

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
Katedra měření



Pokročilé zpracování termovizního obrazu pomocí FPGA

květen 2018

Diplomant: Jakub Jirsa
Vedoucí práce: Ing. Jan Kovář

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne _____

podpis

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jirsa** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **406079**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Senzory a přístrojová technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Pokročilé zpracování termovizního obrazu pomocí FPGA

Název diplomové práce anglicky:

Advanced Thermal Image Processing with FPGA

Pokyny pro vypracování:

1. Připravte přehled problematiky termovizních systémů, seznámte se s bolometrickými senzory a prostudujte vliv prostředí technologických postupů výroby na nechlazené bolometrické senzory.
2. Seznámte se s architekturou FPGA Cyclone V, procesorem i.MX6 a vývojovou deskou ARMADEUS APF6_SP.
3. Seznámte se s přenosem 14bitového paralelního videa z mikrobolometrického senzoru TAU2 do FPGA a realizujte ukládání tohoto obrazu do videobufferu i.MX6 procesoru.
4. Seznámte se s blokovou kamerou TAMRON MP1010M-VC a přenosem obrazu do FPGA.
5. Realizujte a otestujte v FPGA algoritmus použitelný v reálném čase pro:
 - a) vykreslení a detekci hran ve viditelném obraze;
 - b) zvýšení ostrosti termovizního kanálu;
 - c) snížení šumu termovizního obrazu pomocí filtrace v čase;
 - d) zvýšení rozlišení (super-resolution) během digitálního zoomu v obraze a proveďte jeho porovnání s algoritmy postavenými na Unsharp masking sharpening, Subpixel reconstruction a Deep bilateral Learning metodě;
 - e) obrazovou fúzí, která kombinuje termovizní a viditelný obraz, a proveďte návrh transformace obou obrazů na sebe. Vyřešte paralaxu obou optických systémů z hlediska správného křekrytí a ostření na definovanou vzdálenost. Zobrazte fúzi obrazu v režimech Picture-in-Picture (PiP), Blending a Thermal Visible Sharpening (TVS);
 - f) zobrazení a porovnání aplikace 8, 14 a 16 bitové RGB palety na termovizní kanál;
 - g) zobrazení termovizního kanálu v lineárním a nelineárním škálování.
6. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhňte další postup.

Seznam doporučené literatury:

- [1] DANIELS, Arnold: Field guide to infrared systems, detectors, and FPAs. 2nd ed. Bellingham , Wash.: SPIE Press, c2010; ISBN 978-0-8194-8080-4.
- [2] Intel FPGA, dokumentace a referenční manuál k IP core (<https://www.altera.com/documentation/lit-index.html>)
- [3] CHAPLE, Girish a DARUWALA, R. D.: Design of Sobel operator based image edge detection algorithm on FPGA. In: 2014 International Conference on Communication and Signal Processing [online]. IEEE, 2014, s. 788-792 [cit. 2017-10-02]. DOI: 10.1109/ICCSP.2014.6949951. ISBN 978-1-4799-3358-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6949951>
- [4] BAILEY, Donald G.: Design for embedded image processing on FPGAs. Singapore: John Wiley & Sons (Asia), 2011; ISBN 978-0-470-82849-6.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

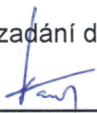
Ing. Jan Kovář, Workswell s.r.o., Libocká 653/51b, 16100 Praha 6

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **09.10.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **28.02.2019**


_____ Podpis vedoucí(ho) práce

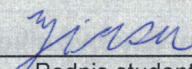
_____ Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

_____ Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

31.10/2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotace

Cílem této práce je seznámit se termografickými systémy a realizovat funkční firmware pro FPGA Cyclone V GX, které bude zpracovávat obraz z termografické kamery Tau2 a kamery Tamron.

V první části této práce se čtenář seznámí s termografickými systémy a principy detekce infračerveného záření. Jsou zde podrobně rozebrány jednotlivé typy detektorů spolu s principy detekce infračerveného záření. Ve druhé části této práce se čtenář obeznámí s hardwarovým vybavením, které bylo použito pro tuto práci. Následně je podrobně rozebrán firmware pro zpracování obrazu.

Klíčová slova

Termografie, detektory infračerveného záření, termografické systémy, zpracování obrazu v FPGA

Summary

The aims of this work are to introduce thermography systems and to design a functional firmware for FPGA series Cyclone V GX, which will process termograms from Tau2 and images from Tamron camera.

In the first part of this work, the reader will become familiar with thermographic systems and principles of infrared detection. Types of detectors are analyzed in detail along with the detection principles of infrared radiation. In the second part of this work the reader will become familiar with hardware equipment used in this work. Subsequently, the algorithms for image processing are described in detail.

Index Terms

Thermography, infrared thermal detectors, thermographic systems, thermal Image processing with FPGA

Poděkování

Děkuji především vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Kovářovi, který mi byl po celou dobu oporou a v případě nesnází mi pomohl. Také bych chtěl poděkovat mým rodičům, kteří mě po celou dobu mého studia podporovali.

Obsah

| | |
|---|-------------|
| Seznam obrázků | xi |
| Seznam tabulek | xiii |
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Termografie | 3 |
| 2.1 Infračervené záření | 3 |
| 2.2 Radiometrie | 4 |
| 2.3 Záření černého tělesa | 5 |
| 2.4 Rovnice termografie | 6 |
| 3 Detektory IR záření | 9 |
| 3.1 Vlastnosti detektorů IR záření | 10 |
| 3.1.1 Citlivost | 11 |
| 3.1.2 Šumový ekvivalentní výkon | 13 |
| 3.1.3 Detektivita a normalizovaná detektivita | 13 |
| 3.1.4 Teplotní diference ekvivalentní šumu | 13 |
| 3.2 Fotonové senzory | 15 |
| 3.2.1 Extrinsické detektory | 16 |
| 3.2.2 Intrinsické detektory | 16 |
| 3.2.3 Fotoemisní detektory | 16 |
| 3.2.4 Kvantové detektory | 16 |
| 3.3 Tepelné senzory | 18 |
| 3.3.1 Pyroelektrické detektory | 18 |
| 3.3.2 Termoelektrické detektory | 20 |
| 3.3.3 Bolometrické detektory | 21 |
| 4 Korekce a kalibrace senzoru | 25 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5 | Termografické systémy | 29 |
| 5.1 | SWIR kamerové systémy | 29 |
| 5.2 | MWIR a LWIR kamerové systémy | 30 |
| 6 | Hardwarová a softwarová konfigurace | 31 |
| 6.1 | Kamera Tamron | 31 |
| 6.2 | Termografická kamera Tau2 | 33 |
| 6.3 | Procesorový modul APF6_SP | 34 |
| 6.4 | Vývojové prostředí | 35 |
| 6.5 | Altera IP core | 36 |
| 6.6 | Vývoj firmwaru pro FPGA | 36 |
| 7 | Firmware FPGA | 37 |
| 7.1 | Průměrování obrazu | 38 |
| 7.2 | Tau2 modul | 40 |
| 7.3 | Zápis do RAM | 44 |
| 7.4 | Přímý zápis do RAM I.MX6 | 45 |
| 7.5 | Tamron modul | 48 |
| 7.6 | Konfigurace | 49 |
| 8 | Ostatní problémy | 51 |
| 8.1 | Detekce a hledání hran v obraze | 51 |
| 8.2 | Přiřazení pinů FPGA | 53 |
| 8.3 | Inicializace interních pamětí v FPGA | 53 |
| 8.4 | Super resolution | 54 |
| 8.5 | Konfigurace FPGA po PCIe | 57 |
| 8.6 | Vícebitové palety | 59 |
| 8.7 | Fúze obrazů | 60 |
| 8.8 | Návrh dalšího postupu | 62 |
| 9 | Závěr | 63 |
| A | Obrazová příloha | I |
| B | Obsah přiloženého CD | III |

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Planckův vyzařovací zákon a Wienův posunovací zákon | 5 |
| 2.2 | Spektrální závislost emisivity a intenzita vyzařování těles s různou emisivitou . . | 7 |
| 2.3 | Termografická rovnice | 8 |
| 3.1 | Detektivita různých detektorů v závislosti na vlnové délce | 10 |
| 3.2 | Frekvenční závislost citlivosti | 12 |
| 3.3 | Spektrální odezva tepelných a fotonových detektorů | 12 |
| 3.4 | Rozdělení fotonových detektorů | 15 |
| 3.5 | Energetický diagram QWIP | 17 |
| 3.6 | Diagram několika QWIP | 17 |
| 3.7 | Rozdělení fotonových detektorů | 19 |
| 3.8 | Zapojení firmou ULIS | 21 |
| 3.9 | Můstkové zapojení | 21 |
| 3.10 | Jednovrstvý mikrobolometr a jeho zapojení | 22 |
| 3.11 | Mikrobolometrické pole | 22 |
| 3.12 | Mikrobolometrický senzor | 22 |
| 3.13 | Zapojení matice bolometrů | 23 |
| 3.14 | Doba chlazení senzoru | 24 |
| 4.1 | Kalibrace jednotlivých pixelů | 25 |
| 4.2 | Kalibrační křivka pro LWIR a MWIR kameru | 27 |
| 6.1 | Kamera Tamron mp1010m-vc | 31 |
| 6.2 | Termografická kamera Tau2 | 33 |
| 6.3 | Systém na modulu APF6_SP | 34 |
| 7.1 | Schéma celého systému | 37 |
| 7.2 | Schéma průměrovacího modulu | 38 |
| 7.3 | Schéma stavového automatu průměrovacího modulu | 39 |
| 7.4 | Ukázka průměrování po sobě jdoucích snímků | 39 |

| | | |
|------|---|----|
| 7.5 | Testovací obrazec Tau2 | 40 |
| 7.6 | Šedotónový obraz z kamery Tau2 | 41 |
| 7.7 | Obraz s aplikovanou paletou | 41 |
| 7.8 | Stavový automat odeslání histogramu | 42 |
| 7.9 | Zobrazení termogramu v nelineárním škálování | 42 |
| 7.10 | Porovnání obrázku před ekvalizací histogramu a po ekvalizaci histogramu | 43 |
| 7.11 | Nastavení DMA kontroléru v Qsysu | 45 |
| 7.12 | Překlad adres z FPGA do I.MX6 | 46 |
| 7.13 | Obrazový generátor Tamron | 48 |
| | | |
| 8.1 | Schéma modulu pro hledání hran | 52 |
| 8.2 | Obraz po průchodu hranovým detektorem | 52 |
| 8.3 | Princip aproximací nejbližší soused, bilineární aproximace a bikubická aproximace | 54 |
| 8.4 | Princip neuronových sítí | 55 |
| 8.5 | Princip metody SRCNN | 56 |
| 8.6 | Porovnání čtyř metod použitých pro SR | 57 |
| 8.7 | Porovnání 8 a 10 bitového indexování | 59 |
| 8.8 | Termogram obarvený paletou | 62 |
| 8.9 | Viditelný obraz | 62 |
| 8.10 | Metoda Picture in Picture | 62 |
| 8.11 | Metoda blending | 62 |
| | | |
| A.1 | Schéma zapojení všech modulů v QSys (a) | I |
| A.2 | Schéma zapojení všech modulů v QSys (b) | II |
| A.3 | Obrazová fúze kalibračních obrazců | II |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Dělení IR dle vlnové délky | 3 |
| 2.2 | Porovnání radiometrických a fotometrických veličin | 5 |
| 3.1 | Dělení detektorů IR záření | 9 |
| 3.2 | Vybrané parametry senzorů a kamer | 11 |
| 5.1 | Rozdělení termokamer na základě rozsahu detektoru | 29 |
| 6.1 | Parametry kamery Tamron | 32 |
| 6.2 | Parametry kamery Tau2 | 33 |
| 6.3 | Základní parametry I.MX6 a Cyclone V GX C4 | 35 |
| 7.1 | Velikost jednotlivých bufferů pro jádro s rozlišením 640x512px | 44 |

1. Úvod

Snahu rozšířit lidské vnímání je možné pomocí nejnovějších technologií. Jedním ze zařízení, které nám rozšiřuje naše vnímání, jsou i termografické kamery. Ty nám umožňují zachytit tepelné záření a při správném nastavení mohou získat informaci o teplotě měřeného objektu. V dnešní době, kdy je již technologie dobře zvládnuta, je snaha zlepšit parametry jejich obrazu softwarovou cestou.

V první části této práce je podrobně rozebrána termografie, termografické detektory a systémy. V první kapitole je rozebráno, jak infračervené záření vzniká a jakým způsobem se šíří prostorem. V další kapitole jsou probrány detektory IR záření, následuje krátká kapitola věnovaná termografickým systémům.

Ve druhé části jsou analyzovány hardwarové prvky, na kterých je realizováno zpracování termogramů. Dále jsou zde probrány algoritmy, které jsou použity pro zpracování termogramů.

2. Termografie

Termografie je vědní obor zabývající se bezkontaktním měřením a analýzou teplotních polí. Jeho základem jsou Planckův vyzařovací zákon a Kirchhoffův zákon. Další rozvoj termografie byl umožněn vědeckým pokrokem v oblastech nanotechnologie a mikroelektroniky, díky kterému je možné konstruovat velice malé, citlivé a přesné senzory s vysokým rozlišením. Pomocí těchto senzorů je pak možné získat snímky teplotního pole tzv. termogramy, na základě kterých lze určovat teplotu měřených objektů.

2.1 Infračervené záření

Infračervené záření (IR) je část elektromagnetického spektra s vlnovou délkou od 0,78 – 1000 μm [26]. Tato oblast vlnových délek se hojně využívá v mnoha vědeckých odvětvích. Používá se pro termografii, spektroskopii látek, kontrolní systémy, astronomii aj. IR záření se dále dělí, viz tabulka 2.1.

Tabulka 2.1: Dělení IR dle vlnové délky

| Oblast | Vlnová délka (μm) |
|------------------------------|--------------------------------|
| Blízké IR (NIR) | 0,78 - 1 |
| Krátkovlnné IR (SWIR) | 1-3 |
| Středně vlnné IR (MWIR) | 3-6 |
| Dlouhovlnné IR (LWIR) | 6-15 |
| Velmi dlouhovlnné IR (VLWIR) | 15-30 |
| Vzdálené IR (FIR) | 30-100 |
| Submilimetrové IR (SubMM) | 100-1000 |

Pro termografické systémy se používají senzory citlivé mezi 1-15 μm [35]. Záření lze popsat radiometrickými veličinami, které specifikují záření z hlediska přenesené energie.

2.2 Radiometrie

Elektromagnetické záření lze popsat mnoha parametry. Pro jeho popis se ujal dva systémy. Jeden je odvozen od vnímání lidského oka a nazývá se fotometrie, druhý je odvozen od energie záření a nazývá se radiometrie. Jelikož v termografii se používají radiometrické veličiny, je zde uveden popis jednotlivých radiometrických veličin [11, 21].

Základní veličinou je zářivý (světelný) tok (Φ), ten je definován jako

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} ; \quad [\Phi] = \text{W}, \quad (2.1)$$

kde Q je množství světelné energie, která dopadne na vnější stranu plochy S za časový interval dt . Lze si představit, že světelný tok vyjadřuje celkový „otisk“ světelné energie na vnější straně plochy S za časový interval dt [21].

Pro směrovou charakterizaci záření se používá další parametr zářivost (I), která udává závislost zářivého toku na prostorovém úhlu Ω . Lze ji vyjádřit jako

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} ; \quad [I] = \text{WSr}^{-1}. \quad (2.2)$$

Další důležitou veličinou charakterizující plošné zdroje záření je intenzita vyzařování (M), ta je definována jako zářivý tok vystupující z plochy zdroje

$$M = \frac{d\Phi}{dS} ; \quad [M] = \text{Wm}^{-2}. \quad (2.3)$$

Naproti tomu lze definovat intenzitu ozáření (E), jež je definována jako zářivý tok dopadající na ozářené těleso

$$E = \frac{d\Phi}{dS} ; \quad [E] = \text{Wm}^{-2}. \quad (2.4)$$

Poslední veličinou, kterou zde uvedeme, je záře (L), která je definována jako podíl zářivosti plošného elementu zdroje v daném směru a průmětu plošného elementu do roviny kolmé k danému směru. Matematicky lze zapsat jako

$$L = \frac{dI}{dS \cos\alpha} ; \quad [L] = \text{WSr}^{-1}\text{m}^{-2}. \quad (2.5)$$

Posledním parametrem je spektrální hustota obecné veličiny (X) (může se jednat o spektrální hustotu zářivého toku, spektrální hustotu intenzity vyzařování aj.)

$$X_\lambda = \frac{dX}{d\lambda}. \quad (2.6)$$

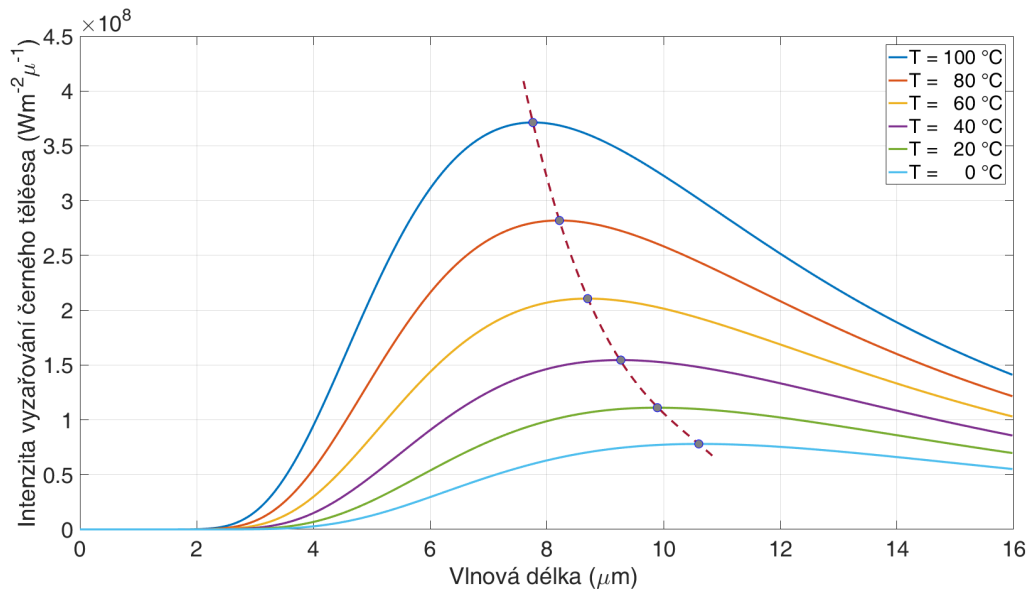
Pro úplnost je ještě uvedena tabulka porovnávající fotometrické a radiometrické veličiny.

Tabulka 2.2: Porovnání radiometrických a fotometrických veličin

| Symbol | Fotometrie | Jednotka | Radiometrie | Jednotka |
|--------|------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|
| Φ | světelný tok | lm | zářivý tok | W |
| I | svítivost | cd | zářivost | W Sr^{-1} |
| E | osvětlení | lx | ozáření | W m^{-2} |
| L | jas | cd m^{-2} | zář | $\text{W Sr}^{-1}\text{m}^{-2}$ |
| M | světlení | lm m^{-2} | intenzita vyzařování | Wm^{-2} |
| e | expozice | lx s | dávka | $\text{W m}^{-2}\text{s}$ |
| Q | světelná energie | lm s | zářivá energie | J |

2.3 Záření černého tělesa

Při teplotě vyšší než absolutní nula vyzařuje každé těleso energii v podobě elektromagnetického záření. Intenzita vyzařování závisí na teplotě tělesa a vlnové délce.



Obrázek 2.1: Planckův vyzařovací zákon a Wienův posunovací zákon

Černé těleso dokonale pohlcuje veškerou energii, která na těleso dopadá. Těleso se tedy při nízkých teplotách jeví jako černé. Spektrální intenzitu vyzařování absolutně černého tělesa lze

matematicky zapsat jako

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)}, \quad (2.7)$$

kde c je rychlost světla, h je Planckova konstanta, k je Boltzmanova konstanta, T je termodynamická teplota tělesa a λ je vlnová délka. Na obr. 2.1 je vidět průběh vyzařovací charakteristiky v závislosti na teplotě. Můžeme si všimnout, že maximum vyzařovací křivky se s rostoucí teplotou posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. To je popsáno Wienovým posunovacím zákonem

$$\lambda = \frac{b}{T}, \quad (2.8)$$

kde T je termodynamická teplota a b je Wienova konstanta. Kromě toho je z obr. 2.1 vidět, že celkový vyzářený výkon s teplotou roste. Celkový vyzářený výkon odpovídá ploše pod grafem. Integrací intenzity vyzařování podle vlnové délky získáme Stefan-Boltzmannův zákon, který dává do vztahu teplotu tělesa a výslednou intenzitu záření

$$M = \sigma T^4, \quad (2.9)$$

kde T je termodynamická teplota a σ Stefanova-Boltzmannova konstanta.

