



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KAMERA PRO APLIKACE V BIOLOGII

CAMERA FOR BIOLOGICAL APPLICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Jurák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

BRNO 2017



Diplomová práce

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

Student: Bc. Petr Jurák

ID: 144850

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Kamera pro aplikace v biologii

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Pro termální kameru s vysokým rozlišením realizovanou na bázi Xilinx Zynq navrhnete IP bloky nutné pro obsluhu obrazového senzoru, regulaci teploty senzoru a komunikaci s AD převodníky. Bloky navrhnete v jazyku VHDL a v prostředí Vivado Design Suite. Vytvořte jednoduché programy v jazyku C, kterými ověříte funkčnost jednotlivých bloků. Navržené bloky integrujte do stávajícího systému kamer firmy PSI a ověřte funkčnost celého zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] OHTA, Jun. Smart CMOS image sensors and applications. Boca Raton: CRC Press, c2008. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 129. ISBN 0849336813.

[2] KURODA, Takao. Essential principles of image sensors. S.l.: Apple Academic Press Inc, 2014. ISBN 1482220059.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 16.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubiček, Ph.D.

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem IP bloků pro termokameru. Tato termokamera je určena pro zkoumání rostlin. Hlavní součástí termokamery je detektor infračerveného záření, který snímá frekvence v rozsahu 8 – 14 μm . Získaný analogový signál je upraven a následně digitalizován. Součástí detektoru je také Peltierův článek, který je určen jak pro chlazení detektoru, tak pro zahřívání a je řízen externím signálem. Vývojová deska MicroZed implementuje IP bloky. Termokamera je navržena tak, mohla být řízena z desky MicroZed. Rozbor zařízení je nejprve popsán od teoretické části až po návrh IP bloků.

KLÍČOVÁ SLOVA

termokamera, termografie, infračervené záření, IR detektor, Peltierův článek, VHDL, MicroZed, PID

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the design of IP blocks for thermal camera. This thermal camera is intended for plant research. The main part of the thermal camera is an infrared detector that detects a frequency in the range of 8 – 14 μm . The analogue signal obtained is modified and subsequently digitized. The detector also includes a Peltier device which is designed for both detector cooling and heating, and is controlled by an external signal. The MicroZed development board implements IP blocks. The thermal camera is designed to be controlled from the MicroZed board. Device analysis is first described from the theoretical part to the design of IP blocks.

KEYWORDS

thermal camera, thermography, infrared, IR detector, Peltier device, VHDL, MicroZed, PID

JURÁK, P. *Kamera pro aplikace v biologii*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 34 s., 0 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Michal Kubiček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Kamera pro aplikace v biologii jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému odbornému konzultantovi z firmy Photon Systems Instruments Ing. Tomáši Ratajovy, za pomoc a praktické rady při návrhu IP bloků.



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Seznam obrázků	x
Úvod	1
1 Elektromagnetické záření	2
1.1 Elektromagnetické spektrum	2
1.2 Infračervené záření	3
1.2.1 Objev infračerveného záření	3
1.2.2 Charakteristika infračerveného záření	4
1.2.3 Emise infračerveného záření, absolutně černé těleso	4
1.2.4 Chování infračerveného záření v prostředí	6
1.2.5 Dělení infračerveného záření	7
2 Termografie	8
2.1 Termovize	9
2.2 Využití termografie v praxi	11
2.3 Detektory infračerveného záření	13
2.3.1 Intrinsické detektory	13
2.3.2 Extrinsické detektory	13
2.3.3 QWIP	14
2.3.4 Termoelektrické detektory	14
2.3.5 Pyrometry	14
2.3.6 Bolometry	14
2.3.7 Mikrobolometry	15
2.4 Termoelektrické chlazení	16
2.4.1 Peltierův jev	17
3 Návrh ip bloků	19
3.1 Popis desky MicroZed	19
3.2 Vývojové prostředí Vivado	19
3.2.1 Popis AXI4	20
3.3 Řízení detektoru BIRD17-XGA	22
3.3.1 Blok FSYNC_generator	24
3.3.2 Komunikace s detektorem	25

3.4	Řízení A/D převodníku pro videosignál	26
3.4.1	Blok ADC_video	27
3.5	Regulace teploty detektoru	29
3.5.1	Blok ADC_diode	30
3.5.2	Blok PSD_regulator	31
3.5.3	Blok PWM_generator	33
4	Závěr	34
	Literatura	35
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	37

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Šíření elektromagnetického pole [2]	2
Obrázek 1.2: Elektromagnetické spektrum [3]	2
Obrázek 1.3: Zahřáté teploměry podle jednotlivých složek spektra [5]	3
Obrázek 1.4: Použitelná IR pásma [7]	4
Obrázek 1.5: Teplotní závislost vyzařování absolutně černého tělesa [8].....	5
Obrázek 1.6: Energetická rovnováha objektu [7]	6
Obrázek 1.7: Rozdělení IR spektra [11]	7
Obrázek 2.1: Odražená energie vytvoří na skle obraz [6]	10
Obrázek 2.2: Zobrazení předešle situace ve viditelném spektru [6].....	10
Obrázek 2.3: Testování teploty rostliny při rostoucí slanosti půdy	11
Obrázek 2.4: Zateplený a nezateplený panelový dům [8]	11
Obrázek 2.5: Rozložení teplot na DPS [8].....	12
Obrázek 2.6: Zobrazení člověka v IR spektru [16].....	12
Obrázek 2.7: Rozdělení IR detektorů	13
Obrázek 2.8: Provedení bolometru [8]	15
Obrázek 2.9: Provedení mikrobolometru [20].....	15
Obrázek 2.10: Seebeckův jev.....	16
Obrázek 2.11: Thomsonův jev [22]	17
Obrázek 2.12: Peltierův jev	17
Obrázek 2.13: Zapojení polovodiče P a N, spojovací můstek [23]	18
Obrázek 2.14: Peltierův článek [24]	18
Obrázek 3.1: Deska MicroZed [31]	19
Obrázek 3.2: AXI4, událost read	21
Obrázek 3.3: AXI4, událost write	21
Obrázek 3.4: Detektor Bird XGA [25]	22
Obrázek 3.5: Znázornění signálů F_SYNC, V_SYNC a H_SYNC [25].....	23
Obrázek 3.6: Znázornění výstupních video signálů [25].....	23
Obrázek 3.7: Spouštění snímání pomocí F_SYNC [25].....	24
Obrázek 3.8: Simulace signálu F_SYNC	25
Obrázek 3.9: F_SYNC měřený osciloskopem.....	25

Obrázek 3.10: Vyčítání dat pomocí CLK [27]	27
Obrázek 3.11: Časové okno umožňující vyčítat data [27].....	27
Obrázek 3.12: Simulace signálů CLK \pm a CNV \pm	28
Obrázek 3.13: CNV \pm měřené osciloskopem	29
Obrázek 3.14: Časování signálů CS, SCLK a SDATA [28]	30
Obrázek 3.15: Simulace signálů CS a SCLK	30
Obrázek 3.16: CS a SCLK měřené osciloskopem	31
Obrázek 3.17: Simulace sériově-paralelního převodníku.....	31
Obrázek 3.18: Nastavení hodnot složek P, I a D [29].....	32

ÚVOD

Lidské oko je schopné vnímat pouze velmi úzkou oblast elektromagnetické energie, tuto oblast nazýváme viditelné světlo a nachází se v rozsahu přibližně 390 nm až 790 nm. Toto ale není jediné záření, které se kolem nás vyskytuje. Mezi další existující záření patří infračervené záření, které dokážeme vnímat pouze jako teplo vyzařované různými objekty.

