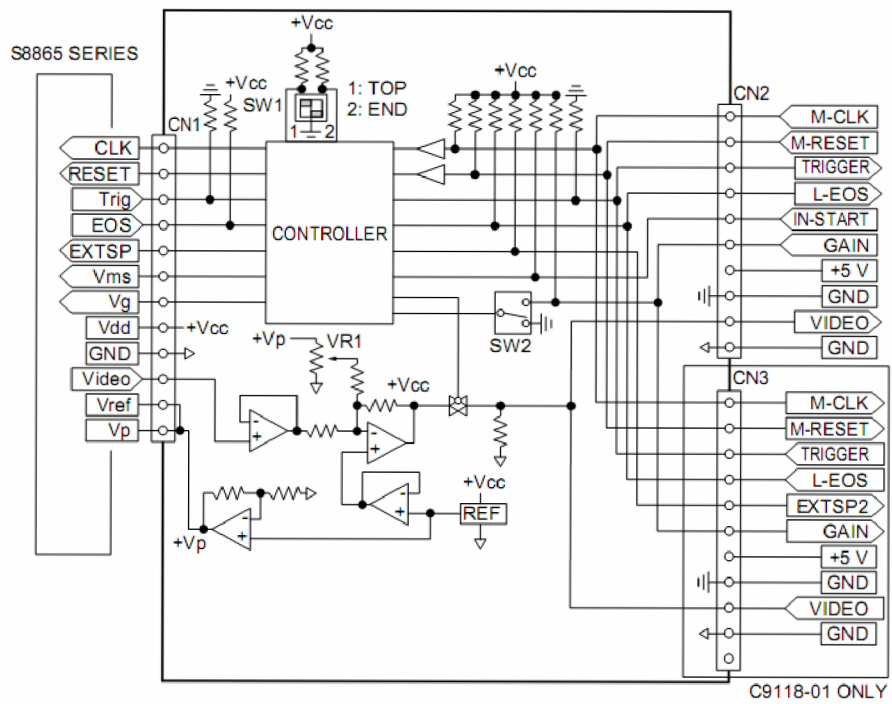


Obr. 6.7. Řídicí obvod C9118 pro snímače PDA S8865-64 [8]

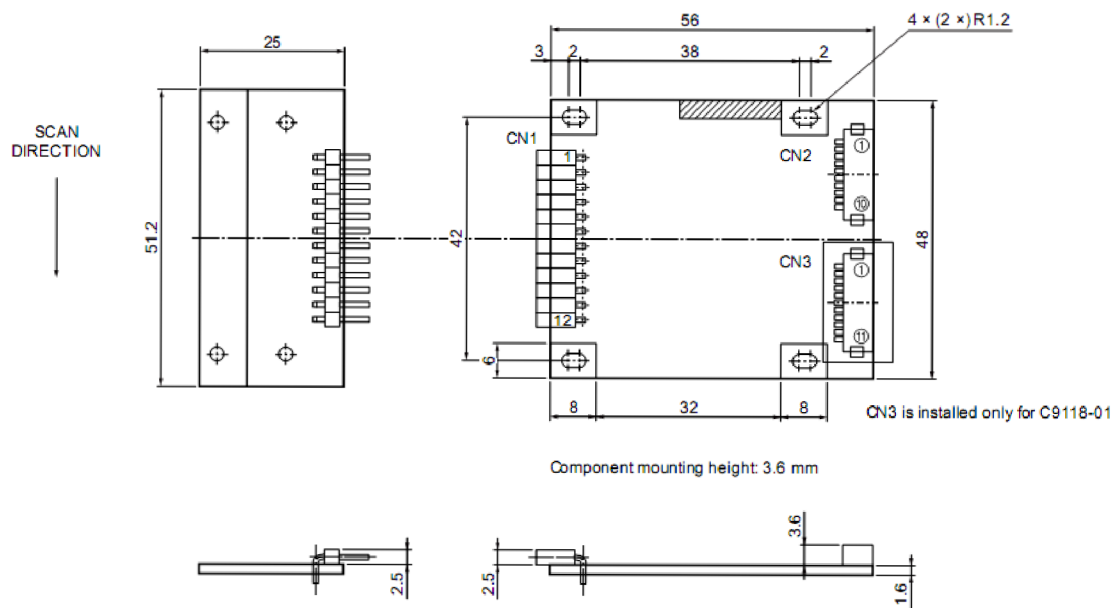
Tab. 6.5. Provozní parametry řídicího obvodu C9118 [8].

Parametr	Symbol	-	Min.	Typ.	Max.
Supply voltage[V] (napájecí napětí)	V _{CC}	-		+7	
Rated voltage [V] (jmenovité napětí)	-	-	4,9	5	5,2
Current consumption [mA] (Odběr proudu)	+I _s	-	-	65	75
Digital input [V] (Digitální vstup)	V _{IH}	High gain	2	-	-
	V _{IL}	Low gain	0	-	0,8
M-RESET pulse width (Low level) [μs] (Šířka pulzu M-RESET)	T _{pwstRESET1}	-	10	-	-
M-CLK frequency [kHz] (frekvence signálu M-CLK)	f _{CLK}	-	40	-	4000
Digital rise/fall times [ns] (doba náběžné a sestupné hrany)	t _{TLH} /t _{THL}	-	-	20	30
Offset output[V] (offsetové napětí na výstupu)	V _{offset}	-	-	0,5	-
Video saturation output[V] * ² (saturační napětí na výstupu)	V _{ast}	-	-	4	-
Data rate [kHz] (rychlost přenosu dat)	f _V	-	10	-	1000
Operating temperature [°C] * ¹	T _{opr}	-	0	-	50

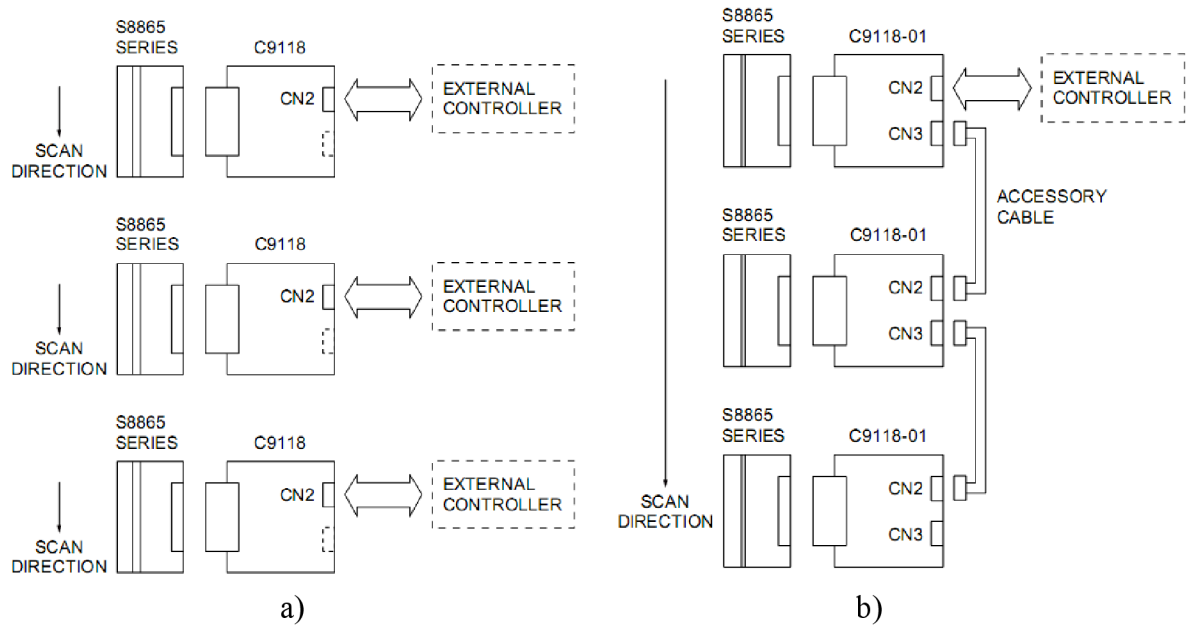
Pozn: *¹ Bez kondenzace
*² Z offsetové hodnoty
Hodnoty pro T_a=25 °C



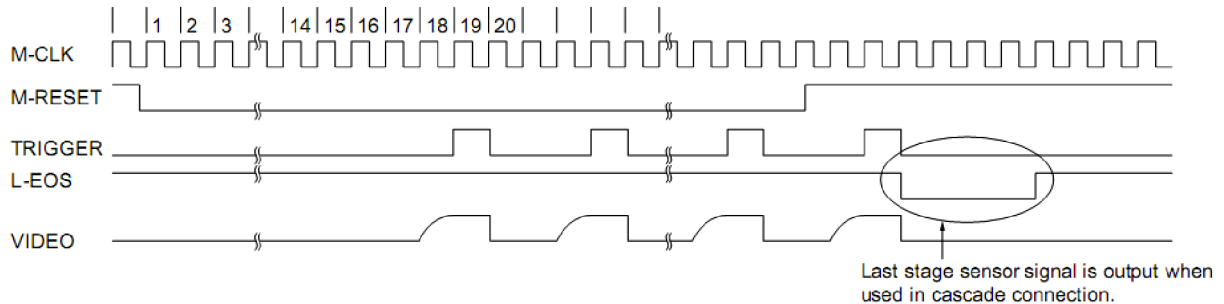
Obr. 6.8. Blokové schéma řídicího obvodu C9118 [8].



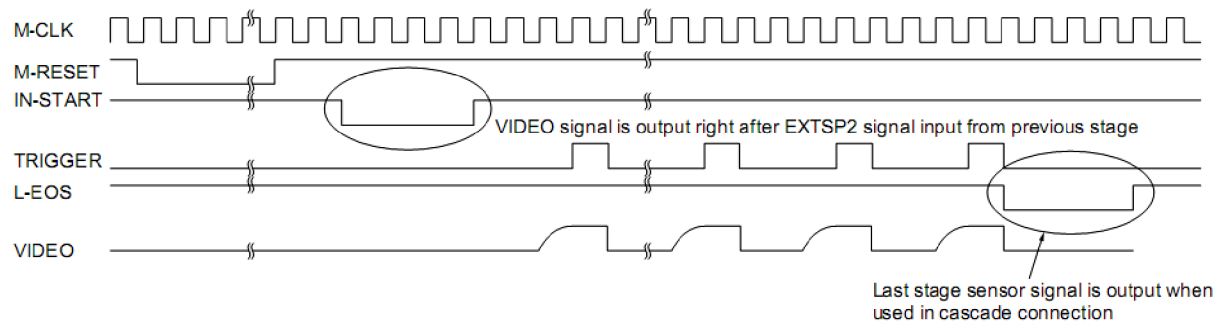
Obr. 6.9. Náčres rozměrů řídicího obvodu C9118 [8].



Obr. 6.10. Zapojení řídicích obvodů C9118 a) jednoduché nebo paralelní zapojení, b) sériové zapojení [8].



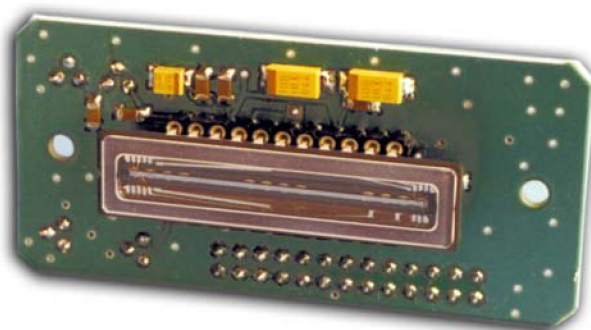
Obr. 6.11. Časové průběhy signálů prvního snímače S8865-64 pro jednoduché a sériové zapojení [8].



Obr. 6.12. Časové průběhy signálů druhého a následujících snímačů S8865-64 pro sériové zapojení [8].

7 LINEÁRNÍ ŘÁDKOVÝ SNÍMAČ LCCD 2048S-14

Pro ověření návrhu detekce letících objektů byla k experimentálnímu měření na základě technických parametrů vybrána lineární řádková kamera LCCD 2048S-14 (Obr. 7.1.) od firmy KHS Instruments, kterou zakoupila firma PROTOTYPA.



Obr. 7.1. Lineární řádková kamera LCCD 2048S-14 [9].

7.1 Lineární řádková kamera LCCD 2048S-14

Kamera LCCD 2048S-14 se skládá z lineárního řádkového snímače ILX 551B od firmy SONY (Obr. 7.5.). Jedná se o zmenšený typ lineárního CCD prvku určeného původně do faxů a skenrů. Obsahuje generátor časových impulzů a obvod pro řízení taktovacích pulzů.

Pro tyto snímače byly navrženy řídicí obvody CLS 551. Dále má kamera rozhraní pro nastavení expozičního času a signálů obrazového vyčítání.

