



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

DETEKTOR POZICE LASEROVÉHO SVAZKU

POSITION SENSING DETECTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tuan Ha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Peter Barčík, Ph.D.

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Tuan Ha

ID: 174497

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Detektor pozice laserového svazku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem činnosti senzorů pro detekci pozice stopy laserového svazku v dané rovině a podrobně prostudujte jejich vlastnosti. Vyberte vhodný typ senzoru pro detekci pozice laserového svazku v ohniskové rovině čočky nebo teleskopu. Úhlovou odchylku dopadajícího svazku předpokládejte v řádech desetin miliradiánů.

Zkonstruujte laboratorní přípravek, který bude umožňovat měřit pozici stopy laserového svazku. Zařízení se bude skládat ze samotného detektoru a z vyhodnocovací jednotky. Data získaná z měření budou zpracována v PC, kde bude vykreslena aktuální poloha stopy laserového svazku v dané rovině.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] VIRTO, A.L., A. CALDERUN. Study of CMOS image sensors for laser beam position detection. In: Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37510) [online]. IEEE, 2004, s. 792-795 [cit. 2017-05-12]. DOI: 10.1109/IMTC.2004.1351165. ISBN 0-7803-8248-X.

[2] M. K. ACHUTHAN, K. N. BHAT. Fundamentals of semiconductor devices. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2007. ISBN 9780070612204.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 14.5.2020

Vedoucí práce: Ing. Peter Barčík, Ph.D.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá způsoby návrhu detektoru laserového svazku a její realizací. Na úvod jsou uvedeny různé druhy detektorů a jejich srovnání. Detailně je práce zaměřena hlavně na detekci pomocí kvadrantního senzoru. Jsou zde uvedeny výhody a nevýhody tohoto senzoru a způsoby realizace detektoru s kvadrantním senzorem. V simulaci v Matlabu je vytvořen model, kde jsou modelovány výstupní odezvy na simulovaný laserový svazek. Dále následuje testování samotného čipu a proměření jeho základních parametrů (nelinearita, drift ...). Z naměřených a simulovaných dat je navržen detektor pozice laserového svazku. Detektor je popsán z hlediska hardwaru, firmwaru a softwarové aplikace. Na konci jsou vyhodnoceny parametry vytvořeného přístroje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Detektor pozice, foto-efekt, fotolaterální efekt, laserový svazek, kvadrantní detektor, DPS - deska plošných spojů, vývojová deska - STM32F4, sériová komunikace, Python

ABSTRACT

This thesis deals with design of a laser position detector. Different types of sensor are mentioned and compared at the beginning. Special attention is paid to quadrant sensor. Its pros and cons are discussed with designing methods. The sensor is simulated in Matlab to test its output response. Then the laboratory tests follow to measure real response of the chip. Then follows the design of the detector based on measured and simulated data. In the conclusion of this thesis parameters of created device are evaluated.

KEYWORDS

Position sensitive detector, photoeffect, photolateral effect, laser beam, quadrant detector, PCB - printed circuit board, development board - STM32F4, serial communication, Python

HA, Tuan. *Detektor pozice laserového svazku*. Brno, 2020, 66 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: Ing. Peter Barčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Detektor pozice laserového svazku“ 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Peterovi Barčíkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	10
1 Teoretická část	11
1.1 Fotodektory a fotodiody	11
1.2 Laterální PSD	14
1.3 Segmentované PSD	15
1.3.1 Zapojení kvadrantních PSD	17
1.4 Jiné způsoby detekce	18
1.5 Užití v praxi	19
1.6 Simulace	20
2 Praktická část	24
2.1 Parametry senzoru	24
2.1.1 Odezvy pro signály s širší pološířkou svazku	25
2.1.2 Odezvy pro signály s kratší pološířkou svazku	26
2.1.3 Odezvy segmentů	28
2.2 Návrh detektoru	29
2.2.1 Hardware	30
2.3 Firmware	33
2.3.1 Struktura	33
2.3.2 AD převodník & DMA kontrolér	34
2.3.3 CMSIS	36
2.4 Software	37
2.4.1 Použité knihovny/moduly a komponenty programu	37
2.4.2 Chod programu	39
2.5 Obsluha a chod přístroje	41
2.5.1 Modul	41
2.5.2 Aplikace PSD	42
2.6 Výsledky	49
2.6.1 Testovací stanoviště	49
2.6.2 Parametry přístroje	50
2.6.3 Chyby a nepřesnosti	51
Závěr	56
Literatura	57
Seznam symbolů, veličin a zkratk	60

Seznam příloh	62
A Externí deska	63
A.1 Schéma a layout	63
A.2 BOM	64

Seznam obrázků

1.1	Spektrální odezva typické PIN fotodiody[4]	12
1.2	Fotokonduktivní obvody fotodiod	14
1.3	Princip laterálních fotodetektorů [5]	15
1.4	Rozdíl linearit mezi laterálníma PSD	15
1.5	Znázornění vlivu velikosti bodu na měřicí rozsah a rozlišení[10]	16
1.6	Typické zapojení s kvadrantní PSD[6]	17
1.7	Schematické zobrazení přijímače optické komunikace [6]	19
1.8	Model Gaussovského svazku dopadající na senzor	21
1.9	Rozdíl linearit mezi laterálníma PSD	21
1.10	Odezvy na různé pološířky kruhového svazku	22
1.11	Odezvy na eliptický svazek v ose X pro různé délky poloos	22
1.12	Korekce směrnice	23
2.1	Senzor VBQ 036 A	24
2.2	Měřicí pracoviště	25
2.3	Závislost výstupních relativních hodnot větších svazků na pozici	26
2.4	Tvar svazku pro šířku svazku (2w) 2,46 mm	26
2.5	Tvar svazku pro šířku svazku (2w) 120 μm	27
2.6	Závislost výstupních relativních hodnot větších svazků na pozici	27
2.7	Odezva jednotlivých segmentů	28
2.8	Blokové schéma zařízení	29
2.9	Blokové schéma zpracování v procesoru	30
2.10	Layout externí desky	30
2.11	První a druhý blok	31
2.12	Obvod pro součet všech segmentů	32
2.13	Třetí blok	32
2.14	Vývojový diagram Firmwaru	34
2.15	Zobrazení DMA paměti	35
2.16	Nejdůležitější objekty aplikace	38
2.17	Stručný vývojový diagram aplikace	40
2.18	Modul	41
2.19	Přední a zadní část krabičky	42
2.20	exe soubor	42
2.21	Připojení	43
2.22	Režimy zobrazení hodnot	44
2.23	Odezva napětí SUM na optický výkon	44
2.24	Nastavení (Preferences)	45
2.25	Závislost doby vykreslení grafů na počet vzorků	46

2.26	Nastavení délky tabulek	47
2.27	Indikace módů na modulu	47
2.28	Změna v osách elipsy	48
2.29	Kalibrace osy	48
2.30	Ukládání do textového souboru	49
2.31	Testovací stanoviště	50
2.32	Odchylka roviny svazku a roviny senzoru	52
2.33	Naindukovaný signál z vývojové desky	53
2.34	Nefunkční mód korelace	54
2.35	Vliv offsetu operačních zesilovačů	55
A.1	Layout vrstvy TOP	63
A.2	Layout vrstvy Bottom	63
A.3	Schéma části napájení a rozvodu některých pinů	65
A.4	Schéma - úprava signálů	66

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem pozičního detektoru laserového svazku. V anglických literaturách označované jako PSD ¹. Detektory tohoto typu jsou široce zastoupeny v různých oblastech průmyslu. Použití nacházejí například na satelitu NuSTAR, kde slouží k zarovnání teleskopické optiky [1]. Najdou své uplatnění všude, kde je třeba měřit minimální (až 0,5 μm [1]) odchylky a vibrace. Samotný detektor se skládá ze tří hlavních částí: ze senzoru, elektroniky upravující výstupní signály senzoru a vyhodnocovací jednotky.

Práce je rozdělena do dvou částí na teoretickou a praktickou. Vzhledem k tomu, že senzory pracují na principu fotodiod začíná teoretická část kapitolou o fotodiódách. V dalších kapitolách jsou rozebrány jednotlivé typy senzorů. Například senzory laterálního typu využívající fotolaterálního efektu a segmentované fotodetektory. Laterální senzory nejsou momentálně v České republice komerčně dostupné, proto je práce z větší části zaměřena na segmentované PSD.

Jsou zde okrajově zmíněny jiné způsoby detekce světelného bodu. Patří mezi ně například CCD, CID a CMOS detektory.

Konec teoretické části je zaměřen na simulaci Gaussovského laserového svazku na kvadrantní detektor. Simulovány jsou svazky kruhového a eliptického tvaru na vybraný typ senzoru.

Praktická sekce je věnována měření senzoru, návrhu a realizaci přístroje. Ze získaných teoretických znalostí je navržen detektor jehož součástí je analogová deska plošného spoje (shield), vývojová deska STM32F4 a PC (resp. software v jazyce python).

¹Position sensing detector - detektor pozice (v této práci je myšlený samotný detektor)

1 Teoretická část

1.1 Fotodetektory a fotodiody

Tato kapitola slouží k vysvětlení a pochopení problematiky. Slouží jako, úvod do světa fotodetektorů, jejichž návrhem se tato práce zabývá. Fotodetektozem nazýváme zařízení, jehož funkcí je detekce a konverze světelné informace [2]. Fotodetektory lze dělit do různých tříd podle různých kritérií. Do hlavních tří tříd patří fotokonduktivní, fotovoltaiické a fotoemisní. Ty se liší především způsobem generace výstupních elektronů. Fotokonduktivní produkují volné elektrony, které jsou schopny přenášet proud, tudíž fungují jako proudový zdroj. Fotovoltaiické podobně jako fotokonduktivní produkují volné elektrony vnitřním fotoefektem (tzn. uvolněné elektrony a díry, zůstávají v materiálu ve vodivé vrstvě), ale narozdíl od výše jmenovaného vytvářejí napětí. Nakonec fotoemisní fotodetektory, ty jsou založené na vnějším fotoefektu. Vyzářené elektrony fotodetektoru jsou sbírány externím obvodem ([2]).

Mezi nejčastější senzory pro návrh fotodetektorů patří fotodiody a jejich obdoby. Jsou to diody s přechodem PN, které jsou vyrobeny tak, aby došlo k proniknutí světla do oblasti přechodu. Tímto je generován proud, jehož velikost slouží jako informace k detekci pozice.

Ve stavu bez vnějšího světla dochází vlivem tepla ke generaci minoritních nosičů (elektrony v P a díry v N). Takto vzniká unikající proud (I_D ¹v ang. leakage current nebo dark current), který se přičítá k proudu generovaného světlem (I_L ²). Pro výslednou velikost výstupního proudu diodou (I_c ³) platí vztah:

$$I_c = I_L + I_D. \quad (1.1)$$

Unikající proud může generovat nechtěný šum [3], a tím snižovat dynamický rozsah systému. Velikost I_D nabývá řádu několika nA [18], proto se jeho kompenzace I_D v komerčních zařízeních neřeší.

Důležitým parametrem fotodiod je jejich spektrální odezva znázorněná na obr.1.1. Znalost spektrální charakteristiky se hodí k návrhu vysílače (laseru). Ten by měl mít vlnovou délku odpovídající maximální odezvy spektra pro maximalizaci účinnosti přijmu. Z obr. 1.1 by tato hodnota vlnové délky laseru byla kolem 900 nm. Horní limit odezvy je spjat přímo s šířkou zakázaného pásma E_G ⁴(tj. energií potřebnou ke generaci nosičů). Tedy k poklesu průběhu dochází díky malé energii fotonu E_{ph} ⁵,

¹Proud generovaný teplem - dark current

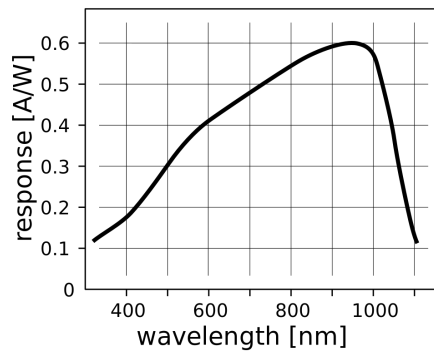
²Proud generovaný dopadem světla

³Celkový proud fotodiodou

⁴Energie zakázaného pásma - band gap energy

⁵Energie fotonu - photon energy

kdy s rostoucí vlnovou délkou (v grafu - wavelength) klesá E_{ph} . Pokud je tedy $E_{ph} < E_G$ pravděpodobnost generace nosičů se zmenšuje, jak je znázorněno na obr.1.1. Ten zobrazuje odezvu fotodiody typu PIN, která je charakteristická svou rychlou reakcí (pro tuto vlastnost je často používána v optických komunikacích). Pokles na kratších vlnových délkách způsobují dva jevy. Za prvé se v praxi často měří spektrální charakteristika zdrojem světla, jehož výkon (tudíž i světelný tok) je konstantní napříč spektra. Na krátkých vlnových délkách je E_{ph} velká, a tudíž i méně fotonů ve světelném toku. Druhým důvodem je, že vlivem vysokého kmitočtu dochází ke generaci většiny nosičů na povrchu. Tím pádem musí nosiče urazit delší trajektorii k oblasti přechodu PN. S delší trajektorií roste pravděpodobnost rekombinace, tedy i menšího výstupního proudu [2]. Tento jev je znatelný na počátku průběhu.



Obr. 1.1: Spektrální odezva typické PIN fotodiody[4]

Dalším parametrem fotodiody je jejich frekvenční odezva (neplést se spektrální odezvou, kde je spektrum myšleno jako spektrum vlnových délek). Ta charakterizuje, jak rychle je schopná fotodioda odpovědět na optický signál. Frekvenční odezva má konečnou hodnotu, jenž je charakterizována rychlostí difuze elektronů. S připojeným závěrným napětím roste rychlost elektronů tedy i rychlost odezvy.

Při návrhu fotodetektorů je nutné zvážit rozměry senzorů (fotodiody). Tento rozměr by měl odpovídat velikosti dopadajícího svazku, tak aby byla nasnímána celá jeho dopadající plocha i s maximálními odchylkami pozice. Nelze však zvyšovat plochu fotodiody donekonečna, jelikož se zvyšující plochou roste i kapacita přechodu PN. Kapacita přechodu zpomaluje rychlost odezvy fotodiody a tím i celého systému. Pro zrychlení je fotodioda často zapojena na reverzní napětí, které zmenšuje kapacitu přechodu. Výsledná kapacita je dána tímto vztahem:

$$C_J = \frac{\varepsilon_{Si} \varepsilon_0 A}{\sqrt{2 \varepsilon_{Si} \varepsilon_0 \mu \rho (V_A + V_{bi})}}, \quad (1.2)$$

kde ε_0 ⁶ [F/cm] je permitivita vakua, ε_{Si} ⁷ [-] permitivita křemíku, μ ⁸ [cm²/Vs] pohyblivost elektronů, ρ ⁹ [$\Omega \cdot m$] rezistivita křemíku, V_{bi} ¹⁰ [V] je úbytek napětí fotodiody a V_0 ¹¹ [V] je reverzní napětí připojené na katodu.

Fotodiody lze provozovat v proudovém nebo napěťovém režimu [11]. V proudovém režimu je závislost intenzity světla na proudu lineární. U napěťového je závislost logaritmická. Je to způsobeno vlastním odporem diody, který exponenciálně roste s rostoucí intenzitou světla. V proudovém módu se vlastní odpor diody neprojevuje [12]. Samotný proudový režim lze provozovat ve dvou “podrežimech” podle intenzity světla. Pokud je úroveň intenzity nízká lze využít zapojení s přidaným záporným napětím podle obr.1.2a. Tohoto zapojení lze s výhodou využít k příjmu signálu se širokým pásmem. Pro měření rychlých signálů s vysokou intenzitou se využívá zapojení obr.1.2b. Tento obvod se využívá například pro měření pulzních laserů. Reverzní napětí V_0 v tomto zapojení je mnohem větší než v předešlém typu.

⁶Permitivita vakua

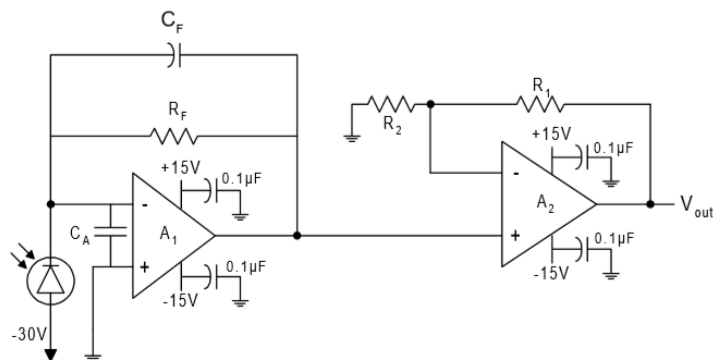
⁷Permitivita křemíku

⁸Pohyblivost elektronů

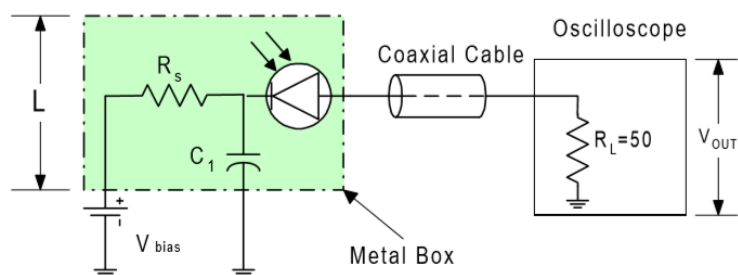
⁹Rezistivita křemíku

¹⁰Úbytek napětí fotodiody

¹¹Reverzní napětí fotodiody



(a) Pro nízké úrovně světla [6]

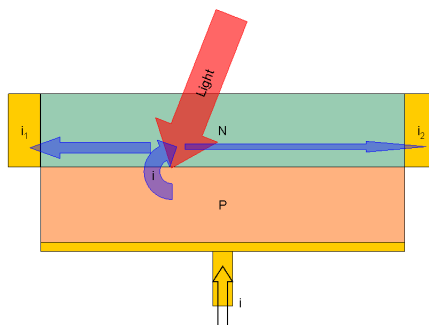


(b) Pro vysoké úrovně světla[6]

Obr. 1.2: Fotokonduktivní obvody fotodiod

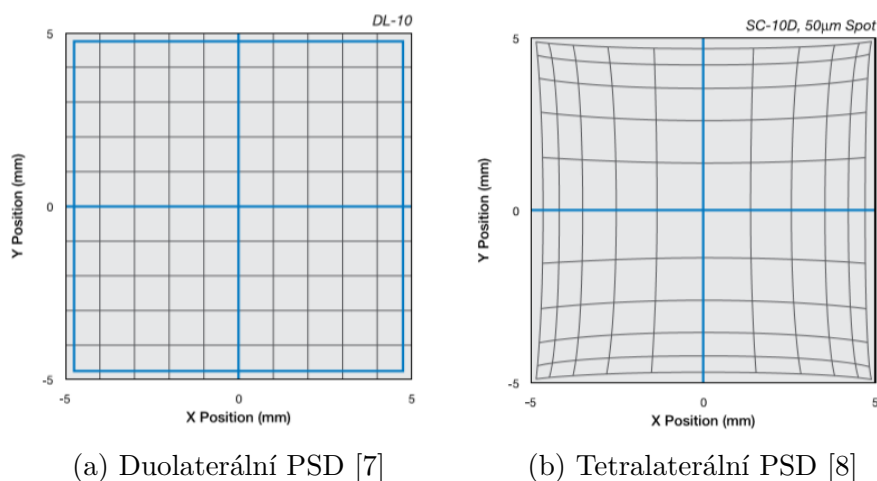
1.2 Laterální PSD

Jsou to detektory se spojitou strukturou fotodiody, které pracují jako zdroje proudu. Na obrázku 1.3 je naznačen princip jejich funkce. Fotodektor se skládá z PN vrstev a tří svorek (pro jednu osu). Po dopadu světelného záření dochází ke vzniku proudu, který proudí od bodu dopadu světla ke svorkám na N vrstvě, která zároveň představuje rezistivní vrstvu. Velikost proudu je tedy dána velikostí odporu cesty (delší cesta → větší odpor). Z toho plyne, že pokud bude světelný bod uprostřed dojde k rovnoměrnému rozdělení vygenerovaného proudu mezi svorkami[6].