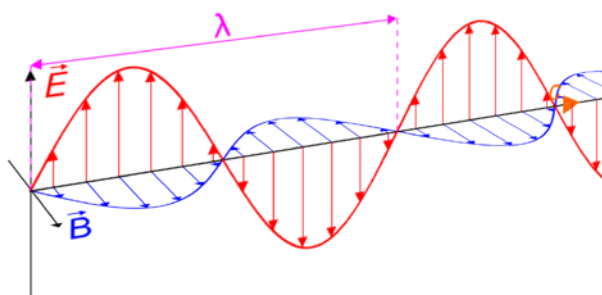
Infračervené záření je lidskému oku neviditelné a často je považováno za „tepelné záření“, avšak faktem je, že povrchy těles zahřívá absorpce jakéhokoliv elektromagnetického záření. Infračerveného záření je možné pozorovat pomocí speciálních kamer, tzv. termokamer, které mají snímače citlivé na infračervené záření.

Termokamera, je zařízení využívající IR záření k zobrazení rozložení teplotního pole na povrchu pozorovaných předmětů v infračervené oblasti spektra. Může tak například odhalit úniky tepla z domů a jiných budov. Výhodou je právě bezdotykové měření teploty, takže nedochází k ovlivnění měřeného objektu měřícím přístrojem, na rozdíl od kontaktních metod. Využití termovize je nejčastěji ve stavebnictví, kde pomocí termovize lze odhalovat úniky tepla. V průmyslu pomáhá termovize odhalovat závady v elektro rozvodech nebo zjišťuje vady výrobků. Dále lze využít termovizi v lékařství, vědě a výzkumu nebo v armádě.

Cílem této diplomové práce je navrhnout IP bloky nutné pro obsluhu obrazového senzoru, regulaci teploty senzoru a komunikaci a AD převodníky. Termokamera má sloužit pro vědecké účely při zkoumání rostlin. Zkoumá se např. teplota povrchu listů, pro posouzení vodivosti průduchů a transparence nad povrchem rostlin. Termokamera je vyvíjena ve firmě Foton Systém Instruments.

1 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ

Elektromagnetické záření je vlnění, složené z elektrického a magnetického pole. Obě složky jsou vzájemně i na směr pohybu vlny kolmé. Toto záření má tzv. duální charakter, tzn., že za určitých podmínek se projevuje jako vlna, za jiných jako částice. Základním parametrem elektromagnetického záření je jeho frekvence, případně vlnová délka (Obrázek 1.1). Mezi těmito veličinami je nepřímá úměra.



Obrázek 1.1: Šíření elektromagnetického pole [2]

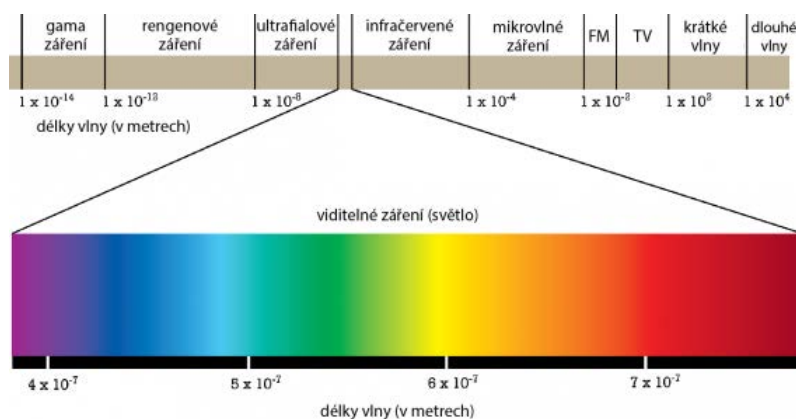
1.1 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum je schématické znázornění elektromagnetického záření všech existujících vlnových délek a je rozděleno do několika skupin podle vlnových délek (Obrázek 1.2). Všechna pásma elektromagnetického spektra podléhají stejným zákonům, ale liší se vlnovými délkami, energií fotonů, vznikem a dalšími vlastnostmi.

Vlnová délka označuje vzdálenost dvou nejbližších bodů vlnění, které kmitají se stejnou fází (jsou ve fázi,

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}, \quad (1.1)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, f je frekvence vlnění a T je perioda).



Obrázek 1.2: Elektromagnetické spektrum [3]

I když se elektromagnetické záření liší vlnovou délkou, energií fotonů, vznikem a dalšími vlastnostmi, jedno mají společné. Každé elektromagnetické záření, od rádiových vln až po gama záření se ve vakuu šíří rychlostí světla, tj. rychlostí přibližně 300 000 km/s. [1]

Hranice mezi jednotlivými druhy elektromagnetického záření nejsou ostré, přechody jsou plynulé nebo se oblasti jednotlivých druhů záření překrývají. Překryv je způsoben tím, že paprsky určujeme podle původu a ne podle frekvence.

Rychlost všech druhů záření ve vakuu je stejná, tzn. všechny se šíří rychlostí světla. V případě průchodu jiným prostředím závisí rychlost na indexu lomu. Index lomu je poměr rychlosti šíření záření ve vakuu a rychlosti v jiném prostředí,

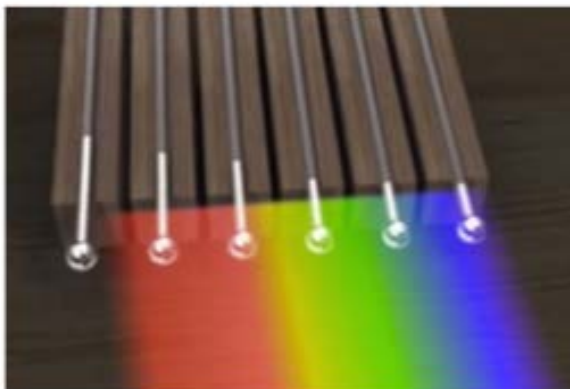
$$n_{\lambda} = \frac{c}{v_{\lambda}}, \quad (1.2)$$

kde v_{λ} je rychlost elektromagnetického záření v daném prostředí (materiálu) a c je rychlost světla ve vakuu.

1.2 Infračervené záření

1.2.1 Objev infračerveného záření

Infračervené záření bylo objeveno pomocí klasického teploměru. Když v roce 1800 astronom Frederick William Herschel (1738 - 1822) používal pro své pozorování barevná skla, zjistil, že tepelný efekt (teplota) je různý v závislosti na barvě daného skla. Při pokusu rozložil sluneční světlo pomocí hranolu a jednotlivé části světelného spektra měřil pomocí teploměru. Naměřená teplota rostla směrem k červené části spektra, proto přesunul teploměr za červené spektrum. Oproti předpokladům teplota neklesla, ale naopak vzrostla. Objevil tak neviditelné spektrum, kterému dal název infračervené, tzn. pod červenou. [6]



Obrázek 1.3: Zahřáté teploměry podle jednotlivých složek spektra [5]

Z obrázku (Obrázek 1.3) je patrné, že nejvyšší teploty dosahuje teploměr za hranicí viditelného světla, v oblasti IR záření neboli „pod“ červenou.