Firma KHS Instruments navrhla spojení snímače ILX 551B a řídicího obvodu CLS 551 čímž vznikla lineární řádková kamera LCCD 2048S-14. Připojením kamery na osciloskop získáme kompletní lineární řádkovou kameru se zobrazovacím zařízením.

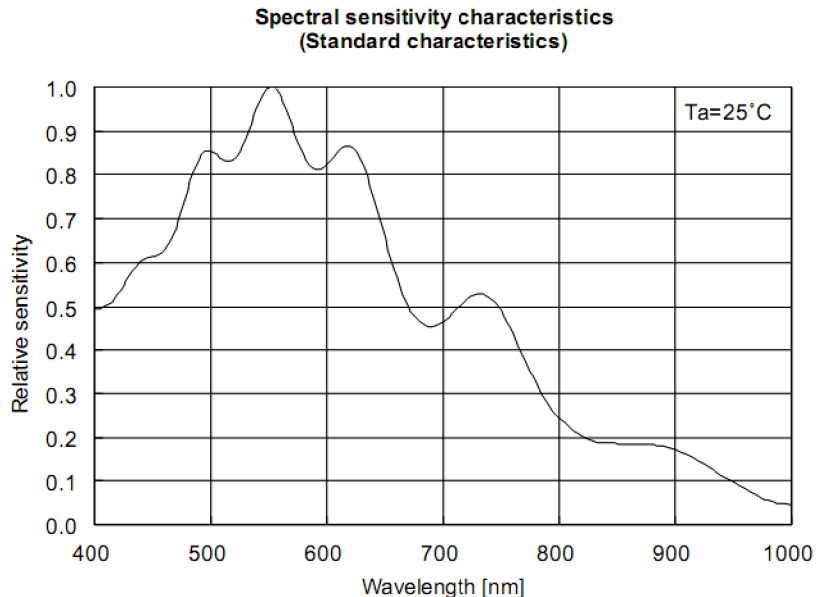
7.2 Základní katalogové údaje kamery

Základní katalogové údaje snímacího pole LCCD 2048S-14 jsou uvedeny v tabulce 7.1.. Spektrální charakteristika je změřena v rozsahu (400-1000)nm (Obr. 7.2.). Pro svou činnost potřebuje LCCD napájení 5 V a 12 V (Tab. 7.2.). Pro tyto snímače byly navrženy řídicí obvody CLS 551, které potřebují pro svoji funkci napájení + 5V a vstupní hodinový signál TTL nebo CMOS s frekvencí až 5 MHz. Pro výše uvedenou kameru je použit oscilátor 8 MHz a hodinový signál 4 MHz. Dále má kamera rozhraní pro nastavení expozičního času a signálů obrazového vyčítání., další externí obvody nejsou potřeba. Zařízení je flexibilní díky digitálnímu rozhraní, které dovoluje uživatelské nastavení generátoru hodinových impulzů

pro vyčítání obrazových bodů a ovládání doby expozice. Nastavování generátoru hodinových impulzů je možné zkratování pinů ps2 až ps0. V základní pozici, jestliže není zkratován žádný pin, je frekvence generátoru přednastavena na nejvyšší hodnotu 4MHz. Dělení kmitočtu lze dosáhnout nastavením pinů podle katalogového listu v rozsahu od 4 MHz do 62,5 kHz v sedmi stupních (Tab. 7.3.). Expoziční čas, čili doba integrace obrazového náboje, se řídí zkratováním pinů SHUT a ts2 až ts0 (Tab. 7.4.). Čas lze měnit pouze při frekvenci hodinových impulzů 4 MHz od 16,4 ms až do velmi krátkého času 4,2 μ s a to celkem ve 14 stupních. Zapojení pinů snímacího pole LCCD 2048S-14 je uvedeno v tabulce 7.5. a popis signálu na jednotlivých pinech je v tabulce 7.6..

Tab. 7.1. Základní katalogové údaje snímacího pole LCCD 2048S-14 [9].

Number of pixels (počet bodů):	2048
Pixel size [μ m ²] (velikost bodu):	14x14
Number of pins (počet pinů)	22
Spectral range [nm] (spektrální rozsah):	<400...1000
Sensitivity [V/(lx sec)] (citlivost):	50 pro 660nm
Saturation exposure [lx sec] (nasycení)	0,06
Analog output [V] (výstupní napětí)	-0,7...9

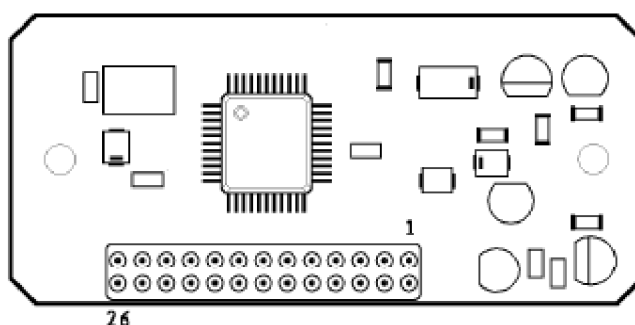


Obr. 7.2. Spektrální charakteristika CCD prvku ILX 551B. [10]

Tab. 7.2. Maximální rozsahy provozních parametrů LCCD 2048S-14 [9].

VCC Supply voltage [V] (napájecí napětí)	- 0,5 až + 6
VDD supply voltage [V] (napájecí napětí)	- 0,5 až + 25
Input voltage applied [V] (vstupní použité napětí)	- 0,5 až Vcc + 0,5
Digital output current [mA] (výstupní proud)	0 až + 5
Storage temperature [°C] (skladovací teplota)	- 20 až + 150
Operating temperature [°C] (provozní teplota)	0 až + 50

7.3 Rozhraní kamery



Obr. 7.3. Zjednodušené rozmístění součástek LCCD 2048S-14 na desce plošných spojů [9].

Tab. 7.3. Řízení frekvence hodin pro vyčítání obrazových bodů snímače LCCD 2048S-14 [9].

ps2	ps1	ps0	pixel clock
1	1	1	4 MHz
1	1	0	2 MHz
1	0	1	1 MHz
1	0	0	500 kHz
0	1	1	250 kHz
0	1	0	125 kHz
0	0	1	62,5 kHz
0	0	0	external/2

Tab. 7.4. Řízení doby expozice snímače LCCD 2048S-14 [9].

ts2	ts1	ts0	exp. time	ts2	ts1	ts0	exp. time
SHUT=1, ps0...ps2=1				SHUT=0, ps0...ps2=1			
1	1	1	4,2 μs	1	1	1	520 μs
1	1	0	6 μs	1	1	0	1,0 ms
1	0	1	10 μs	1	0	1	2,0 ms
1	0	0	17 μs	1	0	0	4,1 ms
0	1	1	33 μs	0	1	1	8,2 ms
0	1	0	66 μs	0	1	0	16,4 ms
0	0	1	130 μs	0	0	1	
0	0	0	260 μs	0	0	0	external

Tab. 7.5. Zapojení pinů LCCD 2048S-14 [9].

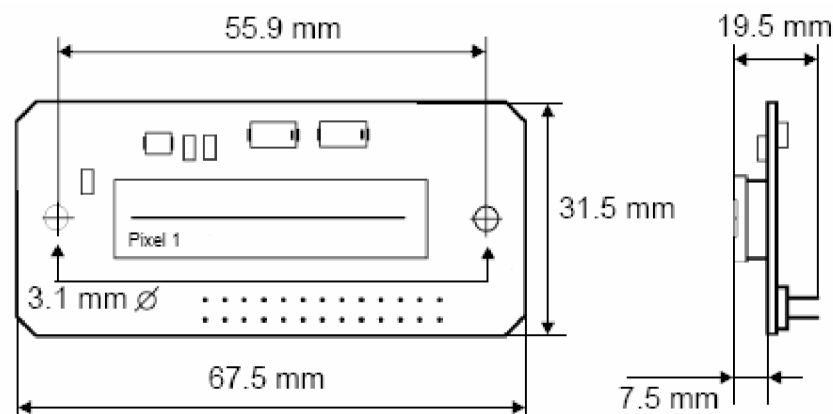
Pin	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Signal	GND	CCD	GND	GND	GND	GND	GND	VDD	VCC
Pin	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Signal	GND	SOS	nc	PCLK	nc	SHUT	Reset	ts2	ps2
Pin	19	20	21	22	23	24	25	26	
Signal	ts1	ps1	ts0	ps0	te	pe	nc	SH	

Tab. 7.6. Popis signálů na pinech LCCD 2048S-14 [9].

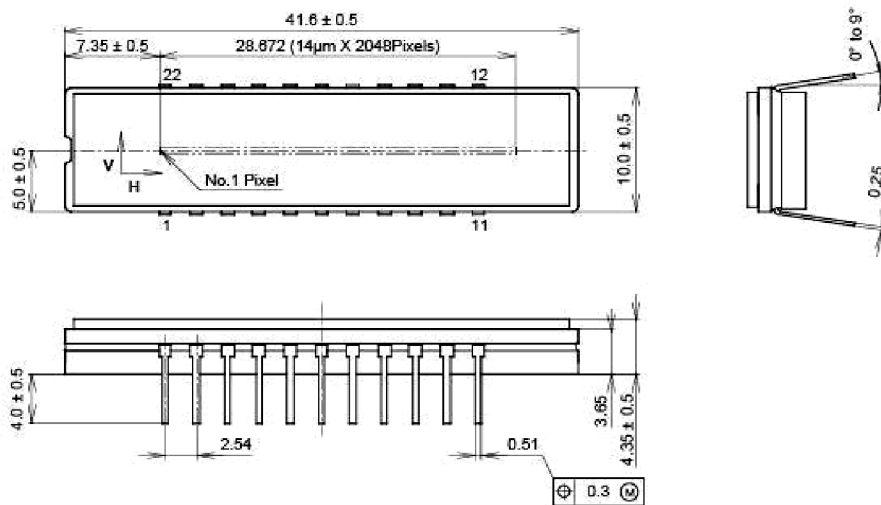
Pin	Pin	Pin
Name	Type	Description (popis)
GND	Power	Power Ground (zem)
VCC	Power	Power + 5 V (napájení)
VDD	Power	Power +12 V (napájení)
CCD	Out	Analog output (výstupní analogový signál)
SOS	Out	Start of scan output (začátek snímku)
PCLK	Out	Pixelclock output (hodinový signál)
ts0...ts1	In	Exposure control (řízení doby expozice)
te	In	Exposure control external (vnější řízení expozice)
ps0...ps1	In	Pixelclock kontrol (řízení hodinového signálu)
pe	In	Pixelclock external (vnější řízení hodinového signálu)
Reset	In	CCD asynchron reset low aktive (reset)
SH	In	Sample/Hold enable hi aktive (vzorkování/uložení)
SHUT	In	Shutter enable (řízení doby expozice)
nc	nc	Do not connect! (nezapojovat)

7.4 Náskres mechanických částí kamery

Kompletní zařízení je navrženo na desku plošných spojů o velikosti 67,5 mm x 31,5mm (Obr.7.4.).



Obr. 7.4. Náskres mechanických rozměrů kamery LCCD 2048S-14 [9].



Obr. 7.5. Nákres pouzdra snímače ILX 551B [10].

Výška od spodní strany k povrchu senzoru je $2,45 \pm 0,3$ mm. Tloušťka krycího skla je 0,8mm a index lomu je 1,5 [10].

7.5 Srovnání optických parametrů PDA S8865-64 a CCD ILX551B

Fotodiodové pole PDA a lineární řádkový snímač CCD jsou optické prvky. Z tohoto důvodu jsou v tabulce 7.7. porovnány nejdůležitější optické vlastnosti.