2.4 Rovnice termografie

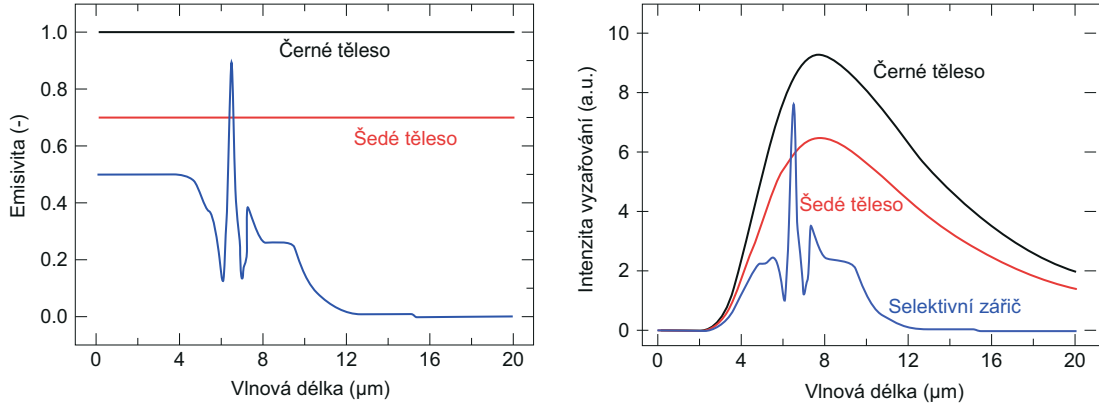
Pomocí rovnice termografie jsme schopni určit vyzářený výkon měřeného objektu a ze znalosti vyzářeného výkonu je již možné dopočítat teplotu. Je však nutné mít na paměti, že pro správné určení výkonu je nutné znát všechny parametry, které měření ovlivňují. Proto není v praxi vždy možné teplotu přesně určit.

Jeden z parametrů, který popisuje schopnost objektu vyzařovat, je emisivita. V mnoha případech je to klíčový parametr nezbytný ke správnému určení teploty. Je definována jako poměr vyzařování černého tělesa a reálné vyzařování materiálu. Jedná se o jednu z definic emisivity, je možné použít i jiné viz [35]. Emisivita je funkcí vlnové délky a teploty a lze ji zapsat jako

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{M_{BB}(\lambda, T)}, \quad (2.10)$$

kde M je intenzita vyzařování objektu a M_{BB} je vyzařovací intenzita černého tělesa. Jedná se o bezrozměrnou jednotku, která nabývá hodnot od 0 do 1. Dle různých hodnot emisivity lze objekty rozdělit do několika skupin [35]: Černá tělesa – takové zářiče, pro které platí $\epsilon \approx 1$,

šedá tělesa – taková tělesa pro které platí $\epsilon = \text{konst}$ (emisivita tedy nezávisí na vlnové délce) a selektivní zářiče – tělesa, jejichž emisivita je závislá na vlnové délce.



Obrázek 2.2: Spektrální závislost emisivity a intenzita vyzařování těles s různou emisivitou

Jestliže těleso dosáhne termodynamické rovnováhy se svým okolím, platí pro dopadající zářivý tok následující rovnice

$$\Phi_0 = \Phi_R + \Phi_T + \Phi_A, \quad (2.11)$$

kde Φ_0 je dopadající zářivý tok, Φ_A je absorbovaný zářivý tok, Φ_T je průchozí zářivý tok a Φ_R je odražený zářivý tok. Jestliže celou rovnici vydělíme Φ_0 , převede se rovnice do následujícího tvaru

$$1 = \alpha + \tau + \rho, \quad (2.12)$$

kde α je koeficient absorpance, τ je koeficient transmittance a ρ je reflektance. Pro neprůhledná tělesa čili tělesa, jejichž transmittance je rovna nule, platí následující vztah:

$$1 - \rho = \alpha. \quad (2.13)$$

Čím méně záření těleso absorbuje, tím méně záření emituje do svého okolí. Těleso se snaží být v termodynamické rovnováze se svým okolím. S tím je spojen Kirchhoffův zákon, který říká „Absorbance povrchu tělesa je identická s emisivitou povrchu”, tedy

$$\epsilon = \alpha. \quad (2.14)$$

Pro neprůhledný objekt tedy můžeme psát rovnici (2.15) v následujícím tvaru.

$$\Phi_{dop} = \epsilon \Phi_{abs} + (1 - \epsilon) \Phi_{odr}. \quad (2.15)$$

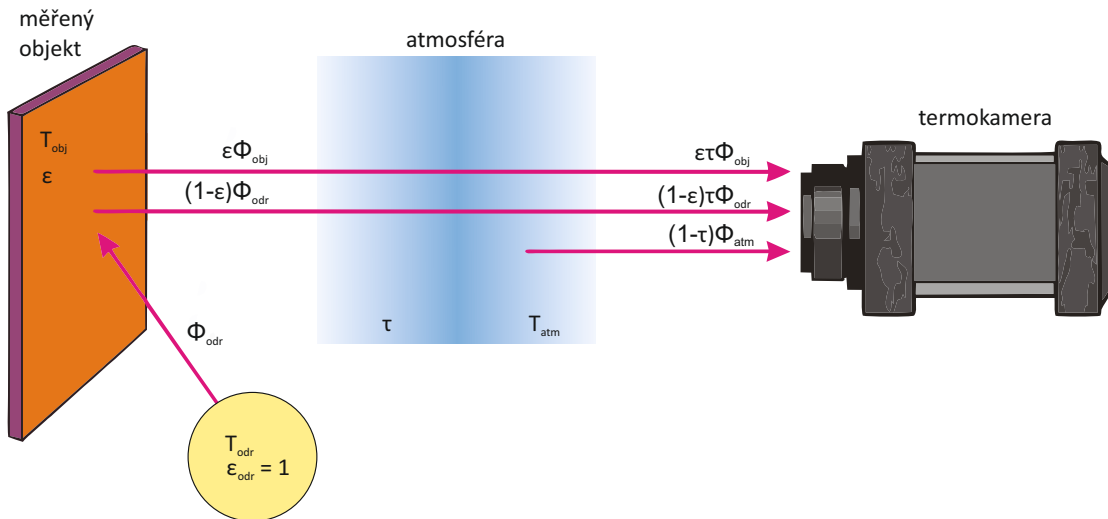
Pakliže těleso neodráží žádné záření, je možné rovnici (2.12) přepsat do tvaru

$$1 - \tau = \alpha. \quad (2.16)$$

Nyní již můžeme přepsat rovnici termografie v plném znění

$$\Phi_{senzor} = \epsilon \tau \Phi_{obj} + (1 - \epsilon) \tau \Phi_{odr} + (1 - \tau_{atm}) \Phi_{atm}, \quad (2.17)$$

kde Φ_{senzor} je zářivý tok dopadající na senzor, Φ_{obj} je zářivý tok vyzářený objektem po průchodu atmosférou, Φ_{odr} je zářivý tok odražený od měřeného tělesa a Φ_{atm} je zářivý tok atmosféry. Tato rovnice platí pouze za zjednodušených podmínek: atmosféra má nulovou reflektanci a těleso má nulovou transmitanci. Je jasné, že tato rovnice popisuje pouze ideální stav a nebere například v potaz teplotu objektivu ani jeho útlum atd.



Obrázek 2.3: Termografická rovnice [30]

3. Detektory IR záření

Detektory lze dělit na základě fyzikálních principů detekce IR záření. Dvě skupiny, které se používají v termografii, jsou tepelné a fotonové detektory, viz tabulka 3.1.

Tabulka 3.1: Dělení detektorů IR záření [24]

| | | |
|--|-----------------|---|
| Tepelné | Pyroelektrické | |
| | Bolometrické | |
| | Termoelektrické | |
| Fotonové (fotovodivostní a fotovoltaické) | Extrinsické | Si:In, Si:Ga, Ge:Cu |
| | Intrinsické | IV-VI (PbSe, PbSnTe), II-VI (HgCdTe), III-V (InSb, InAsSb, InTiSb) |
| | Kvantové | Kvantové jámy a Kvantové tečky |
| | Fotoemisivní | Schottky-barrier detektory |

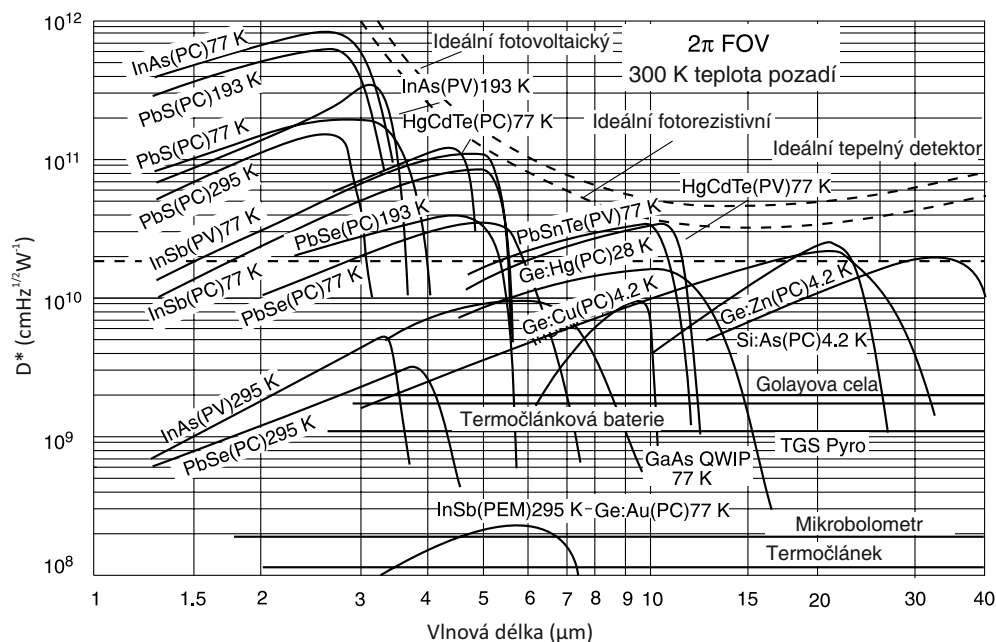
Tepelné detektory pracují na principu absorpce IR záření. Absorpce má za následek ohřátí materiálu a následnou změnu nějaké fyzikální vlastnosti materiálu, kterou je možno měřit (např. změna odporu bolometrických senzorů). Díky tomu, že k absorpci dochází v širokém spektrálním rozsahu, mají tepelné detektory nízkou spektrální závislost.

Fotonové detektory fungují na principu vnitřního fotoelektrického jevu. K fotoefektu dochází v případě, že je energie záření větší než výstupní práce w_0 . Výstupní práce w_0 je rovna energii, jež je potřebná k překonání potenciálové hráze daného materiálu. Je to tedy energie nutná pro uvolnění elektronu. Tento jev popisuje rovnice (3.1)

$$E = hf_0 + E_k \tag{3.1}$$

kde E představuje celkovou energii záření, hf_0 je rovno výstupní práci w_0 (h je Planckova konstanta a f_0 je mezní frekvence daného materiálu) a E_k je kinetická energie fotoelektronu (volného elektronu). Dopadající fotony jsou tak přímo převedeny na výstupní signál, proto detektory tohoto typu mají mnohem větší citlivost než tepelné detektory, viz obr. 3.1. Jejich nevýhoda je vysoká selektivita, která je dána vlastnostmi použitého materiálu. Kromě toho je

u většiny fotonových detektorů nutné externí chlazení, které má omezit generaci a rekombinaci párů elektron díra (šum) [26].



Obrázek 3.1: Detektivita různých detektorů v závislosti na vlnové délce [26]

3.1 Vlastnosti detektorů IR záření

Jako každý senzor mají i detektory IR záření charakteristické parametry, na jejichž základě je možné rozpoznat kvalitu senzoru. Je ale nutné mít na paměti, že každý výrobce provádí měření ve svých laboratořích v sobě určených podmínkách. Proto si nemusí dva parametry zcela odpovídat (např. dva různí výrobci mohou pro získání parametru použít různých metod, viz kapitola Teplotní diference ekvivalentní šumu). Pokud tedy chceme parametry porovnávat, měli bychom měření provádět v jedné laboratoři za stejných podmínek.

Jelikož parametrů vztahujících se k popisu detektorů a termokamer existuje mnoho, uvedeme zde základní parametry, viz tabulka 3.2. Důležité parametry pak rozebereme samostatně v jednotlivých kapitolách.

Tabulka 3.2: Vybrané parametry senzorů a kamer

| Parametr | Popis | Vztah |
|-------------------|--|-------------------|
| MRDT | Tento parametr se vztahuje jak k teplotní citlivosti, tak k rozlišitelnosti kamery. Je definován jako změna teploty černého tělesa, která odpovídá minimální změně záření způsobující rozlišitelnou změnu výstupního signálu (norma STANAG 4349 [20]). | Kamera |
| Spektrální rozsah | Rozsah vlnových délek, na které je senzor citlivý. | Senzor |
| Teplotní rozsah | Teplotní rozsah, ve kterém je kamera schopná měřit. | Kamera |
| Kvantová účinnost | Kvantová účinnost je definována jako poměr počtu uvolněných fotoelektronů k počtu fotonů záření dopadajících na senzor. Udává se v procentech. | Senzor - fotonový |
| Rozlišení | Počet senzorů v matici. Např. 160x128, 336x256, 640x512. | Senzor |
| Velikost pixelu | Velikost jednoho pixelu. Udává se v μm , např. $17\mu\text{m}$ u kamer Tau2. | Senzor |
| Přesnost | Určuje přesnost měření kamery, udává se v procentech z rozsahu. | Kamera |

3.1.1 Citlivost

Citlivost senzoru je definována jako poměr výstupního signálu v jednotkách RMS a dopadajícího záření jako

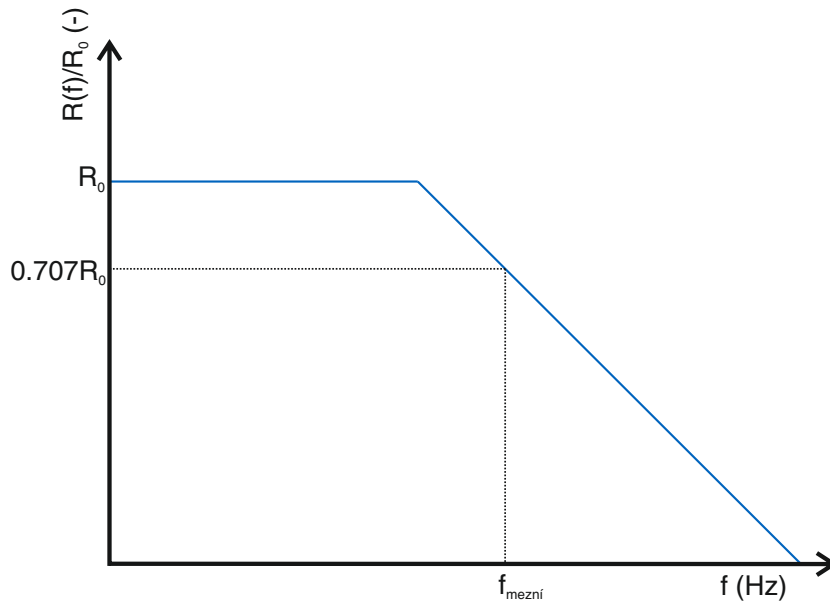
$$R = \frac{V_{out}}{\Phi_e} ; \quad [R] = W. \quad (3.2)$$

Citlivost detektoru závisí na frekvenci změn intenzity dopadajícího záření v čase. Se zvyšující se frekvencí citlivost klesá. Citlivost pro většinu typů senzorů je možné modelovat jako dolní propust prvního řádu. Je možné určit časovou konstantu τ jako čas, který je potřeba pro pokles výstupního signálu na 63%. Čím menší je časová konstanta, tím rychlejší časové změny signálu

jsme schopni detekovat – detektor je rychlejší. Modul citlivosti je možné zapsat jako [8]

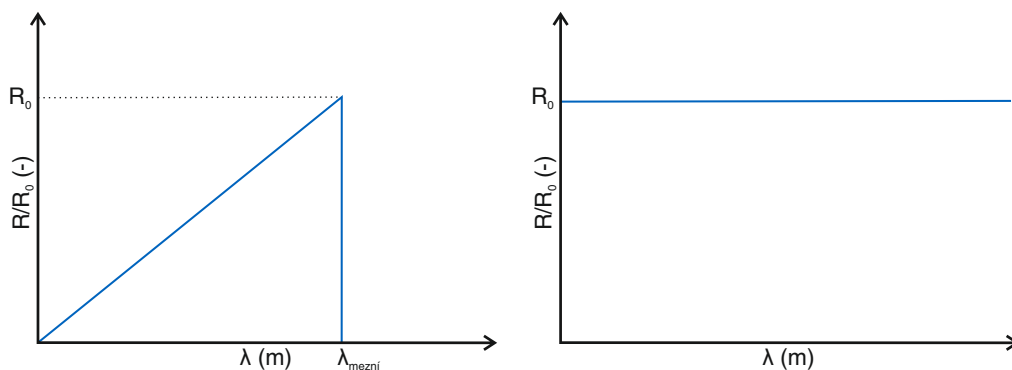
$$|R(f)| = \frac{R_0}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}} \quad (3.3)$$

Graf frekvenční závislosti můžeme vidět na obr. 3.2.



Obrázek 3.2: Frekvenční závislost citlivosti [8]

Další parametr, který je pro citlivost důležitý, je jeho spektrální závislost na vlnové délce dopadajícího záření. Pro tepelné a fotonové detektory můžeme vidět spektrální závislost na obr. 3.3.



Obrázek 3.3: Spektrální odezva tepelných a fotonových detektorů [8]

Citlivost je také ovlivněna konstrukcí detektorů a jejich vyhodnocovacími obvody.

3.1.2 Šumový ekvivalentní výkon

Šumový ekvivalentní výkon (NEP) je definován jako velikost výkonu dopadajícího záření, které zvýší úroveň signálu na úroveň šumu. Jinými slovy NEP odpovídá dopadajícímu záření, které vede na $SNR = 1$. Matematicky lze zapsat jako

$$NEP = \frac{V_s}{R} = \frac{V_s}{\frac{V_{out}}{\Phi_e}} = \frac{\Phi_e}{SNR} ; \quad [NEP] = W. \quad (3.4)$$

3.1.3 Detektivita a normalizovaná detektivita

Detektivita D je definována jako obrácená hodnota NEP

$$D = \frac{1}{NEP} ; \quad [NEP] = W^{-1}. \quad (3.5)$$

Z detektivity pak vychází normalizovaná detektivita D^* , která je definována takto

$$D^* = D\sqrt{Af} = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{NEP} ; \quad [D^*] = W^{-1} f^{1/2} m^{1/2}. \quad (3.6)$$

V normalizované detektivitě je již zahrnuta šířka přenášeného pásma, plocha senzoru, šum i citlivost. Jedná se tedy o důležitý parametr pro porovnání jednotlivých detektorů.

3.1.4 Teplotní diference ekvivalentní šumu

Teplotní diference ekvivalentní šumu (NETD) je v oblasti termografických systémů často používaný parametr. V materiálech je obvykle označován jako citlivost. Je definován jako minimální rozdíl teplot mezi dvěma černými tělesy, který zvýší úroveň signálu na úroveň šumu ($SNR=1$). Jeho význam je tedy velice podobný parametru NEP, na rozdíl od něj je ale přepočítán na jednotky Kelvin. NETD může být definován jak pro senzor, tak pro celý termografický systém, který zahrnuje i interakci záření s okolím a optickou soustavou. Matematicky lze zapsat NETD pro senzor následovně

$$NETD = V_s \frac{\Delta T}{\Delta V_{out}} = \frac{\Delta T}{SNR} ; \quad [NETD] = K. \quad (3.7)$$

Jelikož nás nezajímají idealizované podmínky, zavádí se $NETD$ pro celý systém takto [27]

$$NETD = \frac{4f_{\#}^2 \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{At_{op}M^*}}. \quad (3.8)$$

Parametr $f_{\#}$ je clonové číslo, které je definováno jako f/D , kde f je ohnisková vzdálenost a D je průměr otevřené clony objektivu. Parametr A je plocha detektoru, t_{op} je propustnost optiky a M^* je definován integrálem

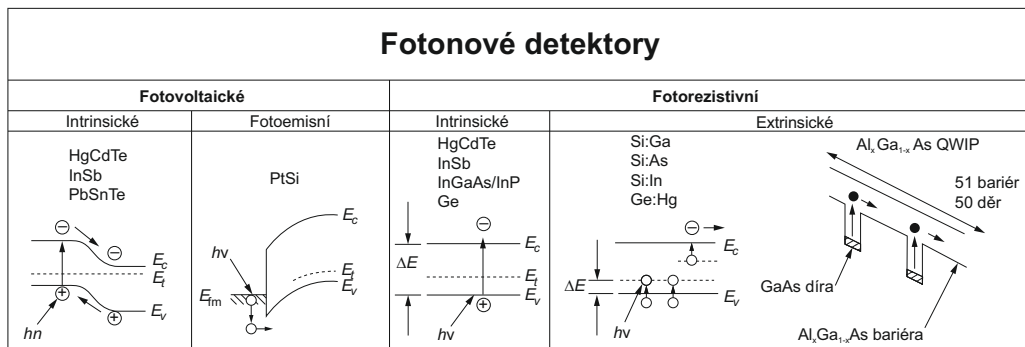
$$M^* = \int_0^{\infty} \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{\lambda} t_{at\lambda} D_{\lambda}^* d\lambda, \quad (3.9)$$

kde $t_{at\lambda}$ je propustnost atmosféry, D_{λ}^* je normalizovaná detektivita a $\left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{\lambda}$ je parametr udávající, jak moc se mění vyzařování objektu s teplotou.

Pro tepelné detektory má NETD nejčastěji hodnoty od 30 – 200mK a pro fotonové okolo 10mK. Jelikož je značně složité získat NETD výpočtem, existují metody, jak tento parametr získat měřením. V odkazech [12, 37] je možné nahlédnout, jakým způsobem NETD měří společnosti FLIR a Xenics. Z popisu je jasné, že obě firmy používají odlišnou metodiku a není tedy relevantní jejich parametry porovnávat (liší se v teplotách černých těles, počtu sejmutých snímků atd.).

3.2 Fotonové senzory

Fotonové detektory lze rozdělit na základě pracovního režimu na fotovoltaické a fotovodivostní. Dle použitého materiálu a technologie pro konstrukci se senzory dělí na intrinsické, extrinsické, kvantové a fotoemisní využívající vnitřní fotoelektrický jev. Zde je možné dodat, že literatura se v této problematice značně liší, např. v [35] autor uvádí dělení na fotovodivostní, fotovoltaické, fotoemisní a kvantové. V této práci budeme používat dělení dle [5] a [26].