1.2.2 Charakteristika infračerveného záření

Infračervené záření se označuje zkratkou IR z anglického slova *infrared*. Toto záření je elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou větší než viditelné světlo, ale menší než mikrovlnné záření. Tedy v pásmu od 760 nm (hranice viditelného pásma) do 1 mm (hranice mikrovlnného pásma). Těmto vlnovým délkám odpovídají frekvence přibližně 300 GHz až 400 THz. Ve vakuu se šíří rychlostí světla, tj. rychlostí 300 000 km/s. Pro infračervené záření platí stejné zákony jako pro ostatní druhy záření.

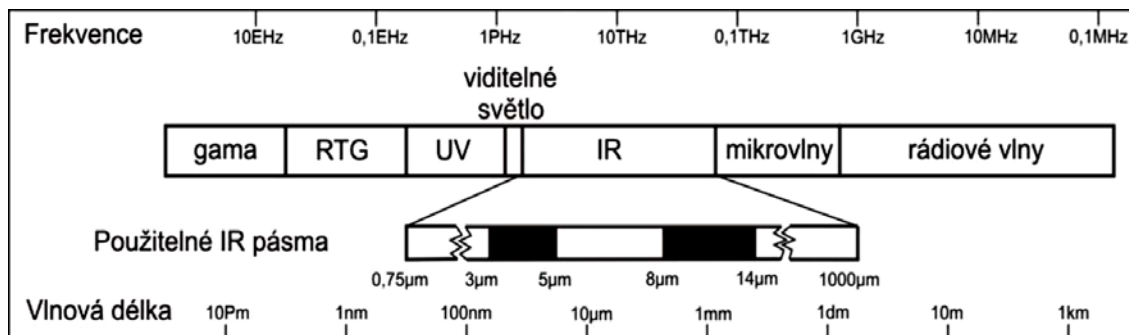
Zdrojem IR záření jsou téměř všechna tělesa, která mají teplotu vyšší než je absolutní nula. Absolutní nula je teplota, kdy má látka nejnižší možnou vnitřní energii a tudíž pohyb částic je nejnižší možný. Hodnota absolutní nuly je 0 K neboli $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Díky tomu, že IR záření vyzařují prakticky všechna tělesa, lze použít detektory IR záření k pozorování objektů ve tmě.

Pro lidi neviditelné IR pásmo také zahřívá předměty, aniž by zároveň ohřívalo vzduch. IR záření, které při dostatečné intenzitě vnímáme pokožkou jako teplo, částečně odráží předměty všech barev. Na rozdíl od ostatních složek spektra je neodražené IR záření hmotou akumulováno jako teplo. Poté je zahřátými objekty vyzářeno zpět.

Nejpřirozenějším přírodním zdrojem infračerveného záření je Slunce. Sluneční paprsky se skládají z infračerveného, viditelného a ultrafialového záření.

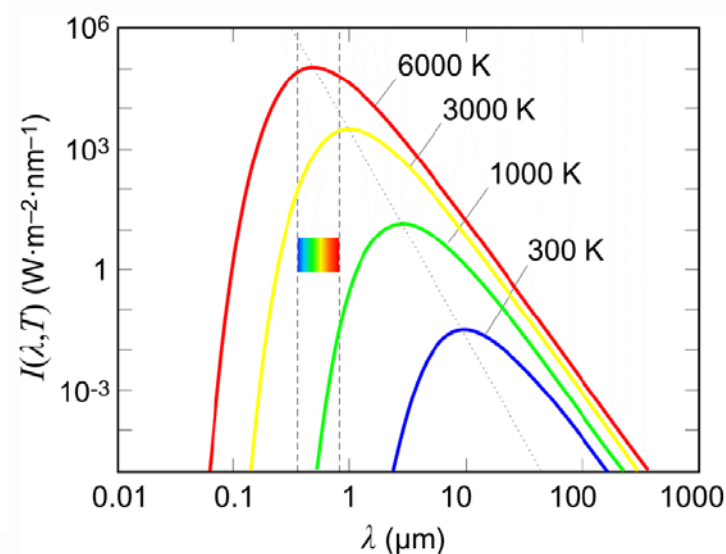
Ve spektru IR vlnových délek se nachází několik oblastí, které nejsou použitelné u IR zobrazovacích systémů z důvodu absorpce záření atmosférou. Tyto děje jsou způsobovány převážně oxidem uhličitým a vodní párou obsaženou v atmosféře. Proto zůstávají dvě pásma, kde lze IR záření využít pro systémy zobrazovací techniky. Říká se jim „atmosférická okna“ a jsou to oblasti 3 – 5 μm a 8 – 14 μm (Obrázek 1.4). [7]



Obrázek 1.4: Použitelná IR pásma [7]

1.2.3 Emise infračerveného záření, absolutně černé těleso

Princip vzniku IR záření je vysvětlen na záření absolutně černého tělesa. Absolutně černé těleso je hypotetický objekt, který pohlcuje veškeré elektromagnetické záření na něj dopadající, bez ohledu na vlnovou délku záření. Ostatní tělesa pohlcují pouze část elektromagnetického záření a zbylé světlo odráží. Spektrum vyzářené absolutně černým tělesem je určeno pouze teplotou tělesa, proto i vlnová délka takového záření závisí pouze na teplotě (Obrázek 1.5).



Obrázek 1.5: Teplotní závislost vyzařování absolutně černého tělesa [8]

Zdrojem IR záření jsou ale všechna tělesa s teplotou vyšší než je absolutní nula. IR záření vzniká v pevných látkách kmitáním atomů v prostorové mřížce. V kapalinách vzniká volným kmitáním atomů a v plynech otáčivým pohybem molekul. [9]

S rostoucí teplotou rychleji kmitající a vibrující částice mají více energie. Jsou proto méně stabilní a potřebují se této přebytečné energie zbavit, aby se opět dostaly do stabilnějšího stavu. Toho dosáhnou vyzářením energie ve formě fotonu. K vyzáření dojde tak, že rychle kmitající atomy se srážejí, ztrácí energii a přecházejí na nižší energetické hladiny. Přechod na nižší energetickou hladinu způsobí vyzáření fotonu. Ztráta energie je rovna energii vyzářeného fotonu. Málo rozkmitané molekuly (malá energie) vyzářují nízkoenergetické fotony, tj. IR záření. [10]

Vlnová délka záření tedy závisí na teplotě. Čím je teplota tělesa vyšší, tím je vlnová délka záření kratší. Dlouhé IR záření tak má ze všech druhů IR záření nejnižší teplotu. Při teplotě okolo 600°C vyzářuje těleso blízké IR záření a začíná vyzářovat také červené světlo. Při teplotě okolo 2000°C vyzářuje těleso v IR i ve viditelné oblasti. [10]

Pro popis vyzařování reálného povrchu ve srovnání s vyzařování absolutně černého tělesa slouží emisivita,

$$\varepsilon = \frac{M_{\lambda}}{M_{\lambda 0}}, \quad (1.3)$$

kde M_{λ} je intenzita spektrálního vyzařování obecného tělesa a $M_{\lambda 0}$ je intenzita spektrálního vyzařování absolutně černého tělesa při stejné teplotě jako má obecné těleso.