Tab. 7.7. Srovnání optických parametrů fotodiodové pole PDA S8865-64 a lineárního řádkového snímače CCD ILX 551B. [7] [8]

Parametry	Symbol		PDA S8865-64	ILX 551B (LCCD 2048S-14)
Numer of elements (počet prvků) [-]			64	2048
Pixel size (velikost bodu) [μm]	W x H		700x800	14x14
Spectral range (spektrální rozsah) [nm]	λ		200 až 1000	400 až 1000
Peak sensitivity wavelength [nm] (špička citlivosti pro vlnovou délku)	λ_p		720	560
Clock pulse frequency [kHz] (frekvence hodinových pulzů)	f(CLK)		40 až 4000	62,5 až 4000
Saturation exposure (nasyčení) [lx sec]	Esat	High gain	$0,0008^{*1}$	0,045
		Low gain	$0,0016^{*1}$	
Photo sensitivity (citlivost) [V/lx.s]	S	High gain	4400	40^{*2}
		Low gain	2200	
Dark output voltage [mV] (výstupní napětí při zastínění)	Vd	High gain	$0,02^{*3}$	$0,3^{*4}$
		Low gain	$0,01^{*3}$	
Sensitivity nonuniformity [%] (nerovnoměrná citlivost)	PRNU		$\pm 10^{*5}$	8
Saturation output voltage [V] (Výstupní napětí při saturaci)	Vsat		3,5	1,8
Dynamic range (dynamický rozsah)[-]	DR	High gain	$175\,000^{*6}$	6000^{*6}
		Low gain	$350\,000^{*6}$	

Pozn:

PDA S8865-64: $T_a=25^\circ\text{C}$, $V_{dd}=5\text{V}$, $V(\text{CLK})=5\text{V}$, $V(\text{RESET})=5\text{V}$, $V_{\text{gain}}=5\text{V}$ (High gain),
0V (Low gain)

LCCD 2048S-14 (ILX 551B): $T_a = 25^\circ\text{C}$, $V_{DD1} = 9\text{V}$, $V_{DD2} = 5\text{V}$, $f(\text{CLK})=1\text{MHz}$,
světelný zdroj= $3200\text{K}(2927^\circ\text{C})$,
IR cut filter: CM-500S ($t = 1.0\text{mm}$)

*¹Měřeno pro 2856 K(2583°C) - halogenová žárovka

$$Esat = \frac{V_{sat}}{S} \quad (12)$$

*²Měřeno pro rovnoměrnou intenzitu osvětlení

*³Měřeno pro integrační čas $t=1\text{ms}$

*⁴Měřeno pro integrační čas $t=10\text{ms}$

*⁵Fotodiodové pole je vystavené rovnoměrnému světelnému záření do nasycení 50%

*⁶

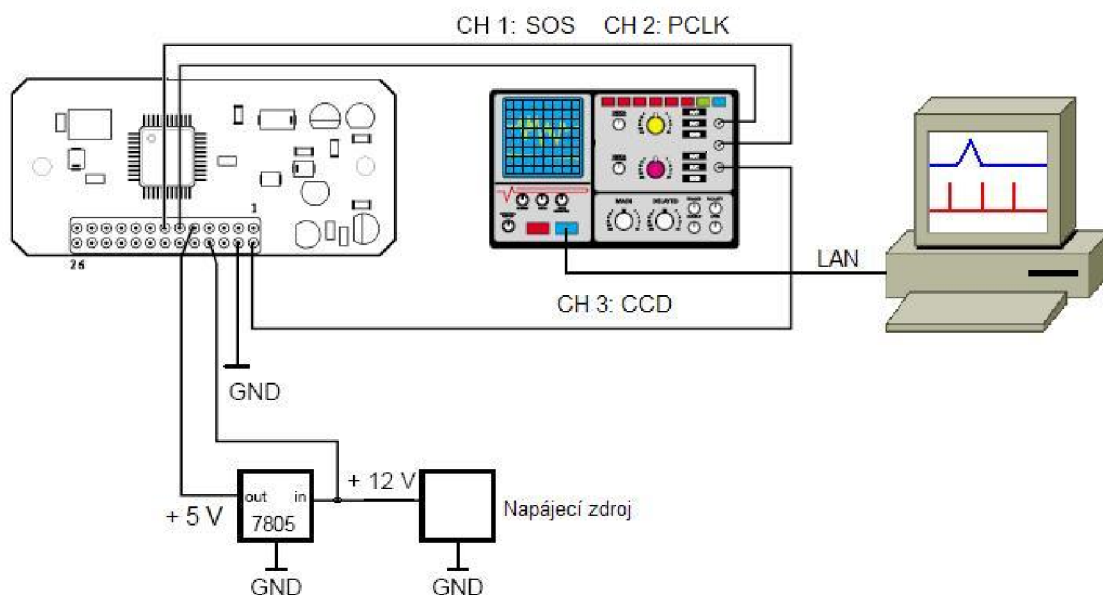
$$DR = \frac{V_{sat}}{V_d} \quad (13)$$

8 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Cílem navržených experimentů bylo určit hranice použitelnosti prvků CCD v podmínkách firmy PROTOTYPA a naznačit možná řešení budoucích vyvíjených zařízení. Měření byla rozdělena na statickou a dynamickou oblast. Ve statické části byly použity zobrazované objekty, které se nepohybovaly a byly pevně umístěny nad snímacím zařízením. Ověřovalo se zobrazování předmětů na CCD snímači při změně zaostření objektivu, výšky a tvaru předmětu. Pro určování polohy předmětu a šířky pulsu byl používán programu MATLAB. V dynamické oblasti byla provedena měření s letícími objekty.

8.1 Blokové schéma experimentálního měření

Experimentální měření se skládalo z pěti funkčních bloků (Obr. 8.1.). Kamera byla napájena +12V ze zdroje stejnosměrného napětí (VDD). Aby činnost zařízení nebyla ovlivňována případnými změnami napájecího napětí, je součástí zapojení také integrovaný obvod 7805 stabilizující stejnosměrné napětí +5V. Na první kanál osciloskopu CH1 byl zapojen signál začátku snímku SOS. Signál generátoru hodinových impulzů PCLK byl zapojen na druhý kanál CH2. Výstupní analogový signál CCD byl zobrazen na osciloskopu jako třetí kanál CH3. Na tomto signálu bylo prováděno trigrování na náběžnou hranu signálu. Osciloskop byl spojen přes lokální síť LAN s osobním počítačem, na kterém zpracováváme zachycené průběhy.



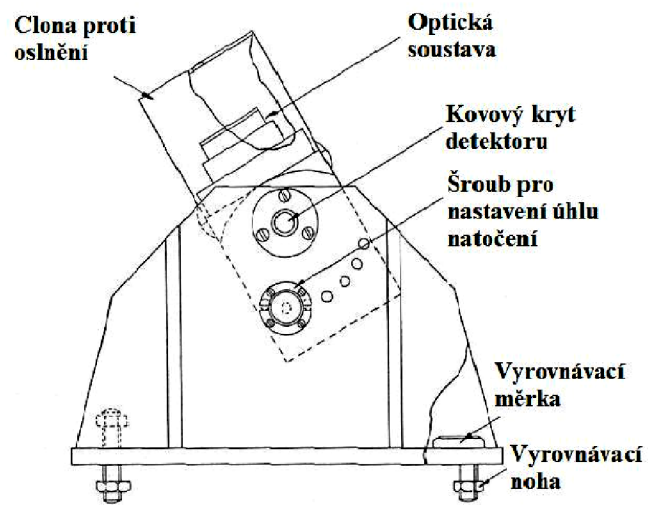
Obr. 8.1. Blokové schéma experimentu.

8.2 Měřicí systém

Měření probíhalo podle návrhu pro detekci letícího objektu s přímým osvětlením snímače. Lineární řádková kamera byla uchycena spolu se stabilizátorem napětí na desku plošných spojů. Signály generátoru hodinových impulzů a ovládání expozice byly z pinů na kameře vyvedeny na externí pinové pole, kde se daly snadno nastavovat. Pro zvýšení citlivosti snímače bylo využito mechanické konstrukce optického detektoru AVL 460 (viz. Příloha A, Obr. 3.). Vnitřní elektronika původního zařízení byla vyměněna za výše uvedenou lineární řádkovou kameru. Těsně nad snímač byla připevněna clona s úzkou štěrbinou širokou 0,2 mm. (viz. Příloha A, Obr. 1.). Přes štěrbinu tak pronikal rovnoměrný tenký paprsek světla, který nepřesytí snímač. Snímač s clonou byl uložen do kovového krytu detektoru (viz. Příloha A, Obr. 2.). Zaostření světla se provádělo optickou soustavou s čočkami našroubovanou na clonu (viz. Příloha A, Obr. 3.). Na optickou soustavu lze našroubovat kruhový tubus složený ze 3 dílů, sloužících jako clona proti oslnění. Poslední díl má obdélníkový průřez (viz. Příloha A, Obr. 4.).

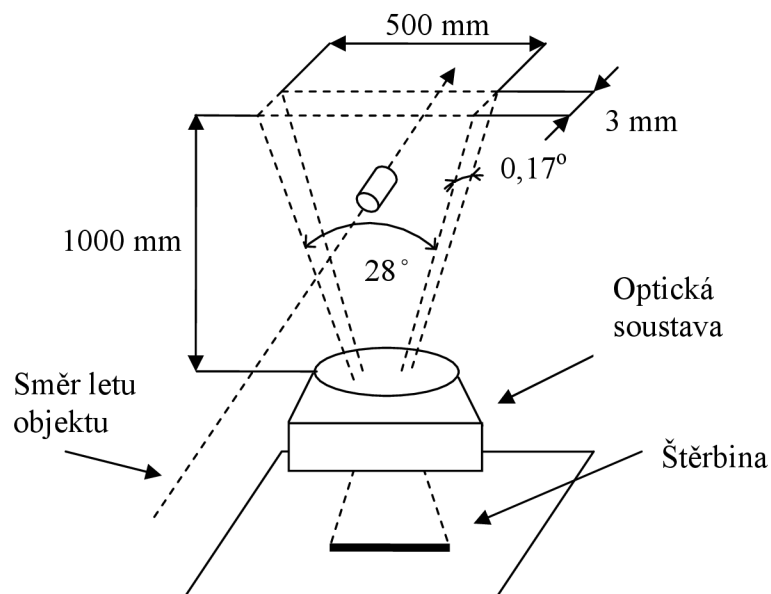
8.2.1 Popis měřícího systému AVL 460

Původní systém byl navržen pro měření rychlosti projektilů jak ve vnějších tak i tunelových střelnicích v širokém rozsahu ráží, výšek střelby a podmínek osvětlení. Systém používá dva optické detektory AVL 460 s balistickým měřícím zařízením a párem jednotek dálkového ovládání Typ 42405. Obecné uspořádání střeleckého stanoviště je ilustrováno na obrázku 4.3.. Na mechanickou konstrukci lze použít výměnné čočky pro 35 mm kamery se závitem Pentax, jejichž ohnisková vzdálenost je vybírána s ohledem na požadovaný úhel záběru. Systém může být konvenčně použit pro přírodní i umělé světelné podmínky a lze využít i infračervený zdroj osvětlení, pokud není vhodné použití viditelného světla. Každý detektor je namontována na podstavci, ze kterého může být snadno odstraněn, pokud by měl být permanentně instalován na stanovišti. Detektor lze otáčet kolem horizontální osy o $\pm 45^\circ$ v 15° krocích a o 90° ve vertikální ose krocích (Obr. 8.2.). To dovoluje značnou flexibilitu instalace zařízení. Individuální řízení citlivosti každého detektoru může být nastavováno v závislosti na výšce střelby a ráži projektilu pro dosažení maximální přesnosti. Každý detektor má indikační kontrolku, která indikuje zachycení projektilu. Lze přepínat mezi dvěma způsoby trigrování – na vrchol pulsu nebo na základnu (bázi) pulsu [11].



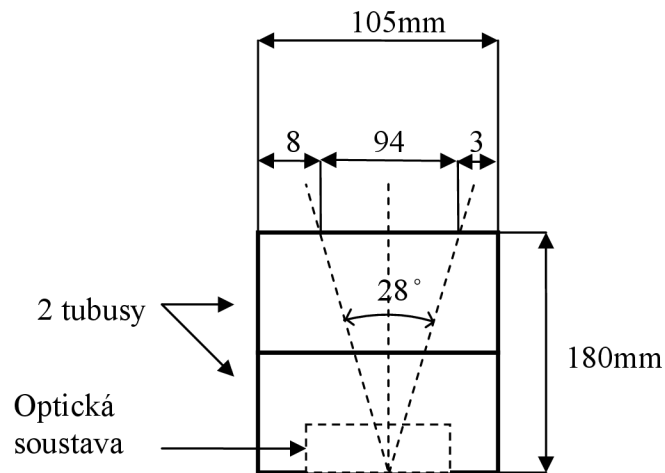
Obr. 8.2. Optický detektor AVL 460 [11].

Pro ohniskovou vzdálenost 50 mm je velikost pozorovacího pole ve výšce 1m:



Obr. 8.3. Detekce letícího objektu pomocí snímače CCD.

Rozměry zorného pole při použití CCD snímače byla ověřena měřením a výpočtem.