Obrázek 3.4: Rozdělení fotonových detektorů [5]

Fotovodivostní detektory pracují na principu změny odporu vlivem dopadajícího záření. Foton je materiálem absorbován, čímž dojde k excitaci elektronu a následnému uvolnění částice nesoucí náboj - fotoelektronu. Pokud přiložíme k materiálu konstantní napětí, dojde vlivem fotoelektronů ke zvětšení protékajícího proudu, který můžeme detekovat.

Fotovoltaické detektory využívají pro detekci IR záření fotoefekt. Typický příklad takového materiálu dvouvrstvá polovodičů typu P a N, u které vzniká hráz mezi P-N přechodem. Po absorpci fotonu se generuje pár elektron-díra. Následně dojde vlivem elektrického pole, které je uvnitř materiálu, k akceleraci a unášení obou nosičů náboje na opačnou stranu. Takto vznikne napětí, které jsme schopni na detektoru měřit.

3.2.1 Extrinsické detektory

Extrinsické - nevlastní polovodiče jsou využity v senzorech fotovodivostních i fotovoltaických. Pro výrobu jsou používány dopované materiály na bázi křemíku (Si:X) a germánia (Ge:X). Častým materiálem pro výrobu fotovodivostních detektorů je křemík dopovaný o indium, arstat nebo galium [5]. Dnes se používají převážně pro vesmírné aplikace. Zřídka kdy je však můžeme najít v terestriálních aplikacích. Zde se používají intrinsické detektory na bázi HgCdTe nebo InSb [25].

3.2.2 Intrinsické detektory

Intrinsické - vlastní polovodiče jsou používány pro výrobu fotovodivostních detektorů. Mezi nejčastěji používané materiály pro výrobu detektorů patří $\text{Hg}_{(1-x)}\text{CdxTe}$. Šířku zakázaného pásu (spektrální citlivost detektoru) lze snadno měnit změnou poměru směsi rtuti a kadmia. Pro kompozit o teplotě 77K a složení, kde $x = 0,196$, je maximální vlnová délka kterou senzor ještě zaznamená $14 \mu\text{m}$. Proto se tento materiál hodí i pro výrobu LWIR zařízení. Jeho nevýhodou je právě zmíněná frekvenční závislost na složení kompozitu - při nejistotě složení kompozitu o 2% ($x = 0,196 \pm 0,004$), vynikne nejistota v maximální detekovatelné vlnové délce o $0,5 \mu\text{m}$ ($14 \pm 0,51 \mu\text{m}$). To je zvláště nebezpečné u výroby větších sensorových polí (FPA) - některé pixely by mohly mít jinou spektrální citlivost než ostatní, což by vedlo na problémy s kalibrací a chybná měření. Naopak jeho velká výhoda je vysoká detektivita a snadná změna maxima spektrální citlivosti zvýšením obsahu kadmia. V oblasti SWIR začínají díky nové technologii převládat kamery na bázi $\text{In}_{(1-x)}\text{GaxAs}$ [35]. Posledním významným materiálem je InSb, který je většinou nutně chladit na kryogenní teploty 77K. Ten se využívá především v pásmu MWIR [35].

3.2.3 Fotoemisní detektory

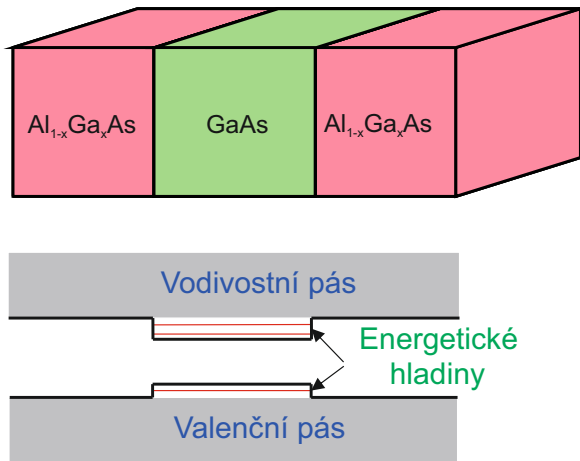
Fotoemisní detektory využívají vnitřního fotoefektu. Jsou nejčastěji konstruovány na bázi Schotkyho přechodu, který vzniká spojením materiálu kov-polovodič. Pro jeho výrobu se často používá platina a křemík. Přechod je často realizován jako přechod Si/PtSi. Většina detektorů se externě chladí na teplotu 77K za účelem snížení šumu a s tím související zvýšení citlivosti.

3.2.4 Kvantové detektory

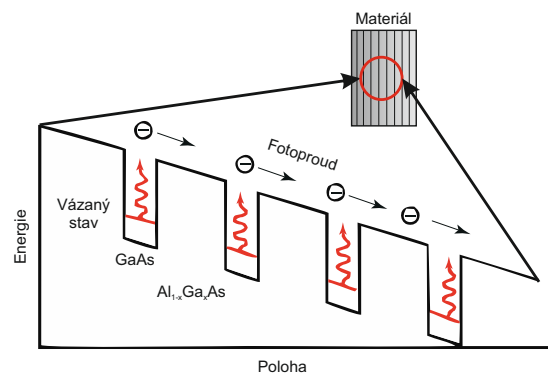
Kvantové detektory – QWIP fungují díky kvantovým jevům v materiálech. Střídání atomárních vrstev vhodných materiálů (např. GaAs a $\text{Al}_{(1-x)}\text{GaxAs}$) vede ke vzniku lokální změny energetických hladin, čímž vznikají energetické díry. To má za následek změnu elektrických i optických vlastností materiálu. Dopadne-li foton s dostatečně vysokou energií do oblasti kvantové díry,

KAPITOLA 3. DETEKTORY IR ZÁŘENÍ

může excitovat elektron ze základního stavu. Ten je vnějším polem unášen - vznikne fotoproud. V oblasti kvantové díry je nižší energetický rozdíl mezi valenčním a vodivostním pásem. Energie potřebná k excitaci odpovídá právě takovému IR záření, které má dostatečnou energii. Pro zvýšení kvantové účinnosti se většinou volí uspořádání s několika QWIP, typická hodnota je okolo 50. Vlastností QWIP detektorů je úzká spektrální charakteristika s vysokou detektivitou. Jako u většiny fotonových detektorů se i QWIP chladí na teploty okolo 77K [35].



Obrázek 3.5: Energetický diagram QWIP [35]



Obrázek 3.6: Diagram několika QWIP [35]

3.3 Tepelné senzory

Mezi tepelnými detektory v dnešní době převládá technologie nechlazených bolometrických senzorů (zvláště v oblasti LWIR). To je způsobeno především díky vyzkoušeným technologickým postupům, díky kterým je možné vyrábět spolehlivé senzory. Mezi hlavní zástupce vyrábějící mikrobolometrické senzory patří např. společnosti FLIR, ULIS a SCD Semiconductor Devices.

3.3.1 Pyroelektrické detektory

Pyroelektrické senzory jsou vyrobeny z krystalového feromagnetického materiálu, který vykazuje trvalý dipólový moment. Dopadající záření je pohlceno, což vede ke zvýšení teploty. To má za následek změnu vnitřního dipólového momentu materiálu a následnou změnu polarizace materiálu. Při konstantní teplotě k polarizaci materiálu nedochází. Není tedy možné změřit napětí mezi elektrodami. Z toho vyplývá, že pyroelektrické senzory fungují pouze při změně teploty. Proto se používá mechanická záklopka, která periodicky přerušuje proud dopadajících fotonů.

V současnosti je nejvíce FPA senzorů vyrobeno z $\text{Ba}_{(1-x)}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ - BST [8]. Pyroelektrické senzory jsou citlivé mezi 0,2-100 μm . Pro pyroelektrické materiály je důležitý pyroelektrický koeficient, který udává, jak se mění elektrická indukce se změnou teploty. Lze ho definovat jako změnu elektrické indukce v závislosti na změně teploty

$$\mathbf{p} = \frac{d\mathbf{D}}{dT} ; \quad [p] = \text{C m}^{-2} \text{K}^{-1}. \quad (3.10)$$

Generaci termoelektrického proudu je možné odvodit z Maxwellových rovnic [8]. Víme, že elektrická indukce \mathbf{D} lze zapsat jako

$$\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (3.11)$$

kde \mathbf{E} je intenzita elektrického pole a \mathbf{P} je vektor polarizace daného materiálu. Dále lze použít Gaussovu větu elektrostatiky

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho, \quad (3.12)$$

kde ρ je hustota elektrického náboje. Následně lze pokračovat

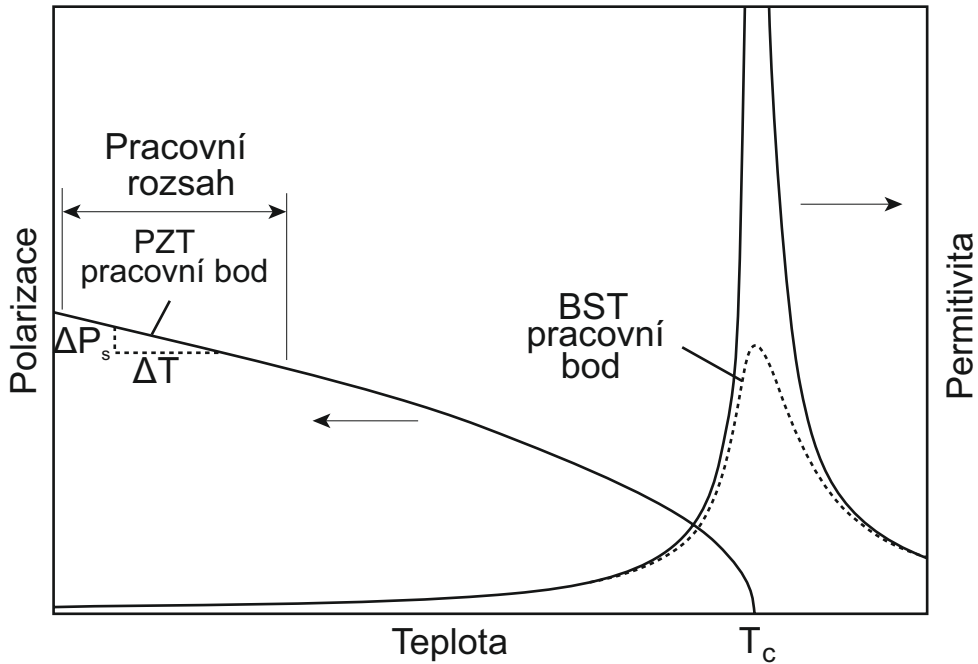
$$\iiint_{\Omega} \rho dV = \iiint_{\Omega} \text{div } \mathbf{D} dV = \iint_{\partial\Omega} \mathbf{D} d\mathbf{S} = DS. \quad (3.13)$$

V této rovnici jsme použili Gauss-Ostrogradského větu pro úpravu objemového integrálu na plošný. Také jsme provedli zjednodušení, ve kterém předpokládáme, že materiál je uspořádaný

tak, že vektor elektrické indukce je rovnoběžný s normálovým vektorem plochy, kterou teče proud. Výslednou rovnici lze napsat jako

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{dDS}{dt} = S \frac{dD}{dt} = S \frac{dD}{dT} \frac{dT}{dt} = Sp \frac{dT}{dt}. \quad (3.14)$$

Zde jsme vyšli z definice proudu a následně použili pravidlo pro derivování složené funkce. Je tedy jasné, že proud záleží pouze na změně teploty materiálu v čase. U pyroelektrických materiálů je vhodné zmínit, že materiály používané pro výrobu senzorů se používají ve dvou režimech. Příkladem materiálu pracujícího pod Curieovou teplotou, kde převládá změna polarizace, je např. $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ – PZT keramika. Materiály pracující v teplotách blízké Curieově teplotě, ve kterých je rozhodující změna permitivity, reprezentují např. $\text{Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Ta}_{1/2})\text{O}_3$ - PST, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PMN a $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ - BST [26].



Obrázek 3.7: Rozdělení fotonových detektorů [26]

3.3.2 Termoelektrické detektory

Termoelektrické detektory fungují na principu Seebeckova jevu. Jsou-li dva vodiče z různých materiálů spojeny do elektrického obvodu a mají-li tyto vodiče různou teplotu, vznikne termoelektrické napětí, které jsme schopni detekovat. Matematicky lze výsledný rozdíl napětí zapsat jako

$$\Delta U = \alpha \Delta T, \quad (3.15)$$

kde ΔU je rozdíl napětí mezi konci vodičů, α je Seebeckův koeficient a ΔT je rozdíl teplot. Rozdíl napětí mezi konci jednoho termočlánku není většinou dostatečný, proto jsou termoelektrické senzory konstruovány jako sériově řazené termočlánky. Citlivá část senzoru je poté načerněna pro lepší absorpci záření. Dle požadavků na senzor (teplotního rozsahu, mechanické odolnosti, přesnosti atd.) je vybírán materiál senzoru. Monolitické termočlánekové baterie se díky vysoké teplotní vodivosti křemíku zhotovují na tenké membráně s vysokým teplotním odporem [26].

3.3.3 Bolometrické detektory

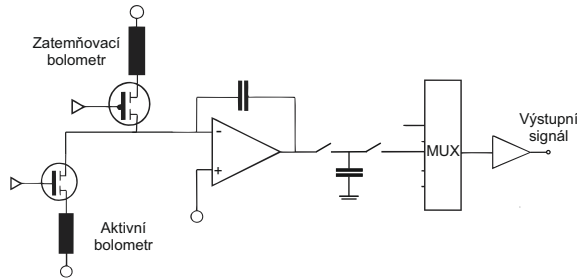
Bolometry nebo též mikrobolometry jsou odporové detektory fungující na principu termistorů. Dopadající záření je absorbováno načerněnou plochou senzoru, čímž dojde k jeho ohřevu a ke změně elektrického odporu. Abychom mohli změnu detekovat, je nutné použít čtecí obvod (ROIC). Odpor bolometru lze popsat rovnicí

$$R = R_0 e^{c\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}; \quad [R] = \Omega, \quad (3.16)$$

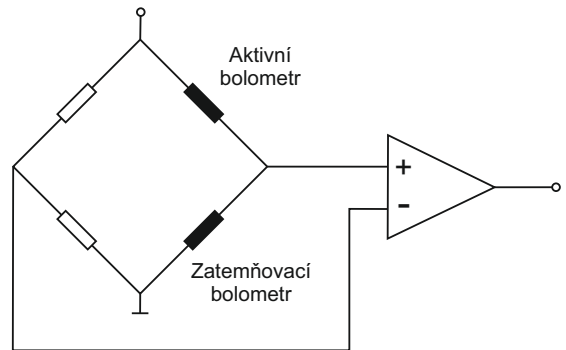
kde R_0 je referenční odpor za dané teploty T_0 , c je materiálová konstanta a T je aktuální teplota senzoru. Důležitým parametrem je citlivost bolometrů – TCR, který udává, jak moc se změni odpor při změně teploty. Pro jeho výpočet se používá aproximace v pracovním bodě R_0

$$TCR = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT}; \quad [TCR] = K^{-1}. \quad (3.17)$$

U bolometrů je také často uváděn v jednotkách %/K. Hodnoty TCR leží v rozmezí 1–5%/K. Pro měření změny odporu se používají různá zapojení, viz obr. 3.8 a obr. 3.9.



Obrázek 3.8: Zapojení firmou ULIS [33]



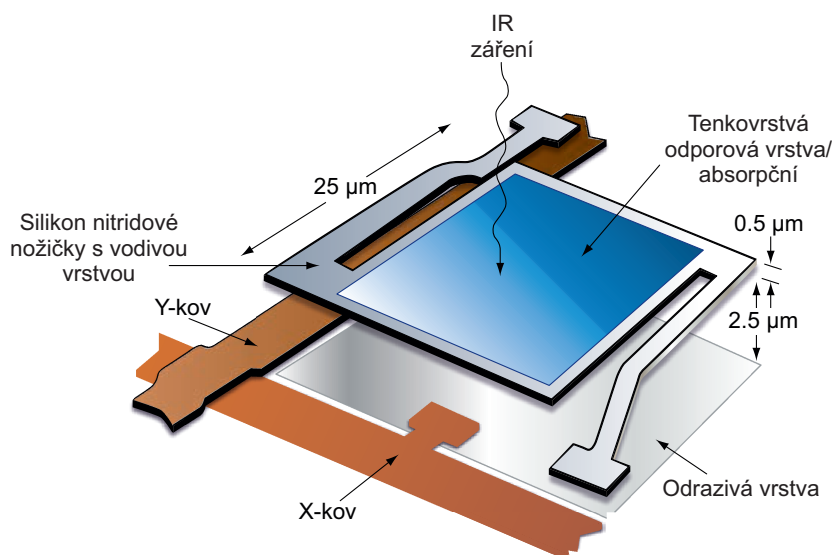
Obrázek 3.9: Můstkové zapojení [8]

Všechna zapojení pro mikrobolometry používají aktivní a tzv. zatemňovací bolometr. Ten je na desce plošných spojů (DPS) spolu s aktivním (měřicím) bolometrem. Na rozdíl od aktivního bolometru je zatemňovací bolometr izolován tak, aby na něj nedopadalo žádné záření. Změnu jeho odporu způsobuje pouze okolní teplota a teplota DPS. Tato teplota ovšem působí i na měřicí bolometr. V důsledku měnící se teploty DPS bez zatemňovacího bolometru by docházelo k chybě měření. Pakliže se použije vhodné zapojení obou bolometrů (měřicího a zatemňovacího), lze signál vzniklý ohřevem DPS na výstupu odečíst.

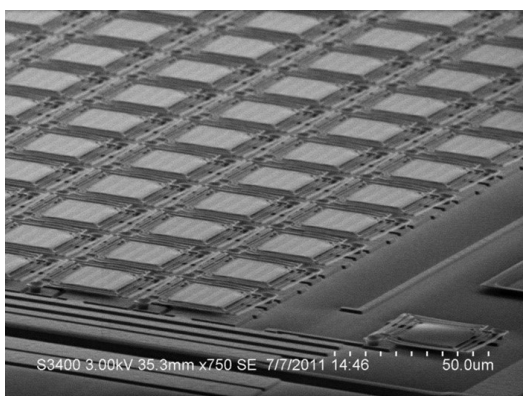
Jednu z metod pro vytvoření bolometru jako mikro-elektro-mechanického systému (MEMS) je možné popsat následovně. Mikrobolometr je vytvořen na velkém křemíkovém waferu, na kterém je vytvořen CMOS multiplexor. Pro vytvoření můstkové struktury jsou nanášeny vrstvy

Si_3N_4 a SiO_2 , které slouží jako záchytná plocha pro rezistivní materiál. Na vytvořený můstek je poté nanášena vrstva vanadium oxidu nebo amorfního silikonu, která slouží jako tenkovrstvý rezistor. Poslední krok je použití plynu, který má rozpustit veškerý nepotřebný materiál. Takto vzniklý senzor je oříznut do obdélníkové struktury a vložen do pouzdra, které je vakuováno pro tepelnou izolaci bolometrů od okolí (typické hodnoty jsou 10⁻⁶ Torr) [8, 26].

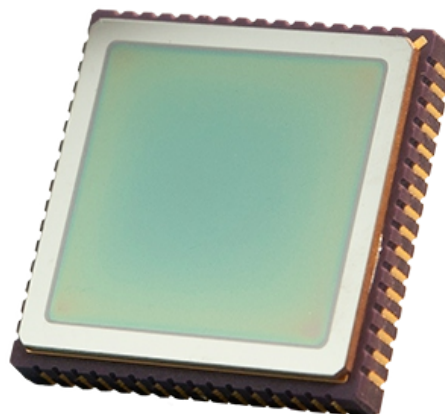
Takto vytvořený senzor má ale i jednu nevýhodu. Tou je jeho nízký “fill-factor“, který udává podíl plochy pokryté aktivním materiálem. Díky postranním nožičkám je možné pokrýt pouze okolo 65% užitečné plochy. Firma DRS Technologies, Inc. proto vymyslela novou dvouvrstvou strukturu tzv. Umbrella layer, která umožňuje pokrýt více než 90% užitečné plochy [19].