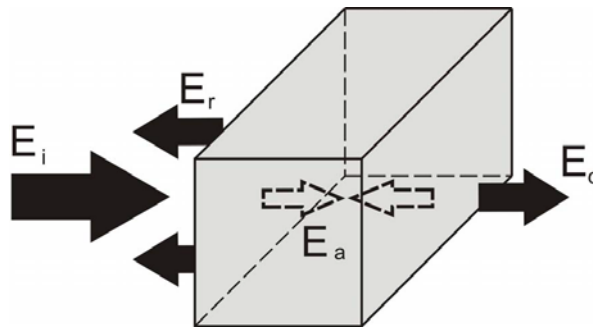
Koeficient emisivity se mění od 0 pro nezářivé zdroje k 1 pro absolutně černé těleso a je bezrozměrný. I když absolutně černé těleso v přírodě neexistuje, hodnotě $\varepsilon = 1$ se dá přiblížit sestavením kulové dutiny s malým trubkovitým vstupem. Takový objekt bude mít emisivitu 0,998. Tento princip se používá pro kalibraci termovizních kamer. [7]

Různé druhy materiálů mají různé emisivity, a proto IR záření emitují s rozdílnou

intenzitou pro danou teplotu. Emisivita materiálů je dána jejich molekulární stavbou a povrchovými charakteristikami. Barva není hlavní složka, která ovlivňuje emisivitu, není-li z radikálně odlišné látky než je základní materiál. Stejně jako u viditelného spektra, čím více jsou některé povrchy vyleštěné, tím více IR záření odrazí. [7]

1.2.4 Chování infračerveného záření v prostředí

Dopadne-li IR (tepelné) záření na těleso, je jeho počáteční energie E rozdělena na tři části. Jedna jeho část je odražena E_r , další je absorbována E_a a zbývající tělesem prochází E_d (Obrázek 1.6). Je také třeba si uvědomit, že některé materiály nepropouští IR záření, ale viditelné světlo ano (např. sklo). [7]



Obrázek 1.6: Energetická rovnováha objektu [7]

Suma všech faktorů je vždy rovna jedné a to bez ohledu na vlnovou délku,

$$E = E_r + E_a + E_d \Rightarrow 1 = \frac{E_r}{E} + \frac{E_a}{E} + \frac{E_d}{E} \Rightarrow 1 = R + A + D, \quad (1.4)$$

kde R je odrazivost, A je absorpce a D je propustnost. Tyto koeficienty jsou bezrozměrné. Jejich hodnoty jsou závislé na frekvenci a úhlu dopadu a mění se od nuly do jedné. Těleso s koeficientem $R = 1$ je zrcadlové (bílé) a odráží veškerou na něj dopadající energii. Těleso s koeficientem $A = 1$ se nazývá absolutně černým tělesem a těleso s koeficientem $D = 1$ je diatermní, což znamená, že nedisponuje žádnou energií a nechává všechnu zářivou energii procházet beze změny. V přírodě neexistují tělesa, které by byla absolutně černá, diatermní či bílá, ale koncepce absolutně černého tělesa je základem teorie radiační termometrie. [7]

Pokud má těleso konstantní teplotu, musí být výkon emitovaného záření roven výkonu záření absorbovaného. V opačném případě se objekt zahřívá (vyzařování je menší než absorpce) nebo ochlazuje (vyzařování je větší než absorpce). Proto s konstantní teplotou platí, že absorpce a vyzařování jsou v rovnováze.

1.2.5 Dělení infračerveného záření

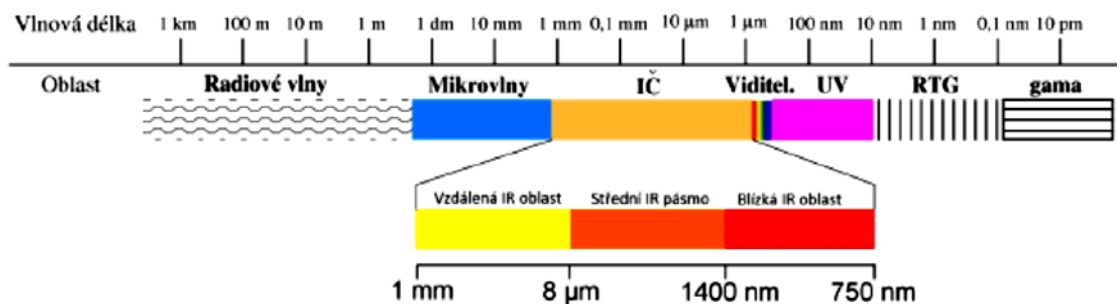
Infračervené záření se dělí na jednotlivá pásma. Toto dělení ovšem není jednoznačně dané a v různých pramenech bývá uváděno různě. První často používané schéma vypadá takto:

- NIR (near infrared), blízké infračervené záření: $0,76 \mu\text{m} - 1,4 \mu\text{m}$
- SWIR (short wave infrared), IR krátké vlnové délky: $1,4 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m}$
- MWIR (medium wave infrared), IR střední vlnové délky: $3 \mu\text{m} - 8 \mu\text{m}$
- LWIR (long wave infrared), IR dlouhé vlnové délky: $8 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$
- FIR (far infrared), vzdálené IR: $15 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$

Další často používané rozdělení je toto:

- blízké IR: $0,76 - 3 \mu\text{m}$
- střední IR: $3 - 30 \mu\text{m}$
- vzdálené IR: $30 - 1000 \mu\text{m}$

Uvedené dělení infračerveného spektra není dosud mezinárodně normalizováno. V literatuře je proto možné setkat se i s jiným dělením. Na obrázku (Obrázek 1.7) je rozdělení IR spektra.



Obrázek 1.7: Rozdělení IR spektra [11]

2 TERMOGRAFIE

Termografie je vědní obor, který se zabývá analýzou rozložení teplotního pole na povrchu tělesa bezkontaktním způsobem. Analyzuje tedy infračervené záření vyzařované tělesem. [12]

Infračervené záření je lidským okem neviditelné, ale je možné ho pozorovat pomocí speciálních kamer, tzv. termokamer (termovizní kamery), které mají snímače citlivé na infračervené záření. Daný snímač zachytává IR záření daného objektu. Toto záření pak převádějí na elektrické signály a dnes většinou digitalizují.

Takovéto snímače musejí být chlazeny na podstatně nižší teplotu, než je teplota okolí, jinak by měřily samy sebe. Jednotlivé frekvence jsou pak nahrazeny falešnými barvami korespondující s povrchovou teplotou snímaného objektu.