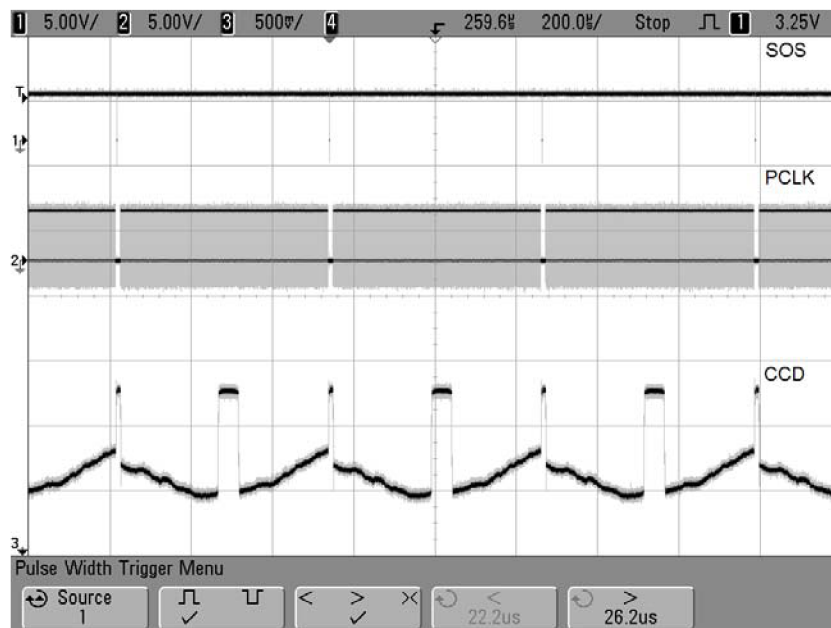


Obr. 8.4. Velikost zorného pole snímače CCD.

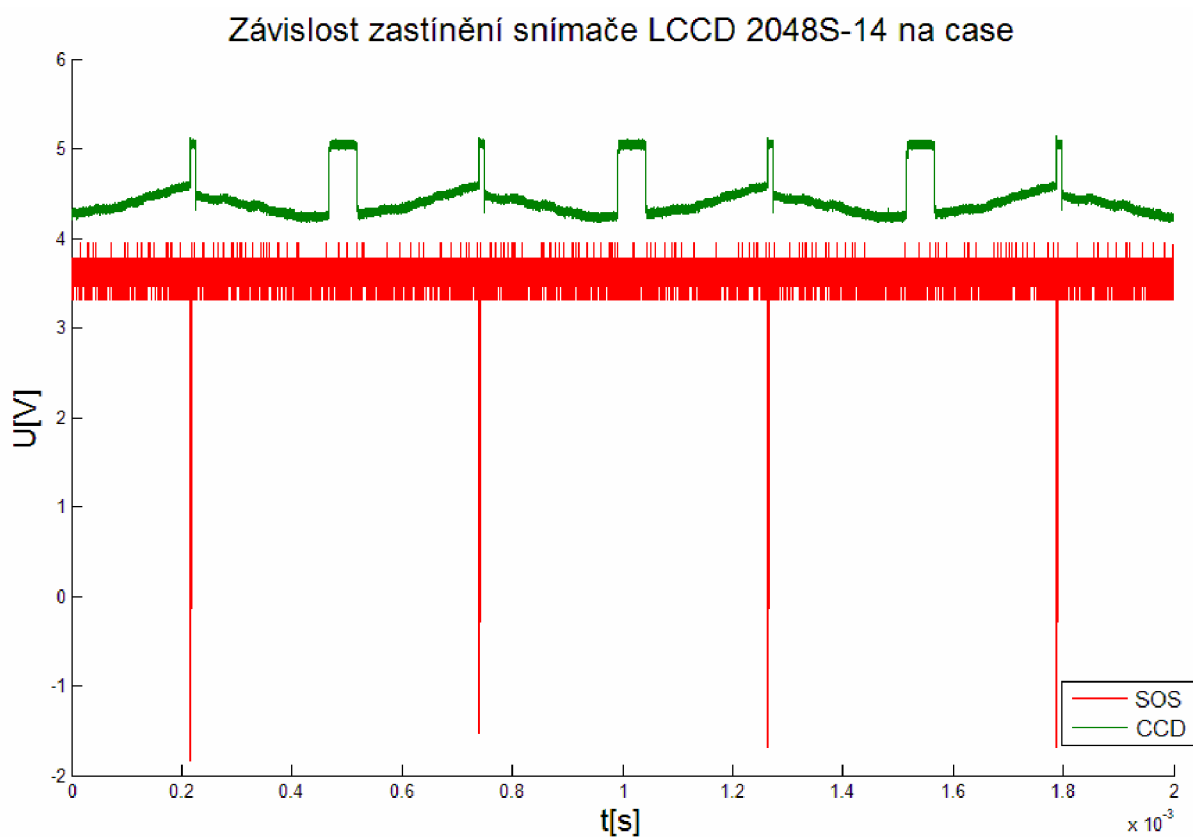
8.3 Zpracování naměřený dat

Způsob zpracování naměřených dat je shodný pro měření s umělým nebo venkovním osvětlením. Průběhy na obrazovce byly převedeny do počítače za pomoci aplikace IntuiLink Data Capture Application, která je součástí vybavení u osciloskopů Agilent. V této aplikaci lze volit například počet kanálu, které chceme zachytit z obrazovky. Počet vzorků se liší podle počtu kanálu, které chceme zobrazit. V našem případě jsem měli zapojené tři kanály a maximální počet vzorků byl 500 000 pro každý kanál. Při zobrazení pouze jednoho kanálu je maximální počet vzorků 1 000 000.

Pro zpracování byl použit program MATLAB. Na obrázcích se objevují tři druhy signálu. První signál SOS představuje začátek doby snímku. Tento okamžik je signalizován poklesem úrovně signálu SOS téměř k nule. Druhý signál PCLK ukazuje hodinové impulzy pro vyčítání obrazových bodů. Na třetím signálu CCD je vidět zachycení objektu snímačem. Příklad signálu z měření s umělým osvětlením je na obrázku 8.5..



Obr. 8.5. Závislost zastínění snímáče na čase při měření v místnosti, $t_{exp}=520 \mu s$.



Obr. 8.6. Závislost zastínění snímáče LCCD 2048S-14 na čase, $t_{exp}=520 \mu s$.

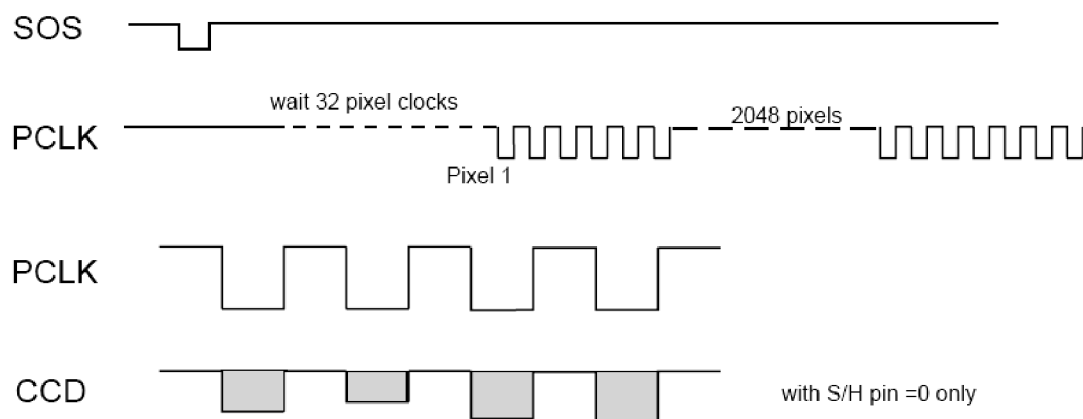
Signál generátoru hodinových impulzů PCLK není zobrazen společně s ostatními signály z důvodu přehlednosti, nicméně je dobře patrný na obrázku 8.3..

8.3.1 Použití programu MATLAB

Výhodou zpracování signálů pomocí aplikace IntuiLink Data Capture Application a vytvořeného programu v aplikaci MATLAB je vysoký počet zaznamenaných vzorků a z toho plynoucí detailní zobrazení průběhů.

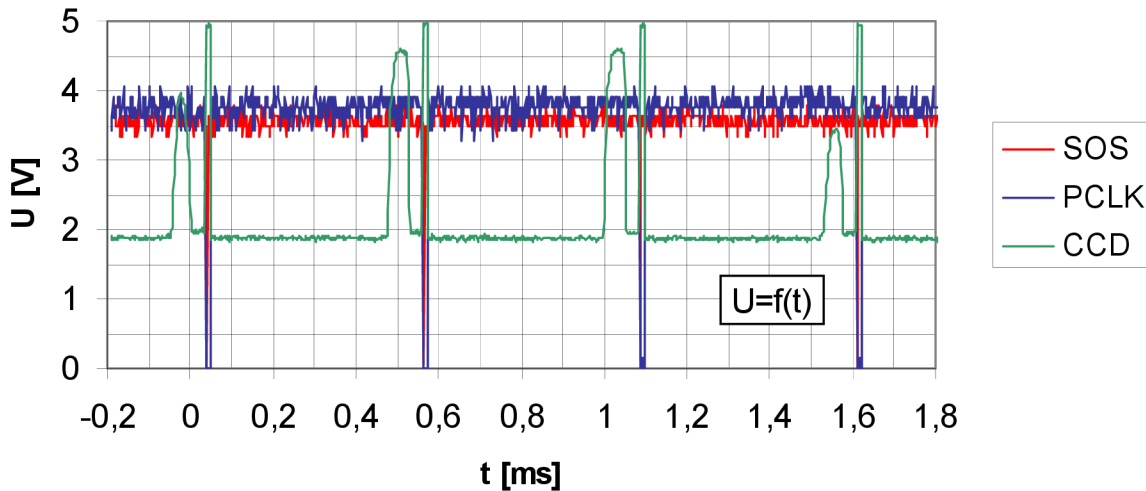
Doba expozice snímače $t_{exp}=520 \mu s$ a časová základna osciloskopu $t_z=200 \mu s/dílek$ je zvolena záměrně, aby bylo možné sledovat více snímků. Snímací prvek má 2048 bodů. Podle katalogového listu dochází k vyčítání obrazového bodu při každé periodě signálu PCLK. Maximální frekvence hodin PCLK je 4MHz s periodou pulzu $t_p=0,25 \mu s$. Výrobce dále zavádí na začátek každého snímku zpoždovací interval t_{zp} o délce 32 period PCLK (Obr. 8.7.). Celková doba snímku $t_s=520 \mu s$ je tedy daná zpoždovacím intervalem $t_{zp}=8 \mu s$ a dobou $t_v=512 \mu s$ pro vyčtení 2048 obrazových bodů. Poměr doby expozice a doby snímku je 1:1. Kratší doby expozice vyžadují náročnější parametry osvětlení pro dosažení stejné citlivosti. Při časové základně $200 \mu s/dílek$ na osciloskopu zobrazíme děj trvající 2ms. V této době je zaručeno zobrazení maximálně třech a minimálně dvou celých snímků. Při počtu 500 000 vzorků na jeden kanál dostáváme dostatečné rozlišení vzorku 4ns. Ukázka rozlišení je zobrazena na následujících obrázcích.

Signály na obrázku 8.8. jsou zobrazeny za pomoci USB flash disku, který lze připojit k osciloskopu. Zde je ovšem počet vzorků pouze 1000 na každý kanál. Signál PCLK se zde díky vysoké decimaci vzorků jeví téměř jako šum. Na obrázku 8.10. je zobrazen detail náběžné hrany impulzu a jsou zde jednotlivé vidět hodinové impulzy.



Obr. 8.7. Katalogové zobrazení začátku doby snímku snímače LCCD 2048S-14 [9].

Závislost zastínění snímače LCDD 2048S-14 na čase

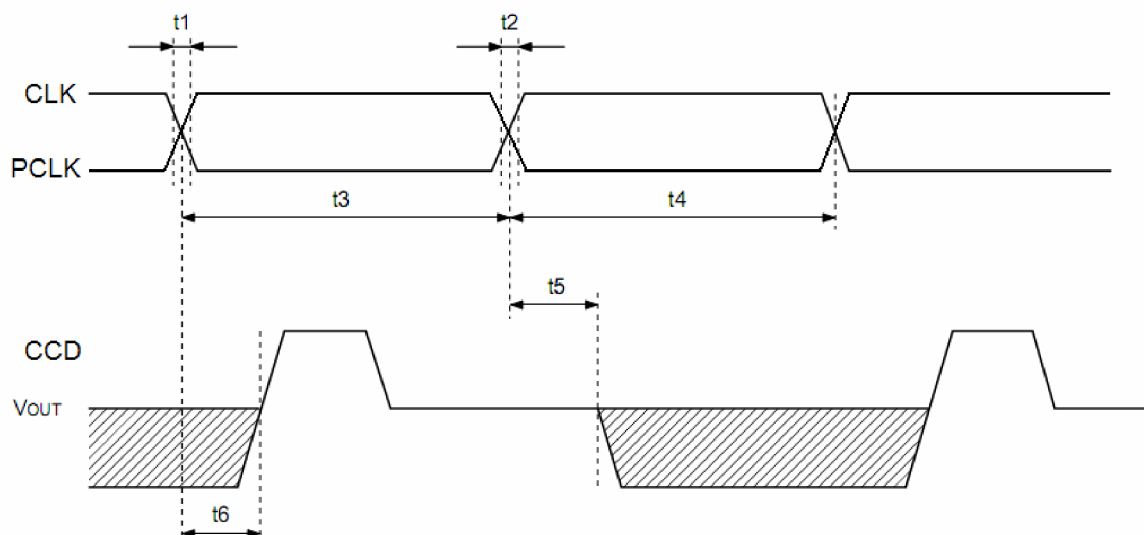


Obr. 8.8. Závislost zastínění snímače na čase za pomoci USB flash disku, $t_{\text{exp}}=520 \mu\text{s}$.