Obr. 1.3: Princip laterálních fotodetektorů [5]

Laterální fotodetektory se dělí podle počtu rezistivních vrstev na Duolaterální a Tetralaterální PSD. Duolaterální mají dvě rezistivní vrstvy narozdíl od Tetralaterálních, které mají vrstvu pouze jednu. Duolaterální také vykazují vysokou linearitu. Charakter linearit je vykreslen na obr. 1.4. [6]



Obr. 1.4: Rozdíl linearit mezi laterálníma PSD

Důležitou výhodou laterálních PSD je, že nejsou nijak limitovány tvarem a pozicí světelného bodu. Světelný bod může být i na okrajích senzoru (pozor u tetralaterálních vysoká nelinearita na okrajích viz obr.1.4). Laterální PSD mají široký dynamický rozsah, díky malému I_D (unikající proud - kap.1.1).

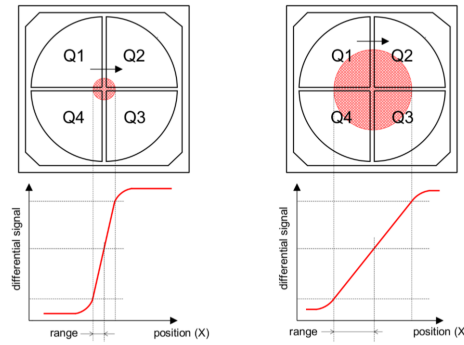
1.3 Segmentované PSD

Jak z názvu plyne, jedná se o detektory, jejichž struktura je segmentována do několika fotodiod. Do této skupiny patří Kvadrantní pro 2D detekci a Bi-Cell (dvoj-

buňkové) pro detekci v jedné ose. Kvadrantní senzory jsou rozděleny do čtyř segmentů, které jsou odděleny mezerou v anglických zdrojích označovanou jako “dead region” [6]. Mohou mít tvar kruhu či čtverce. Bi-cell detektory jsou uspořádány do dvou segmentů většinou ve tvaru obdélníku.

Narozdíl od laterálních PSD nabízejí vyšší přesnost. Jsou také časově stabilnější a méně závislé na teplotě. Mají však více podstatných nevýhod. Pro běžný provoz je nutné zajistit, aby světelný bod neustále překrýval všechny segmenty. Dále musí být velikost dopadajícího světla větší než mezera mezi segmenty, ale zároveň menší než je aktivní oblast detektoru (tato oblast je různá mezi jednotlivými detektory) [9].

S velikostí světelného bodu je také spojen měřicí rozsah detekce. S větším světelným bodem je možné naměřit větší odchylky polohy, ale zároveň s rostoucí velikostí bodu klesá citlivost senzoru. To je dáno tím, že malý bod vygeneruje větší změnu proudu při pohybu než velký bod, za předpokladu, že výkon světelného toku je u obou stejný. Při návrhu je nutné zvolit kompromis mezi měřicím rozsahem a citlivostí, jak naznačuje obr. 1.5.



Obr. 1.5: Znázornění vlivu velikosti bodu na měřicí rozsah a rozlišení[10]

Určení polohy se provádí jednoduchým přepočtem proudů z jednotlivých segmentů (fotodiod). Relativní přepočet pozici v osách X & Y je následující:

$$rel. pozice X = \frac{(I_{Q1} + I_{Q4}) - (I_{Q2} + I_{Q3})}{I_{Q1} + I_{Q2} + I_{Q3} + I_{Q4}}, \quad (1.3)$$

$$rel. pozice Y = \frac{(I_{Q1} + I_{Q2}) - (I_{Q3} + I_{Q4})}{I_{Q1} + I_{Q2} + I_{Q3} + I_{Q4}},$$

kde I_{QX} jsou proudy generované v jednotlivých segmentech. Relativní hodnoty pozic jsou vztaženy ke středu ($X = Y = 0$) [6]. Pro přepočet na absolutní hodnoty pozic

X a Y je třeba znát rozměry aktivní oblasti svazku laseru (L_X^{12} a L_Y^{13}). Vztah pro výpočet absolutních hodnot pozice je :

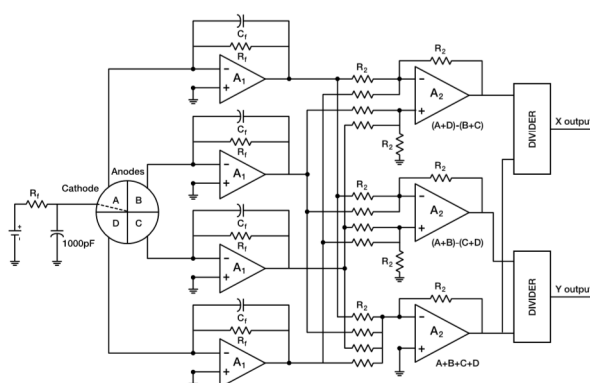
$$abs. pozice X = rel. pozice X \cdot \frac{L_X}{2}, \quad (1.4)$$

$$abs. pozice Y = rel. pozice Y \cdot \frac{L_Y}{2},$$

1.3.1 Zapojení kvadrantních PSD

V této části je uvedený typický příklad zapojení kvadrantních detektorů. Typicky jsou signály ze senzorů nejdříve zesíleny, poté jsou analogově zpracovány přes diferenciální zesilovače a sumátory. Takto upravené signály vstupují do A/D převodníků, posílající data do řídicí jednotky, která signály zpracovává (dělení).

Na obr.1.6 je typické obvodové zapojení kvadrantního PSD. Toto zapojení je založeno na zapojení obr.1.2a, tedy fotodiody v proudovém módu s rychlou odezvou.



Obr. 1.6: Typické zapojení s kvadrantní PSD[6]

Proud ze segmentů nabývá hodnot od desítek po stovky μA . Proto je nutné výstupní proudy zesílit, tak aby byli úrovně v napěťovém rozsahu A/D převodníku. Toto je provedeno v bloku A1 - převodníku proudu na napětí, kde lze zároveň volit šířku přijatého pásma pomocí kombinace C_f a R_f . Pro toto zapojení platí horní mezní kmitočet vyjádřený vztahem:

$$f_{mezni} = \frac{1}{2\pi R_f C_f}. \quad (1.5)$$

¹²Rozměr X osy aktivní oblasti seszoru

¹³Rozměr Y osy aktivní oblasti seszoru

Hodnoty odporu R_f jsou voleny v intervalu od 10 k Ω do 10 M Ω a hodnoty kondenzátoru C_f od 1 pF do 10 μ F. Velikostí odporu lze jednak měnit velikost zesílení, který určuje vztah $U_{A1} = I_F \cdot R_f$, ale také lze volit rychlost odezvy systému. Pro rychlejší systém je třeba mít malé R_f , s menší hodnotou však klesá zesílení. Je tedy nutné zvolit kompromis mezi zesílením a rychlostí odezvy.

Další bloky provádějí operace matematické rovnice 1.3. Matematickou rovnici by šlo vypočítat i v samotné řídicí jednotce, ale s tím by se zvýšil počet A/D převodníků a docházelo by k většímu zatížení jednotky. Z těchto důvodů je zvolen analogový přístup.

1.4 Jiné způsoby detekce

Mimo detekce pomocí fotodiod existují i jiné metody snímání pozice svazku. Například snímání pomocí CMOS, CCD & CID [14]. Tyto metody jsou založené na přenosu světelné energie na elektrickou pomocí pole buněk citlivých na světlo. Každá buňka představuje jeden pixel a liší se způsobem přenosu náboje a vnitřní struktury.

CCD¹⁴ senzory obrazu jsou ve zkratce tvořeny dvourozměrným polem MOS kondenzátory, které sbírají světelný svazek a pomocí fotoefektu ho přeměňují na elektrický náboj. Tento náboj je sériově přenesen pixel po pixelu k zesilovači. Výhodou této detekce je právě v její metodě čtení pixelů, jelikož v cestě nejsou žádné kapacity ani odpory, je proto výsledný signál bez šumu. Nevýhoda tohoto snímání je například složitá implementace na čipu, kdy je třeba zajistit složité externí ovládání. Další nevýhodou CCD je takzvaný “Blooming” kdy při přesycení jedné buňky dochází k “rozlití” náboje do okolí, kde vznikají pře-saturované pixely.

S CCD jsou úzce propojené CID, které mají podobnou strukturu (také obsahují MOS kondenzátory). Při čtení pixelu však může současně číst z více sloupců a řad (X - Y matice) najednou. Ve výsledku má CID menší tendenci “Blooming”, ale za cenu nižší citlivosti.

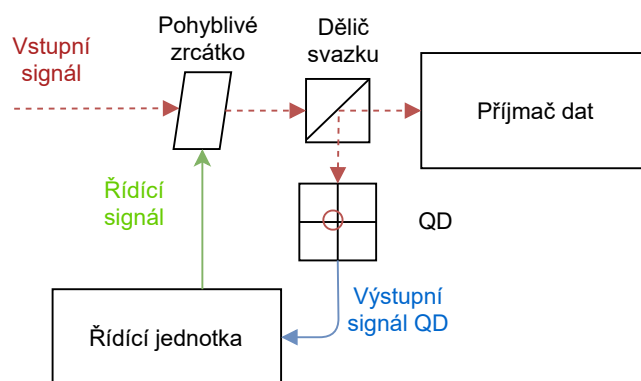
Senzory CMOS pracují také na principu fotoefektu, ale narozdíl od CCD nejsou generované náboje přesouvány, nýbrž detekovány pomocí zesilovačů tvořených z CMOS tranzistorů. Výrobní technologie CMOS senzorů umožňuje jednoduchou integraci okolních obvodů (kontrolní logika, ADC...). Z toho vyplývá i nižší cena těchto detektorů.

Výše uvedené způsoby nejsou vhodné pro aplikaci, jenž se tato práce zabývá. To zejména z hlediska ceny a složitosti implementace. Také rychlost těchto zařízení je oproti rychlosti segmentovaných PSD mnohem menší.

¹⁴Charge-coupled device

1.5 Užití v praxi

V praxi se s PSD setkáme kdykoli je potřeba měřit přesný pohyb (otřesy) v desetinách mikrometrů. Právě pro měření pohybů svazků jsou hojně užívány v systémech optické komunikace. Tyto systémy realizují komunikaci pomocí modulovaného laserového svazku. Nastává však problém, kdy vlivem měnících se vlastností prostředí (teplota, vlhkost), dochází ke změně indexu lomu a tím pádem ke změně pozice svazku. Pro optimální příjem je nutné, aby byla pozice svazku vždy ve středu optického přijímače. Proto jsou do přijímacích modulů vloženy subsystemy, které mají za úkol centrování vstupního signálu. Na následujícím schématu je zakreslen tento proces.



Obr. 1.7: Schematické zobrazení přijímače optické komunikace [6]

Celý děj funguje následovně. Vstupní signál je rozdělen do dvou větví. První jde do optického přijímače, který dekoduje vstupní data. Druhá větev se stará o korekci svazku a vytváří zpětnou vazbu se zrcátkem, pomocí něhož lze svazek vycentrovat. Odkloněný svazek nejdříve dopadá na PSD, který transformuje světelný signál na elektrický, nesoucí informaci o pozici dopadu svazku. Ta může být buď ve formě souřadnic X,Y a součtu segmentů (SUM) (1.3) nebo jako výstup samostatných segmentů (model předpokládá kvadrantní senzor). Tato informace je dále zpracována rychlým obvodem "Řídící jednotkou". Nejčastěji používané moduly jsou FPGA¹⁵ nebo již vytvořené ASIC¹⁶ obvody.

V praxi se musí řídicí jednotka (FPGA) vypořádat i se signály, jejíž signál

¹⁵Programovatelná hradlová pole - anglicky Field Programmable Gate Array

¹⁶Zákaznický integrovaný obvod - anglicky Application Specific Integrated Circuit

je zkreslen šumem okolí. Tento šum lze do určité míry zredukovat vstupním filtrem, který je závislý na druhu modulace signálu. Další možností redukce šumu může být implementace funkce korelace (přesněji kros-korelace)[19]. Známe-li parametry vstupního signálu, můžeme tento signál syntetizovat v přijímači. Syntetizovaný signál poté koreluje se vstupním signálem a přidaným šumem. Díky dobré korelaci syntetizovaného se vstupním a špatné korelaci šumu se syntetizovaným dojde k vylepšení poměru SNR. Amplitudu výsledné korelace lze považovat za výslednou hodnotu segmentu (koreluje se každý segment samostatně). Pro snadnější detekci amplitudy v obvodech FPGA se využije cyklické korelace, jejíž amplituda na výstupu je konstantní oproti klasické kros-korelaci.

Po získání hodnot ze všech segmentů lze aplikovat rovnici 1.3 a získat relativní souřadnice, které lze použít pro korekci laserového svazku pomocí pohyblivého zrcátka.

1.6 Simulace

Tato část práce je zaměřena na simulaci senzoru, která modeluje jeho chování a odezvu na Gaussovský laserový svazek. Simulace jsou vytvořeny v prostředí Matlab verze 2017.

Svazek je definován podle vztahu pro optickou intenzitu s Gaussovým rozložením se souřadnicemi x a y . Simulovány byli kruhové svazky, pro které platí [13]:

$$I(x, y, z) = I_0(z) \cdot e^{-2\frac{x^2+y^2}{w^2}} \quad (1.6)$$

a eliptické svazky se vztahem

$$I(x, y, z) = I_0(z) \cdot e^{-2\left(\frac{x^2}{w_x^2} + \frac{y^2}{w_y^2}\right)}, \quad (1.7)$$

kde I_0 ¹⁷ je maximální intenzita ve středu svazku, w ¹⁸ je pološířka svazku v dané rovině (v rovině dopadu na senzor), w_x je délka hlavní poloosy a w_y délka vedlejší poloosy eliptického svazku.

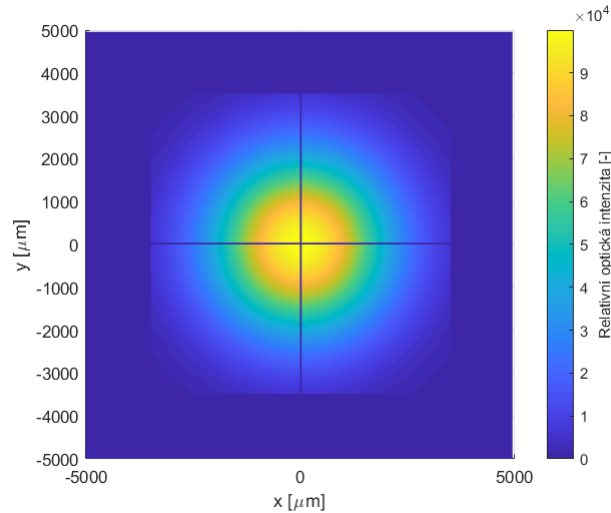
Na obr.1.8 je znázorněn kruhový svazek s pološířkou 3 mm (3000 μ m), který má ve středu maximální relativní intenzitu rovnu 10000 [-]. Velikost intenzity nemá v simulacích význam, jelikož je výstup daný poměrem rozdílu v dané ose a sumě všech kvadrantů (vzorec 1.4). Funkce *hsurf(...)* zobrazuje intenzitu v poměru ku maximální, tudíž graf vypadá identicky pro různé I_0 se stejnou pološířkou svazku w .

Vykreslení pro eliptický svazek probíhá analogicky. S tím rozdílem, že je nutné zvolit parametry hlavní a vedlejší poloosy. Pro eliptický svazek byly simulovány dva

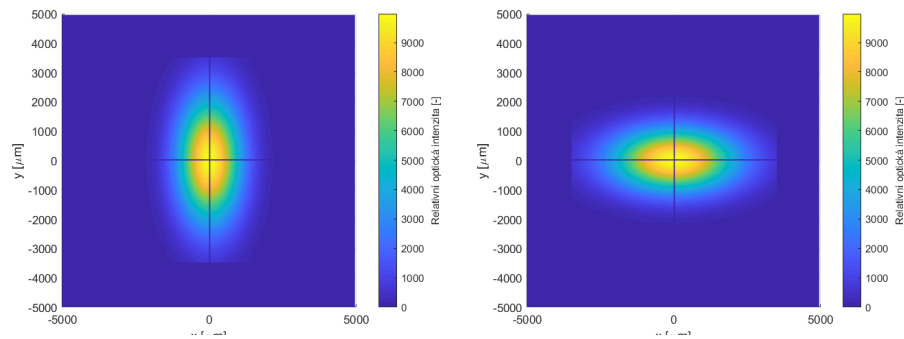
¹⁷Intenzita ve středu svazku - maximální

¹⁸Pološířka svazku v dané rovině

případy. První s delší hlavní poloosou X 1.9b) a druhý s delší vedlejší poloosou Y 1.9a. Velikost kratší poloosy je rovna polovině délky delší poloosy (např. $w_x = w_y/2$). Na obrázcích 1.9 mají obě delší poloosy velikost 3 mm (3000 μm).



Obr. 1.8: Model Gaussovského svazku dopadající na senzor



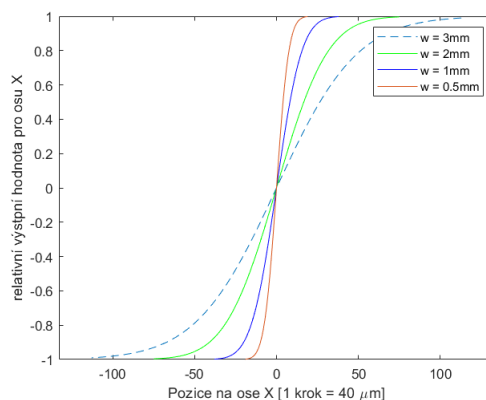
(a) Eliptický svazek s delší Y osou (b) Eliptický svazek s delší X osou

Obr. 1.9: Rozdíl linearit mezi laterálníma PSD

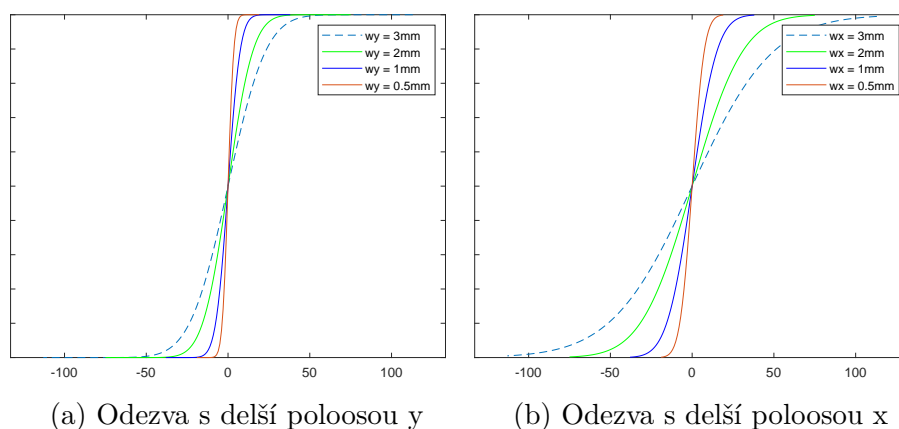
Svazky jsou definovány jako 2D pole, které jsou následně maskovány s polem simulující detektor pomocí funkce *bsxfun()*. Velikost pole, ve kterém je definován detektor, představuje plochu o rozměru (10 x 10) mm. Na této ploše je namodelován senzor se čtyřmi kvadranty, kde rozměr jednoho kvadrantu činí (3,43 x 3,43) mm. Model detektoru je navržen podle skutečné součástky VBQ 036 A. Rozměr “Dead regionu” (prostor mezi kvadranty) byl zvolen 40 μm na základě typických hodnot (30 μm - 50 μm). Maskováním svazku s jednotlivými kvadranty získáme intenzitu z

konkrétních kvadrantů pro výpočet pozice podle vztahů 1.3.