Výsledný snímek se odborně nazývá termogram. Termogram je složený z pixelů jako u klasických snímků. Jednotlivé pixely pak odpovídají povrchové teplotě měřeného objektu v daném bodě. Rozlišení termogramu je dáno rozlišením detektoru termokamery a je jedním ze základních parametrů. [13]

S termografií se pojí hned několik fyzikálních zákonů, které jsou k přesnému měření velmi důležité. Jedná se o Planckův zákon, Stefan-Boltzmannův zákon, Lambertův zákon a Wienův posunovací zákon. Tyto zákony vycházejí z absolutně černého tělesa. [8]

Planckův zákon vyjadřuje závislost intenzity záření I absolutně černého tělesa na vlnové délce a termodynamické teplotě. Z tohoto zákona vyplývá, že těleso o povrchové teplotě vyšší než je absolutní nula, vysílá do svého okolí elektromagnetické záření o vlnové délce odpovídající jeho teplotě. Intenzita záření absolutně černého tělesa se spočítá jako:

$$I_{0\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}} \right)}, \quad (2.1)$$

kde h je redukovaná Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s), c je rychlost světla ($c = 3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹), λ je vlnová délka, T je teplota absolutně černého tělesa a k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J·K⁻¹) [8]

Stefan-Boltzmannův zákon popisuje růst intenzity vyzařování tělesa se čtvrtou mocninou termodynamické teploty daného tělesa. Zákon platí, jak již bylo řečeno, pro absolutně černé těleso. V reálných podmínkách se s takovým tělesem nesetkáme, a proto je potřeba vztah doplnit o emisivitu ε daného tělesa,

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (2.2)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,57 \cdot 10^{-8}$ W·m⁻²·K⁻⁴), T je termodynamická

teplota a ε je emisivita tělesa. [8]

Lambertův zákon popisuje pokles intenzity záření tělesa s rostoucím úhlem odchýlení od normály vyzařování. Jednodušeji řečeno, maximum elektromagnetického záření leží ve směru normály k ploše zdroje záření,

$$I_{\varphi} = I_N \cdot \cos(\varphi), \quad (2.3)$$

kde I_{φ} je intenzita záření ve směru odchýleném od normály zdroje, I_N je intenzita záření ve směru kolmém na zdroj a φ je úhel odklonění od normály. [8]

Wienův posunovací zákon vyjadřuje změnu vlnové délky, na které je vyzařovaná energie absolutně černého tělesa maximální v závislosti na změně termodynamické teploty. S rostoucí termodynamickou teplotou se vlnová délka snižuje, tzn. čím teplejší je dané těleso, tím vyzařuje na kratších vlnových délkách,

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (2.4)$$

kde λ_{max} je vlnová délka maxima vyzařování, T je termodynamická teplota tělesa a b je Wienova konstanta ($b = 2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}$) [8]

Změna intenzity záření se vzdáleností vyjadřuje snížení přijaté intenzity záření emitovaného bodovým zdrojem se čtvercem vzdálenosti od tohoto zdroje. Popis platí pro ideální případ, kdy se jedná o bodový zdroj a vyzařuje světlo izotropně,

$$I = \frac{I_0}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (2.5)$$

kde I intenzita záření ve vzdálenosti r , I_0 je intenzita zdroje záření a r je vzdálenost od zdroje. [8]

2.1 Termovize

Termovize je optoelektronický zobrazovací systém, který v infračerveném spektru pracuje se středními a dlouhými vlnovými délkami.

Způsob registrace termovizního obrazu je v podstatě analogický se způsobem registrace obrazu na CCD prvek. Všechny detektory mají společné to, že v obrazové rovině jsou umístěny elementy, které zaznamenávají obraz. Do ohniskové vzdálenosti se tedy umísťuje registrační plocha detektoru označována jako FPA (focal plane array). [7]

Pro vytvoření měřeného obrazu se používají dvě metody:

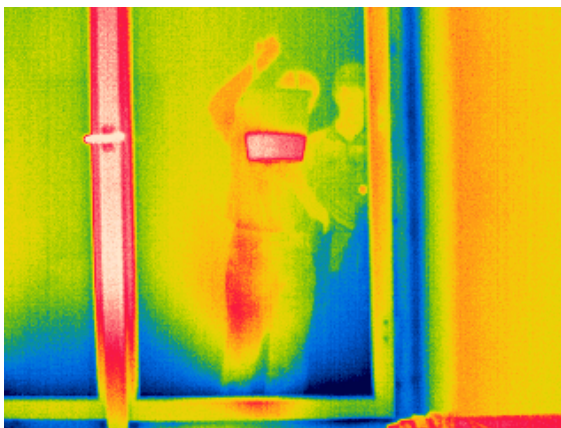
Aktivní metoda využívá jak zdroj IR záření, tak detektor IR záření. Energie vyzařovaná zdrojem IR se odráží od objektu a je zachycena detektorem IR záření. [7]

Pasivní metoda využívá vlastního vyzařování snímaného objektu v infračervené části spektra. Využívá se zejména v případě, kdy je vyzařování snímaného objektu vyšší než vyzařování okolního prostředí. [7]

Zobrazovaná scéna se postupně snímá pomocí opticko-mechanického skeneru. Což je zařízení využívající refrakčních (čočkových) nebo reflexních (zrcadlových) optických prvků, případně jejich kombinaci. [7]

Povrchový teplotní reliéf objektu i obraz snímané scény je ovlivněn celou řadou vnějších i vnitřních faktorů. To znamená, že radiační tok detekovaný IR zobrazovacím systémem je ovlivněn jak zářením od vlastního objektu, tak zářením pozadí a vnějších radiačních zdrojů. Situace se navíc komplikuje tím, že detekované IR záření je ovlivňováno teplotou, ochlazováním povrchů objektů, prouděním vzduchu a u obecných objektů také směrovostí jejich vyzařování. [7]

Následující termogram demonstruje problem s odraženou teplotou. Jedná se o obraz odraženého záření dvou postav ve skle na obrázku (Obrázek 2.1) a (Obrázek 2.2). Tyto problémy lze částečně kompenzovat, ale ne je zcela odstranit.



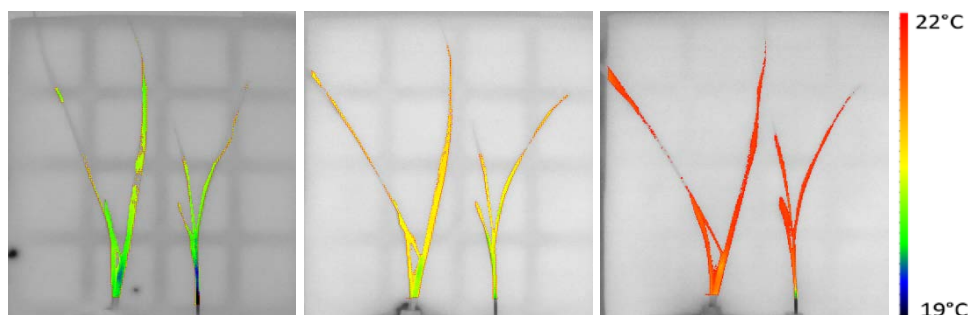
Obrázek 2.1: Odražená energie vytvoří na skle obraz [6]



Obrázek 2.2: Zobrazení předešle situace ve viditelném spektru [6]

2.2 Využití termografie v praxi

Vyvíjená termokamery má najít využití při zkoumání rostlin. Detekovaným infračerveným zářením se bude zkoumat povrchová teplota listů. Toho lze využít ke studiu stresu rostlin jako je sucho, reakce vyvolaná na slanost nebo patogeny. Na obrázcích (Obrázek 2.3) je vidět, že rostlina reaguje na větší množství soli v půdě zvýšením své teploty.