8.3.2 Získání výstupních dat

Navržený skript v programu MATLAB (viz. Příloha C). nalezne začátek prvního snímku pomocí minima signálu SOS. Po uplynutí zpoždovacího intervalu začíná řádková kamera generovat hodinový signál PCLK. Skript nalezne opět minimum v první periodě hodin a po dalším časovém zpoždění (viz Tab. 8.1.) získá hodnoty napětí signálu CCD v oblasti platných dat. Tímto způsobem dojde k vyhodnocení jednoho snímku a celý proces se opakuje po dalším minimu signálu SOS.

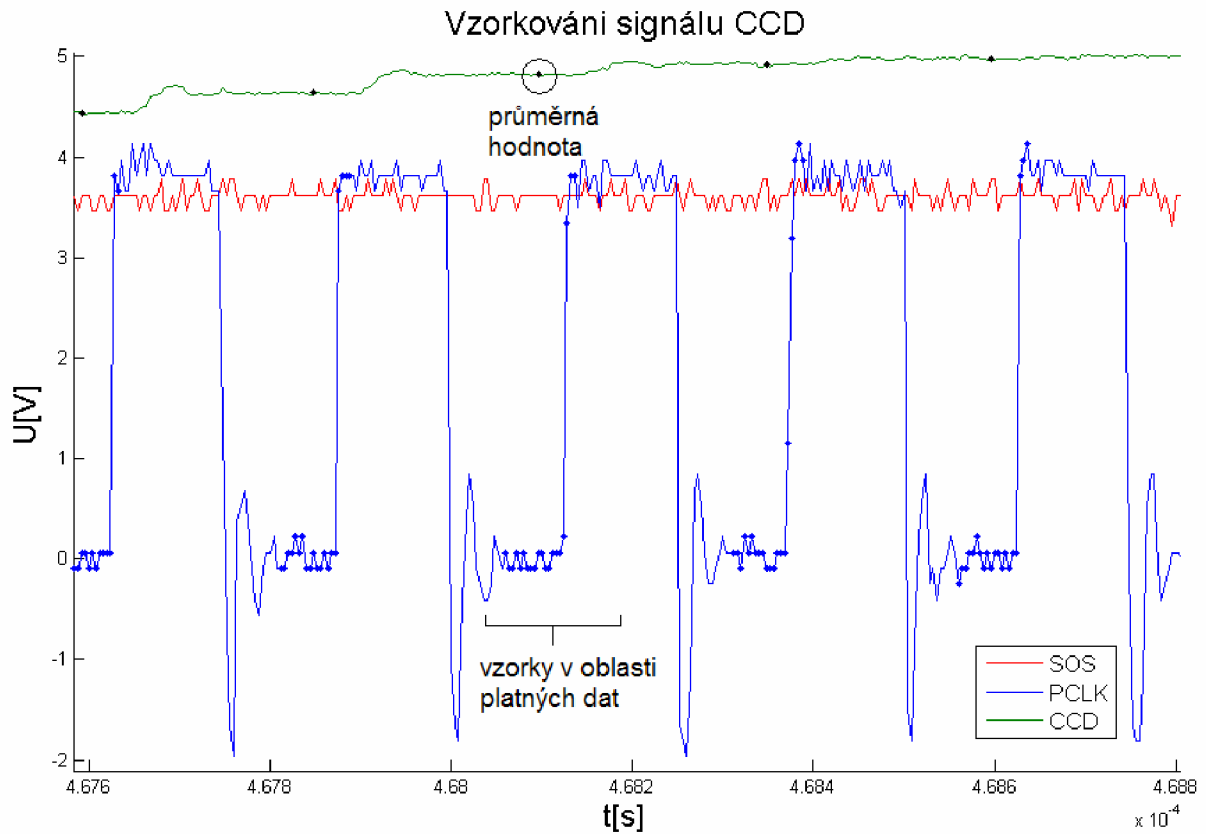
K vyčítání obrazové informace z pixelů dochází v každé periodě hodinového signálu PCLK. Výstupní signál PCLK z kamery LCDD je invertován k signálu CLK senzoru CCD. Z důvodu vysokého rozlišení obsahuje signál šumy a náhodné impulzy, které je nutno eliminovat při zjišťování amplitudy signálu CCD. Oblast výstupních dat z pixelů začíná po uplynutí časového zpoždění t_5 po sestupné hraně signálu PCLK (Obr. 8.9.) a je ohraničena intervalem t_6 . Výrobce uvádí minimální, maximální a průměrné hodnoty časových zpoždění (Tab. 8.1.). V našem případě je nastaveno časové zpoždění $t_5=50 \text{ ns}$ a $t_6=120 \text{ ns}$. Při rozlišení vzorků 4ns navzorkujeme jednu periodu hodin na 62 vzorků. Po započtení časových zpoždění získáme 20 vzorků na oblast platných dat (Obr. 8.10.). Tyto vzorky určují časové okamžiky, ve kterých je sejmuta hodnota signálu CCD a na obrázku 8.10. jsou vyznačeny modrými body. Z těchto hodnot vypočítáme aritmetický průměr signálu CCD v jedné periodě hodin. Tato průměrná hodnota je vyznačena černými body.



Obr. 8.9. Časový průběh vyčítání obrazové informace ze signálu CCD [10].

Tab. 8.1. Časové intervaly zpoždění [10].

Časové intervaly	Symbol	Min.	Typ.	Max.
CLK pulse rise/fall time[ns]	t1, t2	0	10	---
CLK pulse duty*	---	40	50	60
CLK – VOUT1 [ns]	t5	50	80	110
CLK – VOUT2 [ns]	t6	30	75	120

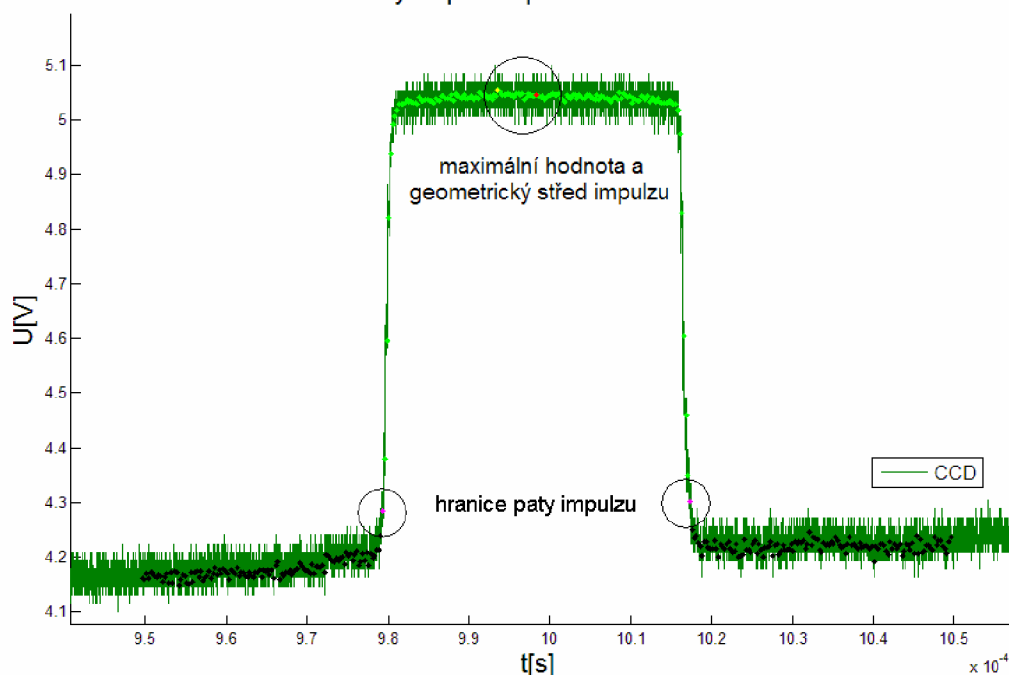


Obr. 8.10. Vzorkování signálu CCD, $t_{\text{exp}}=520 \mu\text{s}$.

8.3.3 Měření polohy a šířky pulzu

Abychom mohli určit, v jakém místě nad snímačem došlo k průletu objektu nebo jaká je šířka impulzu, musíme znát, jaké pixely byly zastíněny. Navržený program v MATLABU vypočítává v každé periodě hodin průměrnou hodnotu signálu CCD a vlastně tak spojuje hodinový signál s fyzickými pixely. Počítáním jednotlivých period od začátku snímku až do místa, kde proletěl projektil nad snímačem, zjistíme polohu projektilu. Pro určení šířky pulzu zadáváme do programu referenční úroveň napětí. Všechny průměrné hodnoty signálu CCD větší než tato hodnota budou programem vyhodnocovány jako pulz (Obr 8.11.). Pokud je úroveň signálu na okrajích snímku větší než úroveň základny pulzu (Obr. 8.6.), zúžíme vyhodnocovací oblast (Obr. 8.11.). Šířce pulzu odpovídá určitý počet period signálu hodin (pixelů), které vynásobíme šířkou $14\mu\text{m}$ jednoho pixelu na snímači. Maximální hodnota impulzu nemusí být stejná jako geometrický střed impulzu.

Zobrazení šířky impulzu predmetu na snimaci CCD



Obr. 8.11. Zobrazení šířky impulzu předmětu na snímači CCD, $t_{\text{exp}}=520 \mu\text{s}$.

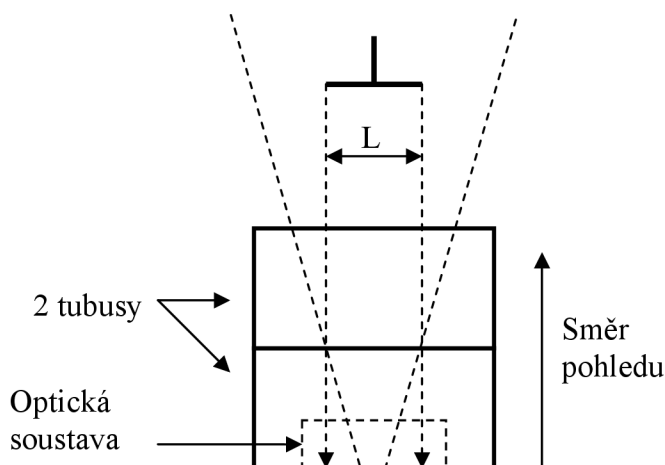
8.4 Experimentální statické měření ve vnitřních prostorech

Hlavním důvodem, pro měření ve vnitřních prostorech byla nezávislost na počasí a testování umělého zdroje světla. Experimenty jsou soustředěny na zobrazování statického objektu na snímači. Pro měření je využito mechanické konstrukce optických hradel (viz. Příloha A, Obr. 9.). Jako zdroj světla je použita lineární žárovka LINESTRA ve tvaru trubice. Žárovka je napájena stejnosměrně 140 V a je zavěšena na konstrukci hradel. Optický snímač je přesně umístěn na zem pod žárovku. V této vzdálenosti od žárovky byla intenzita osvětlení 65 luxů. Clona proti oslnění nebyla použita. Z důvodu konečné šířky trubice nevytváří světlo žárovky na snímači stejnou úroveň signálu, ale v okrajích má signál větší amplitudu (Obr. 8.6.). V grafu jsou vidět čtyři po sobě jdoucí snímky. Objekt je na snímači zachycen třikrát a je umístěn uprostřed snímače. Doba expozice byla nastavena na 520 μs . Úroveň zatemnění snímače je $U_{\text{zat}}=5\text{V}$ a úroveň osvětlení je $U_{\text{osv}}=4,25\text{V}$. Z toho vyplývá, že užitečná část signálu je přibližně 0,75V.

8.4.1 Vliv výšky a zaostření

Experiment spočívá v postupné změně výšky předmětu a v následném zaostření optické soustavy. Optická soustava se je velmi citlivá na přesnou pozici uložení snímače do

ohniska objektivu. V důsledku odchylky v uložení snímače zde neplatí číselné hodnoty zaostření uvedené na stupnici objektivu. Proto byla proměřena závislost výšky objektu na zaostření (Tab. 8.2.). Jako zobrazovaný objekt je použita plastová lišta ve tvaru písmena T (Obr. 8.12.), která se na snímáči jeví jako obdélník. Optická soustava je od firmy Pentax. Rozsah zaostření je od 0,35m do nekonečna. Hodnota clonového čísla byla 1,8.