Simulovány byly čtyři průběhy s různou pološířkou svazku (3; 2; 1 a 0,5) mm a čtyři průběhy elipsy s delší poloosou rovné (3; 2; 1 a 0,5) mm. Počátek všech simulací začíná na levém kraji senzoru tak, aby se všechny svazky držely mimo pracovní oblast (saturace - svazek nezasahuje do všech kvadrantů)(obr.1.10). Svazky jsou posouvány o stejný krok 40 μm doprava.



Obr. 1.10: Odezvy na různé pološířky kruhového svazku



Obr. 1.11: Odezvy na eliptický svazek v ose X pro různé délky poloos

Na obr.1.10 jsou znázorněny průběhy odezvy detektoru pro různé pološířky a poloosy (elipsa) svazku. Průběhy se liší svojí pracovní oblastí, která tvoří lineární část mezi postranními saturacemi. Sklon průběhů je dán jejich pološířkou/poloosou svazku v ose X, kdy s širší pološířkou w klesá úhel sklonu (strmost směrnice).

Z výsledku eliptických simulací lze vyvodit jeden důležitý poznatek. Lze si všimnout toho, že pro správnou funkci zařízení je nutné, aby dopadající svazek byl kruhový. Pro eliptický svazek platí neshoda mezi výstupními X-Y pozicemi. Tato ne-

shoda by se poté ve výsledném grafu projevovala tak, že by stejný pohyb generoval v každé ose jinou změnu. Toto by bylo možné řešit za účasti uživatele, který by normalizoval průběhy směrnic v pracovních oblastech X-Y.

Korekce uživatelem je naznačena na obr.1.12. Simulace zobrazuje směrnice pro svazek elipsy s velikostí poloos $w_y = 1,5$ mm, $w_x = 3$ mm. Prvním krokem korekce je výpočet obou směrnic z koncových bodů průběhů:

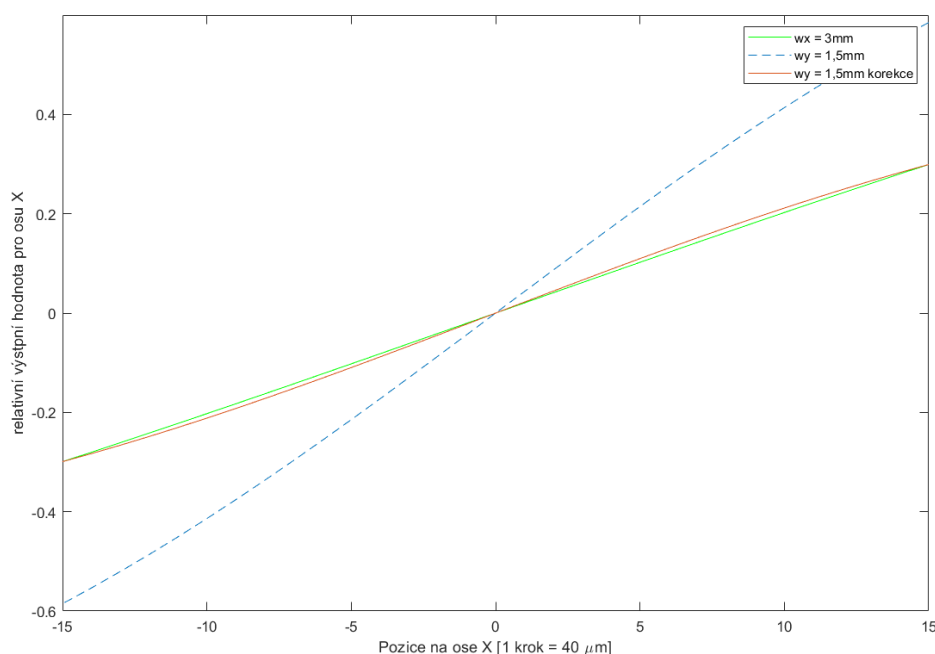
$$směrnice = \frac{hodnota(pozice\ 2) - hodnota(pozice\ 1)}{pozice\ 2 - pozice\ 1}. \quad (1.8)$$

Následuje výpočet korekční konstanty, která se vypočítá jako podíl obou směrnic podle toho, kterou ze směrnic je lepší normalizovat. V tomto případě je normalizována poloosa Y, tudíž lze počítat korekční konstantu tímto způsobem:

$$korekč.\ konst. = \frac{směrnice\ X}{směrnice\ Y}. \quad (1.9)$$

Po výpočtu stačí korekční konstantu vynásobit jednotlivými hodnotami Y ze senzoru.

Výsledek korekce je znázorněn na obr.1.12. Ty jsou v některých oblastech symetricky zaoblené kolem středu. Zaoblení je způsobeno Gaussovským charakterem svazku a způsobuje nelinearity v odezvě senzoru. Nelinearity se kompenzují složitými algoritmy, které jsou nad-rámec této práce.

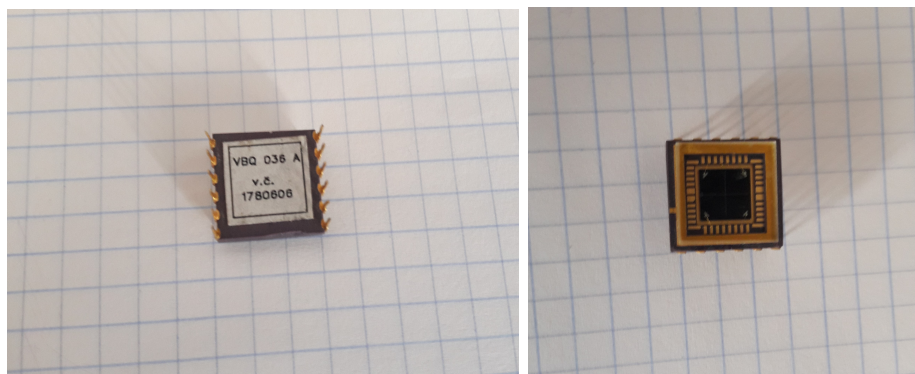


Obr. 1.12: Korekce směrnic

2 Praktická část

2.1 Parametry senzoru

Před samotným návrhem je důležité proměřit konkrétní vlastnosti segmentovaného detektoru ke stanovení parametrů zařízení. Tato část práce je zaměřena na proměření reálných vlastností detektoru VBQ 036 A. Cena těchto detektorů se pohybuje kolem několika tisíc korun. Rozhodl jsem se tedy pro recyklaci starého přípravku, jehož funkcí bylo centrování laserového svazku. Jedná se o segmentovaný typ detektoru staršího typu, jehož dokumentace již není dostupná.



(a) Senzor zezadu

(b) Senzor zepředu

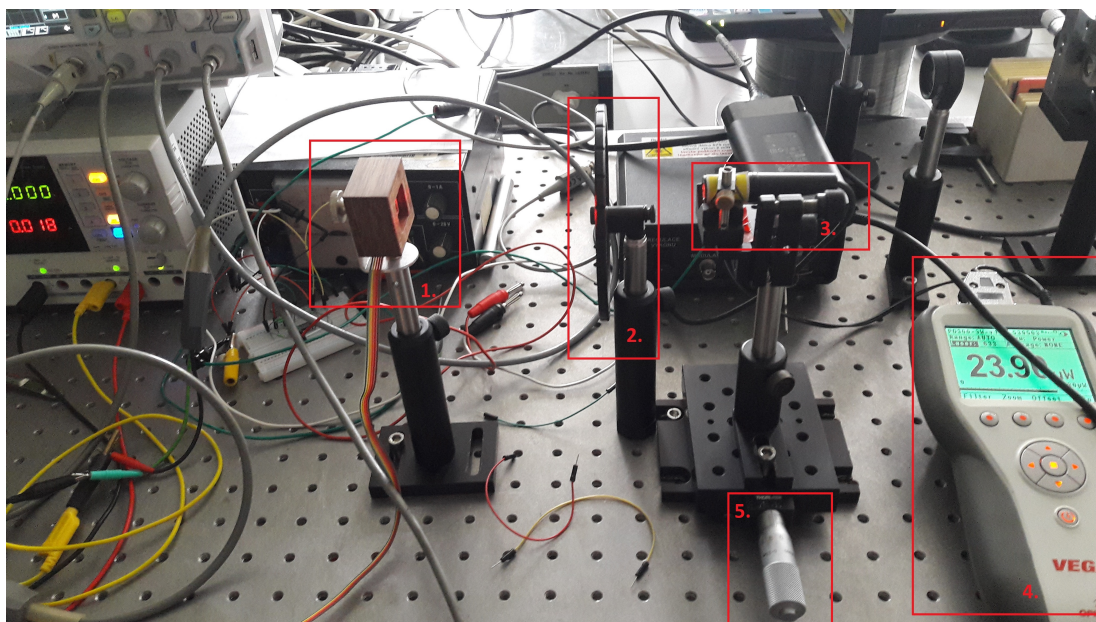
Obr. 2.1: Senzor VBQ 036 A

Přípravek má mimo výstupy centrování, také přímé výstupy z kvadraturních segmentů. Tyto signály jsou převedeny na napětí s přenosem $10,5 \text{ k}\Omega$. Na katody senzoru, je zapojené $+12 \text{ V}$ reverzní napětí. Celý přípravek je napájen symetrickým napětím $\pm 12 \text{ V}$.

Měření probíhalo na měřicím pracovišti, které popisuje obr.2.2. Označení číslo jedna má testovaný senzor, který je zapojen na převodníky starého přípravku. Na výstupy přípravku je zapojený čtyř-kanálový osciloskop Rigol MSO1074, snímající výstupy z jednotlivých segmentů. Číslo dva představuje filtr, k regulaci výkonu laseru. Třetí je blok laseru s vlnovou délkou 633 nm . Pro měření intenzity laseru byl použit měřicí přístroj Vega - Ophir (blok s číslem 4) a k měření posuvu mikrometr (pátý blok). Součástí měřicího pracoviště byl také symetrický zdroj (GW instek) a CCD kamera (Spiricon) propojená s PC, na kterém byla schopna zobrazit tvar a rozměry stopy svazku programem - Beamgage software.

Cílem měření bylo stanovit limity, korekce jednotlivých segmentů a vliv reálných součástek na výstupní napětí. Nejprve byly změřeny výstupní odezvy pro velké

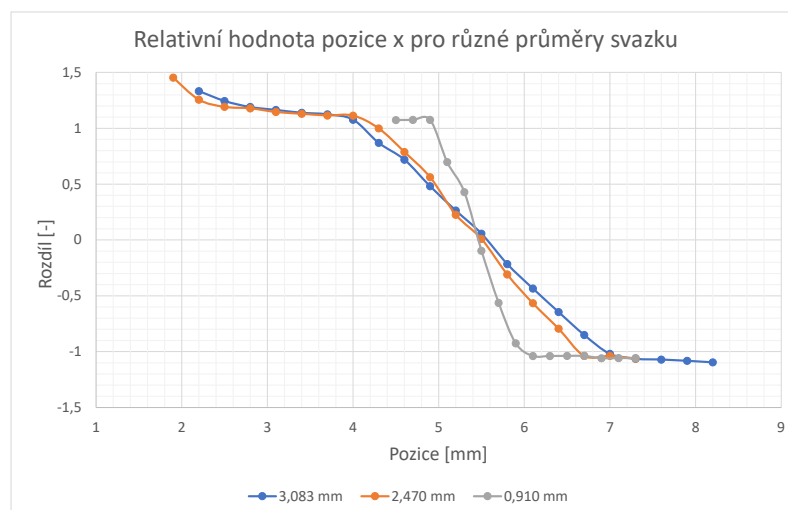
a malé signály ke stanovení limitů maximální a minimální šířky svazků. Poté následovalo změření odezev jednotlivých segmentů v závislosti na intenzitě laseru ke stanovení odchylky segmentů. Tato informace by sloužila k normalizaci jednotlivých segmentů pomocí odporů v počátečním bloku převodníku (obr.1.6). Měření bylo provedeno pouze v jedné ose (X) s předpokladem stejného chování druhé osy (Y). Optický výkon okolního pozadí se pohyboval kolem 8-10 μW .



Obr. 2.2: Měřicí pracoviště

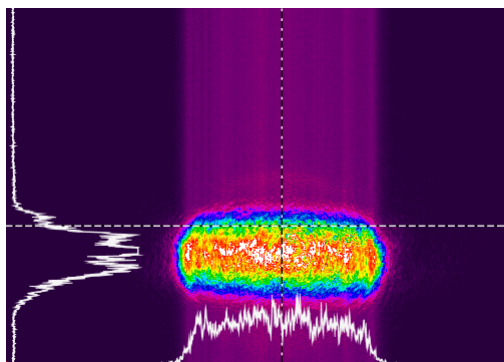
2.1.1 Odezvy pro signály s širší pološířkou svazku

Měření odezev širších svazků sloužilo zejména pro otestování funkčnosti segmentovaného PSD. Z teorie v kap.1.3 bylo již zmíněno, že se maximální rozsah řídí velikostí svazku, a ten může nabývat maximálních hodnot poloviny délky strany senzoru s tím, že má svazek neustálý průnik se všemi kvadranty. Na obrázku 2.3 jsou naměřená reálná data pro tři šířky svazku - $2w$ (ne pološířky w). Šířka byla odečtena z aplikace CCD kamery, ta však umožňuje zobrazení svazku s různou hodnotou expozičního času, která opticky mění šířky odečtené kurzory. Při měření velkých svazků lze šířku svazků odečítat také z naměřených průběhů, kdy je velikost pracovních oblastí (lineární část) rovna šířce svazku. V grafu 2.3 jsou v legendě hodnoty odečtené šířky svazků z CCD aplikace. Ty navíc odpovídají i velikostem naměřených pracovních oblastí. Střed detektoru odpovídá hodnotě 5,4 mm



Obr. 2.3: Závislost výstupních relativních hodnot větších svazků na pozici

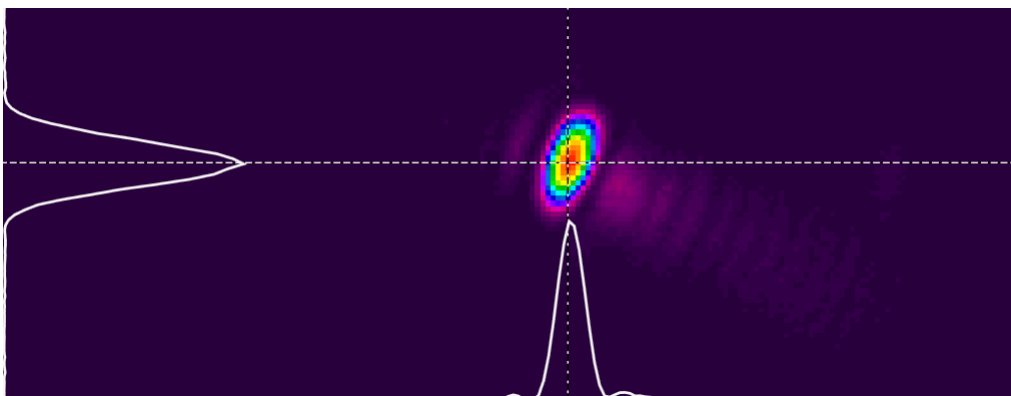
Podobně jako v simulacích byl svazek postupně posouván z levého okraje k pravému. Došlo se ke stejným závěrům jako v simulacích, kdy se zmenšující se velikostí svazku dochází ke zvýšení strmosti pracovní charakteristiky. Na následujícím obrázku je znázorněný jeho eliptický tvar, vyfocený CCD kamerou. Tvar svazku byl dán jeho velikostí, která byla regulována vzdáleností zdroje laseru od senzoru. Široké svazky se jevily elipticky a malé svazky kruhově.



Obr. 2.4: Tvar svazku pro šířku svazku ($2w$) 2,46 mm

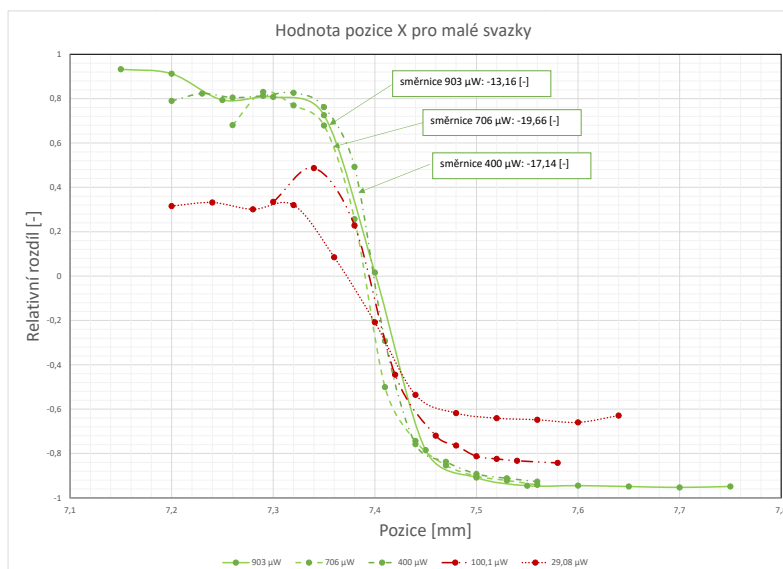
2.1.2 Odezvy pro signály s kratší pološířkou svazku

Tato část měření se zaměřuje na limity minimálních rozměrů svazku a pozorování vlivu “Dead region”. Obr.2.5 zobrazuje tvar laserového svazku pro malé průměry pod cca 120 μm , který je přibližně kruhový.



Obr. 2.5: Tvar svazku pro šířku svazku ($2w$) $120\ \mu\text{m}$

Postup měření malých bodových svazků byl následující. Nejprve byla nalezena pozice detektoru od laserového zdroje taková, aby byl svazek minimální. Na takto malý svazek byl aplikován ND filtr, který rozmítal hodnoty intenzity od nejnižší (schopné zaznamenat rozdíl) až po nejvyšší, která by měla mít hodnotu kolem $1\ \text{mW}$ pro optimální příjem([15]). Stejně jako v předchozím měření velkých svazků byly i tyto svazky proměřeny v ose X.



Obr. 2.6: Závislost výstupních relativních hodnot větších svazků na pozici

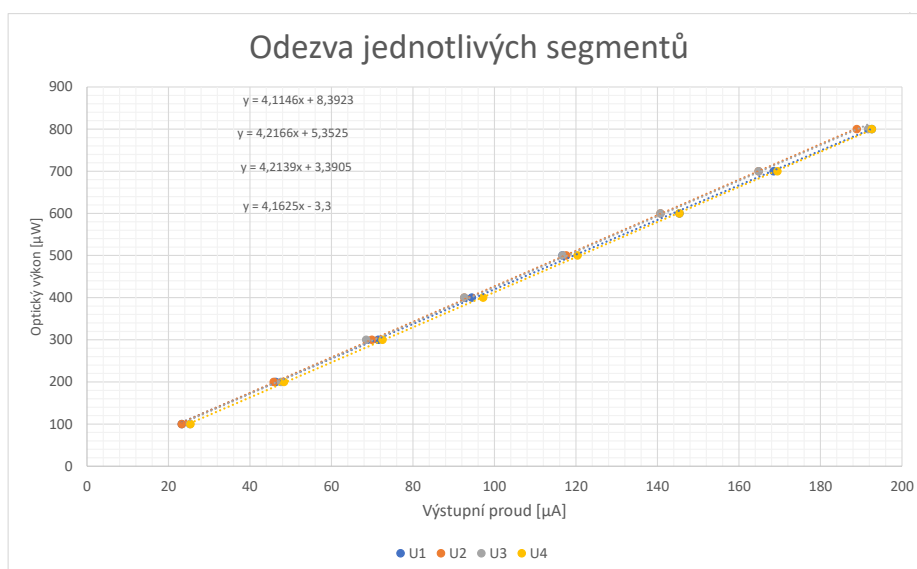
Z teorie a výsledků simulací plyne, že výsledná odezva pro svazky se stejnou pološířkou svazku musí být stejná bez ohledu na intenzitě svazku. Hodnoty by měli

nabývat rozpětí $\langle -1; 1 \rangle$. Tuto podmínku nedodržují svazky s intenzitou $100 \mu\text{W}$ & $29,08 \mu\text{W}$. Ty jsou v grafu označeny červeně. Otázkou je proč je jejich rozsah limitován pod intervalem $\langle -1; 1 \rangle$. Jednou z odpovědí by mohly být offsetové proudy převodníků, které se na vyšších intenzitách (tedy proudech) neprojevovali.