Obrázek 3.10: Jednovrstvý mikrobolometr a jeho zapojení [29]

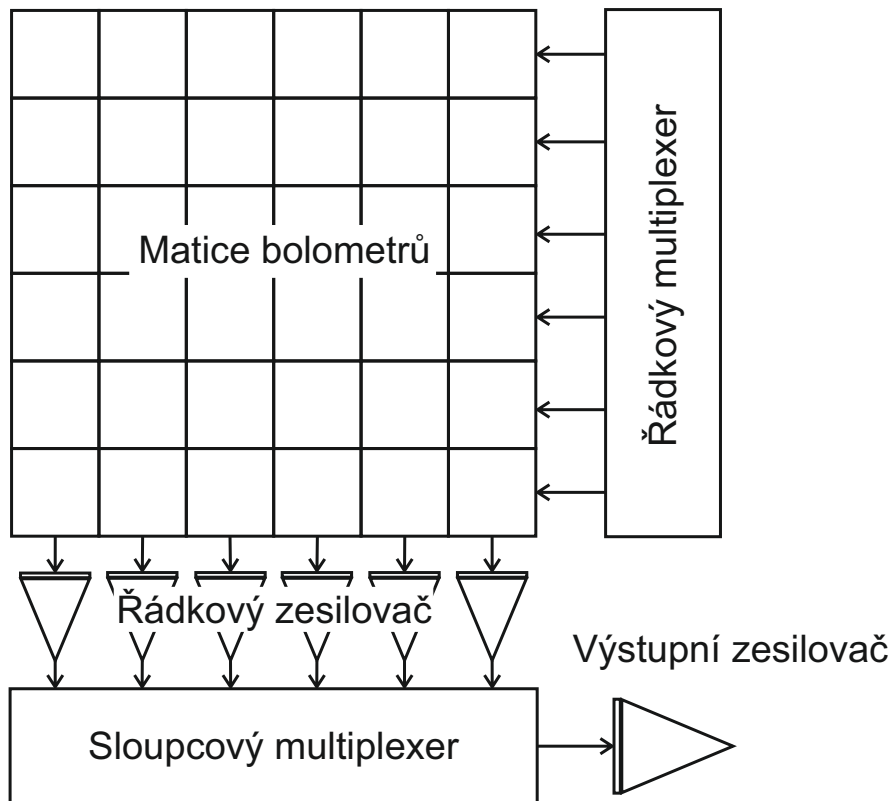


Obrázek 3.11: Mikrobolometrické pole [17]



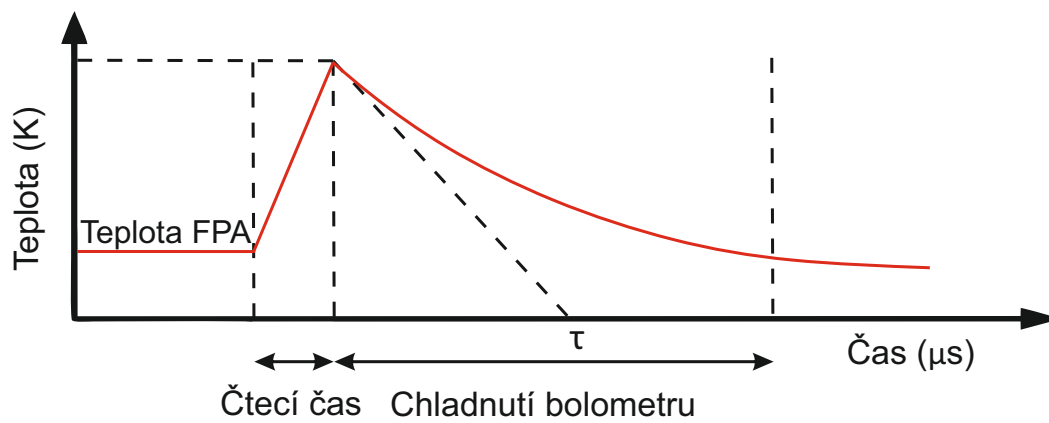
Obrázek 3.12: Mikrobolometrický senzor [18]

Senzory jsou připevněny nožičkami k řádkovému a sloupcovému vodiči. Doplníme-li tedy matici senzorů o řádkový a sloupcový multiplexor, je možné volit, z kterého senzoru budeme číst. Jelikož signál z bolometrů je velice slabý, je nutné doplnit obvod o zesilovací prvky. Nejčastěji se používá uspořádání se sloupcovým a výstupním zesilovačem. Schéma celého zapojení můžeme vidět na obr. 3.13.



Obrázek 3.13: Zapojení matice bolometrů [16]

Pakliže pomocí multiplexorů přistoupíme k vyčtení odporu nějakého pixelu (zapojíme bolometr do obvodu), dojde vlivem Joulova jevu k jeho ohřátí a následnému chladnutí. V praxi je nutné provádět měření odporu s takovou frekvencí, aby senzor vždy stihl vychladnout do dalšího čtení (obr. 3.14). Pakliže tuto podmínku nesplníme, senzor se bude stále ohřívat, což vede na nepřesné měření. Při zapojení bolometru do měřicího obvodu po dobu 20 – 104 μ s, se teplota může zvýšit o 1 – 7 $^{\circ}$ C [19].



Obrázek 3.14: Doba chladnutí senzoru [23]

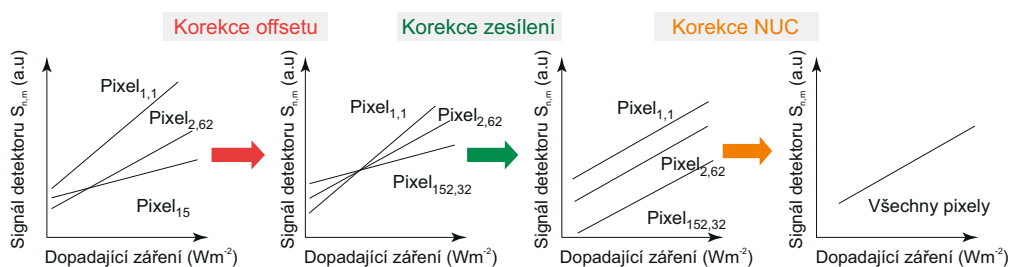
4. Korekce a kalibrace senzoru

Signál každého elementu lze modelovat podle následující rovnice

$$y_{ij}(n) = A_{ij}(n)x_{ij}(n) + O_{ij} + u_{ij}, \quad (4.1)$$

kde y_{ij} je výstupní signál (i, j)-tého elementu v čase n , A_{ij} reprezentuje jeho zisk, O_{ij} je offset daného elementu, x_{ij} je vstupní signál a u_{ij} je aditivní šum [16]. Pro správnou korekci senzoru je nutné znát zisk a offset každého elementu. Velice účinná metoda, která se pro tento účel používá, je detailně popsána v práci [23]. Zde si uvedeme pouze základní princip korekce v bodech (princip korekce je možné vidět na obr. 4.1).

1. Kamera se vloží do klima-komory tak, aby měla v zorném poli černé těleso. Intenzita dopadajícího záření je pak pro každý element stejná.
2. Určíme koeficienty pro kompenzaci offsetu, aby výstupní signály všech elementů byly stejné.
3. Zvýšíme teplotu černého tělesa k horní hranici měřeného rozsahu.
4. Určíme hodnoty koeficientů zisku, aby byly pro všechny elementy stejné.
5. Nyní již můžeme hodnoty zisku a offsetu uložit do logiky zpracovávající obraz a získat korigované signály.



Obrázek 4.1: Kalibrace jednotlivých pixelů [35]

Je potřeba dodat, že offset se mění s časem díky teplotním driftům, proto je potřeba ho korigovat. Nejčastěji je jeho korekce realizována pomocí mechanické záklopký. Po uzavření záklopký na senzor nedopadá žádné světlo a je možné provést korekci offsetu. V anglické literatuře se korekce nazývá “non uniformity correction“ (NUC). Také můžeme podotknout, že některé systémy jsou schopny offset odhadnout z parametrů senzoru (např. teplota DSP) a nepotřebují mechanickou záklopký. V tuto chvíli je stále nejpoužívanější varianta s mechanickou záklopký, jelikož je nejspolehlivější a je relativně snadné ji realizovat.

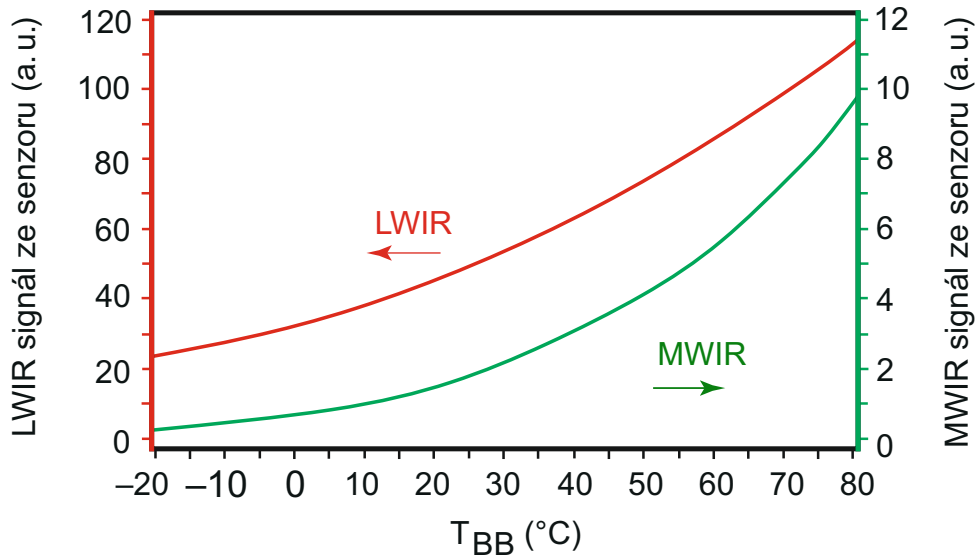
V dalším kroku je nutné provést teplotní kalibraci kamery. Cílem kalibrace kamery je získat vztah mezi dopadajícím zářením a výstupním signálem senzorů. Jelikož se kalibrace provádí na černých tělesech, kalibrační křivka dává do vztahu teplotu černého tělesa a výstupní signál senzoru po korekci pixelů (viz minulý krok). Kalibrace probíhá následovně [35].

1. Kamera se vloží do klima-komory tak, aby měla v celém zorném poli černé těleso. Černé těleso se přiloží co nejbližší k termokameře, aby se minimalizoval vliv prostředí mezi tělesem a kamerou. Intenzita dopadajícího záření je pro každý element stejná. Provede se NUC, aby byla odezva senzorů stejná (ve skutečnosti se trochu liší kvůli šumu), a zaznamená se výstupní signál.
2. Teplota na černém tělese se zvýší, opět se provede NUC a zaznamená se teplota. Tento krok se opakuje, dokud se neprojde celý teplotní rozsah kamery.
3. Následně se naměřené hodnoty vynesou do grafu (viz Obrázek 18) a proloží se kalibrační křivkou.

Použitá kalibrační křivka je určena firmou, která kalibraci provádí. Často se používá polynomičká aproximace, popř. exponenciální. Velice často se používá křivka podle vzorce [35] :

$$S_{out}(T_{BB}) = \frac{R}{e^{B/T_{BB}} - F}, \quad (4.2)$$

kterým lze závislost aproximovat pomocí metody nejmenších čtverců. Neznámé parametry jsou R – odezva, B – spektrální faktor a F – činitel tvaru.



Obrázek 4.2: Kalibrační křivka pro LWIR a MWIR kameru [35]

Jelikož jsme při kalibraci používali černé těleso, není možné počítat teplotu měřeného objektu přímo z kalibrační křivky. To je způsobeno tím, že není započítán vliv atmosféry, emisivita objektů atd. Proto je nutné použít radiometrickou rovnici [35]

$$\Phi_{Objekt}^{BB}(T_{Objekt}) = \frac{\Phi_{Senzor}}{\tau_{Atm}} - \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \Phi_{Pozadi}(T_{Pozadi}) - \frac{1 - \tau_{Atm}}{\epsilon \tau_{Atm}} \Phi_{Atm}(T_{Atm}), \quad (4.3)$$

kteřá opraví teplotu o vliv atmosféry a okolí. Pro rovnici radiometrie se používají různé aproximace a zjednodušení, jednu z metod lze najít i v práci [13].

Po tomto velmi hrubém nastínění problematiky bolometrických senzorů a jejich kalibrace je potřeba ještě doplnit pár poznatků. Měření teploty mikrobolometrickými senzory je velice složité, výsledek nezáleží pouze na problémech zde nastíněných, ale také na mnoha dalších parametrech. Uveďme zde několik příkladů, které ovlivňují výsledek měření: teplota FPA, objektivu a záklopkou, dále teplotní homogenita na FPA, správné nastavení vyhodnocovacích obvodů (zesilovačů, referenčních napětí atd.), stabilita všech napájecích napětí, správné nastavení parametrů prostředí (emisivita, vlhkost, vzdálenost), šum součástek aj. Konstruktoři termokamer se musí se všemi problémy během vývoje vypořádat a měli by uvádět optimální nastavení pro co nejpřesnější měření.

5. Termografické systémy

Termografické systémy jsou určeny k bezkontaktnímu měření teplot, inspekčním účelům, spektroskopii, astronomickým měřením aj. V dnešní době cena těchto systémů klesla několikanásobně, především díky technologickému pokroku v oblastech mikroelektroniky a nanotechnologie. Termokamery mohly začít prostupovat do komerční sféry a do průmyslu. Termografické systémy lze dělit na základě spektrální citlivosti systému, viz tabulka 5.1.

Tabulka 5.1: Rozdělení termokamer na základě rozsahu detektoru [26]

| Region | Rozsah vlnových délek (μm) |
|-----------------------|---|
| Krátkovlnné IR (SWIR) | 1-3 |
| Středovlnné IR (MWIR) | 3-6 |
| Dlouhovlnné IR (LWIR) | 6-15 |

5.1 SWIR kamerové systémy

SWIR kamery používají fotonové detektory s i bez přídavného chlazení. Velice často používají detektory na bázi Indium Galium Arsenidu (InGaAs), který detekuje záření od $0,9 - 1,67 \mu\text{m}$. Díky vysokému odstupu signál-šum není nutné externí chlazení senzoru. Je ale nutné mít na paměti, že v této oblasti vlnových délek je u běžných materiálů vysoká odrazivost, proto je většina záření dopadající na senzor způsobena odrazem záření od měřeného objektu. Takto lze tedy jen velice těžko určit teplotu objektů. Proto se SWIR kamery používají spíše ke kontrole kvality než k měření teplot. Rozlišovat objekty s různou teplotou je možné až při vysokých teplotách ($\geq 200^\circ\text{C}$, záleží na kameře a měřeném objektu), kdy je vyzařování objektu v této oblasti natolik silné, že převládne emise fotonů nad odrazem dopadajícího záření. SWIR kamery lze tedy potkat v aplikacích zaměřených na inspekční účely, noční vidění, astronomii, NIR spektroskopii, zabezpečení objektů a mnoho dalšího [28].

5.2 MWIR a LWIR kamerové systémy

MWIR a LWIR kamery používají jak fotonové, tak tepelné detektory. Na rozdíl od SWIR kamer je v oblasti MWIR a LWIR emisivita běžných materiálů vysoká a u většiny objektů lze určit teplota. Další vlastností těchto kamer je, že jsou provozovány na vlnových délkách, při kterých nedochází k pohlcování IR záření atmosférou. Proto jsou schopny měřit objekty i skrz kouř a mlhu [22].

Obecně lze říci, že LWIR kamery jsou výhodné kvůli vyšší spektrální citlivosti na objekty s nižší teplotou (300K - 26,85°C), lepší viditelnosti skrz mlhu a kouř a větší odolnosti vůči atmosférickým turbulencím. Na druhou stranu MWIR systémy mají lepší kontrast, jsou vhodnější pro měření teplejších objektů a mají lepší propustnost v prostředí s vysokou vlhkostí. Další výhodou MWIR je, že mají menší průměr optiky pro získání stejného rozlišení jako u LWIR systémů [27]. Proto volba mezi MWIR a LWIR kamerou záleží vždy na dané aplikaci.

6. Hardwarová a softwarová konfigurace

Pro tuto práci jsou použity následující hardwarové prvky

- Blokovaná kamera Tamron mp1010m-vc
- Termografická kamera Tau2
- Systém na modulu APF6_SP

6.1 Kamera Tamron

Tamron je japonská firma, která se zabývá výrobou čoček pro kamerové systémy. Kromě toho prodává také kamerový systém Tamron mp1010m-vc.



Obrázek 6.1: Kamera Tamron mp1010m-vc [31]

Jedná se o ultralehkou CMOS kameru s optickým zoomem a rozlišením 1920x1080. Kamera je ovládána přes sériovou linku pomocí VISCA příkazů. Jako každá digitální kamera má mnoho různých nastavení - automatické ostření, nastavení zoomu, nastavení gamma korekce aj. Data z kamery jsou serializována a posílána po 5 párech vodičů se signalizací LVDS (Low Voltage Differential Signaling). Čtyři páry slouží jako datové vodiče a jeden pár vede hodinový signál 74.25 MHz. Data jsou posílána dle formátu ITU BT.1120 – standard pro signály 1920 x 1080.

Tabulka 6.1: Parametry kamery Tamron

| | |
|-----------------------|----------------------|
| Rozlišení | 1920 x 1080 |
| Zobrazovací frekvence | 60,30 Hz |
| Spotřeba | 3 W |
| Video signál | Y/Cb/Cr 4:2:2 (LVDS) |
| Komunikační protokol | VISCA |

6.2 Termografická kamera Tau2

Firma FLIR, která je světovou jedničkou na trhu s termografickými systémy, vyrábí i kamerová jádra, jakým je Tau2.



Obrázek 6.2: Termografická kamera Tau2 [32]

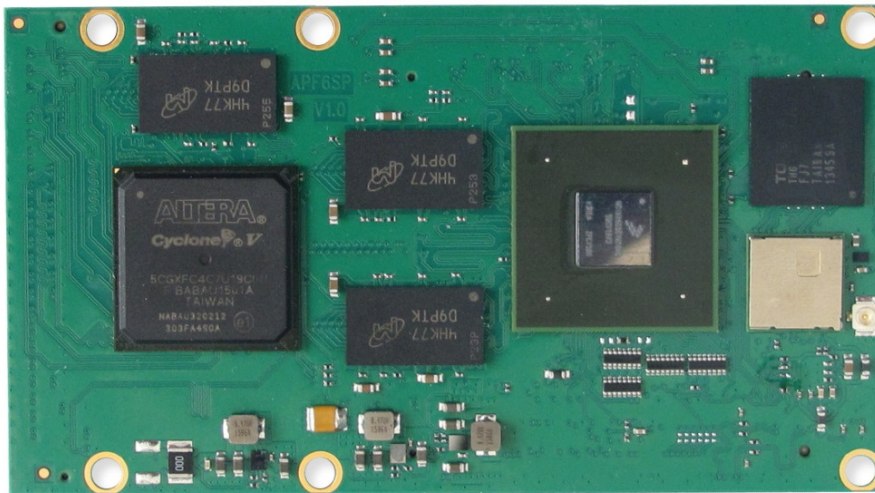
Tau2 je kamera, která používá LWIR mikrobolometrický senzor z vanadium oxidu. Velikost jednoho pixelu je $17 \mu\text{m}$. Kamera je vyráběna v několika variantách, které se liší podle zobrazovací frekvence, rozlišení a citlivosti senzoru. Kameru lze ovládat pomocí sériové komunikace a speciálních příkazů stanovených výrobcem. Obraz je přenášán po paralelní sběrnici. Pro přenos obrazu je použito 17 vodičů. Dva vodiče slouží k horizontální a vertikální synchronizaci, jeden vede hodinový signál a čtrnáct vodičů je využito pro přenos 14bit RAW dat.

Tabulka 6.2: Parametry kamery Tau2

| | |
|-----------------------|------------------------------------|
| Rozlišení | 640 x 512, 336 x 256, 160 x 128 |
| Zobrazovací frekvence | 9/30/60 Hz |
| Velikost pixelu | $17 \mu\text{m}$ |
| Spektrální rozsah | $7,5 - 13,5 \mu\text{m}$ |
| Citlivost | $< 50 \text{ mK}$ |
| Teplotní rozsah | $-40 - 550 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Spotřeba | 1,2 W |

6.3 Procesorový modul APF6_SP

Procesorový modul APF6_SP vyráběný firmou Armadeus systems obsahuje kombinaci FPGA a Armového procesoru. Oba systémy spolu komunikují po sběrnici PCIe 1x. Na rozdíl od komerčně dostupných systémů SoC - systém na čipu (často kombinace FPGA a procesoru v jednom pouzdru), disponuje tato kombinace větším výpočetním výkonem Armového procesoru. Zatímco komerčně dostupné SoC mají jedno až dvě jádra a pracují na frekvencích 900Mhz, modul APF6_SP disponuje až čtyř jádrovým procesorem s frekvencí 1Ghz. Cílem této práce je přesunout část zpracování obrazu na FPGA, a procesor použít pouze pro aplikaci (zobrazování a ukládání obrazu).



Obrázek 6.3: Systém na modulu APF6.SP [6]

Na procesorovém modulu APF6.SP je použit procesor I.MX6 (ARM[®] CortexTM-A9), ke kterému je připojena 512MB DDR3 RAM. Procesor disponuje mnoha standardními rozhraními, jako je SATA II, UART, I2C, SPI, CAN, USB 2 OTG, 1Gbit Ethernet, CSI aj. K procesoru je na sběrnici PCIe připojeno FPGA Cyclone V GX C4-C9 (záleží na požadavcích) od firmy Altera. K FPGA je připojena 384MB DDR3 RAM. Celý tento ekosystém je na malém modulu 90 x 50 mm osazený 3 Hirose konektory. K modulu je také možné zakoupit vývojovou desku APF6_DEV, u které jsou vyvedeny veškeré potřebné vstupy a výstupy.

Další výhodou je, že firma Armadeus systems na svém webovém portálu zpřístupnila několik návodů, jak začít s vývojem pro FPGA. Rovněž nabízí kompletní systém upravený na míru tak, aby bylo možné přehrát firmware na FPGA. Ke stažení jsou nabízeny u-boot, rootfs a linux kernel 3.15. Je tedy možné systém přeinstalovat a rovnou se pustit do vývoje.

Tabulka 6.3: Základní parametry I.MX6 a Cyclone V GX C4

| I.MX6 | | CYCLONE V GX C4 | |
|-------------|---|-----------------------|--------|
| Frekvence | 1GHz | Logické elementy (K) | 40 |
| Počet jader | 1/2/4 | ALMs | 18 868 |
| Sběrnice | PCIe 1x, CSI, HDMI, USB OTG, SATA, UART, I2C, SPI | M10K paměťových bloků | 250 |
| | | DSP blok | 70 |
| | | PCIe blok | 2 |
| RAM | 512MB DDR3 | Paměťový kontrolér | 2 |

6.4 Vývojové prostředí

Vývoj firmwaru pro Cyclone V je prováděn v program Quartus 17.0 lite. Jedná se o neplacenou verzi určenou pro levnější FPGA od společnosti Altera. Výhodou je, že i přesto, že se jedná o neplacenou verzi, je možné použít velkou sadu IP core, která zjednodušuje práci a vývoj komunikace s některými rozhraními. Pro simulaci modulů byl použit software ModelSim, který je možné začlenit do Quartusu a provádět tak simulaci navržených modulů. Jedná se rovněž o neplacenou verzi software, která umožňuje simulovat vlastní design až do 10 000 řádek kódu. Jelikož je celý design členěn do jednotlivých modulů, které je možné simulovat zvlášť, neměl by být s vývojem žádný problém. Ačkoliv byly vyzkoušeny i jiné nástroje pro simulaci jako Icarus verilog ve spojení s Cocotb, vyskytl se problém při simulaci designu s IP moduly: nepovedlo se najít vhodné metody pro začlenění IP modulů do simulace. Rozdíl oproti komerčnímu simulátoru jako je ModelSim je přehlednost a rychlost simulace. Snadné je napsání rutinních testů např. v pythonu, kterými je možné snadno otestovat chování napsaného designu.