Obr. 8.12. Náskres experimentu pro měření výšky a zaostření.

Tab. 8.2. Tabulka zaostření pro šířku předmětu $L=11\text{mm}$.

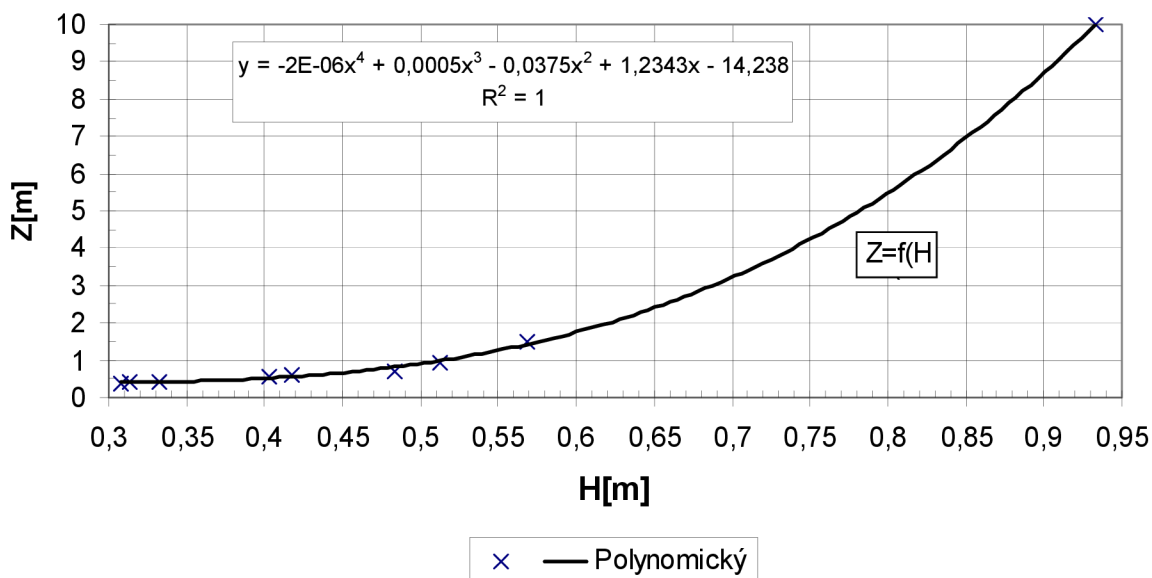
Číslo měření	Zaostření Z [m]	Výška objektu H nad snímačem [cm]	Výška objektu nad zemí [cm]	Šířka pulsu S [mm]	Koeficient zmenšení k
1	0,38	30,8	52,5	3,010	3,654
2	0,4	31,3	53	2,884	3,814
3	0,43	33,3	55	2,688	4,092
4	0,57	40,3	62	2,128	5,169
5	0,63	41,8	63,5	1,946	5,653
6	0,94	51,3	73	1,540	7,143
7	1,5	56,8	78,5	1,232	8,929
8	10	93,3	115	0,784	14,031

$$k = \frac{L}{S} \quad (14)$$

Koeficient zmenšení udává poměr skutečného rozměru L zobrazovaného objektu a vypočítané šířce S impulzu na snímáči.

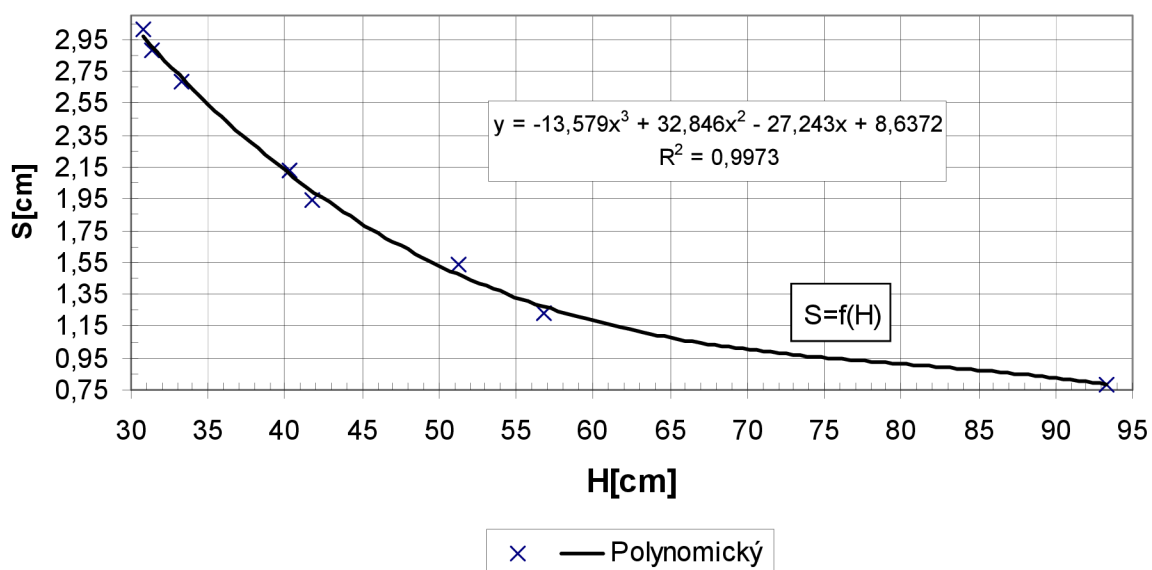
Podle teoretických předpokladů je při zvětšování výšky objektu od snímače nutné zaostřování objektivu do dálky a současně se zmenšuje šířka základny impulzu. Tabulka 8.2. a grafy na obrázcích 8.13. a 8.14. slouží jako orientační návod pro další měření.

Závislost zaostření objektivu Z na výšce předmětu H



Obr. 8.13. Závislost zaostření objektivu Z na výšce předmětu H.

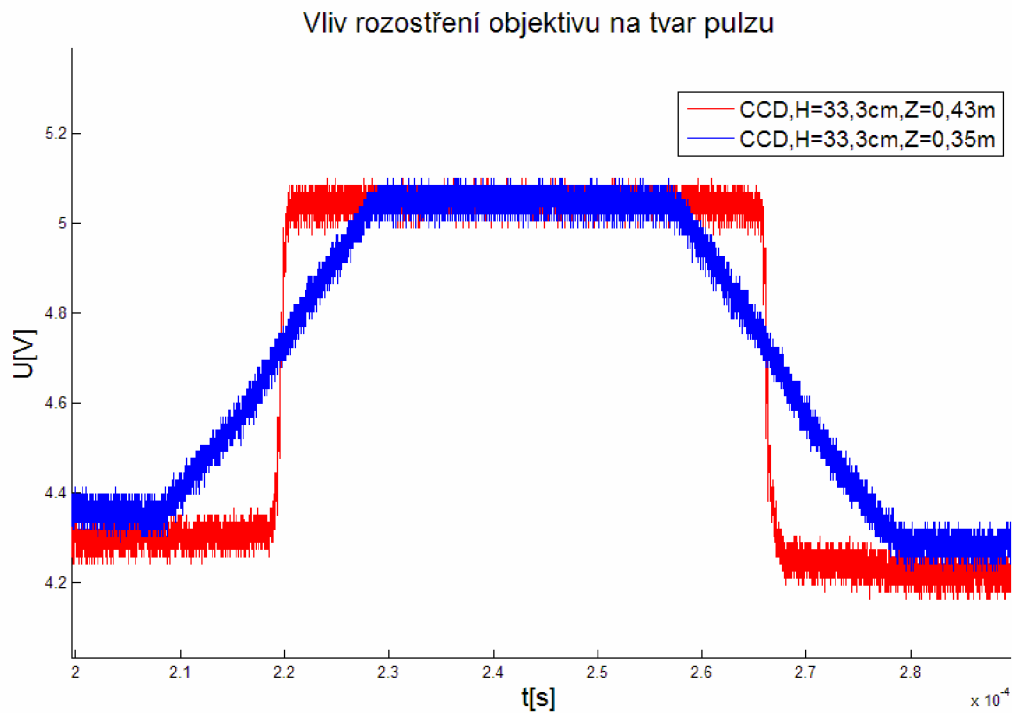
Závislost šířky pulzu S na výšce předmětu H



Obr. 8.14. Závislost šířky signálu S na výšce předmětu H.

8.4.2 Vliv rozostření objektivu

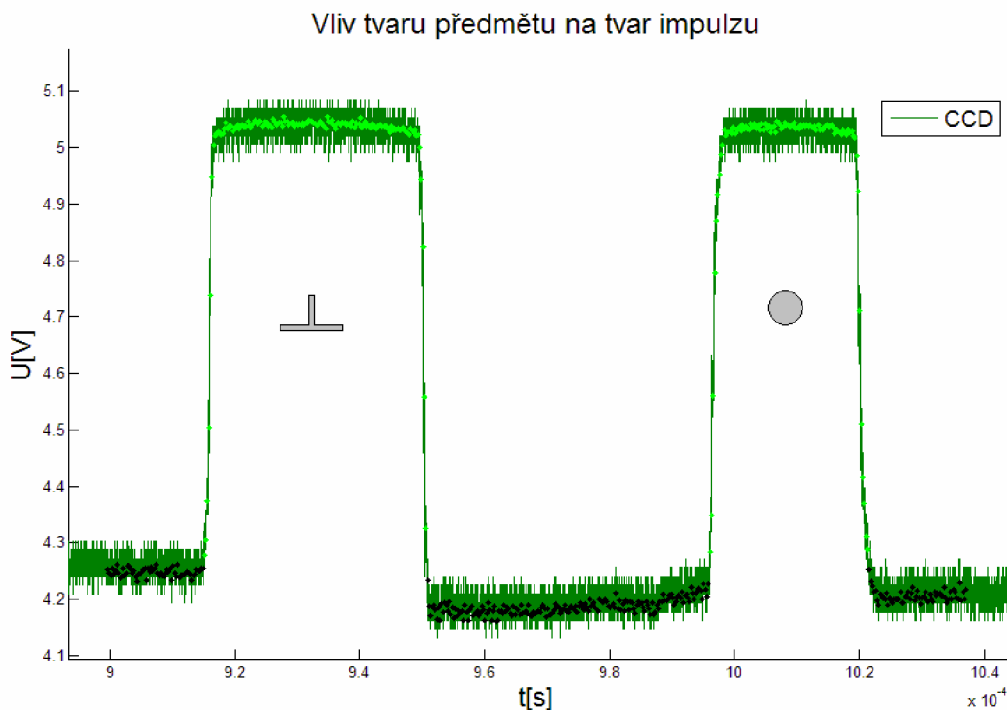
Cílem experimentu bylo zjistit, jak je snímač citlivý na rozdílné tvary zobrazovaných předmětů. Vliv rozostření objektivu na tvar impulzu je znázorněn v grafu 8.15.. Předmět byl ve výšce 33,3cm nad snímačem. Červený průběh ukazuje správné zaostření na předmět. Při změně zaostření je modrý impulz v horní části zúžen a naopak v patě signálu je rozšířen.



Obr. 8.15. Vliv rozostření objektivu na tvar impulzu, $t_{\text{exp}}=520 \mu\text{s}$.

8.4.3 Vliv tvaru předmětu

Pro ověření byla současně zobrazena lišta ve tvaru písmena T a kulatá tyč o průměru 8mm. Jak je patrné z obrázku 8.16., rozdíl je především v šířce obou impulzů, ale tvar předmětu se neprojevil. Poměr šířky lišty a průměru tyče změřených posuvným měřítkem je 1,38. Poměr šířky impulzu lišty a tyče odečtených pomocí programu MATLAB je 1,4. Nepřesnost se pohybuje pod dvě procenta a pro vyhodnocení je dostačující.

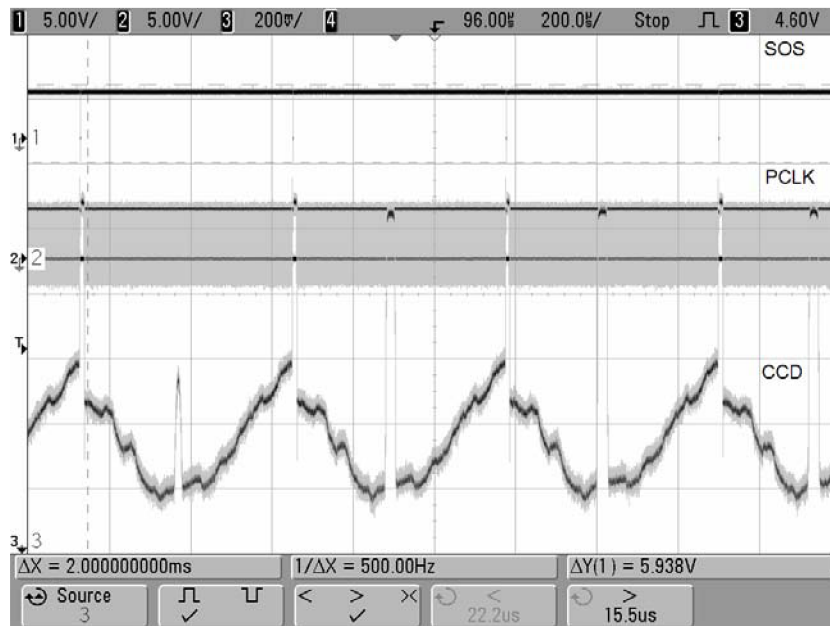


Graf. 8.16. Vliv tvaru předmětu na tvar impulzu, $t_{\text{exp}}=520 \mu\text{s}$.