Nepřesnosti naměřených směrnic jsou pravděpodobně způsobeny chybou měření, kdy mohl svazek dopadat pod úhlem jiným než 90° . Další chybou měření mohl být i šum indukovaný z okolí i vlastních součástek.

2.1.3 Odezvy segmentů

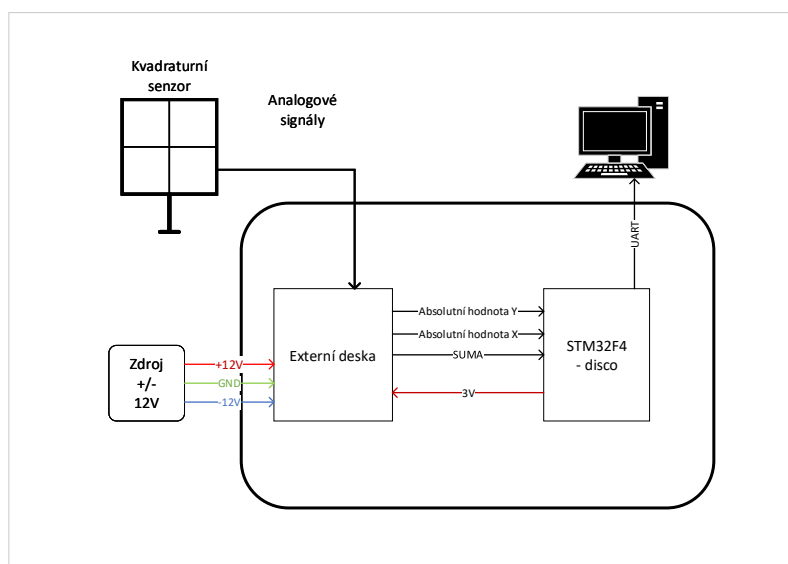
Další otázkou bylo zda-li jednotlivé segmenty senzoru reagují stejně na stejný optický výkon a jaký je charakter závislosti výstupního proudu na vstupním op. výkonu. Pokud by nebyly závislosti lineárně zarovnané (“na sobě” = stejná závislost), potom by výsledné souřadnice X-Y neodpovídaly skutečným hodnotám X-Y. V grafu 2.7 je tato závislost proměřena. Přímký jednotlivých odezev mají přibližně stejnou směrnicí a posuv a jsou lineární v celém rozsahu. Menší rozdíl je znatelný v posunu, který lze vyčíst pomocí rovnice z grafu. Rozdíl v posunu může být způsoben časovou degradací jednotlivých komponent přípravku.



Obr. 2.7: Odezva jednotlivých segmentů

2.2 Návrh detektoru

Tato sekce je věnována návrhu detektoru vycházející ze simulovaných a naměřených poznatků. Detektor se bude skládat z kvadrantního senzoru VBO 036, externí desky, vývojové desky STM32F4 - DISCO, externího zdroje $\pm 12V$ a počítače, jak je znázorněno na následujícím schématu.

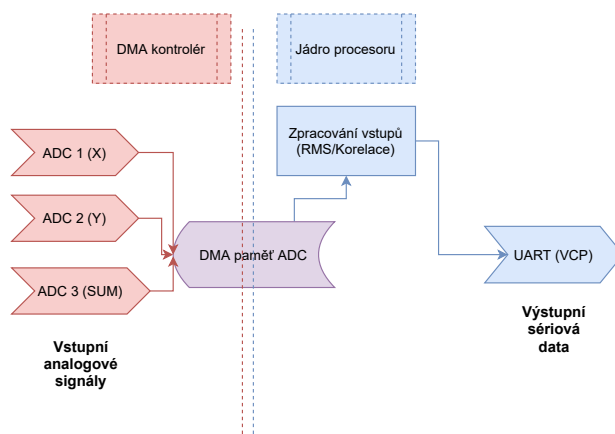


Obr. 2.8: Blokové schéma zařízení

Signály z kvadrantního senzoru dosahují hodnot od $10\ \mu A$ až po $200\ \mu A$ (tyto hodnoty byly odvozeny z naměřených hodnot). Proto je důležité signály zesílit a převést na napětí. Signály jsou upraveny a přeneseny na vstup STM32F4, který je dále zpracovává a posílá pomocí UART (VCP¹) do počítače k vykreslení pozice. Na externí desku je zapojeno symetrické napájecí napětí kvůli zpracování kladných a záporných analogových napětí a také pro zapojení reverzního napětí 12 V k senzoru.

Deska STM32F4 byla využita především díky jejím periferiím. Obsahuje tři 12-bit AD převodníky, schopnost generovat virtuální COM port a DMA kontrolér pro efektivnější práci s pamětí periferií. STM32F4 má v sobě zabudovaný ARM procesor, který je vhodný pro zpracování dat s pevnou a pohyblivou řádkovou čárkou. Průběh zpracování je naznačen na obr.2.9. Data jsou ukládány do vyrovnávací paměti pomocí DMA kontroléru bez účasti jádra. Na samotném jádře poté probíhá zpracování dat k odeslání na UART.

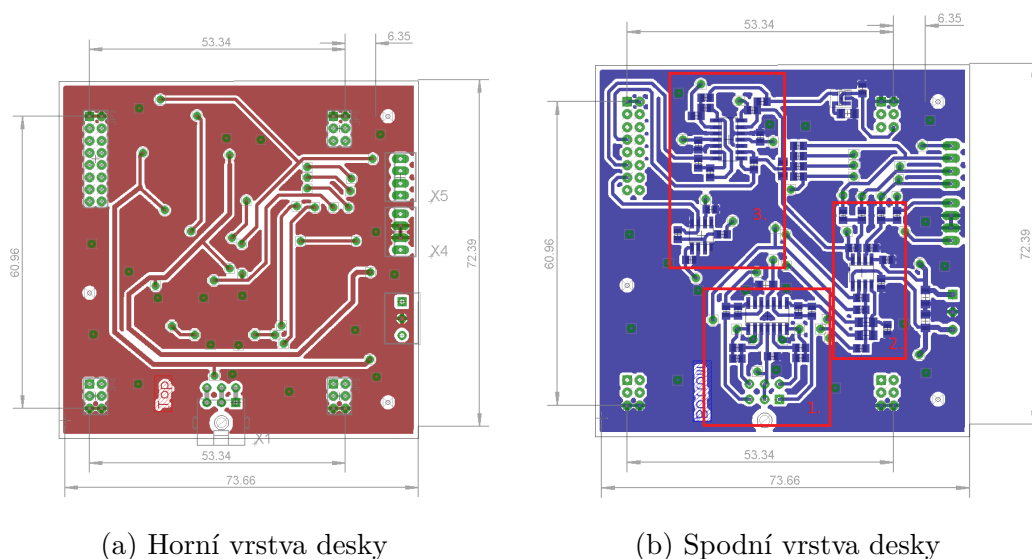
¹Virtuální COM port - anglicky Virtual COM port



Obr. 2.9: Blokové schéma zpracování v procesoru

2.2.1 Hardware

Externí deska je navržena tak, aby její piny pasovaly na piny vývojové desky. Výstup desky je připojen na piny PC1, PA1 & PA2 vývojové desky, na kterých lze nastavit snímání pomocí interních AD převodníků. Pro testování jednotlivých bloků byly do desky vloženy konektory (X4, X5). Schéma destičky vychází z upraveného zapojení 1.6.

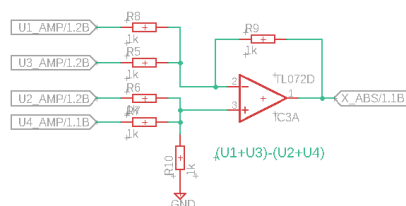


Obr. 2.10: Layout externí desky

Prvním blokem zpracovávající signál ze senzoru je blok převodníku proudu na na-

Velikost maximálních hodnot je cca 200 μA (pro optic. výkon 910 mW) a relativní výstupní hodnoty X a Y mohou dosahovat hodnot $\langle -1; 1 \rangle$. Rozsah AD převodníku musí být tedy rozdělen na dvě poloviny, tak aby se hodnota výstupního napětí 1,5 V rovnala relativní hodnotě souřadnice 0 (střed rozsahu). Z předešlých poznatků, lze hodnotu odporu jednoduše odvodit pomocí Ohmova vztahu:

kde R_F je velikost zpětnovazebního odporu, U_{limit}^3 je zvolený maximální rozsah ($1,5 \text{ V} \pm U_{\text{limit}}$), a I_{MAX}^4 je proud ze senzoru pod maximální povolenou intenzitou. Hodnota $1,3 \text{ V}$ pro U_{limit} byla zvolena s rezervou. Tato rezerva slouží k detekci vlnových délek, které jsou v okolí 1000 nm , na které mají senzory typicky vyšší citlivost (z obr. 1.1). Tudíž by mohlo docházet, ke generaci vyššího proudu při stejném optickém výkonu a různé vlnové délky. Ke zpětnovazebnímu odporu je paralelně připojen kondenzátor, který slouží (spolu s R_F) jako filtr dolní propust. Ten má za úkol filtraci šumu a také slouží proti antialiasingu. Podle dokumentů od OSI-optoelectronics lze volit mezi hodnotami od 1 nF do $10 \text{ }\mu\text{F}$. Zvolena byla hodnota 1.2 nF , vytvářející dolní propust o mezní frekvenci 128 kHz , což je pro tuto aplikaci vhodné, jelikož je firmware schopný snímat frekvence do 130 kHz v režimu korelace (vysvětleno později 2.3.3).



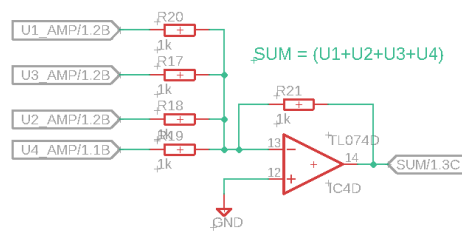
(b) Výpočet absolutní hodnoty Y

Obr. 2.11: První a druhý blok

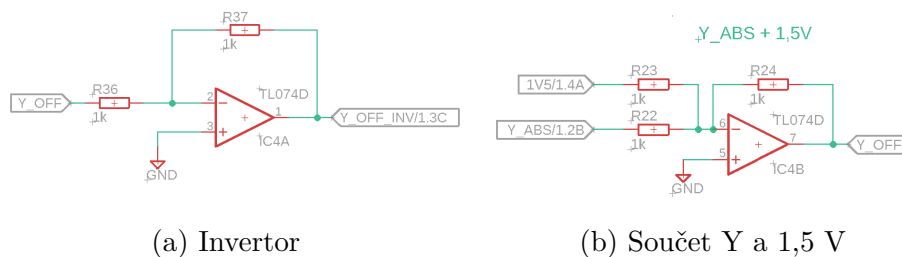
⁴Maximální proud z kvadrurního detektoru

Druhým blokem vyznačeným na layoutu (rozvržení) desky jsou obvody realizující rozdíl segmentů. Z těchto bloků jsou získány absolutní hodnoty souřadnic X a Y. Rozdíl je realizován podle vzorce 1.3 zvlášť pro jednotlivé osy. Na rozdíl od vzorce z kapitoly Segmentované PSD (1.3) zpracovávají obvody hodnoty napětí.

Ve třetím bloku jsou realizovány tři funkce. První je sumátor, který sčítá hodnotu ze všech segmentů a tím dává informaci o dopadajícím optickém výkonu. Slouží hlavně k normování absolutních hodnot souřadnic os. Druhou funkcí je obvod pro úpravu úrovně (zdvih úrovně na 1,5 V), aby odpovídali středu rozsahu AD převodníku. Tato část se skládá z lineárního měniče (3 V \rightarrow 1,5 V) a sumátoru, kde je realizován součet výstupu měniče (1,5 V - polovina AD převodníku) a absolutní hodnota souřadnice os. Výstup ze sumátoru dostáváme invertovaný, proto je na konec zařazen invertující zesilovač se zesílením -1 pro otočení polarit. Součet segmentů a posunuté hodnoty souřadnic jsou vyvedeny na piny AD převodníků vývojové desky.



Obr. 2.12: Obvod pro součet všech segmentů



(a) Invertor

(b) Součet Y a 1,5 V

Obr. 2.13: Třetí blok

Z předchozích naměřených poznatků víme, že největší vliv na dynamický rozsah detektoru mají zejména parazitní vlastnosti operačních zesilovačů a jiných prvků. To zejména v části prvních bloků, kdy se uplatňuje reálný parazitní proud do neinvertovaného vstupu I_{bias} ⁵. Proud nabývá hodnot od desítek pA do několika μ A.

⁵Reálný proud tekoucí do vstupů zesilovače

Pro všechny operace byl tedy zvolen operační zesilovač TL074D, jehož I_{bias} je 65 pA.

2.3 Firmware

2.3.1 Struktura

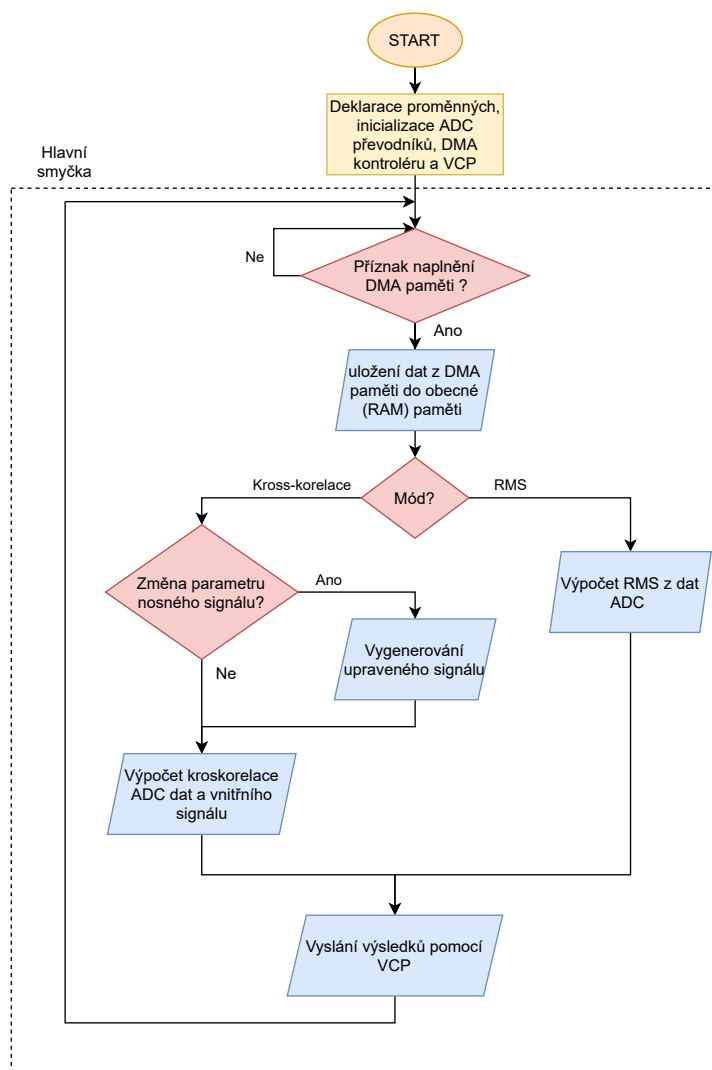
Firmware detektoru implementovaný na desce STM32F4 - Disco byl vytvořen za pomoci vývojového software MXCube. Ten umožňuje uživateli automatické vytvoření periférií v kódu. Za pomoci MXCube byly inicializovány periférie AD převodníku, DMA kontroléru a VCP.

Program je spuštěn hned po zapojení napájení a jeho běh je neustálý. Je to z toho důvodu, aby byla v případě odpojení kabelu detekována chyba v softwaru (viz 2.4). Chod programu znázorňuje následující vývojový diagram. Na začátku jsou deklarovány proměnné programu spolu s inicializací výše zmíněných periférií. V hlavní smyčce poté probíhá zpracování dat. Program kontroluje zda-li jsou data z AD převodníku již naplněna ve vyrovnávací paměti DMA. Pokud není naplněna, vyčká definovaný čas a zeptá se znovu. Po naplnění DMA paměti je změněn příznak na “naplněno” a program se přesune k uložení dat do vnitřní paměti RAM. Je nezbytné uložit data z paměti DMA do RAM, jelikož dochází ke konstantní obměně obsahu DMA paměti i mimo hlavní smyčku. Na základě zvoleného módu přejde program do příslušné větve. V módu RMS⁶ počítá koordinanty X,Y a SUM (celková hodnota) jako efektivní hodnotu z vektoru vzorků AD převodníků.

V případě módu korelace ⁷, je nejdříve indikována změna nosného signálu uživatelem (změna frekvence nebo vzdálenosti). Tato změna může přijít kdykoli jako obsluha přerušení. Změní-li uživatel parametr nosného signálu dojde ke generaci nového vnitřního signálu, který je následně korelován se vstupním signálem. Výstupní hodnoty (RMS nebo korelace) X,Y a SUM jsou vysílány pomocí VCP do počítače a celý proces se opakuje do odpojení napájení.

⁶Efektivní hodnota - anglicky Root mean square

⁷ve skutečnosti kross-korelace, korelace uvádím pro zkrácení výrazu



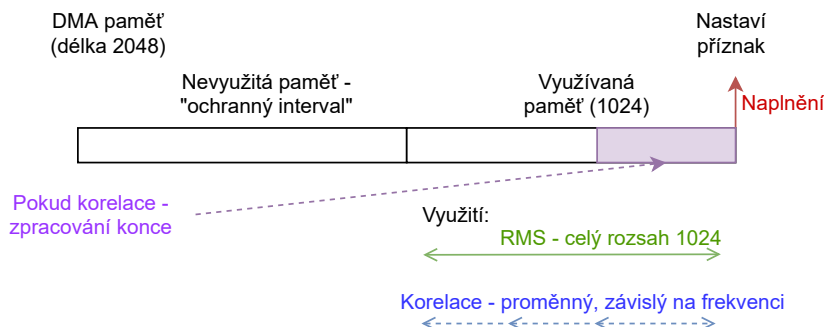
Obr. 2.14: Vývojový diagram Firmware

2.3.2 AD převodník & DMA kontrolér

Tato sekce se zabývá zpracováním vstupních analogových dat. Ty jsou převedena 12 bitovými AD převodníky a ukládána do uživatelem definované paměti (definována paměť s velikostí 2048 vzorků) pomocí DMA kontroléru. AD převodník je nastaven na nejvyšší možnou rychlost vzorkování 1,4 MSps.

Jak již bylo zmíněno v kapitole “Návrh desky” 2.2 DMA plní paměť neustále i za běhu hlavní smyčky. Je tudíž nutné zajistit, aby v případě čtení z DMA paměti nedocházelo k jejímu přepisování. To je zajištěno předřazením ochranného intervalu před využívanou pamětí. Ten zajistí zpoždění do té doby, kdy je část DMA paměti přepsána do jiné - “stabilní” paměti. Tento způsob zpoždění DMA zobra-

zuje obr.2.15. Ochranný interval zde představuje část paměti velikosti 1024 (pasivní paměť). Vynechání dat a zpoždění v této aplikaci nehraje velikou roli, jelikož je rychlost omezena zpracováním softwaru, který je “dostatečně” pomalý (zhruba 100 ms - chod smyčky trvá cca 10 ms).