Vývoj celého designu pro FPGA je realizován v jazyce verilog, který patří do skupiny jazyků HDL – hardware popisující jazyky. Verilog má velice podobnou syntaxi jako jazyk C a stejně jako jazyk C používá preprocesor.

6.5 Altera IP core

Jedná se o hotové moduly dodávané společností Altera. Tyto moduly je možné pomocí parametrů nastavit tak, aby vyhovovaly požadavkům vývojáře. Slouží např. k ovládání interních RAM, PCIe komunikace, kontrolérů pro externí RAM, paměti FIFO, adresových expandérů aj. Dále je k dispozici celá řada aritmetických modulů pro dělení, násobení, převody binárních kódů atd. Bez těchto modulů by byl vývoj na takové úrovni velice zdlouhavý, jelikož napsat modul např. pro PCIe nebo externí paměť by bylo velice náročné.

6.6 Vývoj firmwaru pro FPGA

Vývoj systému lze popsat následovně: jako první je nutné systém rozdělit do logických celků zodpovědných za jednotlivé operace. Následně je potřeba rozdělit jednotlivé logické celky do modulů zodpovědných za jednotlivé operace a zpracování dat. Po napsání kódu pro modul je nutné napsat „Test bench“ – kód, pomocí kterého je možné otestovat chování modulu. Po důkladné simulaci je možné vytvořit modul v Qsys, ve kterém je možné propojit jednotlivé logické celky (PCIe modul, RAM kontrolér aj.). V poslední části je potřeba udělat časovou simulaci, která ověří, že se všechny přechody kombinačních a sekvenčních obvodů se stihnou provést při dané hodinové frekvenci. Celý kód je pak možné zkompileovat a nahrát na FPGA.

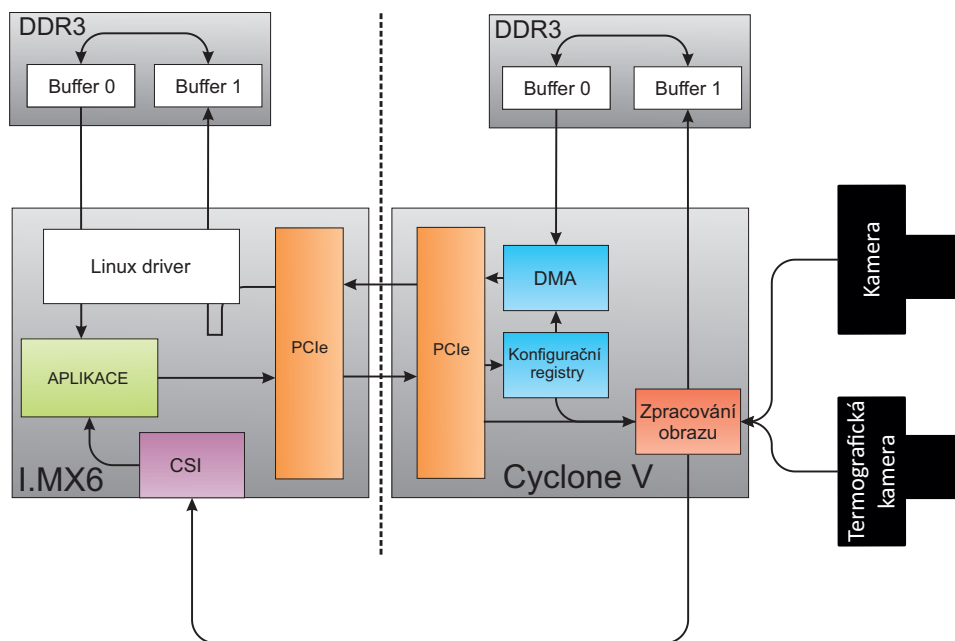
V první části bylo nutné správně zapojit a nastavit projekt. Bylo nutné použít IP moduly pro PCIe a RAM kontrolér spolu s obslužnými IP moduly. Pro celý vývoj jsem použil návod ve kterém je popsán základní postup propojení I.MX6 s FPGA. Po správném nastavení PCIe IP a RAM IP je nutné správně namapovat piny u FPGA. Proto jsem použil tcl skripty z wikipede Armadea. Pak už je možné přistupovat přes aplikaci v I.MX6 do paměti RAM pomocí mnou napsané třídy v C++. Kterou jsem přepsal, tak aby ji bylo možné integrovat do aplikace.

V tuto chvíli bylo možné psát a testovat první kódy v FPGA. Jako první testovací modul jsem vytvořil jednoduchý cyklický generátor, který zapisuje data do externí RAM. Pro ověření funkčnosti jsem vyčetl data přes PCIe aplikací napsanou v C++. Tím jsem ověřil funkčnost celku a mohl jsem se pustit do vývoje firmwaru.

7. Firmware FPGA

Před vývojem jednotlivých modulů jsem systém musel navrhnout tak, aby byl modulární a jednoduše upgradovatelný. Proto jsem se rozhodl rozdělit celý systém následovně:

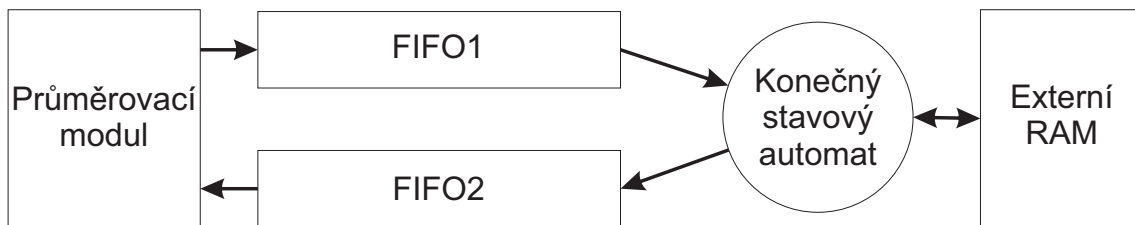
- Tau2 modul
- Tamron modul
- Zápis do RAM
- Konfigurace
- Přímý zápis do RAM I.MX6 (DMA)
- Průměrování obrazu



Obrázek 7.1: Schéma celého systému

7.1 Průměrování obrazu

Průměrovací modul má na starosti průměrování RAW dat z kamery Tau2 v reálném čase. Jelikož se jedná o průměrování po sobě jdoucích snímků, je nutné vstupní data bufferovat. Data z Tau2 jsou 14bitová, proto je potřeba použít minimálně $640 \cdot 512 \cdot 1,75 = 573\,440$ bajtů paměti. Vzhledem k tomu, že FPGA Cyclone V GX C4 disponuje 2,5MB interní paměti, která je sdílena pro všechny moduly, nebylo by rozumné zde data ukládat. Proto jsem vytvořil v externí paměti buffery, do kterých se data ukládají. Pakliže přijde signál začátek snímku, je nutné datový stream ukládat do jednoho z bufferů a zároveň druhý buffer vyčítat a data z něj průměrovat spolu se vstupním streamem. Toto jsem realizoval pomocí konečného stavového automatu, který se stará o zápis a čtení do/z externí paměti RAM. Schéma zapojení můžeme vidět na obr. 7.2.



Obrázek 7.2: Schéma průměrovacího modulu

Stavový automat má několik stavů, mezi kterými přechází podle aktuálního stavu řídicích signálů. Přechodový diagram je vidět na obr. 8.6.

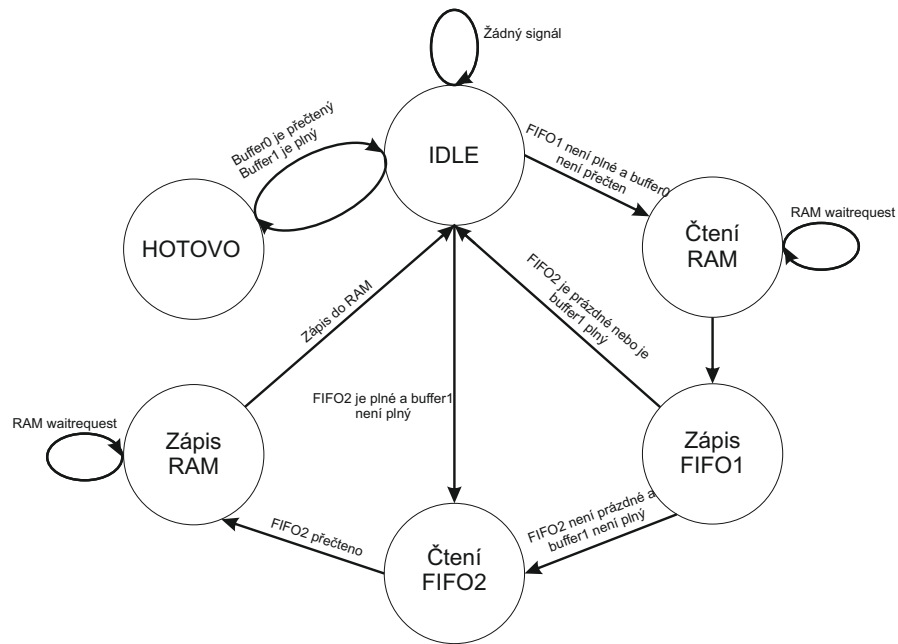
Průměrování snímků vede ke snížení šumu (směrodatné odchylky od skutečné hodnoty). Jelikož se jedná o náhodný signál, dá se očekávat normální rozdělení. V takovém případě by průměrování mělo varianci zmenšit podle následujícího vzorce

$$\text{Var}(X) = \frac{\sigma^2}{n}, \quad (7.1)$$

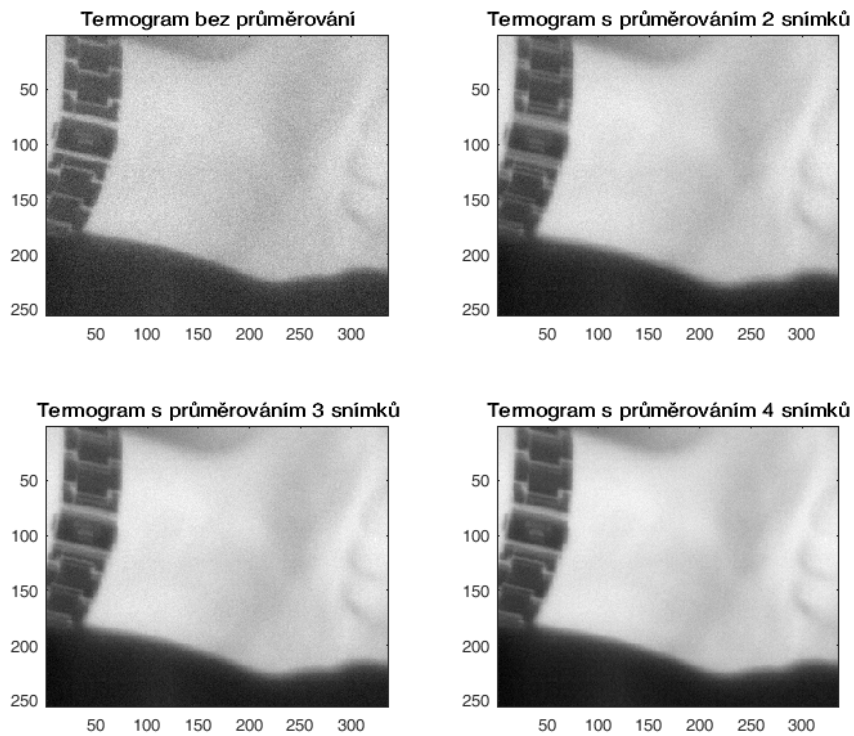
kde σ je směrodatná odchylka a n je počet vzorků. Jelikož je směrodatná odchylka definována jako odmocnina z variance, měl by se šum snížit podle vzorce

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(X)} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (7.2)$$

Pro tuto aplikaci jsem se rozhodl realizovat průměrování pouze 2 snímků. Šum by se tak měl zmenšit 1,4krát. To je z toho důvodu, že s kamerou se bude hýbat a obraz by se při průměrování více snímků rozmazal.



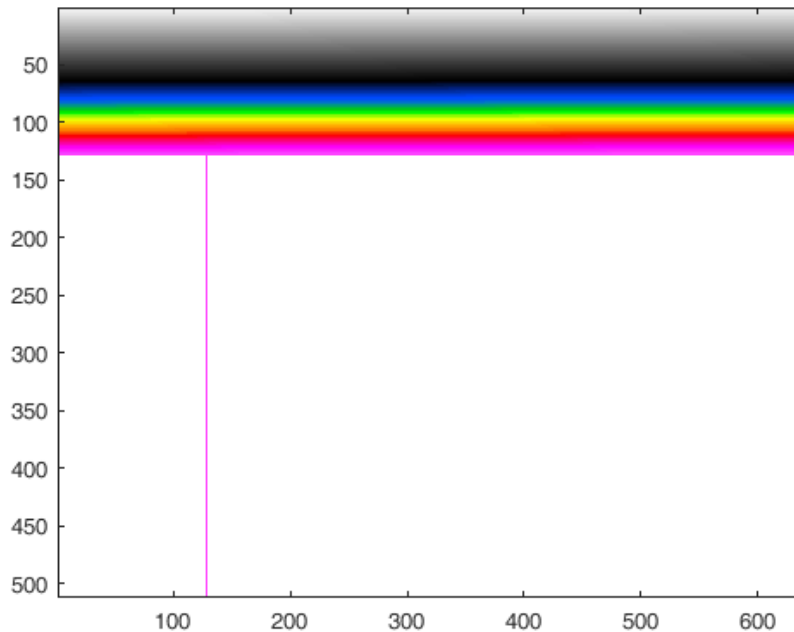
Obrázek 7.3: Schéma stavového automatu průměrovacího modulu



Obrázek 7.4: Ukázka průměrování po sobě jdoucích snímků

7.2 Tau2 modul

Tau2 modul je zodpovědný za zpracování dat z termografické kamery Tau2. V první části modulu je možné konfiguračním bitem volit mezi signálem z kamery a generátoru, který vytvoří testovací obrazec (ten se hodí zvláště pro vývoj aplikace), viz obr. 7.8.



Obrázek 7.5: Testovací obrazec Tau2

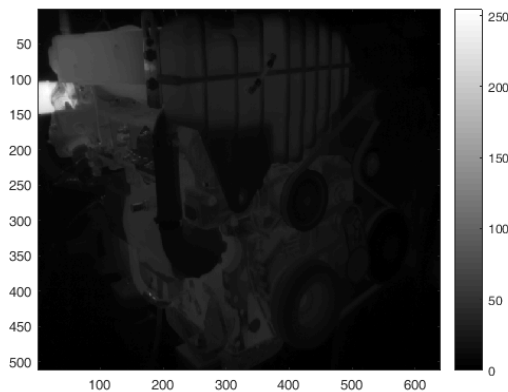
Obrazový signál je pak přepočítán na teploty. To je realizováno vyhledávací tabulkou (LUT), která je tvořena pamětí RAM. Vstupní vodiče z kamery (RAW data) odpovídají 14 bitové adrese. Výstup je 16 bitové číslo, které odpovídá naměřené teplotě daného pixelu. Jelikož se teplota mění v závislosti na nastavených parametrech (emisivita aj.), je nutné mít přístup k aktualizaci LUT z aplikace. Proto je RAM vytvořená jako dual port, jeden port slouží pro přepočet vstupních RAW dat na teploty a druhý vstup slouží pro aktualizaci paměti. Vstupní adresy jsou namapovány na BAR1 PCIe, což umožňuje aktualizovat RAM z aplikace v I.MX6. Vstupní adresy jsou v hexadecimálním formátu 0 – 4000.

Dále je potřeba vytvořit termogram – barevný obraz, který je odeslán a zobrazen v aplikaci. Hodnota každého pixelu je vypočtena dle následující rovnice

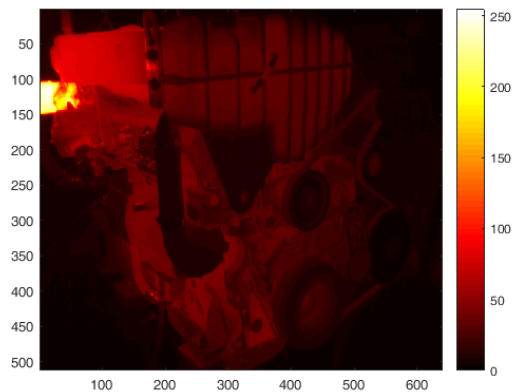
$$IMG_{gray} = \frac{PIX_{max} - PIX}{PIX_{max} - PIX_{min}} (L - 1), \quad (7.3)$$

kde PIX_{max} je maximální hodnota v obraze, PIX_{min} je minimální hodnota v obraze a L je počet úrovní (pro 8 bitové palety $L = 256$, pro 10 bitové palety $L = 1024$).

Tím je vypočten černobílý obraz, který je možné zobrazit. Jelikož je těžké černobílý obraz interpretovat, používají se barevné palety, které mají pomoci při interpretaci obrazu. To je provedeno až v aplikaci.



Obrázek 7.6: Šedotónový obraz z kamery Tau2



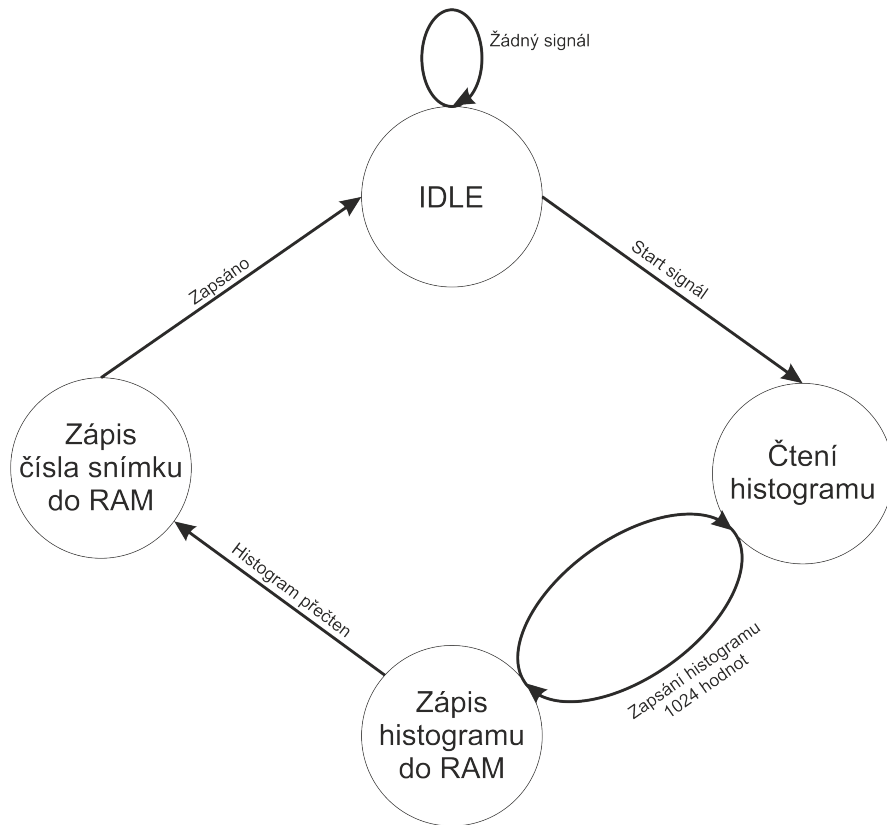
Obrázek 7.7: Obraz s aplikovanou paletou

Výsledná obrazová data nabývají hodnoty mezi 0-255, popř. 0-1023 u 8 a 10 bitové palety. Následně je zařazena další LUT, která umožňuje zobrazit termogram v různém škálování. Vstupní data odpovídají adrese a výstupní data novým hodnotám šedotónového obrazu. LUT je realizována pomocí dual port RAM, což umožňuje dynamicky měnit její obsah tak, aby došlo např. ke zvýšení kontrastu v termogramu (ekvalizace histogramu) či logaritmickeému zobrazení. Výsledný stream je připojený do modulu, který je zodpovědný za zápis do externí paměti RAM.

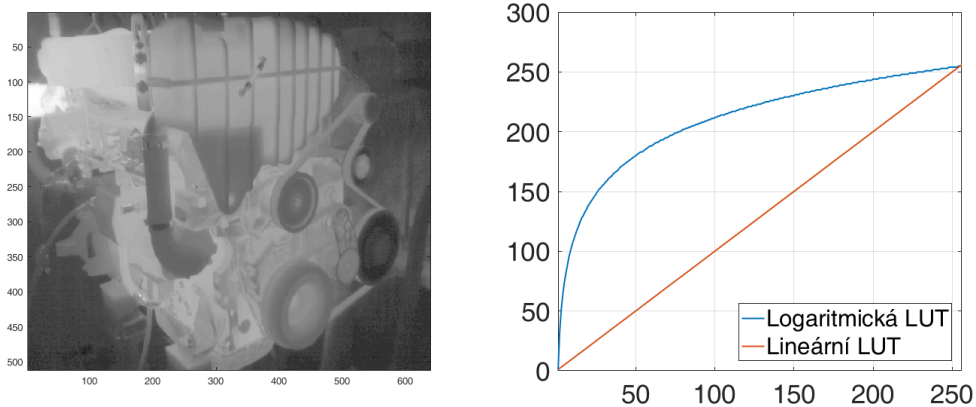
Algoritmy pro zvýšení kontrastu pracují s histogramem (četnost pixelů pro jednotlivé odstíny šedi). Histogram jsem vypočítal následovně: Každá hodnota šedotónového obrazu slouží jako adresa pro RAM. K výstupu z RAM je připočtena 1 a výsledek je opět připojen jako datový vstup RAM spolu se signálem write. Tím dojde k inkrementaci na dané pozici. Jelikož čtení a zápis trvá dva hodinové cykly, v případě, že by dva po sobě jdoucí pixely měly stejnou hodnotou, obsah paměti RAM by byl dvakrát přemazán stejnou hodnotou. Bylo tedy nutné tento problém dále ošetřit.