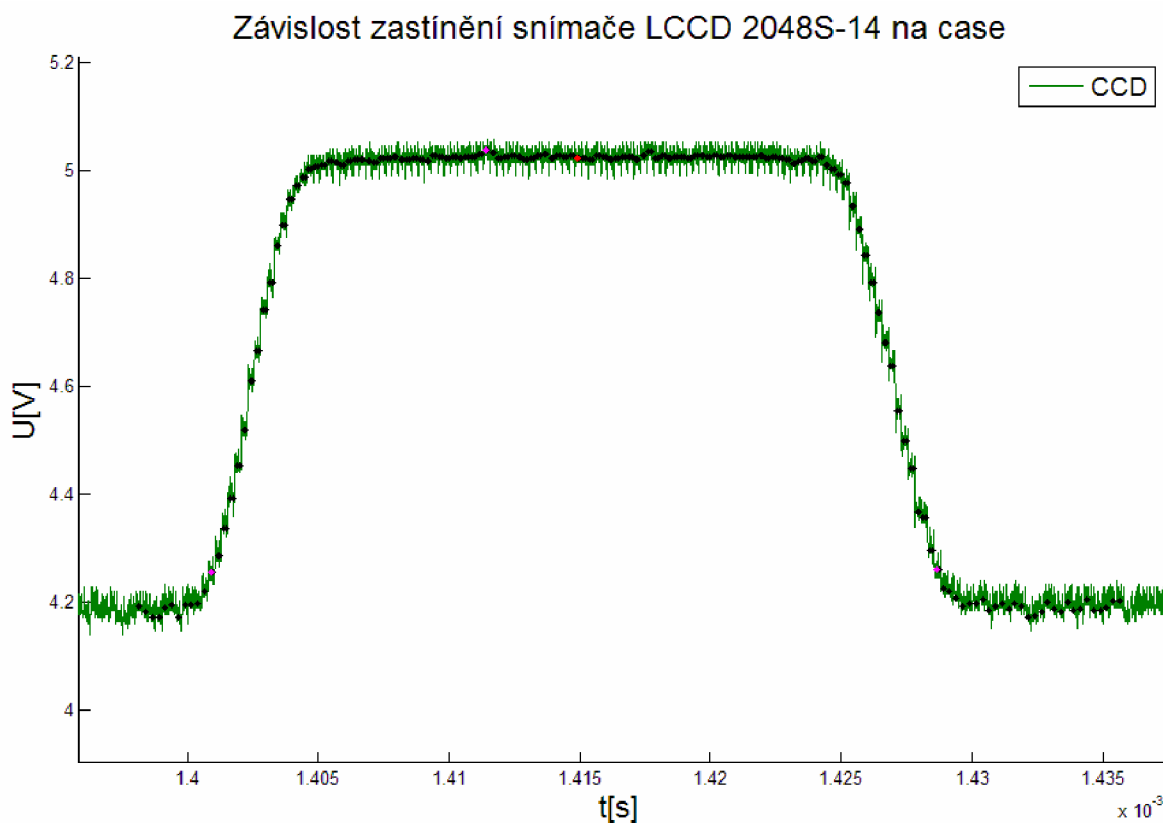
8.5 Experimentální dynamické měření ve vnitřních prostorech

Cílem experimentu bylo detekovat letící objekt nad CCD snímačem. Dráha měřeného objektu se musí křížit se světelným polem, které snímá snímací zařízení (Obr. 8.3.). Osciloskop byl zasynchronizován na třetí kanál na náběžnou hranu signálu. Současně byla nastavena podmínka, že osciloskop bude ignorovat signály kratší jak $15,5 \mu\text{s}$. Úroveň prahového napětí byla nastavena na $4,60\text{V}$ (Obr. 8.17.). Tato nastavení se mohou výrazně lišit v závislosti na světelných podmínkách. Při průletu projektilu nad snímačem se spustila synchronizace.

Na obrázku 8.17. je zachycena obrazovka osciloskopu. V časovém úseku 2 ms jsou vidět tři po sobě jdoucí kompletní snímky. Je patrné, že projektil proletěl přibližně středem snímače. Na prvním snímku je úroveň impulzu $4,5 \text{ V}$. Na druhém a třetím snímku projektil zastínil snímač na dostatečně dlouhou dobu a úroveň signálu dosahuje 5V . Detail třetího impulzu ukazuje, že objektiv není ideálně zaostřen na impulz. Je to způsobeno horizontálním a vertikálním vychýlením projektilu z osy dráhy. Na úroveň špičky výstupního analogového signálu CCD mělo vliv zaostření optické soustavy a rychlost letících projektilů, která nebyla konstantní. Objektiv byl zaostřen na $0,7\text{m}$ což odpovídá výšce $48,3 \text{ cm}$ nad snímačem.



Obr. 8.17. Závislost zastínění snímače letícím objektem na čase, $t_{\text{exp}}=520 \mu\text{s}$.

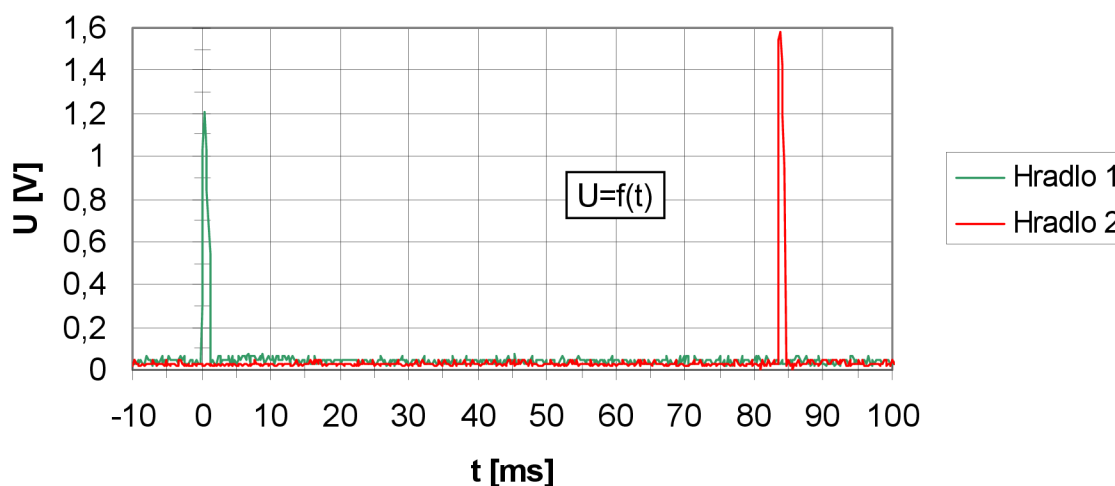


Obr. 8.18. Závislost zastínění snímače LCCD 2048S-14 letícím objektem na čase, $t_{\text{exp}}=520 \mu\text{s}$.

Pohyb letícího objektu jsme simulovali střelbou gumového projektilu o průměru 9 mm a délce 20 mm z plastové pistole. Abychom znali rychlost letících objektů použili jsme tzv. Inteligentní hradla LS04 (viz. Příloha A, Obr. 9.). Zařízení vyrobené firmou PROTOTYPA je

určené pro měření rychlosti střel a kadence střelby. Pracuje na principu optického snímání průletu střely, který je uveden v kapitole 2.3, s tím rozdílem, že jako detekční systém jsou použity rychlé PIN diody. Po průletu projektilu prvním hradlem zatrigroval osciloskop a byl zachycen impuls Hradlo 1. Za určitý čas proletěl projektil i druhým hradlem a byl zachycen impuls Hradlo 2 (Obr. 8.19.). Hradla jsou od sebe vzdálená přesně 1m. Podle vzorce (2) se vypočítala rychlost projektilu na 9 m/s. Osciloskop byl použit proto, že hradla jsou určena pro měření rychlostí nad 50 m/s a nemají tedy možnost přímo vyhodnotit rychlosti pod tuto hranici. Při běžném měření hradla komunikují bezdrátově s vyhodnocovacím software a umožňují inteligentní zpracování různých druhů impulsních signálů.

Závislost zastínění hradel na čase



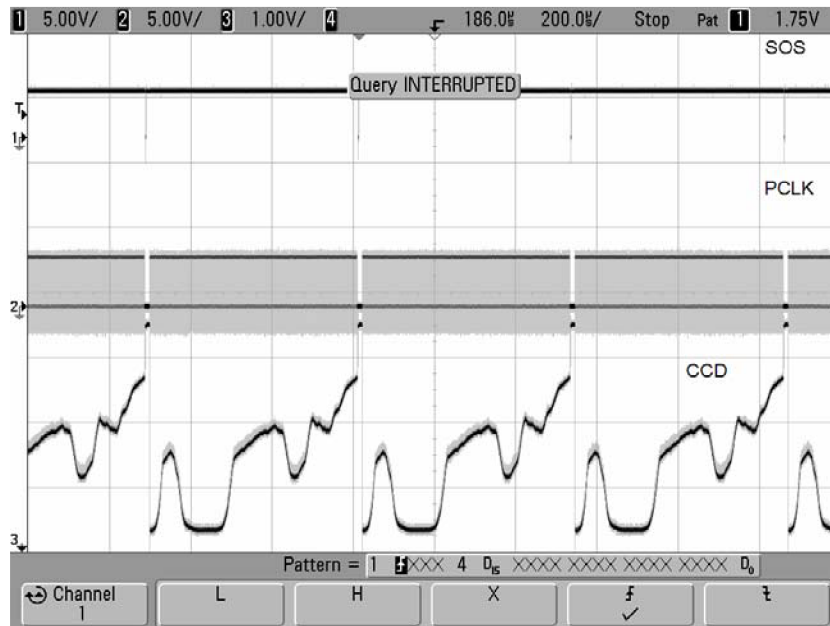
Obr. 8.19. Měření rychlosti projektilů [13].

8.6 Experimentální měření ve venkovních prostorech

Měření venku pod otevřenou oblohou se uskutečnilo z důvodu zajištění rovnoměrného osvětlení snímače. Měření venku má oproti měření uvnitř nevýhodu v závislosti na počasí a proměnlivé intenzitě světla. Na optickou soustavu byl připevněn kruhový tubus jako clona proti přímému oslnění snímače. Zdrojem světla je zde obloha. Při dostatečné úrovni světla se úroveň napětí posune až na 2V a užitečná část signálu je 3V oproti 0,75V při měření uvnitř. Při měření v 8 hodin ráno za jasného dne byla úroveň napětí nízká, ale s postupem času se zvyšovala a podle předpokladu dosáhla 2V (Tab. 8.8.). Snímač reagoval na pohybující se bílé mraky na modrém pozadí (Obr. 8.20.).

Tab. 8.3 Změna úrovně napětí v čase.

Čas[h]	Úroveň napětí[V]
8:00	4,16
8:30	4,057
9:00	3,96



Obr. 8.20. Zobrazení zamračené oblohy na obrazovce osciloskopu.



Obr. 8.21. Zobrazení zamračené oblohy.

9 ZÁVĚR

Tato diplomová práce navazuje na moji bakalářskou práci a vychází rovněž ze zadání firmy PROTOTYPA, která se dlouhodobě věnuje diagnostice jednorázových dějů. Snímání polohy a rychlosti je zde požadováno u kmitajících strojních částí, zákluzových mechanismů a letících objektů. Proto bylo těžiště práce věnováno optickým řádkovým snímačům a fotodiodovým polím.

V úvodní části práce je vysvětlen princip činnosti snímacích prvků CCD a fotodiod. Dále jsou rozebrány jednotlivé metody pro snímání objektů a problematika dopadu paprsků světla na snímač při použití různých variant zdrojů světla a optických soustav. V teoretické části práce byly porovnány parametry řádkových CCD snímačů a diodových polí PDA. Pro aplikaci snímání polohy a rychlosti kmitajících strojních částí a pro zákluzové mechanismy bylo doporučeno použití diodových polí, vzhledem k jejich vyšší citlivosti při dostatečném rozlišení polohy. Vhodná jsou diodová pole řady PDA S8865 firmy Hamamatsu.