Obr. 2.15: Zobrazení DMA paměti

Velikost zpracovávaného bloku je vztažena k zvolenému módu a frekvenci nosné. Pokud je zvolen mód RMS je zpracován celý rozsah (aktivní paměti - bez ochranného intervalu). V případě módu korelace je velikost závislá na hodnotě nosné frekvence (čili frekvence generované interně). S rostoucí frekvencí je nutné velikost zpracovávaných dat snížit, tak aby program zpracovával přiměřený počet period vstupního signálu. Naopak s nízkou frekvencí je třeba nasnímat alespoň jednu periodu. Se znalostí rychlosti vzorkování a velikosti aktivní paměti lze stanovit limitní frekvence v módu “Korelace”. Horní limit lze stanovit z Nyquistův–Shannonův vzorkovacího teorému, který tvrdí že pro rekonstrukci frekvenčně omezeného signálu je nutná vzorkovací frekvence dvakrát vyšší, než je nejvyšší frekvence rekonstruovaného signálu. Prakticky však tento teorém platí omezeně a pro rekonstrukci je třeba mnohonásobně vyšší kmitočet[21]. Pro f_{vz} ⁸ 1,4 MHz byla zvolena horní limitní mez na 120 kHz,

⁸Vzorkovací frekvence - AD převodníků (1,4 MHz)

což je 11,6 násobek vzorkovací frekvence. Dolní limitní frekvenci lze vypočítat následovně.

$$\text{min. frekvence} = \text{počet vzorků} \cdot \frac{1}{f_{\text{vz}}} = 731,428 \mu s \Rightarrow 1367 \text{ Hz} \quad (2.2)$$

2.3.3 CMSIS

Jedná se o obsáhlou knihovnu podporovanou společností ARM[22]. Podporuje většinu ARM cortexových procesorů a je zcela zdarma. Vytváří vyšší abstrakci nad periferiemi procesoru a tím usnadňuje vývoj aplikací. Zahrnuje rozhraní pro komunikaci s externími sběrnicemi, debugovací nástroje, nástroje pro řízení vnitřních periférií, funkce pro zapracování číslicových signálů a spoustu jiných nástrojů[20]. V této aplikaci jsou využity funkce pro DSP⁹ a to konkrétně funkce pro výpočet RMS (void arm_rms_f32()) ve formátu float (s pohyblivou desetinou čárkou) a funkci pro výpočet kros-korelace dvou signálů (arm_correlate_f32()) ve formátu Q31 a float (s pevnou desetinou čarou). Q31 je formát, který využívá datový typ int32_t (znaménkový 32-bitový datový typ) a umožňuje práci se zlomkovými čísly. To díky virtuální desetinné čárce umístěné za prvním bitem. Nabývá rozsahu od -1 do 1 a oproti typu float je práce s Q31 mnohem rychlejší. Bohužel CMSIS není dokonalá knihovna, která se stále vyvíjí, a funkce RMS lze implementovat pouze s datovým typem float pro užitý typ procesoru ARM Cortex M4 (CMSIS¹⁰ ver. 1.8). Vzhledem k tomu, že je funkce RMS realizovaná pomocí float, je i výpočet korelace implementována s datovým typem float. Realizace obou funkcí prostřednictvím float nám umožní spojení většiny proměnných a zvětšení volného prostoru RAM. Díky tomu lze například definovat větší DMA paměť, a tím i rozšířit frekvenční rozsah (viz 2.2). Tím že jsou obě funkce realizované pomocí float je firmware méně efektivní a pomalý, ale i přesto bude dostatečně rychlý vzhledem k pomalé softwarové aplikaci na PC.

Výpočet efektivní hodnoty RMS je realizována v diskrétní formě:

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \dots + x_n^2}{n}}, \quad (2.3)$$

kde $x_{\text{pořadí}}$ jsou prvky vektoru x a n jeho délka. Ze vzorce je jasné, že výsledek bude vždy kladný i pro záporné vektory. Proto je před výpočtem zařazena funkce, která umí, na základě vybraných prvků, rozhodnout o znaménku výsledné efektivní hodnoty. Tato funkce vybere třicet hodnot, se stejnou vzdáleností mezi sebou, a podle převažujícího znaménka rozhodne o konečném znaménku RMS. Pokud nastane stav, kdy se počet kladných rovná počtu záporných hodnot, je výsledná hodnota RMS

⁹Zpracování číslicových signálů - anglicky Digital signal processing

¹⁰Cortex Microcontroller Software Interface Standard

nula.

Vzorec pro výpočet podobnosti (korelace) je následující:

$$c[n] = \sum_{k=0}^{len} a[k] \cdot b[k - n], \quad (2.4)$$

$a[n]$ a $b[n]$ jsou sekvence vstupních signálů, $c[n]$ je jejich výstupní korelace. V případě firmwaru představuje hodnota $a[n]$ vstupní proměnou z AD převodníku a $b[n]$ představuje interně generovaný signál, jehož frekvence je shodná s frekvencí modulace laseru.

2.4 Software

Tato podkapitola je zaměřena na software čili aplikaci, která slouží k zobrazení zpracovaných dat z vývojové desky. Aplikace je naprogramována pomocí jazyka Python 3.7. Ten nabízí širokou škálu knihoven, které jsou ve většině případů zdarma pro ne-komerční použití. Výhodou jazyka je jeho jednoduchost použití a schopnost přenosu mezi různými platformami (OS Windows, Linuxové systémy ...). Nevýhodou jazyka je jeho rychlost. Program je výrazně zpomalován dynamicky kontrolovanými datovými typy (nepotřebuje přísné uvádění datových typů).

Pro účely aplikace byly srovnávány dvě vývojová prostředí a to Python a Matlab. Ten má stejně jako Python skriptovací charakter s řadou funkcí a možností vytvořit GUI¹¹. Matlab bohužel neobstál ve stabilitě při komunikaci na sériovém rozhraní (VCP). Docházelo totiž k častým výpadkům, které jsou pro aplikaci závažným problémem. Testována byla verze Matlabu 2018 a 2019.

2.4.1 Použité knihovny/moduly a komponenty programu

PySerial 3.0

Tento modul vytváří rozhraní pro komunikaci s VCP. Licence tohoto modulu je zdarma [25]. Aplikace využívá jeho příkazy pro čtení a posílání dat. Data jsou nejdříve poslána do vyrovnávací paměti s omezenou kapacitou. Pokud bude rychlost čtení vyšší než rychlost posílání dat nemůže dojít k zaplnění. V opačném případě může dojít k přeplnění paměti a tím k narušení komunikace. Proto je po každém čtení tato vstupní paměť vyčištěna, pomocí funkce `PySerial(reset_input_buffer())`. Mimo čištění, čtení a zapisování umožňuje modul měnit veškeré parametry komunikačního rozhraní. Například počet paritních a stop bitů, rychlost komunikace, jméno portu a jiné. Uživateli je zpřístupněné pouze změna jména portu, jelikož jsou ostatní hodnoty závislé na pevných parametrech vysílače dat (STM vývojové desky).

¹¹Grafické uživatelské rozhraní - anglicky Graphic User Interface

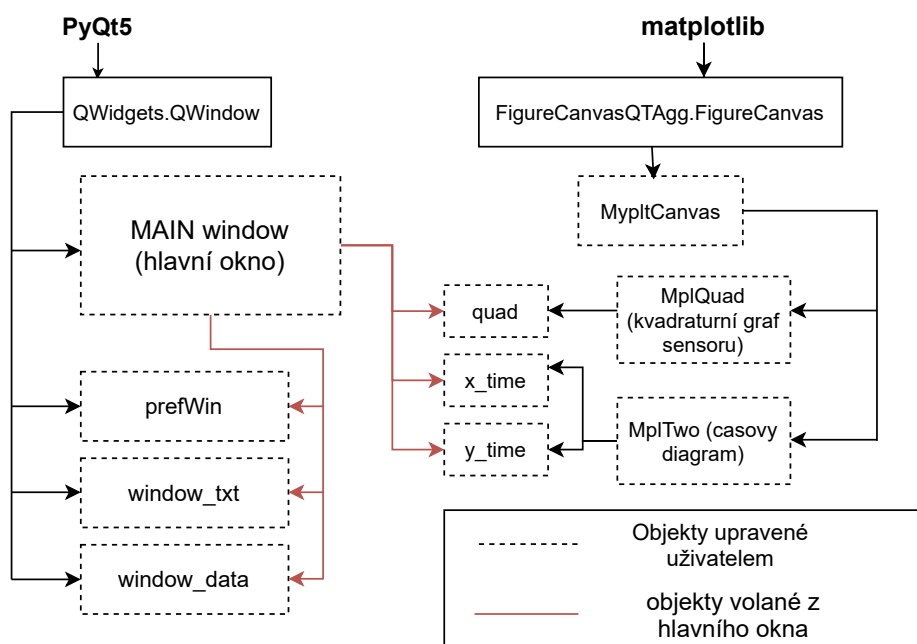
PyQt5

Pro návrh GUI byla využita knihovna PyQt5. Užití této knihovny je zdarma pro nekomerční aplikace[24]. Lze jím naprogramovat prostředí pro většinu platforem (Windows, Linux atd.). Další výhodou této knihovny je její možnost renderování (vykreslení) matplotlib grafů, které pro tuto aplikaci zásadní. Nabízí velké množství konfigurovatelných komponent (QWidgets). Mezi nejdůležitější patří FigureCanvas - pro vykreslení grafů, QTimer - pro periodické spouštění zvolené funkce, a jiné.

Matplotlib

Vykreslení grafů je realizováno pomocí knihovny matplotlib[26]. Knihovna byla navržena tak, aby se její struktura podobala syntaxi Matlabu. Oproti Matlabu je zdarma a vedena jako open-source projekt. Jak již bylo uvedeno výše je PyQt5 spojený s matplotlib pomocí FigureCanvas. Pro vykreslení pomocí pyplot je nutné toto nastavení změnit v hlavičce.

Hlavní komponenty programu



Obr. 2.16: Nejdůležitější objekty aplikace

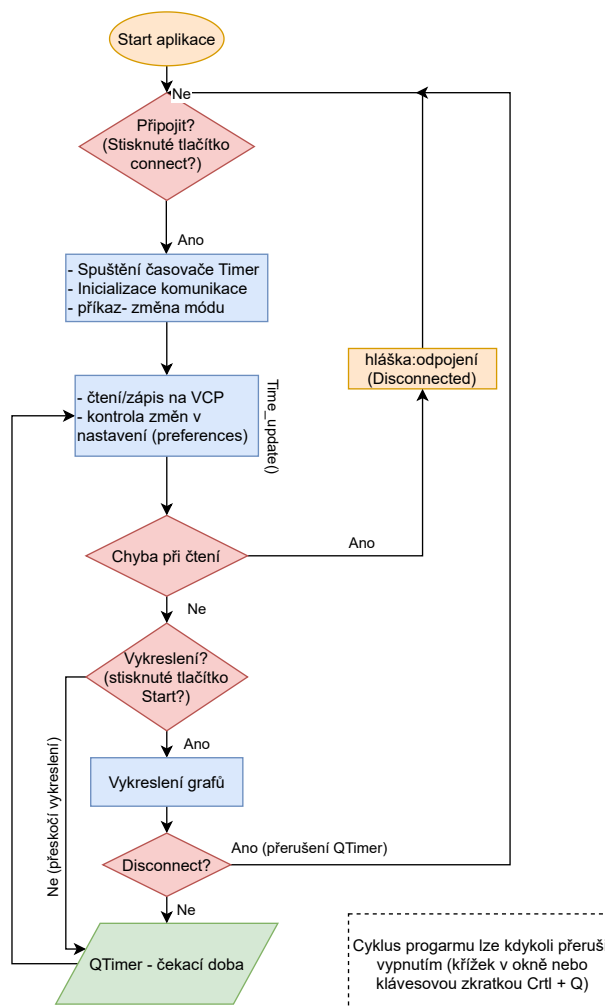
Výše uvedený diagram znázorňuje hlavní třídy programu. Po spuštění se uživateli zobrazí hlavní okno `main_win`, které je dceřinným objektem `QWidgets.QWidget`. V

“MAIN window” se vytvoří objekty oken `prefWin` (okno pro nastavení parametrů), `window_txt` (okno pro ukládání dat) a `window_data` (okno pro zobrazení reálných dat ze sériové komunikace). Všechny zmíněné objekty jsou zapouzdřené v `main_win` a taktéž dceřiné třídy `QWidgets.QWindow`.

Grafické objekty jsou vytvořeny z mateřské třídy `MypltCanvas`, která je dceřinou třídou `FigureCanvasQTAagg.FigureCanvas`. `MypltCanvas` dále slouží jako mateřská třída pro objekty `MplQuad` a `MplTwo`. Obě tyto třídy obsahují funkce pro aktualizaci grafů, které se volají periodicky pomocí `QTimer` (viz `PyQt5`). Podobně jako objekty oken jsou i grafické objekty inicializovány v hlavním okně (`quad` - pro zobrazení stopy svazku, `x_time` a `y_time` - zobrazení časového diagramu v osách).

2.4.2 Chod programu

Tato část je zaměřená na funkci a propojení jednotlivých objektů aplikace. Po spuštění programu (například ze spustitelného souboru `.EXE`) dojde k vytvoření třídy `main_win` a poté vytvoření ostatních zapouzdřených tříd (viz předchozí podkapitola). Součástí `main_win` je funkce (metoda) `Time_update()`, která se periodicky spouští pomocí `QTimer`. `Time_update()` má za úkol číst data z portu (kontrolovat připojení) a aktualizovat grafy, pokud je spuštěný příznak “Start”(kliknutím na tlačítko “Start”). Cyklus časovače `QTimer` zobrazuje následující diagram.



Obr. 2.17: Stručný vývojový diagram aplikace

Cyklus časovače lze přerušit buď kliknutím na tlačítko “Disconnect”, které ukončí cyklus bez ukončení programu, nechtěným vypojením portu během cyklu nebo ukončením celého programu.

Spuštění časovače (cyklu) začíná stiskem tlačítka “Connect”. S tímto pokynem se spouští inicializace sériového portu, časovače a zároveň vyšle příkaz pro změnu módu, tak aby mód v softwaru a vývojové desky byl identický. Po inicializaci následuje samotné čtení dat ze sběrnice. Pokud dojde k chybě při čtení, program provede ukončení sériového portu a zastavení časovače. Nenastane-li chyba program dále kontroluje vnitřní nastavení z okna “Preferences” a podle toho nastaví prostředí (např. zobrazení v absolutních nebo relativních hodnotách, velikost časové osy, rychlost čtení atd.). Stisknutím “Connect” však nedochází k vykreslení dat. To je umožněno

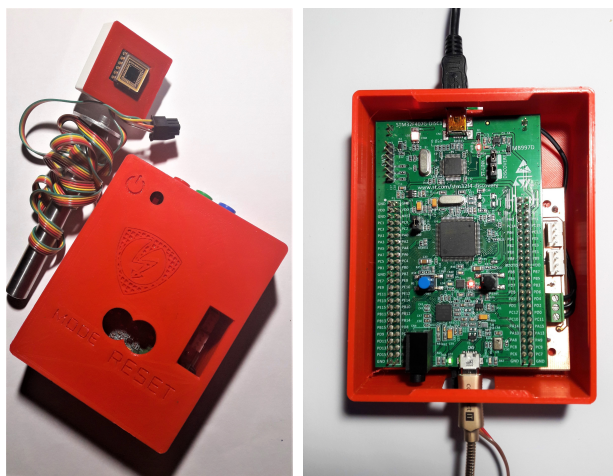
pouze po stisknutí tlačítka “Start”, tak aby si uživatel mohl graf podle libosti zastavit. Po vykreslení se vrací cyklus zpátky na začátek a celý cyklus se opakuje.

Z výše uvedeného je tedy patrné, že cyklus QTimeru může probíhat ve dvou variantách a to bez a s vykreslením. To má nepříznivý vliv na čas zpracování, jelikož vykreslení je proces, který zabírá nezanedbatelnou dobu. Uživatel si tedy musí být vědom toho, že se zvětšující se délkou dat grafů (počet vzorků na osu) dochází ke zvyšování doby vykreslení.

2.5 Obsluha a chod přístroje

Tato část slouží jako ovládací manuál pro uživatele. Detailně se zaměřuje na jednotlivé funkce a stavy, ve kterých se přístroj může nacházet. Nejdříve jsou stručně popsány hardwarové nároky modulu (napěťový zdroj, zapojení atd.), poté jsou rozebrány vlastnosti softwarové aplikace.

2.5.1 Modul



(a) Uzavřený modul

(b) Otevřený

Obr. 2.18: Modul

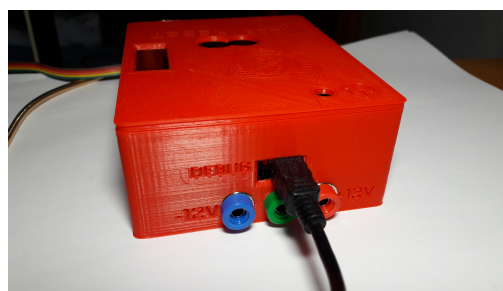
Modul přístroje se skládá ze dvou částí, které jsou uzavřeny v plastové krabici (viz obr.2.18a). Z vývojové desky a desky pro analogové zpracování signálů (dále jen “shield”). Shield slouží k pevnému upevnění ke spodku krabice pomocí tří otvorů. Umožňuje také přístup k výstupům převodníků proudů na napětí senzoru

a jiným signálům. Na obrázku 2.18 je také znázorněn způsob zapojení sériové komunikace (zlatý kabel) a debuggeru (černý kabel) vývojové desky. Sériová komunikace je propojena s PC pomocí kabelu micro-USB (modul) do portu počítače (USB 3, USB-C...). Zapojení je signalizováno zelenou led diodou viditelnou z boku na obrázku 2.19. Pod konektorem sériové komunikace se nachází vstup senzoru, který vede do shieldu.

V běžném provozu se nedoporučuje mít zapojený debugger s externím napájením $\pm 12V$, jelikož může vzniknout nesymetrie mezi napětím 5 V debuggeru a externím napětím (resp. napětím 5 V derivované z 12 V na shield desce) a tím k vytvoření proudů mezi napětími a zbytečné ztrátě.



(a) Vstup senzoru a sériové komunikace



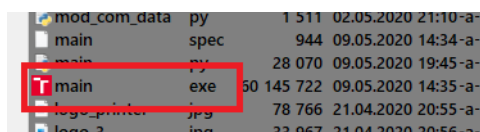
(b) Vstup napájení a debuggeru

Obr. 2.19: Přední a zadní část krabičky

2.5.2 Aplikace PSD

Spouštění a připojení

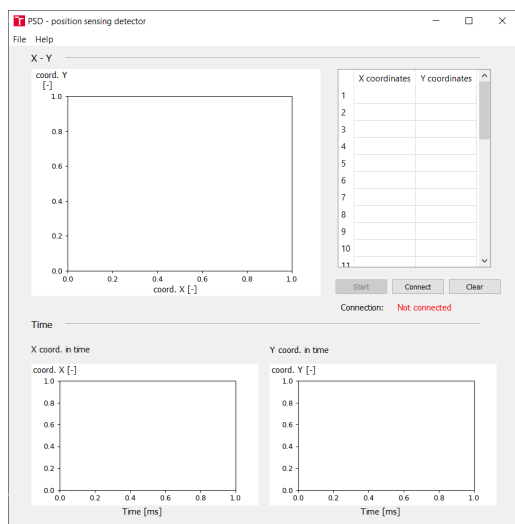
Aplikaci lze na systému Windows spustit pomocí exe souboru (viz 2.20). Ta se načte přibližně za (15-20) s.



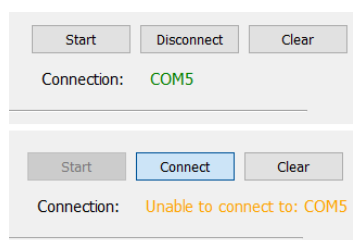
Obr. 2.20: exe soubor

Po spuštění je uživateli zobrazeno hlavní okno aplikace v neaktivním a nepřipojením stavu. Pro aktivaci je nutné aplikaci připojit k modulu pomocí tlačítka Connect (viz 2.21). Tímto se vytvoří pokyn pro inicializaci připojení portu. Pokud se k sériovému portu nelze připojit, aplikace upozorní uživatele hláškou. Jeden z důvodů, selhání komunikace může být nesprávné jméno portu. To lze zjistit například

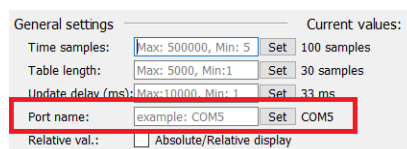
ve správci zařízení (Porty COM a LPT). Jméno portu lze změnit v okně Preferences (nabídka File -> Preferences nebo Ctrl+R). Výchozí jméno portu je nastaveno na “COM5”. Změnu portu je nutné potvrdit tlačítkem Set (2.21). Dalším problémem může být připojení jiné aplikace na tentýž port (PuTTY, Termite atd.). Pokud je jiná aplikace připojená na stejný port jako modul, je komunikace s aplikací PSD blokována.