Následně je nutné histogram odeslat. Proto jsem vytvořil konečný stavový automat, který po signálu konec snímku vyčte celou paměť RAM, ve které je histogram uložený, a odešle ho jako stream do modulu zápis do RAM.

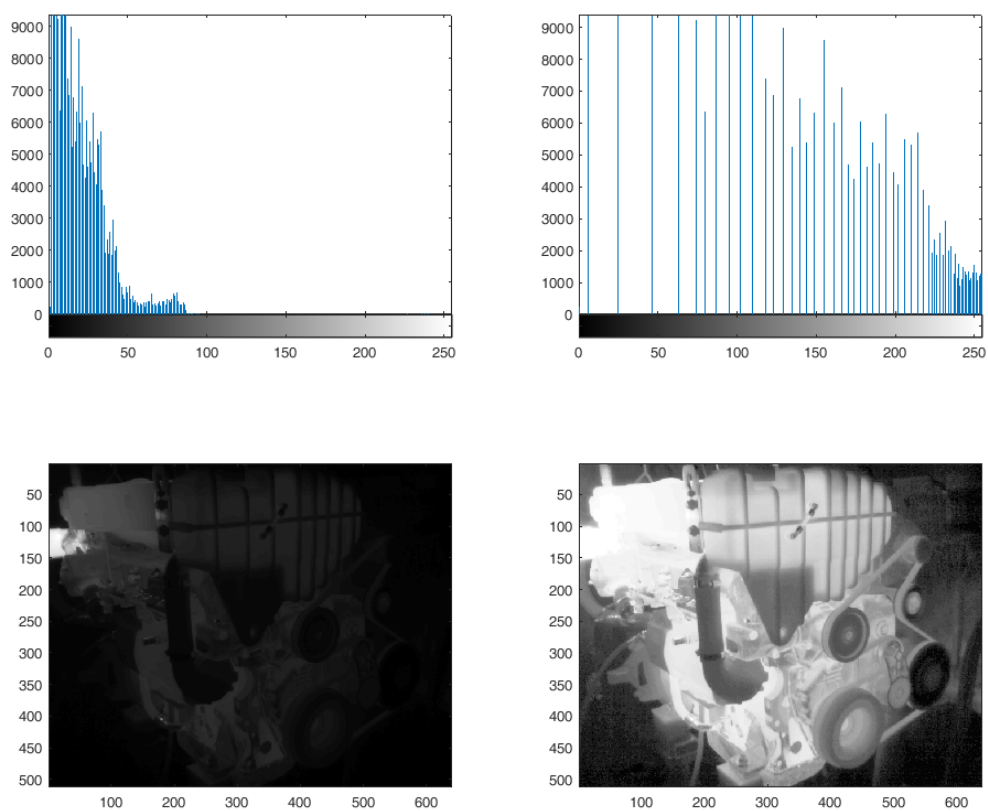
Po odeslání histogramu je možné v I.MX6 vypočítat pomocí různých algoritmů nové hodnoty jasových složek. Ty lze zapsat do LUT v I.MX6. Tím je možné zvýšit kontrast v termogramu, např. algoritmem ekvalizace histogramu.



Obrázek 7.8: Stavový automat odeslání histogramu



Obrázek 7.9: Zobrazení termogramu v nelineárním škálování



Obrázek 7.10: Porovnání obrázku před ekvalizací histogramu a po ekvalizaci histogramu

7.3 Zápis do RAM

Modul zapisující do RAM FPGA je zodpovědný za správné ukládání dat do RAM FPGA. Pro jeho vývoj jsem použil dva buffery, do kterých se střídavě zapisují data. Jeden začíná na adrese 0x0000000 a druhý na 0x00020000. Z toho vyplývá, že maximální velikost bufferu je 2MB. Po uložení všech dat do jednoho bufferu se nastaví příznakový bit pro zahájení DMA do paměti I.MX6. Následující data se pak ukládají do druhého bufferu.

Modul má na vstupu 3 streamy: jeden pro teplotní obraz, druhý pro černobílý a třetí slouží k odeslání histogramu. Každý vstup má vlastní FIFO, které je připojeno k paměťovému kontroléru, jenž obsluhuje vnější paměť RAM. Jelikož zápis do FIFO probíhá rychlostí hodin Tau2, zatímco komunikace s externí RAM probíhá při vyšší hodinové frekvenci (125MHz), je nutné použít dual port FIFO – vstup a výstup má tedy vlastní hodinový signál. Na vstup každého FIFO je tedy přiveden hodinový signál a datový stream. Na výstupu je připojen paměťový kontrolér a hodinový signál, který je spojený s pamětí.

Aby se data navzájem nepřemazávala, je nutné k jejich adresám přičíst správný offset. Ten se skládá z bufferového offsetu (0x0 nebo 0x20000) a interního offsetu v bufferu (RGB obraz je nutné posunout o velikost teplotního obrazu a histogram, který je až na konci bufferu, je nutné posunout o teplotní offset a RGB offset). Toto má na starosti konfigurační modul, který při změně rozlišení kamery změní příslušné offsety.

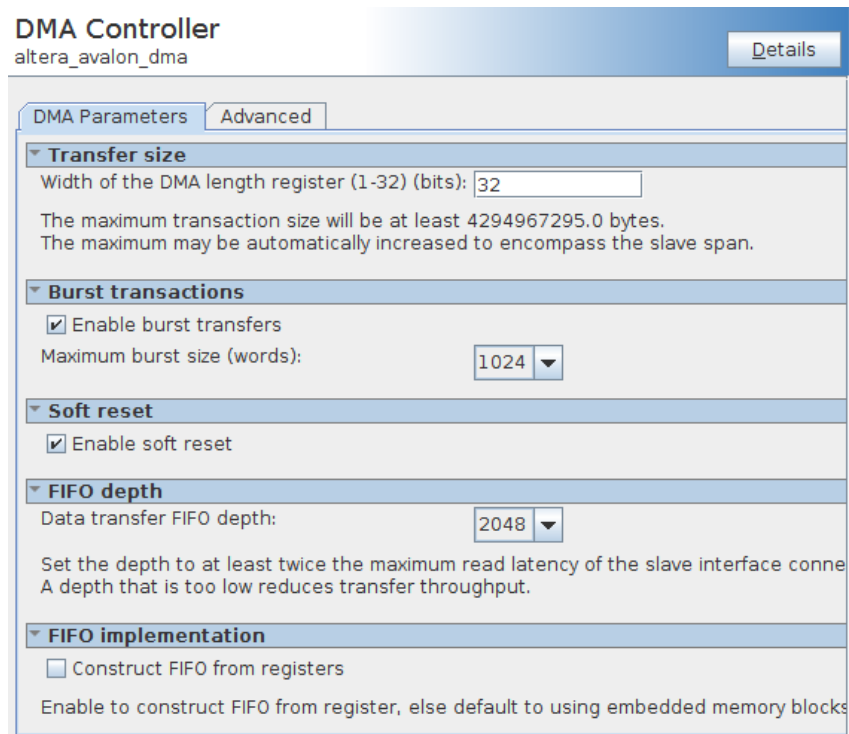
Tabulka 7.1: Velikost jednotlivých bufferů pro jádro s rozlišením 640x512px

| Data | Paměť (počet bajtů) |
|-----------|---|
| Teplotní | $(640 \cdot 512 \cdot 2) = 655360 \approx 0.655\text{MB}$ |
| RGB | $(640 \cdot 512 \cdot 1) = 327680 \approx 0.327\text{MB}$ |
| Histogram | $1028 \approx 0.001\text{MB}$ |

V tabulce můžeme vidět velikost interních bufferů, které je nutné pomocí DMA odeslat do paměti I.MX6. V poslední části modulu, je tzv. "interrupt_generator", který je zodpovědný za ukládání dat do správného bufferu a nastavení příznakového bitu pro DMA.

7.4 Přímý zápis do RAM I.MX6

DMA modul se stará o čtení dat z paměti FPGA a jejich zápis do paměti I.MX6. Pro vývoj tohoto modulu jsem vyšel z referenčních designů od firmy Armadeus a Altera [3]. Následně jsem modul přepsal tak, aby vyhovoval našim požadavkům. Jako první bylo potřeba správně nastavit fungování DMA kontroléru.

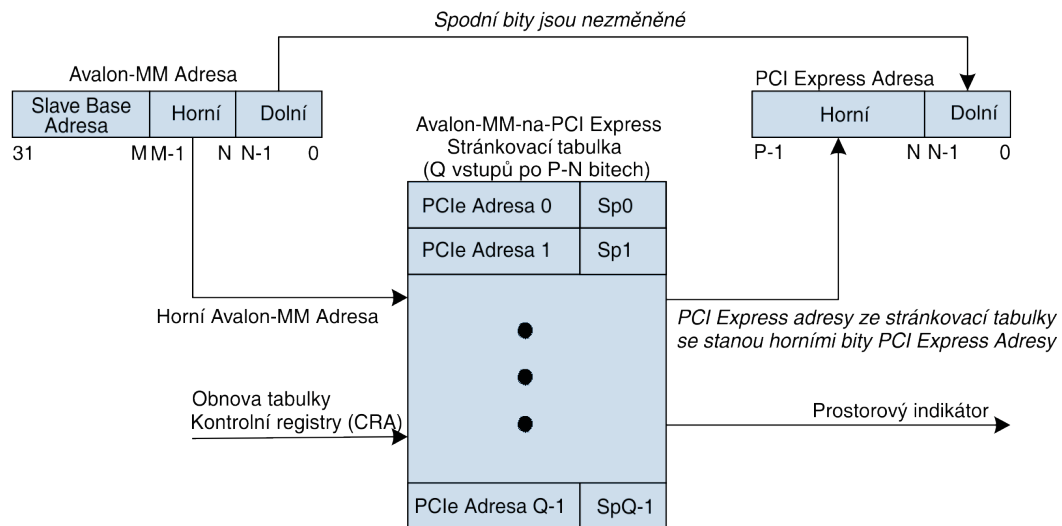


Obrázek 7.11: Nastavení DMA kontroléru v Qsysu

Bohužel DMA kontrolér IP umožňuje přenést (přečíst z paměti a následně zapsat) pouze 1024 slov (v našem případě má PCIe sběrnice šířku 64bit). To znamená, že na jeden přenos je možné přenést 16 384B. DMA modul musí několikrát po sobě požádat DMA kontrolér o přenos tak, aby se přenesl celý buffer z paměti RAM FPGA. DMA modul je vytvořen jako FSM, která po příchodu start signálu z modulu Zápis do RAM, provede sérii žádostí o přenos. Před každou žádostí zvýší adresu o 16384, aby nedošlo k jejich překrytí. Takto lze přenést celý buffer z RAM FPGA. Maximální přenosovou rychlost (s přečtením dat v aplikaci) jsem naměřil 91MB/s.

Zde ovšem vyvstává několik problémů. Především je nutné alokovat potřebná data v linuxovém jádře tak, aby nedošlo k nechtěnému přemazání části OS. Řešení spočívá v napsání linuxového ovladače. Ukázkové kódy lze najít na stránkách Armadeus wiki a Altera [2]. Dále je nutné provést překlad adres z paměťového prostoru FPGA do paměťového prostoru I.MX6.

Pro překlad bylo nutné nastudovat, jakým způsobem probíhá překlad adres v FPGA. O překlad se stará PCI hard kontrolér IP [4]. Překlad stránek je uložen v konfiguračních registrech (CRA) a probíhá podle schématu na obr. 7.13.



Poznámky

- (1) N je počet nepřekládaných bitů
- (2) M je počet Avalon-MM Adresových bitů.
- (3) P je počet PCI Express adresových bitů
- (4) Q je počet stránek ve stránkovací tabulce
- (5) Sp[1:0] je indikátor adresového rozsahu (64 nebo 32 bitů)

Obrázek 7.12: Překlad adres z FPGA do I.MX6 [4]

Jelikož maximální velikost DMA bufferu je 2MB, rozhodl jsem se nastavit adresu PCI na 20 bitů ($N = 20$) = 1MB. Následně jsem nastavil 4 stránky ($Q = 4$). Po alokaci potřebného místa v linuxovém jádře je nutné zapsat horní bity do stránkovací tabulky, což zajistí ukládání dat do správného adresového prostoru. To je provedeno z linuxového driveru.

Pro tvorbu ovladače na straně I.MX6 jsem vyšel z ukázkového kódu od firmy Armadeus. Jako většina ovladačů pro externí zařízení potřebuje tento driver funkce *probe* a *remove*. Funkce *probe* má za cíl enumeraci a registraci zařízení v jádře systému a alokaci potřebného prostoru v jádře. Funkce *remove* se stará deregistraci zařízení v jádře a uvolnění alokovaného prostoru. Nejdříve se v jádře alokuje místo na strukturu ovladače pomocí funkce

```
struct dmasimple {
    volatile dma_addr_t * dmabuff;
    volatile u32 __iomem * bar0;
    void __iomem * const * iomap;
    dma_addr_t dma_handle;
    dma_addr_t dma_base_handle_addr;
    volatile u8 * frame0;
    volatile u8 * frame1;
    unsigned frameNumberOffset;
    bool debug_mode;

    struct device *dev;
};
dmas = devm_kzalloc(&pdev->dev, sizeof(*dmas), GFP_KERNEL);
```

Následně se alokuje IO prostor pro PCIe, což u I.MX6 nesmí být více než 1MB. Komunikace pro IO je na BAR0. V dalším kroku se koherentně alokuje 5 MB prostor v paměti I.MX6.

```
my_dma->dmabuff = dmam_alloc_coherent(&pdev->dev, DMA_BUFF_SIZE, &dmas->dma_handle, GFP_KERNEL);
```

Tento příkaz nám vrací pointer ukazující na první adresu bufferu. Jelikož jsem v FPGA nastavil velikost jedné stránky na 1MB, je nutné, aby počáteční adresa v I.MX6 byla také zarovnána na 1MB. Vzhledem k tomu, že nevíme, jakou adresu nám jádro určí, zvolil jsem buffer takové velikosti, aby bylo možné zarovnání na 1MB provést ručně v ovladači. I když je tedy fyzicky potřeba pouze 4MB, které se přenáší z FPGA, 1MB je použit na případné zarovnání adres.

```
if(((u32)(dmas->dma_handle) & 0x000000000000FFFFFF) == 0x0000000000000000 ){
    printk("Address dmas->dma_handle alignment OK\n");
    dmas->dma_base_handle_addr = (u32)(dmas->dma_handle);
} else {
    printk("Address dmas->dma_handle alignment CHANGED\n");
    dmas->dma_base_handle_addr = (((u32)(dmas->dma_handle) |
                                0x000000000000FFFFFF) ^ 0x000000000000FFFFFF ) + 0x0000000000010000;
}
```

Po správné alokaci bufferů v I.MX6 je možné zapsat horní adresové bity (12 bitů) do stránkovací tabulky FPGA.

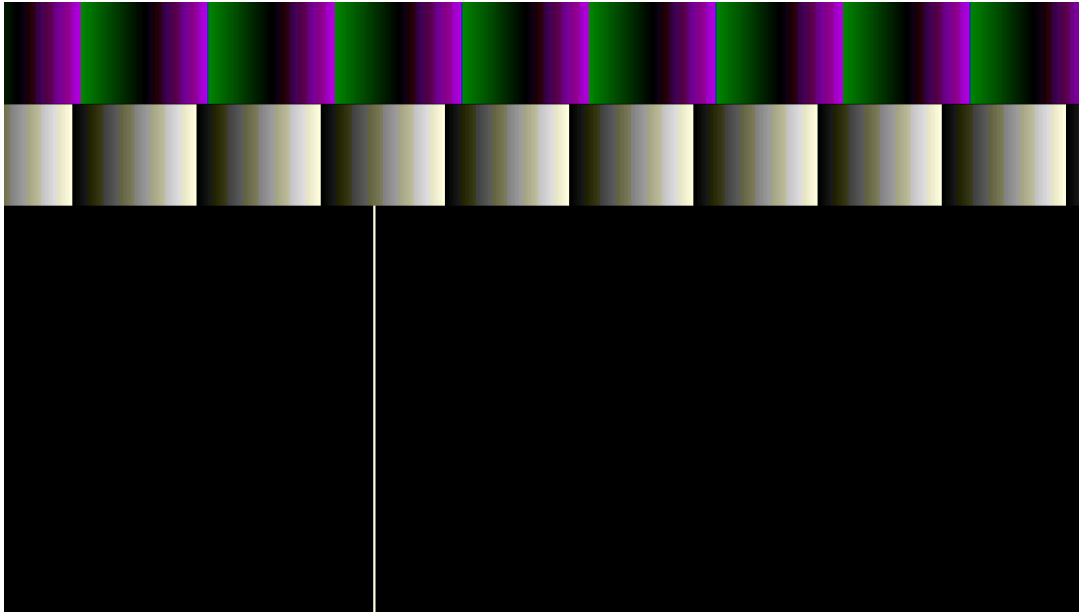
```
writel(dmas->dma_base_handle_addr + 0x000000, &dmas->bar0[CRA_REG_A2P_ADDR_MAP_L00/4]);
writel(0, &dmas->bar0[CRA_REG_A2P_ADDR_MAP_HI0/4]); // 32bits address
```

Pak je již možné implementovat funkci *read*, která přenesený buffer zkopíruje do uživatelského prostoru aplikace.

```
err = copy_to_user(buf, (void *)my_dma->frame0, count)
```

7.5 Tamron modul

Tamron modul je zodpovědný za zpracování dat z kamery Tamron. V první části modulu je možné konfiguračním bitem volit mezi signálem z kamery a generátoru, který vytvoří testovací obrazec stejně jako u kamery Tau2.



Obrázek 7.13: Obrazový generátor Tamron

Jelikož vstupní formát kamery je YCbCr (4:2:2), musel jsem napsat modul, který přepočítává obraz na RGB565. Tento signál je pak připojen přes paralelní 16bitovou sběrnici k procesoru, kde jsou data vyčítána a zobrazována přes linuxový driver. Pro zpracování obrazu v FPGA je vhodné použít jasový signál s hodnotami 0 – 255. Jelikož jasová složka Y nabývá hodnoty mezi 16 – 235, předpočítal jsem jasový signál a uložil ho ve formátu intel HEX do paměti ROM, která slouží jako LUT. Vstupem je hodnota 16 – 235, výstup je již přepočítaný signál 0 – 255. Tento stream je určen pro budoucí použití – např. hledání hran v obraze nebo rozpoznávání postav.

Přepočet na RGB565 lze realizovat podle ITU-R BT.601, který převádí YCbCr na RGB888. Pro přenos signálů z digitálních kamer se standardně používají hodnoty Y [16 235] a Cb,Cr [16 240]. S tím je v přepočtu nutné počítat. Detaily převodu lze najít např. v [34].

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.164 & 0.000 & 1.596 \\ 1.164 & -0.392 & -0.813 \\ 1.164 & 2.017 & 0.000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y - 16 \\ Cb - 128 \\ Cr - 128 \end{bmatrix}. \quad (7.4)$$

7.6 Konfigurace

Konfigurační modul má na starosti parametrizaci a řízení celého systému. Jeho řídicí registry jsou mapovány na adresy BAR1 PCIe.

Jsou zde uloženy veškeré adresové offsety a nastavení kamer, které se aktualizují vždy na začátku každého snímku.

Čtení a zápis do řídicích registrů probíhá přes sběrnici Avalon memory mapped slave. Jedná se o standardní sběrnici pro komunikaci s pamětí. V minimální konfiguraci je zde potřeba hodinový signál, datový a adresový signál, vodiče pro žádost o čtení a zápis (standardně se také používají vodiče burstcount, chip select, waitrequest atd.). Pro nastavení zatím stačí šest 32bitových adres, přes které je možné konfiguraci provádět.

8. Ostatní problémy

V následujících kapitolách budou detailně rozebrány ostatní problémy spojené s vývojem firmwaru.

8.1 Detekce a hledání hran v obraze

Pro hledání a detekci hran v obraze jsem se rozhodl použít Sobelův hranový detektor, který je popsán např. v [7, 15]. Ten je založen na hledání gradientu v x-ovém a y-ovém směru. Hledání gradientu probíhá pomocí konvoluce s vhodně zvoleným konvolučním jádrem. Sobelův hranový detektor používá nejčastěji dvě jádra, viz rovnice 8.1.