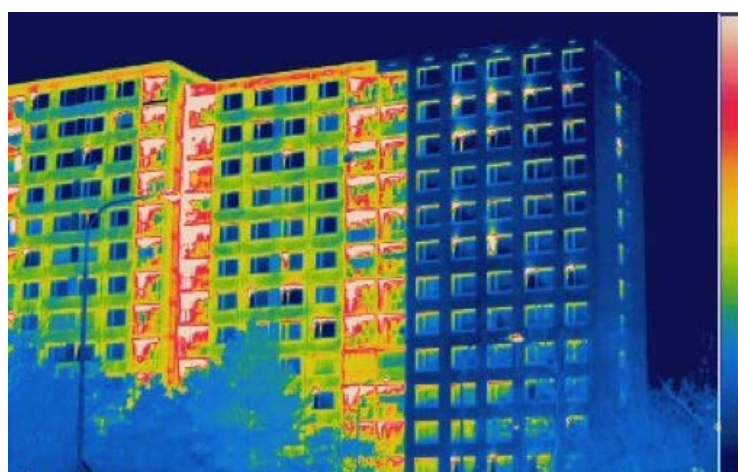


Obrázek 2.3: Testování teploty rostliny při rostoucí slanosti půdy

Aplikací využívajících termovizního měření je mnohem více, patří sem například:

Stavebnictví - Zejména v posledních letech se ve velkém využívá termografie k měření úniků tepla na povrchu stavebních konstrukcí. Pomáhají odhalit konstrukční vady vzniklé špatně odvedenou prací, stářím objektu a navlhnutí zdí. Největší překážkou je teplota okolí. Tento druh měření se může provádět pouze v zimním období, kdy je odstup venkovních teplot od teplot uvnitř konstrukce znatelný.

Srovnání dvou panelových domů, z nichž je jeden před provedeným zateplením a druhý po zateplení viz obr. Zateplený panelový dům, vykazuje daleko menší tepelné úniky za totožných okolních podmínek (Obrázek 2.4). [8]



Obrázek 2.4: Zateplený a nezateplený panelový dům [8]

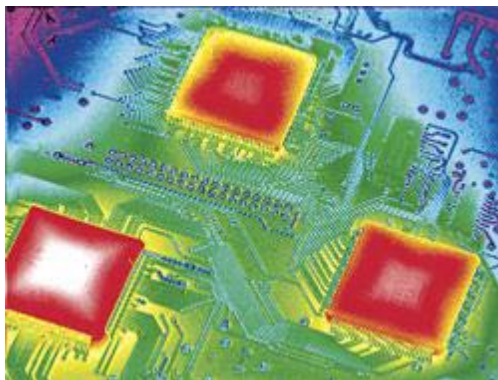
Průmysl - Diagnostika v odvětví jako elektroinstalace, mechanicky namáhané

stroje, hledání potrubí a detekce úniků, fotovoltaické elektrárny

V průmyslu má termografie dvojí hlavní využití. Přesné měření vysokých teplot a jejich rozptřeni na povrchu materiálů popřípadě sledování procesu tuhnutí a bezpečnostní využití ve smyslu předcházení nákladných havárií průběžnými prevencemi. [8]

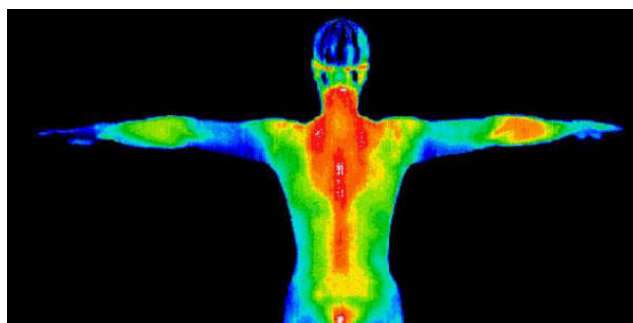
Zdravotnictví - Lidské tělo jako většina organismů samo o sobě produkuje teplo. Pokud v organismu dochází k určitým změnám způsobeným onemocněním, neprokrvením nebo jiným změnám metabolismu, projeví se tato změna i na teplotní struktuře. Pomocí termografických metod je možné předejít závažným onemocněním v prvotních stádiích vzniku. [8]

Věda a výzkum - Zde se termografie využívá v oblastech jako je vývoj materiálů, kontrola kvality, nedestruktivní defektoskopie nebo rozložení teplot na DPS, (Obrázek 2.5). Využívá se hlavně v případech, kdy je potřeba nedestruktivní metodou otestovat materiály a analyzovat termogramy v reálném čase. [8]



Obrázek 2.5: Rozložení teplot na DPS [8]

Vojenství - Naše tělesná tkáň produkuje v důsledku metabolických procesů teplo, kterého se zbavuje převážně ve formě infračerveného záření. Pro naše tělo je typické IR vyzářování na dlouhých vlnových délkách. Proto je možné vidět lidské tělo i v noci pomocí infračervených kamer. IR spektrum vyzářované člověkem je na obrázku (Obrázek 2.6). [15]



Obrázek 2.6: Zobrazení člověka v IR spektru [16]

2.3 Detektory infračerveného záření

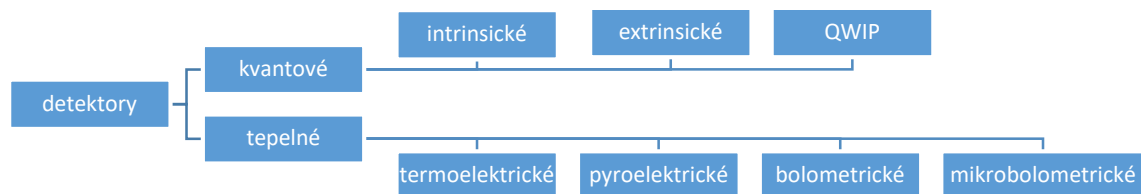
Detektor je zařízení, které transformuje zářivou energii na jinou formu měřitelné energie. Využívá k tomu fyzikálních jevů vznikajících při absorpci záření hmotou.

Každé těleso o vyšší povrchové teplotě než je hodnota absolutní nuly, vysílá elektromagnetické záření úměrné jeho teplotě. Tohoto jevu, nazývaného Planckův zákon, využívají všechny detektory IR záření. Detektor infračerveného záření převádí dopadající IR záření na elektrický signál, který je další elektronikou převeden na termogram.

Z hlediska principu funkce se rozlišují dva základní typy detektorů: tepelné a kvantové (Obrázek 2.7).