(a) Neaktivní okno



(b) Stav připojení



(c) Změna názvu portu

Obr. 2.21: Připojení

Po úspěšném navázání spojení s modulem, stačí stisknout tlačítko “Start” pro vykreslení grafů. Software počítá i s případem odpojeného kabelu, kdy dojde k automatickému ukončení komunikace a vykreslování.

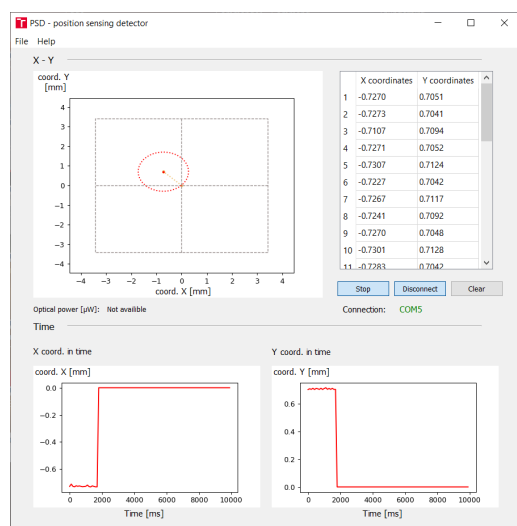
Grafy - hlavní okno

Grafy jsou jeden z nejdůležitějších objektů celého programu. V levém horním rohu se nachází graf pro zobrazení stopy svazku na souřadnicích X a Y. Vespod se nacházejí grafy souřadnic vykreslených v čase.

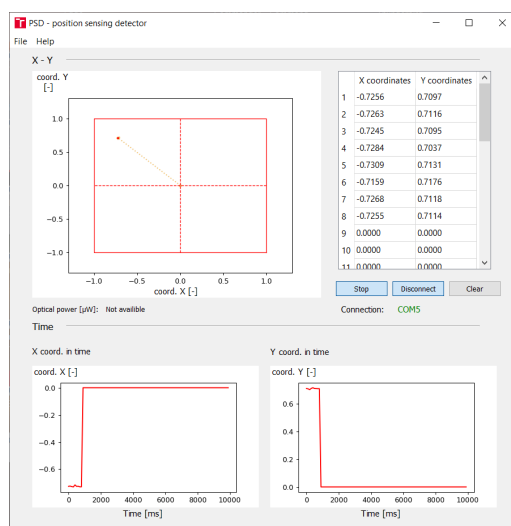
Hodnoty lze zobrazovat, jako relativní nebo absolutní hodnoty. Při změně režimu zobrazení čísel dochází i ke změně interpretace grafu “X - Y” (Význam časových diagramů zůstává nezměněn). V režimu absolutních hodnot představují šedé přerušované čáry kvadranty senzoru o velikosti (3.43 x 3.43) mm. Červená přerušovaná čára potom modeluje skutečnou velikost svazku. Velikost svazku si musí uživatel určit samostatně mimo aplikaci a nastavit v “Preferences” v kolonce “Spot dimensions”. V režimu relativních hodnot červený kruh a kvadranty senzoru ztrácí smysl, protože

je relativní hodnota vztažena k velikosti šířky svazku. Hranice svazku nyní představují červené plné čáry, kdy krajní hodnoty $\langle -1; 1 \rangle$ odpovídají hodnotám šířky svazku (př. pro šířku 3 mm - $\langle -3; 3 \rangle$ mm). Relativní zobrazení je vhodné použít v případech, kdy uživatel nemůže změřit šířku svazku.

Červený bod představuje aktuální pozici středu svazku a žluté body, následující červený bod jsou minulé pozice svazku. Počet žlutých bodů je rovný délce počtu hodnot tabulky, který lze změnit v "Preferences".

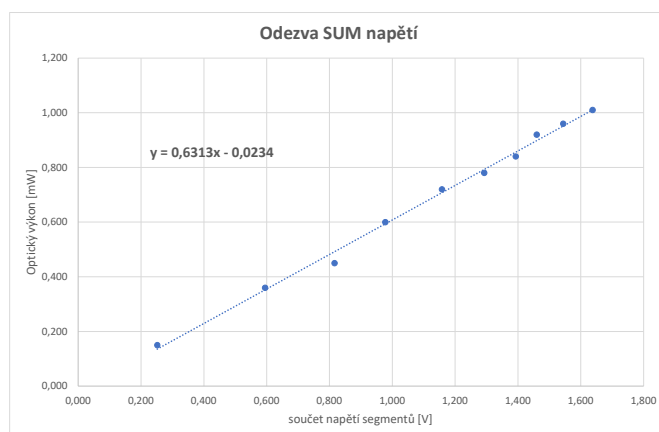


(a) Graf v zobrazení absolutních hodnot



(b) Graf v zobrazení relativních hodnot

Obr. 2.22: Režimy zobrazení hodnot



Obr. 2.23: Odezva napětí SUM na optický výkon

Mimo zobrazování aktuální polohy svazku umí aplikace měřit i jeho optický výkon. To lze implementovat se znalostí závislosti výstupního celkového součtu napětí

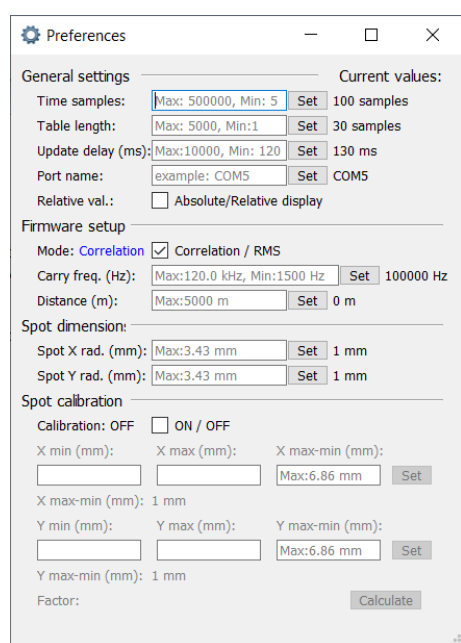
všech segmentů (U_{SUM}) na vstupním optickém výkonu z grafu 2.23. Odezva byla odměřena pomocí měřiče optického výkonu Vega. Směrnice této závislosti je 0,6313 s posunem -0,0234. Výpočet opt. výkonu vypadá následovně:

$$\text{Opt.výkon} = U_{\text{SUM}} \cdot 4,1769 + 3,46, \quad (2.5)$$

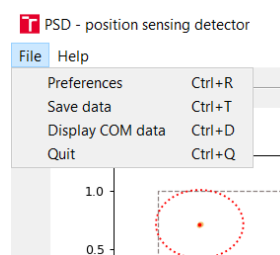
kde U_{SUM} ¹² je součet napětí všech segmentů. Opt. výkon lze měřit pouze v módu RMS se spuštěným vykreslováním.

Nastavení - Preferences

Toto je ovládací část aplikace. Uživatel má možnost změny některého z parametrů zpracování dat, komunikace a vykreslování. Do okna “Preferences” se lze dostat buď přes nabídku “File” nebo přes klávesovou zkratku Ctrl + R. Každou změnu v “Preferences” je nutné potvrdit stisknutím “Set”. Tím dojde ke změně hodnoty v levé kolonce “Current values” - aktuální hodnoty. Limity nebo příklady parametrů jsou zobrazeny ve vyplňovacím poli. Dojde-li k překročení nebo podtečení limitů, nastaví se nejnižší/nejvyšší možná hodnota.



(a) okno Nastavení



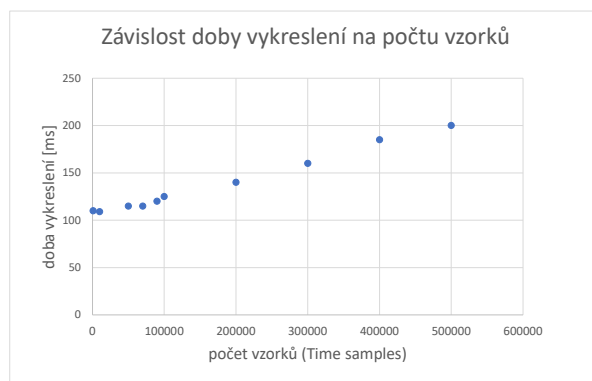
(b) Nabídka File

Obr. 2.24: Nastavení (Preferences)

Time samples je parametr, kterým lze měnit délku časové osy v grafech “X coord. in time” a “Y coord. in time”. Právě tyto grafy lze ukládat do textového

¹²Součet napětí všech kvadrantů

souboru. S maximální délkou 500 tisíc vzorků a rychlosti snímání aplikace 10 s lze dosáhnout teoretické doby logování (nahrávání) až 57.8 dní (nebylo testováno - nedoporučuje se). S různou délkou zobrazených vzorků však roste i doba vykreslení. Tuto závislost popisuje graf 2.25.



Obr. 2.25: Závislost doby vykreslení grafů na počet vzorků

Na tomto grafu je vidět, že se průběh dělí na dvě části. U první části pro délky do 90 tisíc je rozdíl dob zpracování minimální a druhé části dochází k lineárnímu nárůstu. Lineární nárůst druhé části (nad 90 tisíc) je popsán touto rovnicí získanou pomocí Microsoft Excel:

$$y = 0,0002 \cdot \text{Time samples} + 102,97. \quad (2.6)$$

V programu je implementována synchronizace doby zpracování s nastavitelnou dobou čtení dat tak, aby minimální doba odpovídala době vykreslení (+ 5 ms doba čekání QTimeru). Změní-li se tedy nastavení délky počtu “Time samples”, změní se čas “Update time” (doba čtení) na minimální možnou hodnotu. Je tedy výhodné změnit nejprve parametr “Time samples” a poté “Update time”.

Podobně jako časovou osu lze měnit počet vzorků v tabulce parametrem “Table length”. Tento parametr je zároveň spojený s délkou tabulky vstupních dat COM 2.26. Toto okno lze podobně jako “Preferences” vyvolat z nabídky File nebo klávesovou zkratkou Ctrl + D. “COM data” slouží pouze pro kontrolu vstupních dat z modulu.

	data SUM	data X	data Y
1	0.3530	0.8282	-0.8073
2	0.3530	0.8288	-0.8045
3	0.3530	0.8281	-0.8073
4	0.3528	0.8284	-0.8058
5	0.3527	0.8284	-0.8063
6	0.3530	0.8256	-0.8067
7	0.3530	0.8282	-0.8073
8	0.3530	0.8289	-0.8044
9	0.3530	0.8280	-0.8073
10	0.3534	0.8282	-0.8081
11	0.3527	0.8284	-0.8062
12	0.3529	0.8281	-0.8073
13	0.3530	0.8281	-0.8073
14	0.3530	0.8288	-0.8042
15	0.3530	0.8281	-0.8073
16	0.3528	0.8283	-0.8059
17	0.3528	0.8284	-0.8063
18	0.3530	0.8257	-0.8068

(a) Zobrazení dat z komunikace

Time samples: (Max: 50000, Min: 5) Set: 100 samples
 Table length: (Max: 5000, Min: 1) Set: 30 samples
 Update delay (ms): (Max: 10000, Min: 110) Set: 110 ms

(b) Nastavení délky tabulky

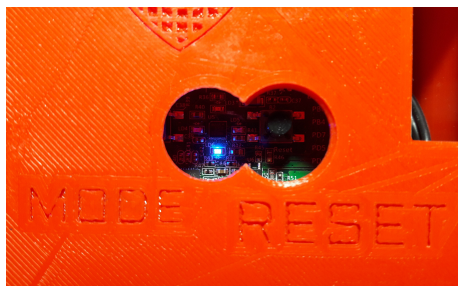
	X coordinates	Y coordinates
1	-0.7141	0.7133
2	-0.7174	0.7031
3	-0.7238	0.7070
4	-0.7237	0.7095
5	-0.7152	0.7035
6	-0.7138	0.7128
7	-0.7071	0.7033
8	-0.7268	0.7006
9	-0.7211	0.7015
10	-0.7233	0.7002
11	-0.7247	0.7057

Stop Disconnect Clear
 Connection: COM5

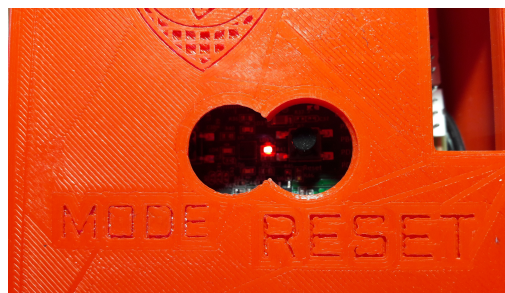
(c) Tabulka v hlavním okně

Obr. 2.26: Nastavení délky tabulek

Další položkou nastavení je nastavení módu korelace a RMS. Při inicializaci komunikace s modulem je ihned vyslán příkaz ke změně módu na RMS, tak aby byl mód modulu a aplikace stejný. Změnu na modulu indikují led diody vedle tlačítka Reset.



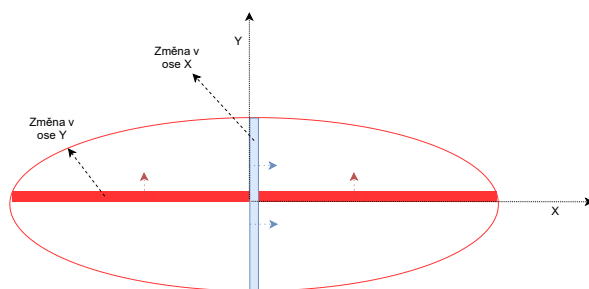
(a) Mód korelace



(b) Mód RMS

Obr. 2.27: Indikace módů na modulu

Speciální část v nastavení je určena pro kalibraci změn v ose (“Spot calibration”). Kalibrace se zaměřuje na svazky eliptického tvaru, kdy vlivem různých velikostí poloos je pro stejnou změnu pozice generována různá hodnota napětí. Tento jev popisuje následující obrázek a potvrzuje jej teoretická simulace 1.6.



Obr. 2.28: Změna v osách elipsy

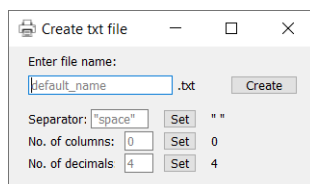
Z obrázku je znatelné, že pro stejnou změnu v osách bude generován vyšší proud pro osu Y, díky větší ploše změny svazku. Kalibraci tvaru svazku provádí uživatel měřením stopy eliptického svazku v osách X a Y. Probíhá automaticky výpočtem korekční konstanty (více v simulaci 1.6). Kalibrací dojde k virtuálnímu zmenšení širší osy svazku na délku kratší. Tím se svazek jeví jako kruhový (virtuálně) a změny v obou směrech jsou ve stejném poměru.

Hodnoty pro kalibraci lze zadat buď jako změřené krajní body rozsahu (X_{\min} , X_{\max} v mm) nebo lze zadat přímo hodnotu rozsahu ($X_{\max-\min}$ v mm). Po potvrzení “Set” se nastaví velikost modelu svazku v grafu X-Y a po stisknutí “Calculate” se hodnoty zkalibrují.

Obr. 2.29: Kalibrace osy

Ukládání dat - Create txt file

Okno “Create txt file” lze vyvolat klávesovou zkratkou Ctrl+S nebo přes nabídku “File”. Zaznamenat lze časové diagramy X a Y. Doporučuje se zastavit vykreslení grafů (“Stop”) před vytvořením textového souboru. V okně pro vytvoření textového souboru si uživatel navolí parametry ukládání. Aplikace umožňuje definovat počet sloupců, desetinných míst a oddělovače dat. Pokud bude chtít uživatel výpis dat do jednoho řádku, stačí nastavit “No. of columns” na nulu. Po nastavení parametrů a vyplnění jména stačí stisknout “Create” pro vytvoření textového souboru. Cesta vytvoření souboru je stejná s cestou souboru main.exe.



Obr. 2.30: Ukládání do textového souboru

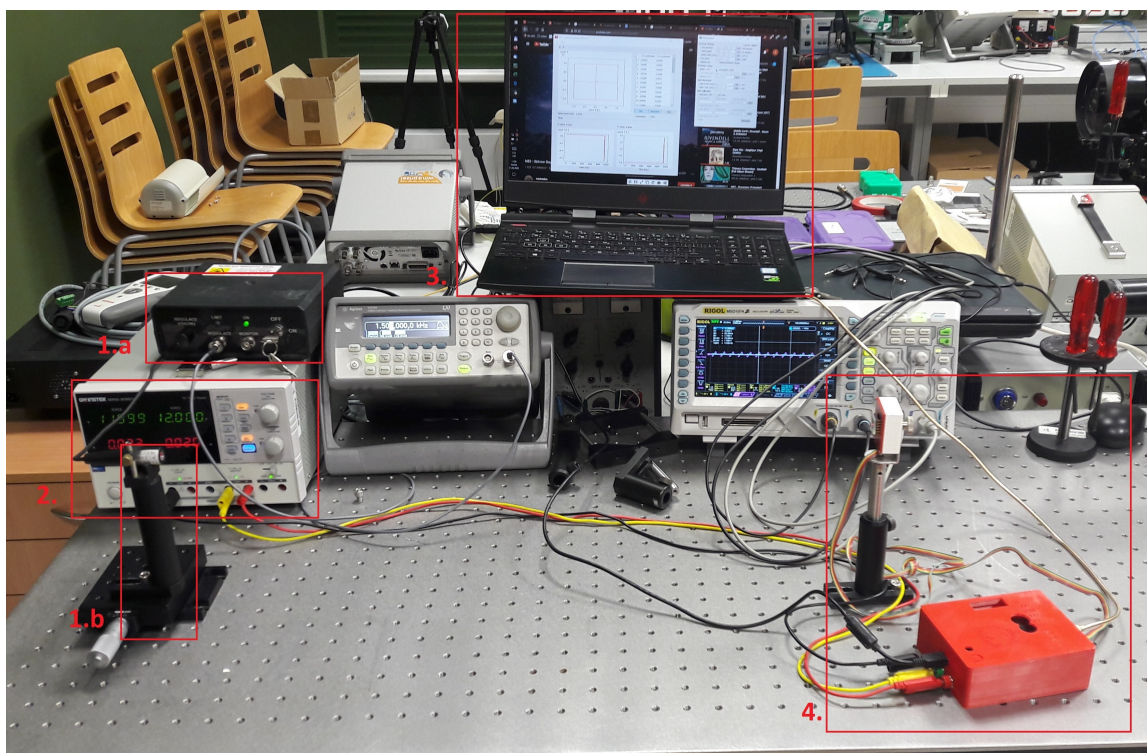
2.6 Výsledky

Poslední kapitola “Výsledky” je věnována vlastnostem navrženého přístroje. Jsou zde probrány parametry přístroje jako dynamický rozsah, citlivost a měřicí rozsah. Některé parametry nejsou stanoveny konkrétními hodnotami, jelikož jsou ovlivněny proměnnými, jejichž hodnota je variabilní. Proto jsou u některých zmíněné pouze teoretické principy.

Návrh se setkal s řadou nedostatků a nepřesností. Ty jsou analyzovány v další části kapitoly. Ta řeší jejich příčiny a možné kompenzace. Na konci kapitoly jsou probrány možnosti užití vytvořeného přístroje PSD.