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (8.1)$$

Výsledný gradient v ose x a y lze najít, pakliže se provede konvoluce obrázku s maskami podle rovnice 8.2.

$$G_x = S_x * IMG \quad G_y = S_y * IMG \quad (8.2)$$

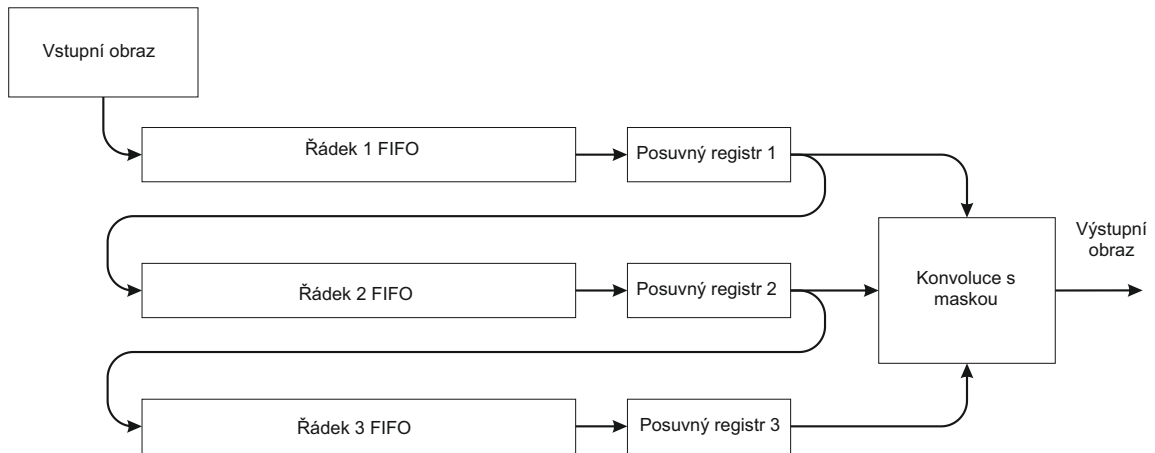
Následně je možné vypočítat velikost a směr gradientu podle rovnice 8.3.

$$\|G\| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad \varphi = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (8.3)$$

Jelikož nás nezajímá směr gradientu, ale pouze jeho velikost, použijeme pouze aproximace, které zjednoduší výpočet. Jelikož počítání odmocniny v plovoucí desetinné čárce by zabralo zbytečně moc výpočetních jednotek v FPGA, použil jsem pro výpočet pouze absolutní hodnotu podle rovnice 8.4.

$$\|G\| = |G_x| + |G_y| \quad (8.4)$$

Následně je již možné použít prahování, které zajistí odstranění chybných hran.



Obrázek 8.1: Schéma modulu pro hledání hran

Pro konvoluci je nutné pracovat se 3 řádky najednou. Proto jsem použil tři FIFO paměti, které ukládají 3 řádky. Výstup z FIFO pamětí je připojen na posuvné registry, ze kterých je již možné vybrat potřebné pixely a provést konvoluci s maskou. Výhodou tohoto uspořádání je, že jednoduchou změnou konvoluční masky je možné provádět jak detekce hran, tak filtrace obrazu.



Obrázek 8.2: Obraz po průchodu hranovým detektorem

8.2 Přiřazení pinů FPGA

Pro správnou komunikaci kamer je nutné přiřadit pinům odpovídající vstupy FPGA. To se provádí buď manuálně v pinout manageru nebo pomocí tcl skriptů. Aby bylo možné projekt jednoduše modifikovat, rozhodl jsem se napsat přiřazení pro všechny piny ručně,

```
set_instance_assignment -name IO_STANDARD "LVDS" -to tamron_clk_in_clk
set_instance_assignment -name INPUT_TERMINATION "Differential" -to tamron_clk_in_clk
set_instance_assignment -name INPUT_TERMINATION "Differential" -to tamron_clk_in_clk(n)
```

8.3 Inicializace interních pamětí v FPGA

V jazyce C jsem napsal kód, který generuje inicializační soubory v hexadecimálním formátu pro interní RAM/ROM v FPGA. Tento kód jsem vždy modifikoval pro jednotlivé RAM/ROM. Inicializační soubory jsou dle formátu Intel HEX který je detailně pospaný v [36].

```
FILE *fptr;
fptr = fopen("./LUT.hex","w");
if(fptr == NULL)
{
    printf("Error!");
    return -1;
}
int ind;
unsigned char buf[6];

for (ind = 16; ind < 236; ind++){
    buf[0] = 0x01;
    buf[1] = 0x00;
    buf[2] = ind;
    buf[3] = 0x00;
    buf[4] = round((255.0/219.0)*((double) ind - 16.0));
    buf[5] = ~(buf[0] + buf[1] + buf[2] + buf[3]+buf[4])+1;

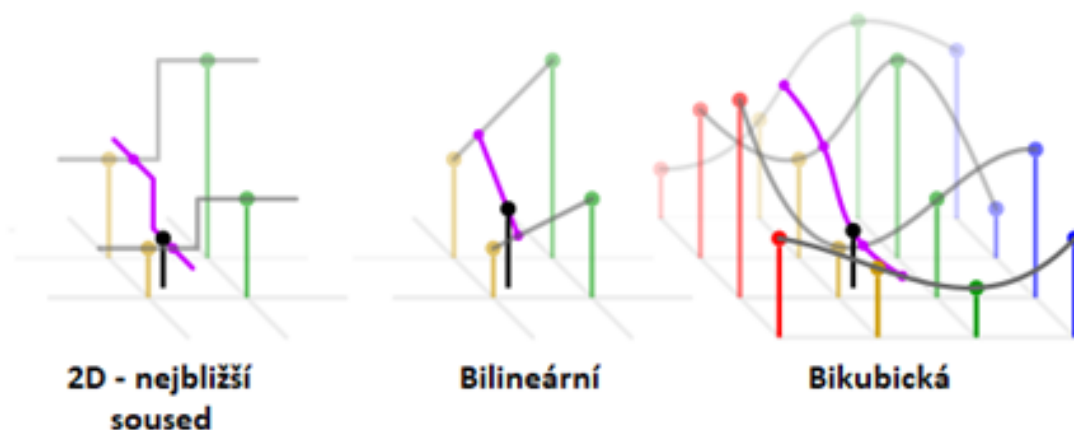
    printf("Prvni %d druhy %d \n",ind , buf[4]);

    fprintf(fptr,":%02X%02X%02X%02X%02X%02X\n",buf[0], buf[1], buf[2], buf[3], buf[4], buf[5]);
}

fprintf(fptr,":00000001FF");
fclose(fptr);
}
```

8.4 Super resolution

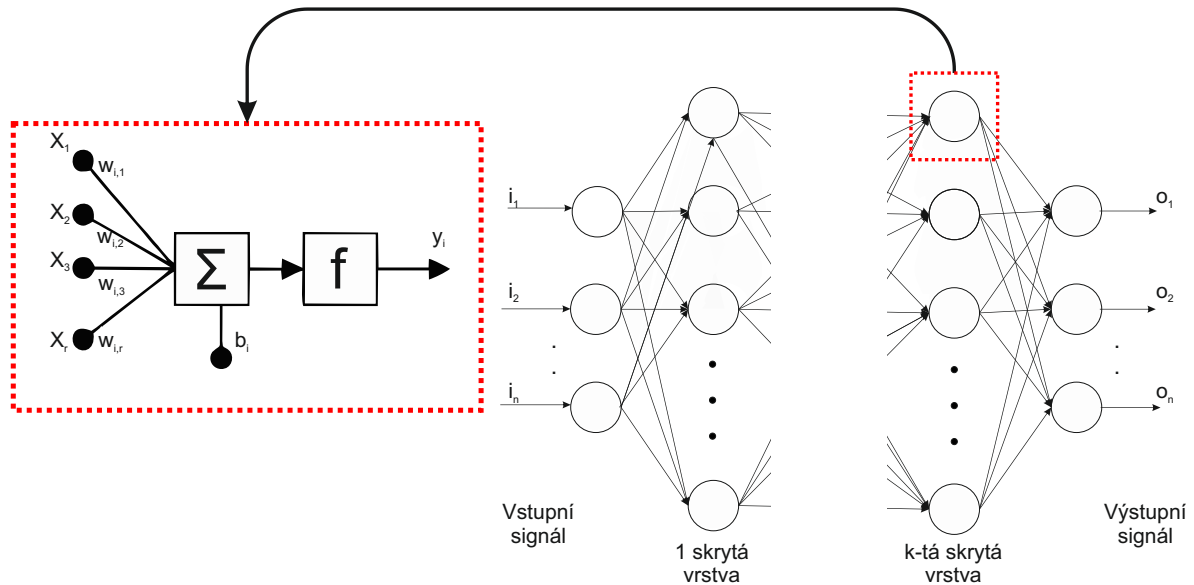
Super resolution (SR) je označení pro obrázky s velkým rozlišením. Standardně je lze získat třemi metodami: nejbližší sused, bilineární aproximace a bikubická aproximace. Princip je zřejmý z obr. 8.3. Metoda nejbližší sused používá pro aproximaci jasů pixelů hodnoty okolních pixelů. Dosahuje tedy nejhorších výsledků. Bilineární metoda používá pro aproximaci 4 nejbližší pixely. Jasová informace dvou sousedních pixelů se proloží lineární funkcí, což vede ke vzniku dvou přímk. Třetí přímka pak spojí obě dvě tak, aby procházela novým aproximovaným pixelem. Poslední metoda je bikubická aproximace. Ta používá k aproximaci 16 pixelů. Každé 4 pixely v řadě se spojí bikubickým polynomem, to vede ke vzniku 4 křivek v jasovém prostoru. Následně se provede poslední aproximace, která aproximuje jasovou hodnotu pixelu v bodě (x,y) .



Obrázek 8.3: Princip aproximací nejbližší sused, bilineární aproximace a bikubická aproximace

Další metody, které se v poslední době používají, jsou založeny na deep learningových metodách. Já jsem si vybral metodu "Super resolution convolution neural network" (SRCNN), která používá konvolučních neuronových sítí [9, 10].

Základní stavební jednotkou neuronových sítí je neuron. Do něho vede několik spojení s různými váhami. Každý vstupní signál se vynásobí příslušnou váhou a sečte se s ostatními vstupy. K takto vzniklému signálu se přičte offset, který je specifický pro každý neuron. Výsledný signál pak slouží jako argument výstupní funkce (aktivační funkce). Jako aktivační funkce se používají například jednotková funkce, ReLU funkce, ArcTan aj. Výstupní signál z neuronu je pak použit jako vstup pro další neuron.



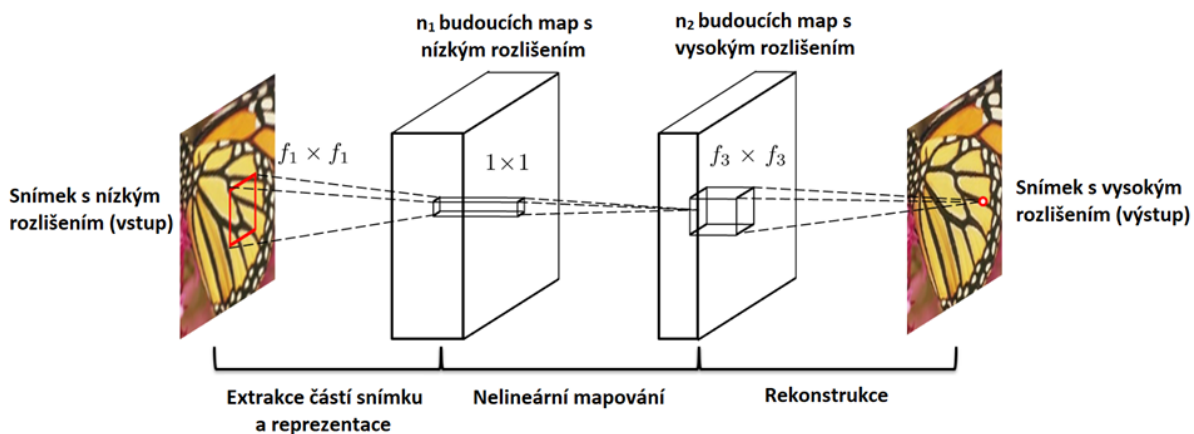
Obrázek 8.4: Princip neuronových sítí [1]

Standardně se používá uspořádání v konfiguraci tzv. fully connected layer, to znamená, že každý neuron je připojen ke všem vstupním signálům v předcházející vrstvě. Kdyby se použil obrázek s rozlišením 1920x1080, bylo by nutné pro jeden neuron použít 1920x1080+1 parametrů (při použití 32 bitového čísla jako váha by bylo potřeba použít více než 8 MB paměti). Jestliže by se použila síť s několika stovkami až tisíci neuronů, byla by taková úloha velice náročná na paměť. Proto se v metodách zpracování obrazu používají konvoluční neuronové sítě. Ty na rozdíl od fully connected layers používají masku vstupů (např. 5x5), kdy jeden neuron potřebuje pouze 25 + 1 vah. Následně se provede konvoluce obrazu s maskou (vstupy neuronu), jejíž výstup je opět obraz. Použití konvolučních sítí ve zpracování obrazu vede k velké úspoře paměti.

Metoda SRCNN je založena na bikubické aproximaci, která zvýší rozlišení obrazu. Dále je použita konvoluční neuronová síť, která má zlepšit výslednou aproximaci. V první vrstvě je použito N_1 neuronů. Po konvoluci každého neuronu vznikne N_1 obrazů. Výsledné obrazy jsou připojeny k další vrstvě, kde je použito N_2 neuronů. Následuje poslední vrstva, která má již pouze 1 neuron, který vytváří výsledný obraz. U této metody je možné volit několik parametrů:

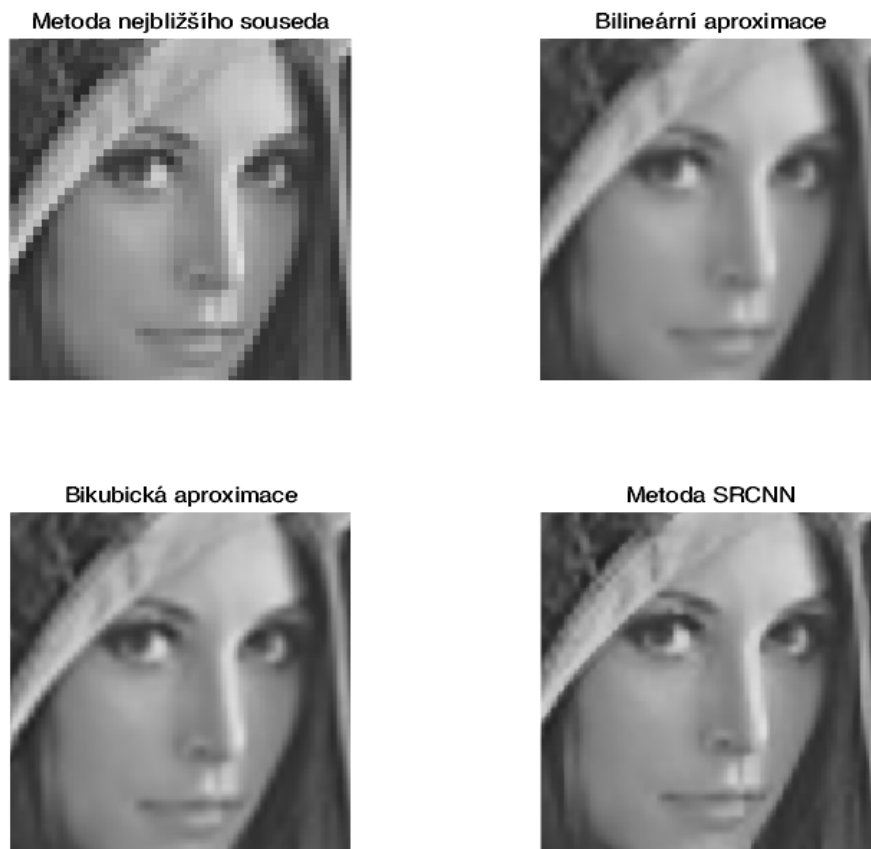
- Velikost vstupní masky $f_1 \times f_1$
- N_1 neuronů v první vrstvě
- Velikost druhé konvoluční masky $f_2 \times f_2$
- N_2 neuronů v druhé vrstvě
- Velikost třetí konvoluční masky $f_3 \times f_3$

Pro SRCNN se často používá uspořádání kde $N_1 = 64$ a $N_2 = 32$. Dále se používá označení pro velikost masek, např. SRCNN 9-1-5, kde čísla označují velikost masky f_1, f_2 a f_3 .



Obrázek 8.5: Princip metody SRCNN [9]

Nevýhodou této metody pro implementaci v FPGA je její velká náročnost na interní paměť. Pro konvoluční neuronovou síť je nutné používat několik řádkových bufferů jako u hranového detektoru. Pro SRCNN 9-1-5 bychom potřebovali 9 FIFO pamětí pro vstupní vrstvu, 0 FIFO pamětí pro první vrstvu a $32 \times 5 = 160$ FIFO pro druhou vrstvu. Také by bylo potřeba $9 \times 9 \times 64 + 64 + 1 \times 1 \times 64 \times 32 + 32 + 5 \times 5 \times 32 + 1 = 8129$ parametrů v plovoucí desetinné čárce. Pro implementaci v FPGA je tedy tento algoritmus nevhodný. Navíc v knihovně Qt, ve které je aplikace napsána, je možné použít funkci pro zvětšení rozlišení obrazu. Proto jsem se po dohodě s vedoucím práce rozhodl SR neimplementovat.



Obrázek 8.6: Porovnání čtyř metod použitých pro SR

8.5 Konfigurace FPGA po PCIe

Aby bylo možné měnit nastavení registrů a interní RAM FPGA, např. změnu obsahu LUT tabulek, bylo nutné vytvořit třídu *PciReadWrite* v C++, která bude mít na starosti konfiguraci FPGA. Pro tvorbu *PciReadWrite* jsem vyšel z kódu, který je dostupný na Altera fóru [14]. V konstruktoru *PciReadWrite* je potřeba předat PCIe slot a BAR, který je použitý pro komunikaci. Následně se otevře systémový soubor, který slouží pro komunikaci se zařízením

```
device->fd = open(device->filename, O_RDWR | O_SYNC);
```

V dalším kroku se uloží velikost souboru daná nejvyšší adresou v FPGA, na kterou můžeme přistupovat přes BAR. Tuto adresu zjistíme pomocí funkce

```
status = fstat(device->fd, &statbuf);
device->size = statbuf.st_size;
```

Pokud všechny operace proběhly úspěšně, je možné zařízení namapovat do virtuální paměti I.MX6 následující funkcí

```
device->maddr = (unsigned char *)mmap(NULL, (size_t)(device->size), PROT_READ | PROT_WRITE,
MAP_SHARED, device->fd, 0); \noindent
```

Následně je možné implementovat funkce pro čtení a zápis dat z/do FPGA např. takto

```
void PciReadWrite::write_8(unsigned int addr, unsigned char data){
    *(volatile unsigned char *) (dev.addr + addr) = data;
    msync((void *) (dev.addr + addr), 1, MS_SYNC | MS_INVALIDATE);
}
unsigned char PciReadWrite::read_8(unsigned int addr){
    return *(volatile unsigned char *) (dev.addr + addr);
}
```

Funkce *msync()* je použita pro vynucení zápisu dat do FPGA. Po vytvoření třídy *PciReadWrite* bylo nutné vytvořit další třídu *FpgaSettings*, která se bude starat o zápis/čtení konkrétních dat. V konstruktoru *FpgaSettings* se vytvoří instance třídy starající se o komunikaci

```
char device[] = "01:00.0";
pciBar2 = new PciReadWrite(device, 2);
```

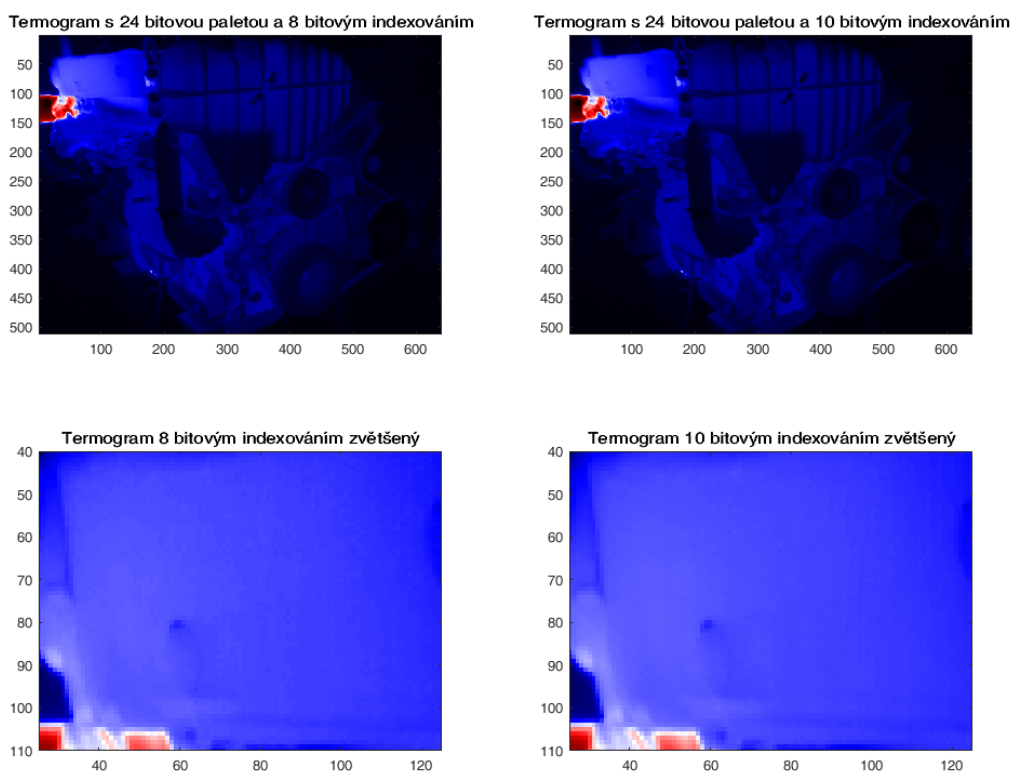
V posledním kroku jsem implementoval jednotlivé funkce, které zapisují/čtou požadovaná data. Např. funkce *setStartStream* zapínající obrazový stream je implementována následovně

```
void FpgaSettings::setStartStream(bool setStream){
    if (!pciBar2->ok) {
        return;
    }
    pciBar2->readInt(SETTINGS_ADDR, &readSettings, 1);
    qDebug() << "FpgaSettings::setStartStream(): Read readSettings " << std::hex << readSettings;
    if(setStream){
        readSettings = (readSettings & ~START_STREAM_M) | (1);
    }else{
        readSettings = (readSettings & ~START_STREAM_M) | (0);
    }
    qDebug() << "FpgaSettings::setStartStream(): Write readSettings " << std::hex << readSettings;
    pciBar2->writeInt(SETTINGS_ADDR, &readSettings, 1);
}
```

8.6 Vícebitové palety

V metodách zpracování obrazu se palety používají pro obarvení černobílého obrazu. Každý pixel má uloženou hodnotu, nejčastěji 0 - 255 pro 8 bitový index, 0 - 1023 pro 10 bitový index a 0 - 65535 pro 16 bitový index. Index odkazuje na pozici v tabulce palet. Paletu lze chápat jako indexovanou tabulku, kde pro každý vstup existuje jedna uspořádaná trojice, která reprezentuje barvu daného pixelu. Data v paletě jsou nejčastěji ve formátu RGB888 – označení pro 24 bitovou paletu.