Tepelné detektory fungují na principu změny elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího IR záření. Tyto detektory využívají infračervenou energii jako zdroj tepla. Absorpcí fotonů dojde ke změně teploty citlivé části detektoru a jsou nezávislé na vlnové délce. Jsou tedy širokopásmové. Mezi běžné IR detektory patří termoelektrické, pyroelektrické, bolometry a mikrobolometry. [14]

Kvantové detektory pracují, zjednodušeně řečeno, na principu počítání fotonů, tj. kvant elektronového záření. Dochází zde ke vzniku volných nosičů elektrického náboje interakcí fotonů s vázanými elektrony. Jsou výrazně citlivější a rychlejší, než tepelné detektory, ale vyžadují přídatné chlazení. Ovšem termokamera s kvantovým detektorem je mnohem těžší než termokamera s tepelným detektorem, právě kvůli nutnosti chlazení detektoru. Kvantové detektory jsou schopné detekovat záření jen v úzkém rozsahu vlnových délek. Jejich cena je vyšší než u tepelných detektorů. Tyto detektory se dále dělí na intrinsické, extrinsické a novější QWIP. [13]



Obrázek 2.7: Rozdělení IR detektorů

2.3.1 Intrinsické detektory

Intrinsické detektory jsou vyrobeny z čistého polovodiče a označují se také jako fotorezistory. Mechanismus funkce spočívá se změně v pohyblivosti nosičů náboje poté, co nastane kontakt dopadajících fotonů s polovodičovou vrstvou. Detektor vyžaduje vnější elektrické pole, které způsobí přenos nosičů náboje a následný vznik elektrického proudu. [17]

2.3.2 Extrinsické detektory

Funkce extrinsických detektorů je založena na polovodičovém přechodu P-N. Spojením těchto dvou typů polovodičů vzniká P-N přechod, ve kterém difúzí děr z P do N a

elektronů opačným směrem ustaluje dynamická rovnováha a vyrovnávají se koncentrace elektronů a děr na obou stranách. Absorbací fotonů v této dvojvrstvě dojde ke vzniku páru elektron-díra. Následným pohybem elektronu do oblasti N a díry do oblasti P vzniká na fotodiodě napětí. Rozlišují se fotoelektrické a fotovoltaické. [17]

2.3.3 QWIP

Princip tohoto zařízení je podobný jako u extrinsického detektoru. Využívá se zde kvantových jam. Jedná se o nepatrně tenké struktury, které jsou naskládány těsně na sobě a ve kterých se uplatňují zákony kvantové mechaniky. Detektor je složen z více než 100 vrstev polovodiče GaAs a každá vrstva má sílu 10 - 700 atomů. K vyražení elektronu z dané kvantové jámy je třeba foton s přesnou energií. To umožňuje vyladění tohoto detektoru na potřebné vlnové délky. QWIP detektor je mnohem citlivější než extrinsické, protože celá kvantová jáma, nejenom příměsový atom, působí jako pohlcující člen. [17]

2.3.4 Termoelektrické detektory

Také bývají nazývány jako termočlánky. Využívají principu termoelektrického jevu (Peltier-Seebeckův jev). Termoelektrický jev vzniká tak, že na styku dvou různých kovů vzniká rozdíl potenciálů v důsledku rozdílné výstupní práce elektronu v kovu. Termoelektrické napětí je přímo úměrné rozdílu teplot na rozhraní dvou kovů. [18]

Konstrukce detektoru spočívá v tom, že na materiál absorbující IR záření se připojí aktivní konec termočlánku. Termočlánek vzniká spojením dvou pásků kovů vyrobených z rozdílných materiálů, kde vzniká při rozdílných teplotách termoelektrické napětí. Teplota aktivního termočlánku se zvyšuje nebo snižuje podle intenzity infračerveného záření. [17]

2.3.5 Pyrometry

Pyrometrické detektory jsou zhotoveny z polarizovaného materiálu a fungují na principu pyroelektrického jevu. Na základě pyroelektrického jevu dochází ke změně polarizace při změně teploty. Detektory pracují tak, že změna intenzity záření dopadající na detektor odpovídá změnám polarizace, a tak vzniká střídavý proud, který již může být monitorován vnějším zesilovačem. [17]

2.3.6 Bolometry

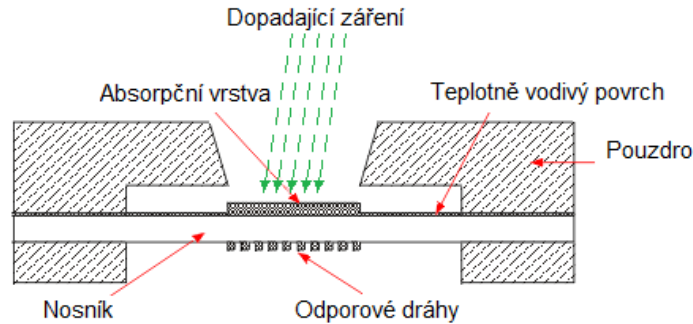
Bolometr je detektor IR záření pracující na principu měření změny elektrického odporu v závislosti na změně odporu s vysokým teplotním koeficientem v důsledku absorpce záření.

Elektrický odpor bolometru se mění v závislosti na jeho teplotě, která závisí na množství absorbovaného dopadajícího IR záření. Množství dopadajícího IR záření je přímo úměrné teplotě a je tedy možné ji určit ze změn elektrického odporu bolometru. Aby toto měření nebylo ovlivněno teplotou okolí je třeba senzor teplotně izolovat od svého okolí. [8]

Zhotovuje se jako tenký pásek. Od vedlejších rušivých vlivů se izoluje vakuovým pouzdem. Bolometr je vhodný pro velmi přesné měření teploty. Moderní konstrukce

mají místo kovového pásku termistor. Typické materiály používané pro absorpční vrstvy bolometrů jsou oxidy vanadu.

Konstrukční provedení bolometru je na obrázku (Obrázek 2.8). Dopadající záření je pohlcováno absorpční vrstvou.



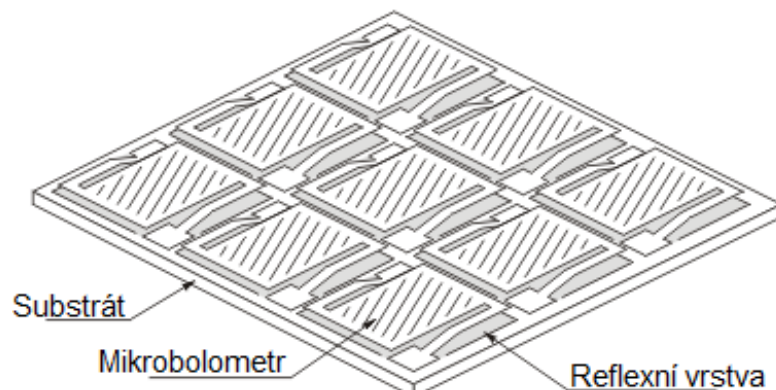
Obrázek 2.8: Provedení bolometru [8]

V termovizních kamerách se ale převážně využívá struktura mikrobolometrického pole.