Pro objekty letící po balistické dráze bylo doporučeno použití řádkových snímačů spolu s rychlými PIN diodami, kde lze s výhodou kromě rychlosti stanovit i příčnou polohu letícího objektu. Experimentální část práce byla věnována ověření vlastností lineární řádkové kamery LCCD 2048S-14 s lineárním snímačem ILX 551B firmy SONY. Důraz byl v práci kladen na způsob zachycení a zpracování naměřených signálů z CCD snímače v podmínkách venkovního a vnitřního osvětlení.

Bylo zjištěno, že CCD snímač je vhodný pro přímé měření rychlosti a polohy systémem START-STOP (princip hradel) pro malé rychlosti (do cca 20 m/s), vzhledem k relativně pomalé snímkové frekvenci (520us). Pro měření rychlosti a polohy rychle se pohybujících objektů v řádu několika stovek m/s (střely) jsou běžně dostupné prvky CCD zatím nevhodné.

Původním přínosem práce je zejména:

- zpracování signálů ze CCD snímačů při měření jednorázových dějů s využitím vícekanálového osciloskopu a prostředí MATLAB
- program pro MATLAB umožňující zpracování signálů
- praktické ověření citlivosti CCD snímačů v podmínkách venkovního a vnitřního (umělého) osvětlení pro malé objekty (cca průměr 10 mm, délka 20 mm)
- ověření rušivých vlivů na kvalitu signálu, generovaných jednorázovými ději
- vytipování oblastí, kde lze uvažovat o nasazení snímačů CCD v podmínkách fy PROTOTYPA (podmíněno dalším vývojem)

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kuba, P., VÍT, V. Televizní technika – Studiové zpracování televizního signálu. Praha: Ben – technická literatura, 2002.
- [2] Grafika [Online]. Grafika Publishing spol. s.r.o., 2003 – [cit. 23.listopadu 2007] . Dostupné na www: <http://www.grafika.cz/art/hw/clanek216968175.html>
- [3] Kejzlar, L., Fischer, J. Measurement velocity by the CCD linear image sensor operating in the TDI mode. Eurosensors XVI - Book of Abstracts. Praha: Czech Technical University in Prague, 2002 , Dostupné na www: <http://measure.feld.cvut.cz/groups/videometry/>
- [4] Vobecký, J., Záhlava, V. Elektronika – součástky a obvody, principy a příklady. GRADA, 2000
- [5] Doleček, J., Moderní učebnice elektroniky – optoelektronika. BEN, 2005. 160s. ISBN 80-7300-184-5
- [6] Fischer, J., Haasz, V., Radil, T. Simple device for small dimension measurement using CCD sensor, 12th IMEKO TC4 International Symposium: Electrical Measurement and Instrumentation. Proceedings. Zagreb , 2002, Dostupné na www: <http://measure.feld.cvut.cz/groups/videometry/>
- [7] Hamamatsu Corporation [Online]. Hamamatsu City: 2004 – [cit. 5.prosince 2006] Dostupné na www: http://www.sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/S8865.pdf
- [8] Hamamatsu Corporation [Online]. Hamamatsu City: 2004 – [cit. 5.prosince 2006] Dostupné na www: www.sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_C/C9118_series.pdf
- [9] khs-instruments [Online]. Höhenkirchen-Siegertsbrunn: 2000 – [cit. 10.května 2006] Dostupné na www: <http://www.khs-instruments.de/ccd/lccd-2048/Lccd14s.pdf>
- [10] EURECA Messtechnik GmbH [Online]. Kohl, [cit. 10.května 2006] Dostupné na www: <http://www.eureca.de/pdf/optoelectronic/sony/ILX551B.PDF>
- [11] Operating instructions OPTICAL DETECTOR AVL TYPE 460, překlad Král, B., návod k obsluze
- [12] Král B., Král M., Dohnal J., Pracovníci firmy PROTOTYPA, osobní sdělení
- [13] UNCAJTIK, P. Využití řádkových CCD snímačů pro měření rychlosti: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 68 s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CCD	snímací prvky, obvody s nábojovou vazbou (Charge Coupled Devices).
PDA	fotodiodová pole (Photodiode Array)
CCD FT	snímací prvek CCD s pulsnímkovým přenosem (Field Transfer)
CCD IL	snímací prvek CCD s meziřádkovým přenosem (Interline,IL)
CCD FIT	snímací prvek CCD (Field-Interline Transfer)
HAD	technologie pro zvýšení rozlišovací schopnosti snímacích prvků CCD (Hole Accumulated Diode)
OPN	Oblast přechodu prostorového náboje
TDI	metodu, která zajišťuje lineární vztah mezi rychlostí pohybu tělesa a rychlostí pohybu obrazu na CCD čipu (Time Delay Integration),
LED	polovodičová součástka obsahující přechod P-N (light-emitting diode)
LAN	lokální (Local Area Network)

PŘÍLOHY

Příloha A, Fotografická dokumentace k experimentálnímu měření s kamerou LCCD 2048S-14.



Obr. 1. Snímač zastíněný clonou.



Obr. 2. Kovový kryt detektoru.



Obr. 3. Optická soustava.



Obr. 4. Kryt s obdélníkovým průřezem.



Obr. 6. Měřicí pracoviště uvnitř.



Obr. 7. Měřicí pracoviště venku.

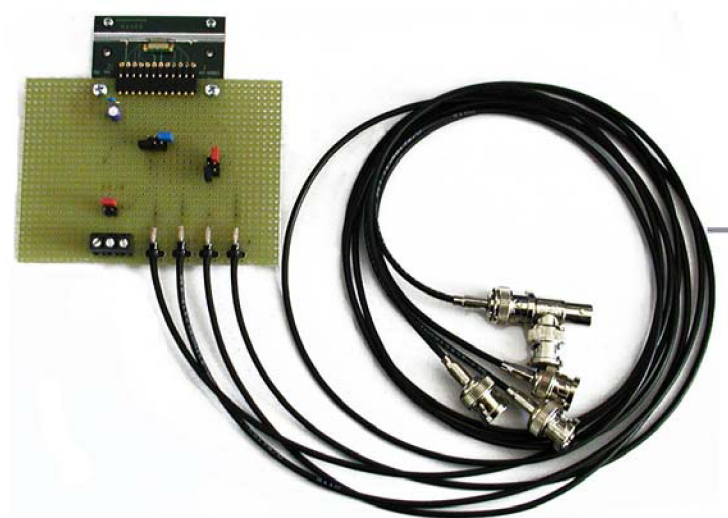


Obr. 8. Testovací maketa zbraně



Obr. 9. Inteligentní hradla.

Příloha B, Fotografická dokumentace k experimentálnímu měření pro snímač PDA S8865-64.



Obr. 1. Návrh zapojení na snímače PDA S8865-64 na desku plošných spojů.

Příloha C, Zdrojový kód programu pro určování polohy a šířky impulzu.

```
close all
clear all
clc
%predpokladem je expozicni doba 520us a 200us/dilek
%nacitani souboru
[FileName] = uigetfile('1.txt','Select the Text File');
RESULT = DLMREAD(FileName,'\t');
vektor = (RESULT(1:500000,1));
vektor1=vektor+abs(vektor(1));
vektor2 = (RESULT(1:500000,2));
figure(1)
hold on;
plot(vektor1,vektor2,'r')
[FileName] = uigetfile('2.txt','Select the Text File');
RESULT = DLMREAD(FileName,'\t');
vektor = (RESULT(1:500000,1));
vektor3=vektor+abs(vektor(1));
vektor4 = (RESULT(1:500000,2));
plot(vektor3,vektor4,'b')
[FileName] = uigetfile('3.txt','Select the Text File');
RESULT = DLMREAD(FileName,'\t');
vektor = (RESULT(1:500000,1));
vektor5=vektor+abs(vektor(1));
vektor6 = (RESULT(1:500000,2));
plot(vektor5,vektor6,'Color',[0,0.5,0])
title('Závislost zastínění snímače LCCD 2048S-14 na case')
legend('SOS','PCLK','CCD')
xlabel('t[s]')
ylabel('U[V]')
%-----
delta_t=abs(vektor1(1)-vektor1(2));%casový rozdíl mezi sousedními vzorky
pocet_hodnot=length(vektor1);      %pocet vzorku ve vektoru
%-----
[SOS_min,i] = min(vektor2(1:131010));%najde první minimum SOS a souřadnici
plot(vektor1(i),vektor2(i),'.k')
sour_minSOS(1)=i;
k=2;
if sour_minSOS(1)<106900    %podmínka pro určení počtu celých snímků
k=3;
end
%-----
%cyklus pro hledání ostatních minim SOS
for c=1:k
m1=sour_minSOS(c)+130000;
m2=sour_minSOS(c)+131010;
[SOS_min,i] = min(vektor2(m1:m2));
i=i+m1-1;
pocet_vzorku_snimku=m1-k;
doba_snimku=pocet_vzorku_snimku*delta_t;
sour_minSOS(c+1)=i;
plot(vektor1(i),vektor2(i),'.k')
end
title('Závislost zastínění snímače LCCD 2048S-14 na case')
%-----
%nalezení prvního minima CLK
figure(2)
hold on;
plot(vektor1,vektor2,'r')
plot(vektor3,vektor4)
```

```

plot(vektor5,vektor6,'Color',[0,0.5,0])
for c=1:k
c1=c;
plot(vektor1(sour_minSOS(c)),vektor2(sour_minSOS(c)),'.k')
m1=sour_minSOS(c);
m2=sour_minSOS(c)+2450;
[CLK_min1,i] = min(vektor4(m1:m2)); %najde prvni minimum CLK a souradnice
i=i+m1-1;
sour_minCLK(1)=i;
plot(vektor3(i),vektor4(i),'.b')%vykresleni minim CLK
plot(vektor5(i),vektor6(i),'.b')%vykresleni amplitudy v prvni minimum CLK
%-----
%cyklus pro hledani ostatnich minim CLK
for c=1:2047
m1=sour_minCLK(c)+40;
m2=sour_minCLK(c)+70;
[CLK_min,i] = min(vektor4(m1:m2));
i=i+m1-1; %souradnice,nutne snizit o -1,vychazi to ze zapisu vektoru
sour_minCLK(c+1)=i;
plot(vektor3(i),vektor4(i),'.b')%vykresleni minim CLK
plot(vektor5(i),vektor6(i),'.b')%vykresleni amplitudy v minimech CLK
end
%-----
%cyklus pro hledani prumernych hodnot a maxima CCD
d=1;
souradnice_nad2V=0;
amp_nad2V=0;
for i=800:1200%cyklus pro nalezeni maxima CCD
a=0;
%for b=28:32 %max-max
%for b=21:43 %typ-typ
for b=13:32 %min-max
c=vektor6(sour_minCLK(i)+b);%ulozeni amplitudy
plot(vektor3(sour_minCLK(i)+b),vektor4(sour_minCLK(i)+b),'.b')
a=a+c;
end
%amplituda_CCD(i)=a/5; %max-max prumer CCD-5hodnot
%amplituda_CCD(i)=a/23; %typ-typ prumer CCD-23hodnot
amplituda_CCD(i)=a/20; %max-max prumer CCD-20hodnot
plot(vektor3(sour_minCLK(i)),amplituda_CCD(i),'.k')%vykresleni prumeru
%-----
%cyklus pro hledani hranic a souradnic
konst=4.27;%konstanta pro nastaveni urovne
if amplituda_CCD(i)>konst %stanoveni podminky minima signalu
amp_nad2V(d)=amplituda_CCD(i);
souradnice_nad2V(d)=i;
d=d+1;
plot(vektor5(sour_minCLK(i)+22),amplituda_CCD(i),'.k')
end

end
[CCD_max,i] = max(amplituda_CCD)%najde maxima CCD a souradnice
if CCD_max >konst
souradnice_min=min(souradnice_nad2V) %stanoveni souradnice dolni meze
u=amplituda_CCD((souradnice_min)) %stanoveni amplitudy dolni meze
souradnice_max=max(souradnice_nad2V) %stanoveni souradnice horni meze
u=amplituda_CCD((souradnice_max)) %stanoveni amplitudy horni meze
sirka(c1)=0.014*(souradnice_max-souradnice_min)
stred=souradnice_min+roundn(((souradnice_max-souradnice_min)/2),0)
plot(vektor5(sour_minCLK(stred)),amplituda_CCD((stred)),'.r')
plot(vektor5(sour_minCLK(i)),CCD_max,'.m')

```

```
plot(vektor5(sour_minCLK(souradnice_min)),amplituda_CCD((souradnice_min)),'.m')

plot(vektor5(sour_minCLK(souradnice_max)),amplituda_CCD((souradnice_max)),'.m')
end
end
prumerna_sirka=mean(sirka)
title('Závislost zastínění snímače LCCD 2048S-14 na case')
legend('CCD')
legend('SOS','PCLK','CCD')
xlabel('t[s]')
ylabel('U[V]')
```