Je tedy možné měnit jak bitovou hloubku indexu, tak hloubku palety, např. 16 bitová paleta znamená formát RGB565. Na obr. 8.7 je možné porovnat vliv hloubky indexu na výsledný termogram. Je vidět, že hloubka indexu nemá na termogram prakticky žádný vliv. Při několikanásobném zvětšení je možné pozorovat drobné odchylky, které z globálního hlediska nejsou pozorovatelné.



Obrázek 8.7: Porovnání 8 a 10 bitového indexování

8.7 Fúze obrazů

Obrazová fúze je označení pro spojení dvou snímků do sebe. Abychom mohli fúzi provést, je potřeba vyřešit paralaxu mezi oběma kamerami. Proto je nutné najít transformační matici, která umožní transformovat jeden obrázek na druhý. Tato transformace se jmenuje projektivní lineární transformace – homografie. Homografie je transformace mezi dvěma perspektivami, ve kterých jsou přímky mapovány opět na přímky. Matematicky lze zapsat jako

$$\lambda x = \mathbf{H}x', \quad (8.5)$$

kde \mathbf{H} je matice homografie, λ je parametr škála, x a x' jsou homogenní souřadnice definované jako

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad x' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8.6)$$

Celý problém se tak redukuje na hledání minimálně 4 korespondujících bodů ve dvou obrázcích. Pro nalezení alespoň 4 bodů se používají různé kalibrační obrazce. Já jsem si vybral obrazec Kruhová mřížka. Po vyfocení kalibračního obrazce oběma kamerami jsem provedl filtraci a prahování snímků tak, aby bylo možné snadno najít kalibrační mřížku. Následně jsem našel matici homografie a obrazy překryl přes sebe. Po několika testech jsem zjistil, že obrazy se od sebe svojí perspektivou velice liší (v závislosti na objektivu a vzdálenosti od kamery), přestože jsou kamery středově zarovnané a vzdálenostně asi 7 cm od sebe. Rozhodl jsem, že fúzi budu realizovat softwarově v I.MX6 pomocí knihovny OpenCV.

Nejprve jsem použil funkce pro prahování a filtraci obrazu. Následně jsem parametrizoval "blob detektor", který hledá anomálie v obraze. Pak už bylo možné vyhledat kalibrační obrazec. Vše je realizováno následujícím kódem.

```
/* Filter Image*/
medianBlur ( imageThermo, imageThermo, 3 );
cv::threshold(imageThermo,imageThermo,50,255,THRESH_BINARY_INV);

/*Create blob detector*/
SimpleBlobDetector::Params params;
params.maxArea = 1e8;
params.minArea = 5;
params.filterByColor = true;
params.blobColor = 0;
params.minDistBetweenBlobs = 10;
Ptr<cv::FeatureDetector> blobDetector_T = cv::SimpleBlobDetector::create(params);

/* Find pattern */
bool found = findCirclesGrid(imageThermo, patternsize, centers1,CALIB_CB_ASYMMETRIC_GRID, blobDetector_T);
drawChessboardCorners(imageThermo, patternsize, Mat(centers1), found);
```

Po nalezení Kalibračního obrazce v termogramu je nutné aplikovat tuto metodu znovu na viditelný obraz. Po nalezení obou kalibračních obrazců jsem vypočítal matici homografie následující funkcí.

```
Mat h = findHomography(centers2,centers1 ) ;
// Warp source image to destination based on homography
warpPerspective(image_visible, im_out,h , imageThermo.size());
```

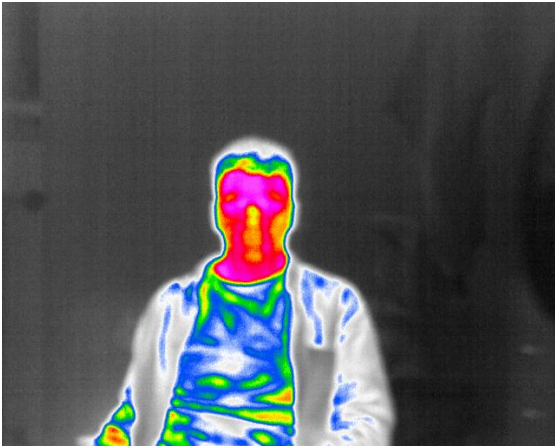
Poté bylo možné provést homografii a transformovat viditelný obraz do termogramu. Výsledné zobrazení jsem realizoval třemi metodami:

- Blending
- Thermal visible sharpening
- Picture in Picture

Blending je metoda založená na součtu obou snímků, kde každý snímek je vynásobený poměrovým koeficientem, který značí sílu zastoupení v obraze.

Picture in Picture používá alfa kanál pro viditelný obraz.

Thermal visible sharpening na místo viditelného obrazu používá obraz prošlý hranovým detektorem, který ve viditelném obraze najde hrany a promítne je do termogramu. Cílem této metody je zlepšit ostrost termogramu.



Obrázek 8.8: Termogram obarvený paletou



Obrázek 8.9: Viditelný obraz



Obrázek 8.10: Metoda Picture in Picture



Obrázek 8.11: Metoda blending

8.8 Návrh dalšího postupu

Některé algoritmy v této práci jsem řešil s ohledem na úsporu použitých zdrojů, zejména počtu logických jednotek v FPGA, úsporu interní paměti FPGA a propustnost externí RAM. V dalších krocích bych implementoval a otestoval následující vylepšení:

- Průměrování více snímků 3, 4, 5
- Testování různých algoritmů pro zvýšení kontrastu v termogramu
- Vyzkoušení různých variant nelineárního zobrazení
- Vyzkoušení algoritmu pro jádra s vyšším rozlišením

9. Závěr

V teoretické části práce jsou popsány principy detekce IR záření. Zvláštní pozornost jsem věnoval jednotlivým typům IR detektorů. U bolometrických senzorů jsem podrobně rozebral principy kalibrace a korekce obrazu. Nakonec jsem zařadil i krátký přehled termografických systémů.

V praktické části jsem popsal hardware a software použitý pro vývoj firmwaru FPGA. Následně jsem rozebral mnou implementované algoritmy pro zpracování obrazu. Nad rámec zadání práce jsem realizoval API, pomocí kterého lze konfigurovat jednotlivé algoritmy z aplikace I.MX6. Kromě toho jsem pro každý mnou napsaný modul vytvořil instanci v programu QSys, který umožňuje propojení modulů a vytvoření uceleného projektu, který lze do FPGA nahrát.

Literatura

- [1] AARSHAY, J.: Fundamentals of Deep Learning - Starting with Artificial Neural Network. 2016.
URL <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2016/03/introduction-deep-learning-fundamentals-neural-networks/>
- [2] ALTERA: PCI Express Avalon-MM High-Performance DMA Reference Design.
URL <https://www.altera.com/support/support-resources/software/download/refdesigns/ip/interface/dnl-pciexpress-hp-avalonmm.html>
- [3] ALTERA: PCI Express (PCIE) IP Core Resource Center.
URL <https://www.altera.com/support/support-resources/intellectual-property/interface-protocols/pci-express/ips-inp-pcie.html>
- [4] ALTERA: User Guide IP Compiler for PCI Express IP. 2014.
URL https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/ug/ug_pci_express.pdf
- [5] Bass, M.; Mahajan, V. N.; Van Stryland, E. W.: *Handbook of optics. Volume II, Design, fabrication and testing, sources and detectors, radiometry and photometry*. McGraw-Hill, 2010, ISBN 0071629270.
- [6] Brown Eric: Linux-ready COM mates an i.MX6 SoC with an FPGA.
URL <http://linuxgizmos.com/linux-ready-com-mates-an-i-mx6-soc-with-an-fpga/>
- [7] Chaple, G.; Daruwala, R. D.: Design of Sobel operator based image edge detection algorithm on FPGA. In *2014 International Conference on Communication and Signal Processing*, IEEE, apr 2014, ISBN 978-1-4799-3358-7, s. 788–792, doi:10.1109/ICCSP.2014.6949951.
- [8] Daniels, A.: *Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs*. Society of Photo Optical, 2010, ISBN 0819480800, 173 s.

- [9] Dong, C.; Loy, C. C.; He, K.; aj.: Learning a Deep Convolutional Network for Image Super-Resolution.
URL http://personal.ie.cuhk.edu.hk/~ccloy/files/eccv_2014_deepresolution.pdf
- [10] Dong, C.; Loy, C. C.; He, K.; aj.: Image Super-Resolution Using Deep Convolutional Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, ročník 38, č. 2, feb 2016: s. 295–307, ISSN 0162-8828, doi:10.1109/TPAMI.2015.2439281.
- [11] Fischer, J.: *Optoelektronické senzory a videometrie*. Vydavatelství CVUT, první vydání, 2002, ISBN 800102525X.
- [12] FLIR: How is NEDT measured?
URL http://flir.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/128/~how-is-nedt-measured%3F
- [13] Foote, M. C.: Temperature stabilization requirements for unchopped thermal detectors. International Society for Optics and Photonics, 1999.
- [14] forum, A.: Pci debug.
URL <http://www.alteraforum.com/forum/showthread.php?t=35678>
- [15] Guo, Z.; Xu, W.; Chai, Z.: Image Edge Detection Based on FPGA. In *2010 Ninth International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science*, IEEE, aug 2010, ISBN 978-1-4244-7539-1, s. 169–171, doi:10.1109/DCABES.2010.39.
- [16] Ing. Pech, J.; Zahradník Csc., I. P.: Mikrobolometrické obrazové snímače. *Elektrorevue*, ročník 15, 2003.
- [17] INO: Uncooled Microbolometer Detector - LWIR, VLWIR, THz.
URL <https://www.ino.ca/en/products/uncooled-microbolometer-384-x-288-fpa/>
- [18] Leonardo DRS: Thermal Detectors & Sensors — Cooled & Uncooled — DRS Infrared.
URL <http://www.drsinfrared.com/Products/ThermalDetectors.aspx>
- [19] Leonardo DRS, E.-O. & I. S.: *LEONARDO DRS' PATENTED SENSOR TECHNOLOGY REVEALED Back to Basics - Asking the Pivotal Question*. 2015.
URL http://www.leonardodrs.com/media/4752/201503advanced_microbolometer_design_wp_mr-2015-04-688.pdf
- [20] NATO: STANAG 4349, NATO STANDARDIZATION AGREEMENT: MEASUREMENT OF THE MINIMUM RESOLVABLE TEMPERATURE DIFFERENCE OF THERMAL CAMERAS (09-AUG-1995). 1995.

- [21] Olšák, P.: Základní radiometrické veličiny.
URL <http://petr.olsak.net/ftp/olsak/grafika/svetlo.pdf>
- [22] OPTO ENGINEERING: Introduction to infrared vision.
URL <https://www.opto-engineering.com/resources/infrared-theory>
- [23] Parrish, W. J.; Woolaway, J. T.: Method and Circuitry for Correcting Temperature-Induced Errors in Microbolometer Focal Plane Array. may 2000.
- [24] Razeghi, M.: Current status and future trends of infrared detectors. *Opto-Electronics Review*, 1998: s. 155–194.
- [25] Rogalski, A.: Infrared detectors: an overview. *Infrared Physics & Technology*, ročník 43, č. 3-5, 2002: s. 187–210.
- [26] Rogalski, A.: *Infrared Detectors*. Taylor & Francis Inc, 2010, ISBN 9781420076714, 898 s.
- [27] Rogalski, A.; Chrzanowski, K.: INFRARED DEVICES AND TECHNIQUES (REVISION). *METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS*, ročník 21, 2014: s. 565–618.
- [28] Sensors Unlimited: Why SWIR?
URL <https://www.photonicsonline.com/doc/why-swir-0001>
- [29] SOFRADIR: Understanding Infrared Camera Thermal Image Quality.
URL <http://www.sofradir-ec.com/media/wp-understanding-tiq-v06-web.pdf>
- [30] Sova, J.: Bezdotykové měření teplotních polí II. *Aldebaran bulletin*, ročník 15, č. 19, 2017.
- [31] Tamron: Intelligent Compact Module. 2018.
URL <http://www.tamron.eu/industrial-optics/products/intelligent-compact-module/>
- [32] Teax: Camera cores — ThermalCapture - Thermal Imaging Technology.
URL <http://thermalcapture.com/category/products/cameracores/>
- [33] Tissot, J.; Trouilleau, C.; Fieque, B.; aj.: Uncooled microbolometer detector: recent developments at ULIS. *Opto-Electronics Review*, ročník 14, č. 1, jan 2006, ISSN 1896-3757, doi:10.2478/s11772-006-0004-2.
- [34] Vijaya, R.; Reddy, K.; Prudvi, K.; aj.: Grey level to RGB using YCbCr color space Technique. *International Journal of Computer Applications*, ročník 147, č. 7, 2016: s. 975–8887.

URL [https:](https://www.ijcaonline.org/archives/volume147/number7/reddy-2016-ijca-911180.pdf)

[//www.ijcaonline.org/archives/volume147/number7/reddy-2016-ijca-911180.pdf](https://www.ijcaonline.org/archives/volume147/number7/reddy-2016-ijca-911180.pdf)

[35] Vollmer, M.; Mollmann, K.-P.: *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, druhé vydání, 2018, ISBN 978-3-527-41351-5, 794 s.

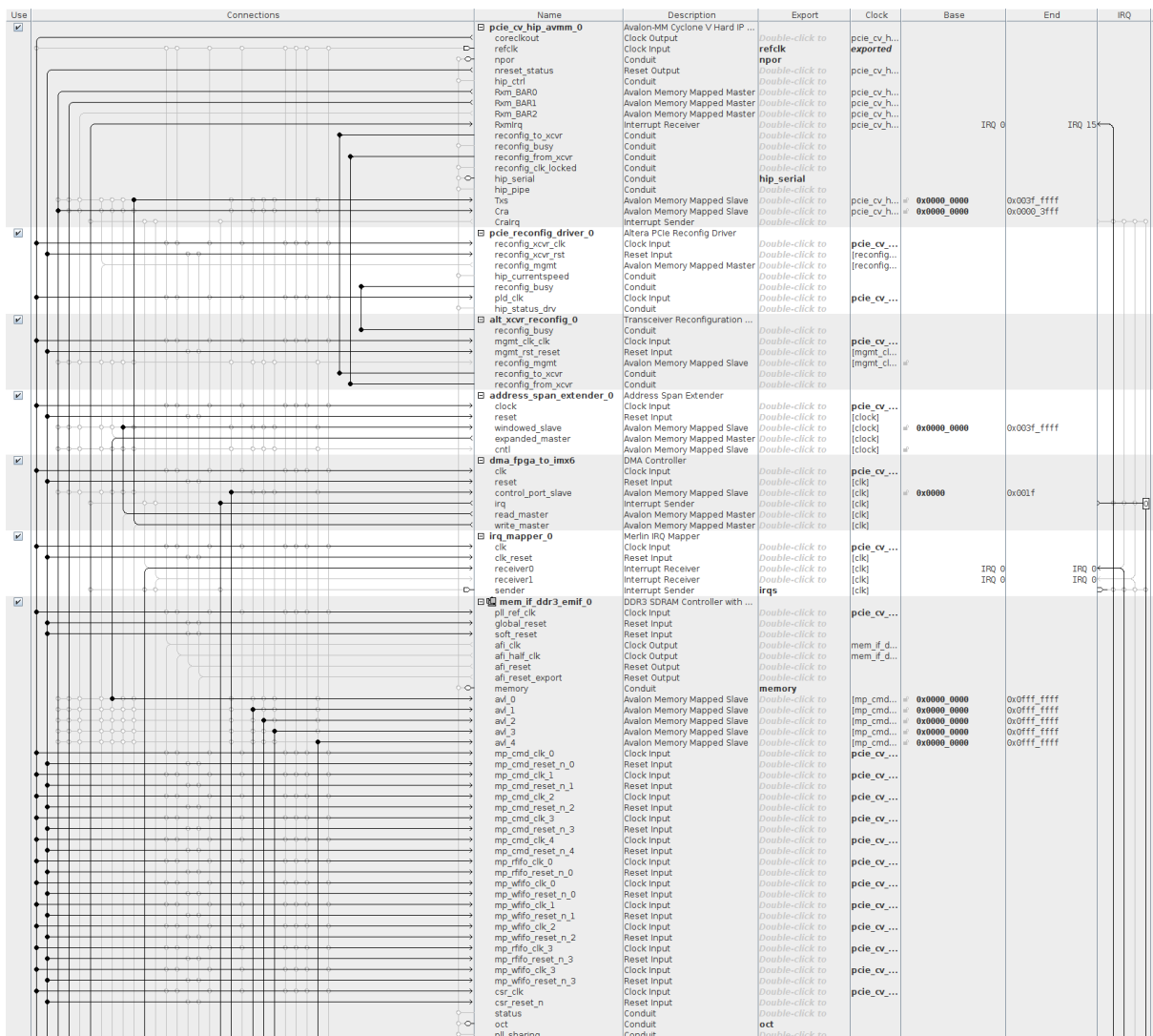
[36] Wikipedia: Intel HEX.

URL https://en.wikipedia.org/wiki/Intel_HEX

[37] Xenics: HOW IS NETD MEASURED?

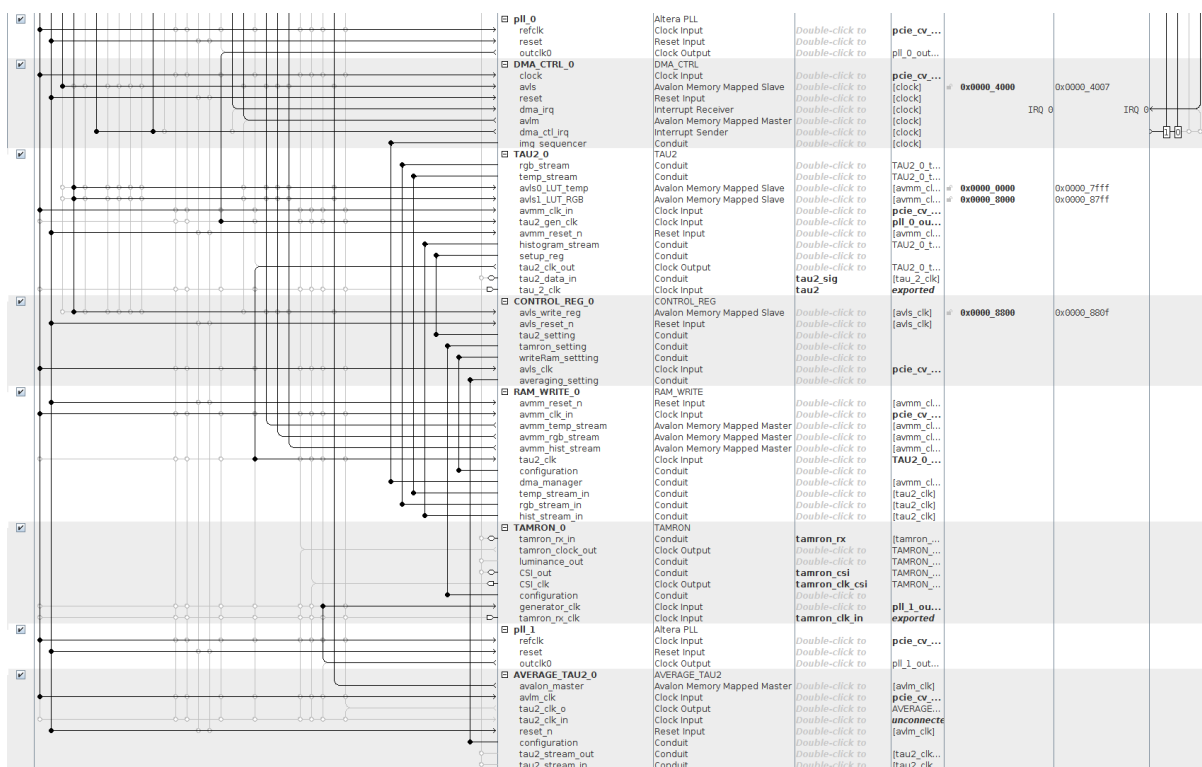
URL <http://www.xenics.com/en/faq/how-netd-measured>

A. Obrazová příloha



Obrázek A.1: Schéma zapojení všech modulů v QSys (a)

PŘÍLOHA A. OBRAZOVÁ PŘÍLOHA



Obrázek A.2: Schéma zapojení všech modulů v QSys (b)



Obrázek A.3: Obrazová fúze kalibračních obrazců

B. Obsah příloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy:

- Diplomová práce v elektronické podobě
- Zdrojový kód diplomové práce v jazyce latex
- Firmware pro FPGA v jazyce verilog
- Matlabovské skripty, které generují některé obrázky
- Vektorové obrázky vytvořené v programu Corel
- Zdrojové kódy v C/C++