2.6.1 Testovací stanoviště

Na obrázku 2.31 je zobrazené měřicí stanoviště pro testování navrženého přístroje. Přípravek se testoval na zdroji laserového svazku o vlnové délce 633 nm. Zdroj napájení laseru je označen jako 1.a a zdroj laserového záření jako 1.b. Přípravek PSD (samotný měřicí přístroj) byl napájen ze symetrického zdroje napětí ± 12 V, na obrázku označený jako blok 2. Vykreslení dat potom probíhalo na notebooku (blok č. 3) ve vytvořeném programu, který zpracovával sériová data z modulu číslo 4. Modul se skládá ze senzoru a krabičky, která se skládá z analogové desky a vývojové desky STM32F4 - Disco.



Obr. 2.31: Testovací stanoviště

2.6.2 Parametry přístroje

Jeden z nejdůležitějších parametrů přístroje je jeho dynamický rozsah. DR^{13} je z definice hodnota charakterizující rozsah maximální a minimální měřitelné hodnoty optického výkonu. Maximální hodnota výkonu je dána doporučenou hodnotou maximálního výkonu na senzor ($P_{opt. max}^{14} = 1 \text{ mW}$) a minimální hodnota výkonu je závislá na optickém výkonu prostředí. Právě optický výkon prostředí má na měřící přístroj největší vliv.

V následující části je popsán příklad postupu určení DR přístroje v laboratoři. Nejdříve byl orientačně změřen výkon okolí tak, aby mělo měřící čidlo stejnou orientaci jako senzor PSD. Optický výkon okolí činil okolo $0,01 \text{ mW}$. Poté byl výkon laseru nastaven na maximální hodnotu ($P_{opt. max}$). Postupně byl výkon snižován až na mezní hodnotu, kdy byl bod odchýlen o 10% (v relativním grafu 0.1 okolí bodu) z původní hodnoty souřadnice X,Y. $P_{opt. min}^{15}$ byla poté odečtena z přístroje pro měření optického výkonu jako tato mezní hodnota (10% - lze si představit kruh kolem původního bodu). Mezní hodnota vyšla 0.15 mW . Výsledný DR v logaritmické

¹³Dynamický rozsah

¹⁴Maximální optický výkon

¹⁵Minimální optický výkon

míře je tedy:

$$DR = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{opt. max}}}{P_{\text{opt. min}}} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{1 \text{ mW}}{0.15 \text{ mW}} \right) = 8.239 \text{ dB}. \quad (2.7)$$

V tomto případě neměl výkon okolí vliv na výsledný DR, ale lze předpokládat, že na vyšších hodnotách optického výkonu prostředí dojde ke zvýšení $P_{\text{opt. min}}$ a tedy snížení DR.

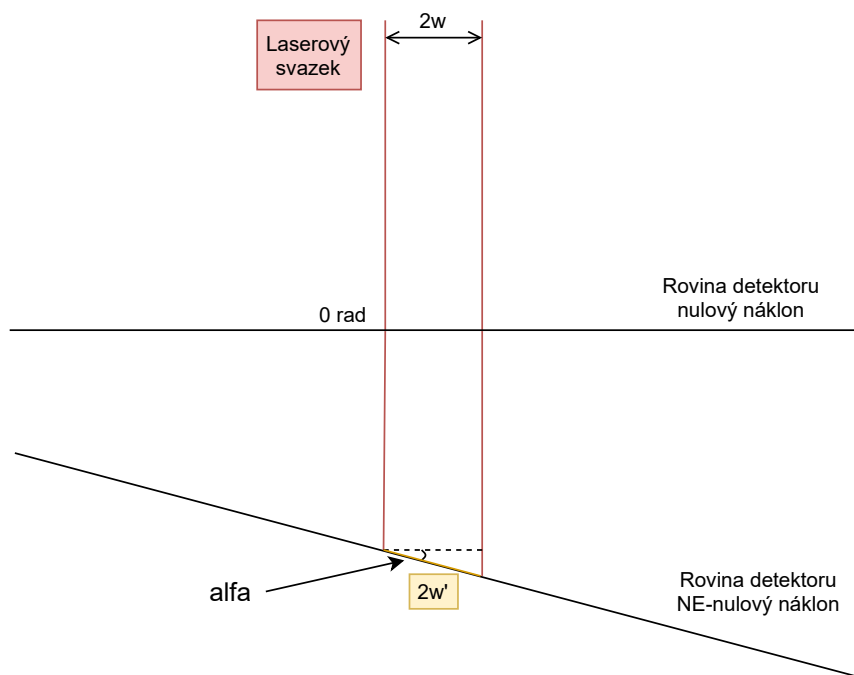
Dalšími důležitými parametry jsou citlivost a měřicí rozsah, které spolu úzce souvisí. V kapitole o segmentovaných PSD 1.3 byl již rozebrán vztah mezi citlivostí a měřicím rozsahem. Tento fakt platí i pro navržený přístroj. Měřicí rozsah lze jednoduše stanovit jako šířku svazku. Tu lze změřit například přes CCD kamerku, nebo jinými metodami. Určení citlivosti bude mnohem komplikovanější úkol. Citlivost je parametr, který je definován jako změna vstupní veličiny ku výstupní. Vstupní veličina je v tomto případě změna pozice svazku (mm) výstupní napětí z AD převodníků (X,Y, SUM). Složitosti výpočtu citlivosti přidává fakt, že se jedná o změnu optického výkonu v jednotlivých segmentech a tato změna je závislá na velikosti svazku. Dále je citlivost závislá na AD převodnících (rozlišení), mezivýpočtech v mikroprocesoru a v počítači (dochází k zaokrouhlování) atd. Určení citlivosti je tedy vhodné stanovit experimentálně s dostatečně jemným posuvným měřítkem a s aplikací na počítači. Z časových důvodů se nepodařilo určit citlivost přístroje.

2.6.3 Chyby a nepřesnosti

Ze zadání práce je stanovená limitní hodnota odchylky laserového svazku od roviny senzoru v řádech desetin miliradiánů. Otázkou je, jaká odchylka představuje náklon desetin miliradiánů. Velkým náklonem by docházelo k zkreslení zobrazení dopadajícího svazky v závislosti v jaké ose je rovina senzoru nakloněná. Následující obrázek znázorňuje tento stav. Alfa je úhel náklonu, $2w^{16}$ je šířka laserového svazku a $2w'^{17}$ je dopadající šířka svazku laseru na rovinu senzoru.

¹⁶Šířka svazku laseru

¹⁷Šířka svazku dopadající na senzor



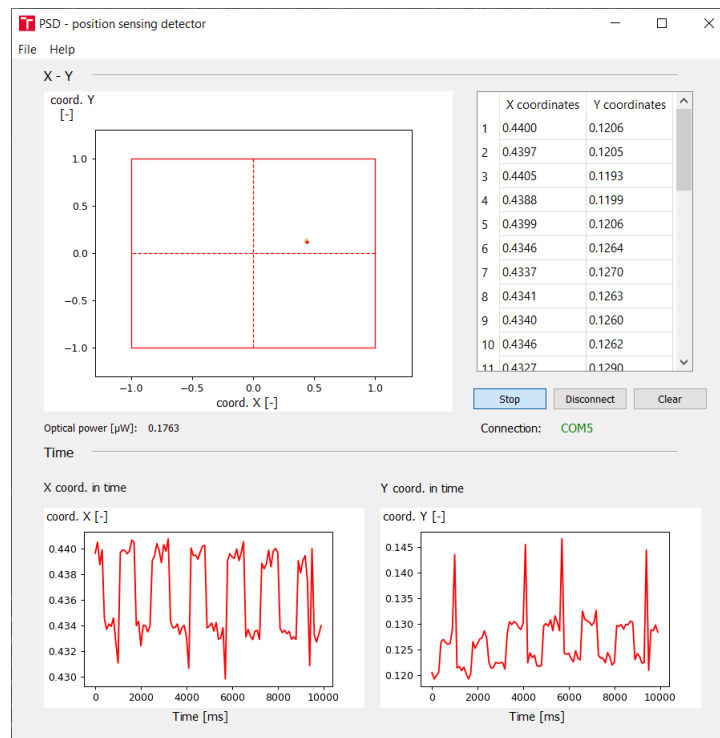
Obr. 2.32: Odchylka roviny svazku a roviny senzoru

Z obrázku (2.32) lze vyvodit výslednou dopadající šířku svazku $2w'$ následovně, za předpokladu nejhoršího případu - například $\alpha = 0,999 \text{ mrad}$ a šířky svazku 3 mm :

$$2w' = \frac{2w}{\cos(\alpha)} = \frac{3 \text{ mm}}{\cos(0,999 \text{ mrad})} = 3,000001497 \text{ mm}. \quad (2.8)$$

Výsledný rozdíl mezi $2w'$ a $2w$ je tak malý, že ho lze zanedbat.

Během testování zařízení se na výstupu objevil periodický signál. Tento signál je viditelný pouze tehdy, když je na vývojovou desku (STM32F4) připojeno externí napájení ze zdroje 12 V . Pokud je vývojová deska napájena z debuggeru (černý drát) nedochází k indukci signálu do analogové desky. Signál je zobrazen na obr.2.33

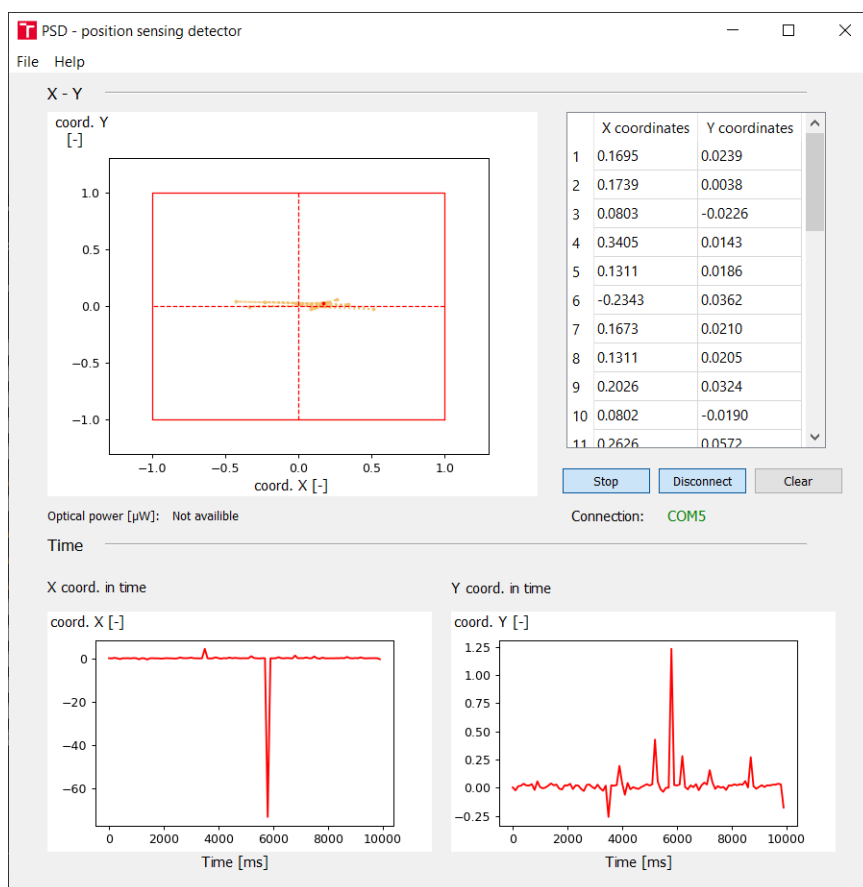


Obr. 2.33: Naindukovaný signál z vývojové desky

Indukovaný signál je viditelný v časových diagramech X a Y, ale je tak malý, že ho nelze pozorovat na grafu zobrazení X-Y. Signál je obdélníkového charakteru s periodou 2 s (frekvencí 0,5 Hz). Pravděpodobná příčina vzniku je v návrhu vývojové desky. Ta v sobě obsahuje obvod programátoru ST-link V2, jejíž součástí je indikační led dioda připojení napájení debuggeru. V momentě, kdy je obvod napájen externě je dioda spínána se stejnou frekvencí. Spínání diody nelze přerušit ve firmwaru a je nutné tuto chybu korigovat přímo na vývojové desce. Například odpájením odporů v cestě led diody (R4 na vývojové desce). Tím dojde k efektivnímu vypojení diod z obvodu.

Testováním se přišlo i na jiné závažné chyby, jejichž příčina není známá. Jednou takovou je nekorektní implementace módu korelace v systému. Výpočet módu spočíval v autokorelaci signálu přijatého a interně generovaného signálu. Jako výsledná hodnota se vzala hodnota vzorku korelace na konci periody (př.: perioda 100 vzorků - výsledná hodnota korelace na pozici 100), kde měla mít korelace buď svoje maximum nebo minimum (opačná fáze signálu- záporná korelace). Důvod je jasný, celý systém byl z počátku navržen na snímání RMS signálu. To znamená, že některé operace byly provedeny na analogové destičce, kvůli úspoře AD převodníků (levnější vývojová deska). Pro korelaci je tato realizace nevhodná, jelikož vlivem fázového zpoždění dochází ke zkreslení signálu a nepřesným výsledkům. Výsledek

korelace je zobrazen na následujícím obrázku. Zde je vykreslena korelace signálu s frekvencí 1500 Hz.

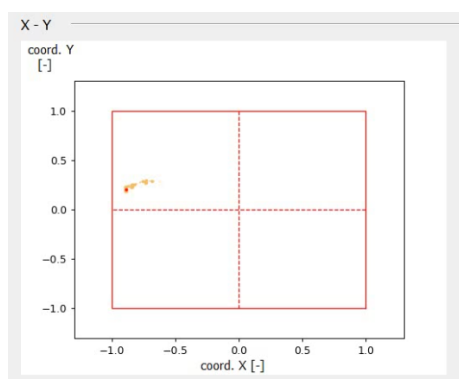


Obr. 2.34: Nefunkční mód korelace

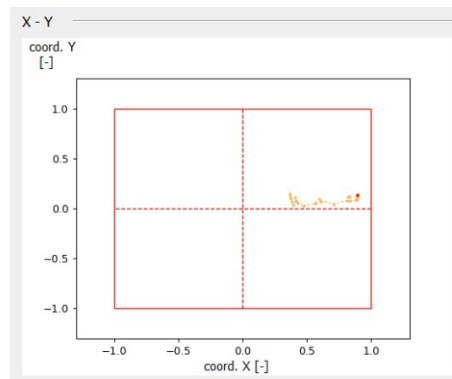
V grafu X-Y je znatelná nestálost výpočtu z průběhu žluté stopy. Korektní implementace korelace by šla provést pomocí čtyř AD převodníků. Na analogové desce by zůstaly pouze operace převodníků proudu na napětí s invertory a zbytek operací by byl proveden číslicově, buď uvnitř vývojové desky nebo v aplikaci na počítači, tak aby byl každý segment korelován zvlášť, ještě před samotným sčítáním a odčítáním signálů. Ve výstupních korelacích by byla aplikován algoritmus vyhledání maxima a teprve poté, by došlo ke sčítání, odčítání a určení hodnot X,Y a SUM 1.4.

Poslední vada přístroje je vada způsobená reálnými parazitními vlastnostmi užitých operačních zesilovačů. Tato vada se projevuje tak, že výsledné napětí SUM je o něco vyšší než napětí X a Y. Na analogové desce se parazitní vlastnosti operačních zesilovačů projevují nerovnoměrností na vstupu [27]. Příčina nerovnoměrnosti vstupu je vyvolána vstupní napětovou a proudovou nesymetrií (vstupní proudy \pm

do OZ^{18} jsou rozdílné) označované jako offset. Offsety ve větvích X,Y se odečtou (1.4), narozdíl od offsetů ve větvi SUM, ve které dochází ke kumulaci této chyby (větev SUM má za úkol sumaci napětí ze všech segmentů). Důsledek je takový, že hodnota napětí SUM je vždy vyšší než skutečná hodnota, a proto jsou relativní meze os vždy menší než 1 nebo -1 (obr. 2.35).



(a) Levá mez osy X



(b) Pravá mez osy X

Obr. 2.35: Vliv offsetu operačních zesilovačů

Kompenzace této chyby je možná například v softwaru aplikace, jednoduchým odečtením hodnoty tak, aby mezní hodnoty vycházeli rovné 1/-1.

¹⁸Operační zesilovač

Závěr

Tato diplomová práce se zabývá otázkou návrhu detekce pozice laserového svazku. Účelem práce je seznámení s problematikou a teoretickým návrhem detektoru.

V teoretické části jsou rozebrány různé typy senzorů a jejich rozdíly. Z těchto senzorů byl vybrán kvadrantní senzor, díky jeho dostupnosti. Vybraný senzor byl součástí starého nepoužívaného přípravku, který byl recyklován. Bohužel nebyla nalezena žádná dokumentace týkající se senzoru VBQ 036 A, a proto bylo nutné nejprve ověřit a otestovat jeho funkčnost. Byly změřeny odezvy jednotlivých segmentů na laser s vlnovou délkou 633 nm. Odezva všech segmentů byla lineární a na žádný defekt se nepřišlo.

Před samotným návrhem byly simulovány odezvy detektoru na laserový svazek ve skriptu v prostředí Matlab. Zde se ukázal podstatný vliv tvaru svazku na výstupní odezvu. Pro optimální detekci pozice je ideální kruhový svazek, jelikož ukazuje změnu v ose X a Y ve stejném poměru. Pro eliptický svazek s Gaussovským rozložením se ukázalo, že v ose s kratší poloosou je odezva na změnu větší, než-li v ose s delší poloosou. Docházelo by k nerovnoměrné detekci pozice. Ukázalo se však, že lze výstupy souřadnic přepočítat, tak aby stejný posuv generoval stejnou změnu napětí. V simulacích se dále testoval vliv velikosti svazku na odezvu. Zde byla potvrzena domněnka, že s menší pološířkou svazku je detektor citlivější na menší pohyby (malý pohyb \rightarrow velká odezva), ale snižuje se jeho pracovní oblast (lineární část). Naopak se širší pološířkou dochází ke snížení citlivosti, ale zvýšení rozsahu dovoleného pohybu.

Na základě odsimulovaných a naměřených dat senzoru, byl navržen detektor. Ten se skládá ze senzoru, VBQ 036 A, krabičky a programu. Součástí krabičky je deska pro analogové zpracování signálů a vývojová deska, která signály převádí do číslicové podoby. Data v číslicové podobě jsou poté zobrazena uživateli na PC v grafickém rozhraní navrženém v jazyce Python.

Závěr praktické části se zabývá defekty a chybami v návrhu a její korekcí. Nejzávažnější byla chyba vadného módu korelace, jejíž korekce nebyla upřesněna. Z časových důvodů byl přípravek otestován pouze hrubě a je třeba hlubšího proměření. Například odezvu přístroje na lasery o různé vlnové délce nebo odezvu na prostředí s různým optickým výkonem a jiné testy.

Výsledný přístroj je schopen měřit pozici laserového svazku pomocí RMS. Umí také orientační měření optického výkonu. Přístroj je natolik citlivý, že je schopen zaznamenat vibraci kroků. Hodí se na přesné centrování a zarovnání objektů.

Literatura

- [1] First Sensor AG: *First Sensor's position sensitive detectors* [online]. A First Sensor Product Announcement - June 25, 2012. Dostupné z URL: [<https://www.first-sensor.com/en/company/press/corporate-press/>](https://www.first-sensor.com/en/company/press/corporate-press/).
- [2] Robert F. Pierret; *Semiconductor device fundamentals*. Addison-Wesley publishing company 1996, ISBN 0-201-54393-1.
- [3] Dark current (physics) - Wikipedia. [online]. Dostupné z URL: [<https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_current_\(physics\)>](https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_current_(physics)).
- [4] Photodiode - Wikipedia. [online]. Dostupné z URL: [<https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>](https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode).
- [5] Lateral-Effect Photodiode - Northwestern Mechatronics Wik. [online]. Dostupné z URL: [<http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Lateral-Effect_Photodiode>](http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Lateral-Effect_Photodiode).
- [6] OSIOptoelectronics - application notes. [online]. Dostupné z URL: [<www.osioptoelectronics.com%2Fapplication-notes%2FAN-Position-Sensing-Photodiodes\(PSDs\).pdf&usg=AOvVawOuYQZujhh-YRePiG-UpH8C>](http://www.osioptoelectronics.com%2Fapplication-notes%2FAN-Position-Sensing-Photodiodes(PSDs).pdf&usg=AOvVawOuYQZujhh-YRePiG-UpH8C).
- [7] Duo Lateral PSDs | Position Sensing Detectors | Silicon Photodiodes | OSI Optoelectronics. OSI Optoelectronics [online]. Copyright © 2013 All Rights Reserved [cit. 05.11.2019]. Dostupné z URL: [<http://www.osioptoelectronics.com/standard-products/silicon-photodiodes/position-sensing-detectors/duo-lateral-psds.aspx>](http://www.osioptoelectronics.com/standard-products/silicon-photodiodes/position-sensing-detectors/duo-lateral-psds.aspx).
- [8] Tetra Lateral PSDs | Position Sensing Detectors | Silicon Photodiodes | OSI Optoelectronics. OSI Optoelectronics [online]. Copyright © 2013 All Rights Reserved [cit. 05.11.2019] Dostupné z URL: [<http://www.osioptoelectronics.com/standard-products/silicon-photodiodes/position-sensing-detectors/tetra-lateral-psds.aspx>](http://www.osioptoelectronics.com/standard-products/silicon-photodiodes/position-sensing-detectors/tetra-lateral-psds.aspx).
- [9] Bi-Cell & Quadrant Photodiodes | Optoelectronic Components | LEDs, Laser Diodes & Detectors | AP Technologies UK. UK distributor of LEDs, Laser

- Diodes, Detectors & Liquid Crystal optics [online]. Copyright © 2019 AP Technologies Ltd [cit. 05.11.2019]. Dostupné z URL:
<<https://www.aptechnologies.co.uk/support/SiPDS/bicell-quad>>.
- [10] R+D Project: Universal Solution for Position Sensitive Detectors - Integrated Circuits Málaga, S.L., 2017. [online]. Dostupné z URL:
<https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwia7tSt_NPlAhVRBGMBHdLjBm4QjB16BAgBEAM&url=http%3A%2F%2Fwww.ic-malaga.com%2Fservicios_files%2Fpress_release.pdf&psig=A0vVaw2gq2L9YT04Y9RmxN4eb778&ust=1573074238929240>.
- [11] Photodiode Characteristics and Applications | Application Notes | OSI Optoelectronics. OSI Optoelectronics [online]. Copyright © 2013 All Rights Reserved [cit. 10. 11. 2019]. Dostupné z URL:
<<http://www.osioptoelectronics.com/technology-corner/application-notes.aspx>>.
- [12] Wei - Chih Wang, *Optical detectors*[cit. 10. 11. 2019].. Dostupné z URL:
<<http://depts.washington.edu/mictech/optics/sensors/detector.pdf>>.
- [13] WILFERT, O. *Kvantová a laserová elektronika* , Urel VUT v Brně, 2012. [cit. 24. 11. 2019]. ISBN 978-80-214-4493-5.
- [14] VIRTO, A.L., A. CALDERUN. *Study of CMOS image sensors for laser beam position detection*. In: Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37510) [online]. IEEE, 2004, s. 792-795 [cit. 24. 11. 2019].. DOI: 10.1109/IMTC.2004.1351165. ISBN 0-7803-8248-X
- [15] Position Sensing Detectors. Thorlabs, Inc. - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control [online]. Dostupné z URL:
<https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4400>.
- [16] Python – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <<https://cs.wikipedia.org/wiki/Python>> [cit. 9. 12. 2019].
- [17] pySerial — pySerial 3.0 documentation. PyPI Package and Documentation Storage [online]. Dostupné z: <<https://pythonhosted.org/pyserial/pyserial.html#overview>> [cit. 9. 12. 2019].

- [18] Measuring Method for Photo Detector Characteristics [online]. Copyright © Stanley Electric Co.,Ltd 2019. Dostupné z: <https://www.stanley-components.com/data/technical_note/TN015_e.pdf> [cit. 11. 12. 2019].
- [19] An Improved Method for the Position Detection of a Quadrant Detector for Free Space Optical Communication. National Center for Biotechnology Information [online]. Dostupné z: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6338972/>> [cit. 29. 4. 2020].
- [20] CMSIS DSP Software Library. Keil Embedded Development Tools for Arm, Cortex-M, Cortex-R4, 8051, C166, and 251 processor families. [online]. Dostupné z: <<http://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/index.html>> [cit. 1. 5. 2020]
- [21] Nyquist–Shannon sampling theorem - Wikipedia. [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon_sampling_theorem> [cit. 1. 5. 2020]
- [22] CMSIS – Arm Developer. Home – Arm Developer [online]. Dostupné z: <<https://developer.arm.com/tools-and-software/embedded/cmsis>> [cit. 2. 5. 2020]
- [23] Welcome to Python.org. Welcome to Python.org [online]. Dostupné z: <<https://www.python.org/Copyright>> ©2001 [cit. 08.05.2020]
- [24] Python GUI test drive: wxPython vs. PyQt | Opensource.com. Opensource.com | Opensource.com [online]. Dostupné z: <<https://opensource.com/article/17/4/pyqt-versus-wxpython>> Copyright ©2019 Red Hat, Inc. [cit. 09.05.2020]
- [25] Welcome to pySerial’s documentation — pySerial 3.0 documentation. PyPI Package and Documentation Storage [online]. Dostupné z: <<https://pythonhosted.org/pyserial/>> Copyright © Copyright 2001 [cit. 09.05.2020].
- [26] Matplotlib: A 2D Graphics Environment - IEEE Journals & Magazine. 301 Moved Permanently [online]. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4160265>> Copyright © Copyright 2020 IEEE [cit. 09.05.2020].
- [27] Vlastnosti operačních zesilovačů [online]. Dostupné z: <<http://www.samoweb.wz.cz/elektronika/opzes1/opzes1.htm>> [cit. 21.05.2020].

Seznam symbolů, veličin a zkratk

PSD	Position sensing detector - detektor pozice (v této práci je myšlený samotný detektor)
I_D	Proud generovaný teplem - dark current
I_c	Celkový proud fotodiodou
I_L	Proud generovaný dopadem světla
E_{ph}	Energie fotonu - photon energy
E_G	Energie zakázaného pásma - band gap energy
V_0	Reverzní napětí fotodiody
V_{bi}	Úbytek napětí fotodiody
ε_0	Permitivita vakua
ε_{Si}	Permitivita křemíku
μ	Pohyblivost elektronů
ρ	Rezistivita křemíku
L_X	Rozměr X osy aktivní oblasti senzoru
L_Y	Rozměr Y osy aktivní oblasti senzoru
I_0	Intenzita ve středu svazku - maximální
w	Pološířka svazku v dané rovině
w_x	Hlavní polosa elipsy
w_y	Vedlejší polosa elipsy
CCD	Charge-coupled device
CID	Charge-injection device
R_F	Zpětnovazební odpor první převodního bloku
U_{limit}	Zvolený maximální rozsah
I_{MAX}	Maximální proud z kvadrurního detektoru

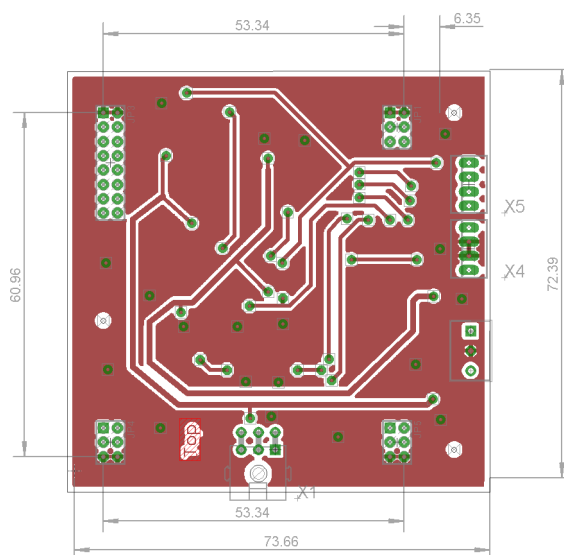
I_{bias}	Reálný proud tekoucí do vstupů zesilovače
U_{SUM}	Součet napětí všech kvadrantů
FPGA	Programovatelná hradlová pole - anglicky Field Programmable Gate Array
ASIC	Zákaznický integrovaný obvod - anglicky Application Specific Integrated Circuit
VCP	Virtuální COM port - anglicky Virtual COM port
RMS	Efektivní hodnota - anglicky Root mean square
f_{vz}	Vzorkovací frekvence - AD převodníků (1,4 MHz)
CMSIS	Cortex Microcontroller Software Interface Standard
DSP	Zpracování číslicových signálů - anglicky Digital signal processing
GUI	Grafické uživatelské rozhraní - anglicky Graphic User Interface
DR	Dynamický rozsah
P_{opt. max}	Maximální optický výkon
P_{opt. min}	Minimální optický výkon
2w'	Šířka svazku dopadající na senzor
2w	Šířka svazku laseru
OZ	Operační zesilovač

Seznam příloh

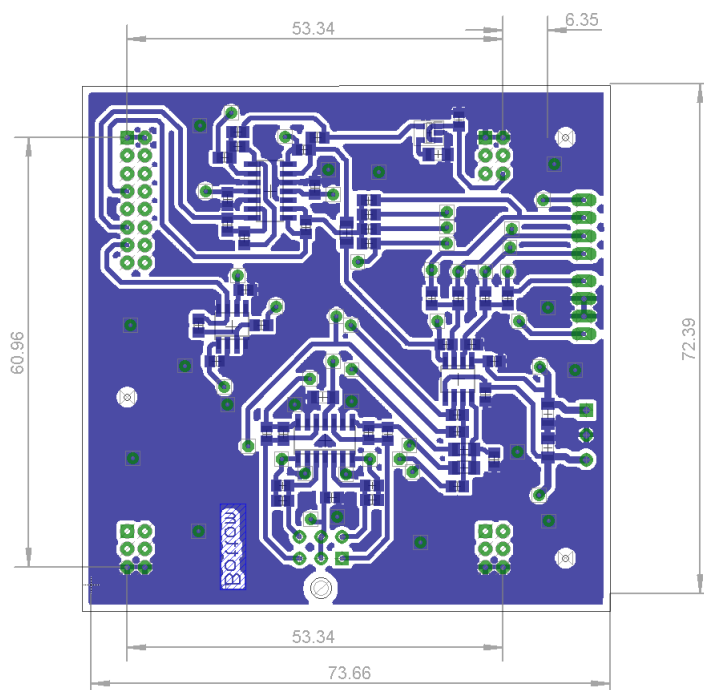
A	Externí deska	63
A.1	Schéma a layout	63
A.2	BOM	64

A Externí deska

A.1 Schéma a layout



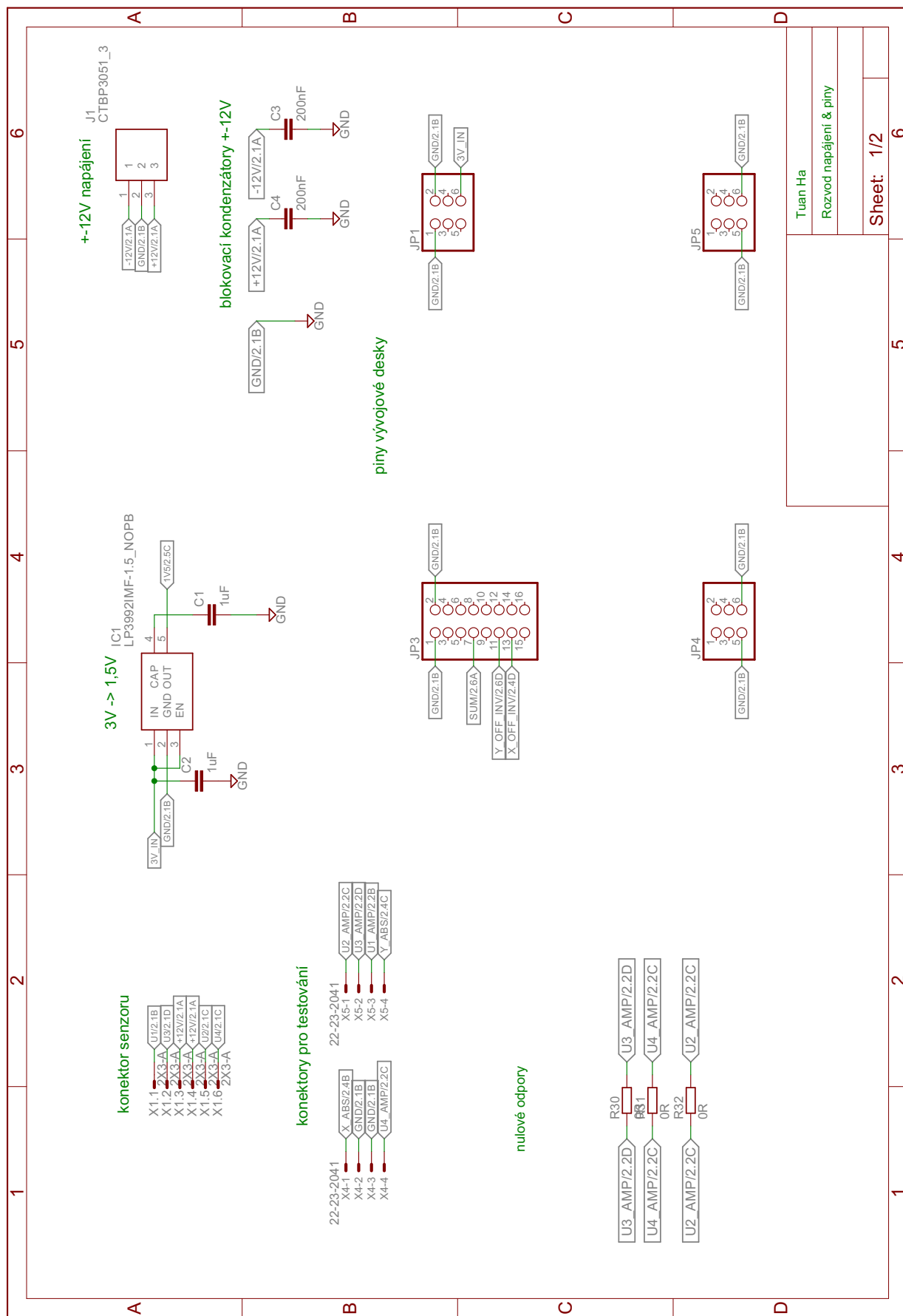
Obr. A.1: Layout vrstvy TOP



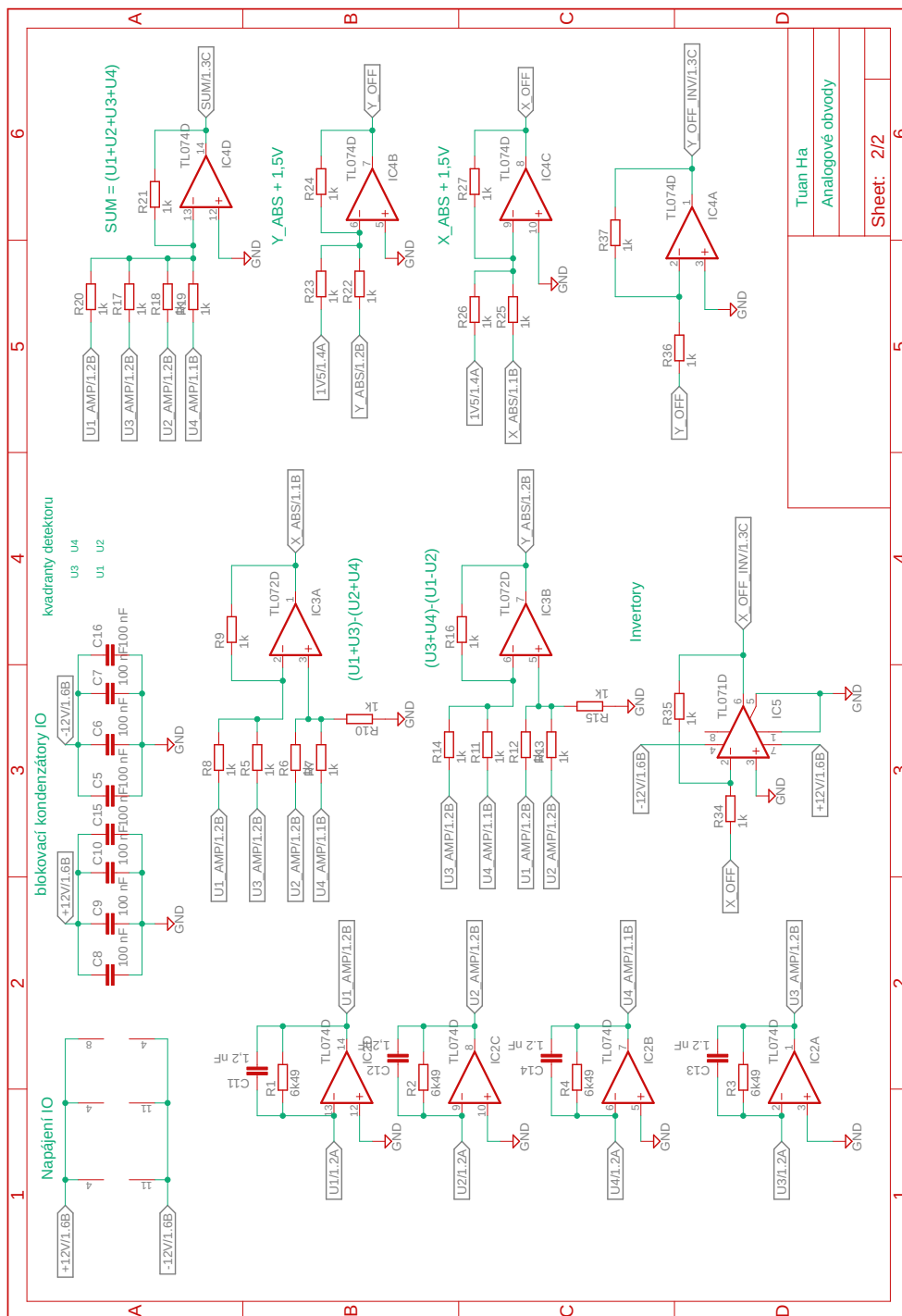
Obr. A.2: Layout vrstvy Bottom

A.2 BOM

Název/URL	Hodnota	Pouzdro	Součástka	Počet	Cena za jednotku bez DPH [Kč]
PINH-2X3		2X03	JP1, JP4, JP5	3	5,448
PINH-2X8		2X08	JP3	1	9,635
R-EU_M1206	0R	M1206	R30, R31, R32	3	1,459
C-EUC0805	100 nF	C0805	C6, C7, C8, C9, C10, C15, C16	7	1,275
C-EUC1206	100 nF	C1206	C5	1	2,802
R-EU_R0805	1k	R0805	R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R26, R27, R34, R35, R36, R37	24	1,385
R-EU_R1206	1k	R1206	R12, R13, R25	3	2,381
C-EUC0805	1uF	C0805	C2	1	8,512
C-EUC1206	1uF	C1206	C1	1	6,967
C-EUC0805	1uF	C0805	C11, C12, C13, C14	4	8,512
C-EUC1206	200nF	C1206	C3, C4	2	1,639
22-23-20414pin header	22-23-2041	22-23-2041	X4, X5	2	6,60
2X3-A- micro mate	2X3-A	3-794618-6	X1	1	30,38
R-EU_R0805	6k34	R0805	R1, R2, R3, R4	4	0,183
CTBP3051_3 svorkovnice	CTBP3051_3	HDRV3W90P0X350 _1X3_1050X700X85	J1 - svorkovnice napájení	1	13,305
LP3992IMF-1.5 reference	LP3992IMF-1.5	SOT95P280X145-5N	IC1	1	22,078
TL071D OZ	TL071D	SO08	IC5	1	8,407
TL072D OZ	TL072D	SO08	IC3	1	13,252
TL074D OZ	TL074D	SO14	IC2, IC4	2	12,702



Obr. A.3: Schéma části napájení a rozvodu některých pinů



Obr. A.4: Schéma - úprava signálů