2.3.7 Mikrobolometry

Mikrobolometry jsou složeny z miniaturních bolometrických detektorů, které jsou vyrobeny na monolitických křemíkových substrátech, jako běžné integrované obvody. Vlastní snímač je tvořen dvourozměrným polem můstkových struktur pokrytých teplotně citlivým odporovým materiálem, který absorbuje IR záření. Jedná se tedy o větší množství bolometrů na jednom senzoru vytvářející obdélníkovou (čtvercovou) strukturu. [20]

Dané maticové uspořádání reprezentuje množství pixelů ve výsledném termografickém snímku. Běžná velikost matice bývá u levnějších termovizních kamer 160x120 pixelů (elementů na senzoru). Dražší přístroje dosahují daleko vyššího počtu 640x480 pixelů. Špičkové termovizní kamery až 1024x1024 pixelů, které umožňují daleko kvalitnější měření. Běžná maticová struktura mikrobolometru využívaných v termovizních kamerách je zobrazena na obrázku (Obrázek 2.9).



Obrázek 2.9: Provedení mikrobolometru [20]

Kromě vlastního snímače čipy obsahují ještě čtecí elektroniku a další pomocné obvody. Můstková struktura zajišťuje dobrou tepelnou izolaci mezi vlastním mikrobolometrem a křemíkovým substrátem.

Novější mikrobolometrické snímače mají pro zlepšení vlastností substrátu pod jednotlivými mikrobolometry nanesenou reflexní vrstvu. Ta slouží k odrazu záření, které mikrobolometrem nebylo absorbováno zpět do mikrobolometru, čímž se zvyšuje účinnost snímače. Dalším důsledkem reflexní vrstvy je potlačení vlivu teploty substrátu, protože jím emitované IR záření odráží zpět. [20]

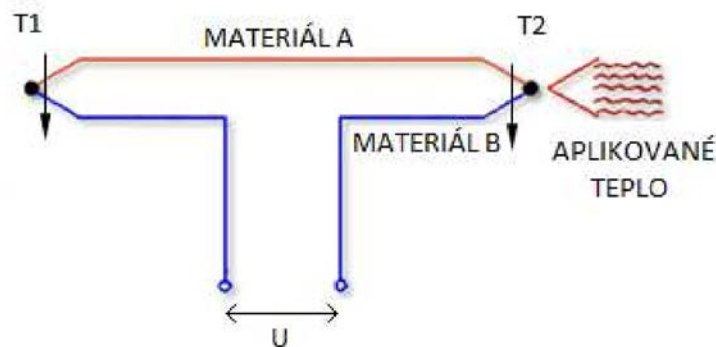
Mikrobolometrické snímače založené na oxidech vanadu bývají v reálných aplikacích umístěny na Peltierově článku, kterým se udržuje poměrně přesně konstantní teplota čipu. Tím se částečně zabrání změnám vlastností snímače v souvislosti se změnami teploty. [20]

2.4 Termoelektrické chlazení

Princip termoelektrického chlazení lze vysvětlit na základě termoelektrického jevu. Při termoelektrickém jevu dochází k přeměně tepelné energie na energii elektrickou a naopak. K této změně dochází v elektronických součástkách, které se nazývají termoelektrické články nebo termoelektrické zdroje. Termoelektrický jev se používá ke generování elektřiny, měření teploty, vytápění a chlazení.

Mezi základní termoelektrické jevy se řadí:

Seebeckův jev – Mají-li dva spoje dvou kovů, které tvoří termočlánek, rozdílnou teplotu, jsou i kontaktní napětí obou rozhraní různá (Obrázek 2.10). Proto výsledné napětí měřené mezi těmito rozhraními je nenulové a termočlánek lze využít jako zdroj elektrického napětí. Obvodem prochází elektrický proud a nastává Seebeckův jev. [21]

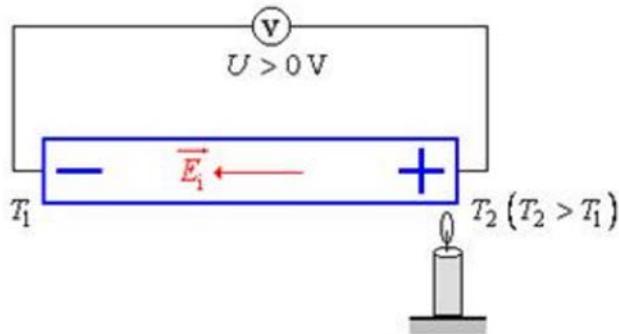


Obrázek 2.10: Seebeckův jev

Peltierův jev – Protože při návrhu termokamery je použit Peltierův článek, je Peltierův jev blíže popsán v kap. 2.4.1.

Thomsonův jev – Když se kovová tyč délky l zahřívá na jednom konci, vytvoří se v ní teplotní spád (teplotní gradient) $\Delta T/\Delta l$ a mezi konci vodiče vznikne nepatrné

termoelektrické napětí U (Obrázek 2.11). Tento jev je tedy podobný Seebeckovu jevu, rozdíl je v tom, že Thomsonův jev vzniká při ohřátí pouze jednoho vodiče. Proto je měřené termoelektrické napětí u Thomsonova jevu velmi malé. [22]

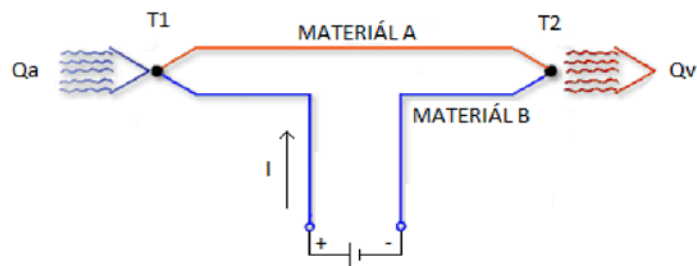


Obrázek 2.11: Thomsonův jev [22]

2.4.1 Peltierův jev

Peltierův jev objevil v roce 1834 francouzský fyzik Jean Charles Peltier. V dnešní době se používá převážně pro chlazení v Peltierových článcích.

Jedná se o jev, který je inverzní k Seebeckovu jevu. Protéká-li stejnosměrný elektrický proud z vnějšího zdroje Seebeckovým obvodem, pak vzniká teplotní rozdíl mezi oběma spoji (Obrázek 2.12). Jeden ze spojů se vždy ohřívá a druhý ochlazuje. Zahřátí nebo ochlazení probíhá podle směru proudu vzhledem k polaritě termoelektrického napětí příslušného spoje. Bude-li elektrický proud z vnějšího zdroje napětí procházet kovy směrem od T1 k T2, bude se spoj T2 ohřívát a spoj T1 ochlazovat. [23]



Obrázek 2.12: Peltierův jev

Pro relativní Peltierův koeficient (2.6), jenž je definovaný jako poměr absorbovaného tepla a proudu platí:

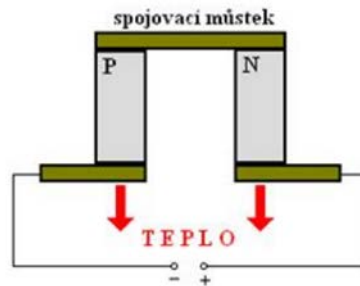
$$\pi_{AB} = \frac{Q}{I}, \quad (2.6)$$

kde Q je teplo a I procházející proud.

Peltierův článek je elektronická součástka, která slouží jako snímač pro měření teploty. Na styku dvou látek z polovodičů různého typu dochází průchodem

stejnoseměrného proudu při určité polaritě k ochlazování. Připojením stejnosměrného proudu opačné polaritě se teplota zvyšuje.

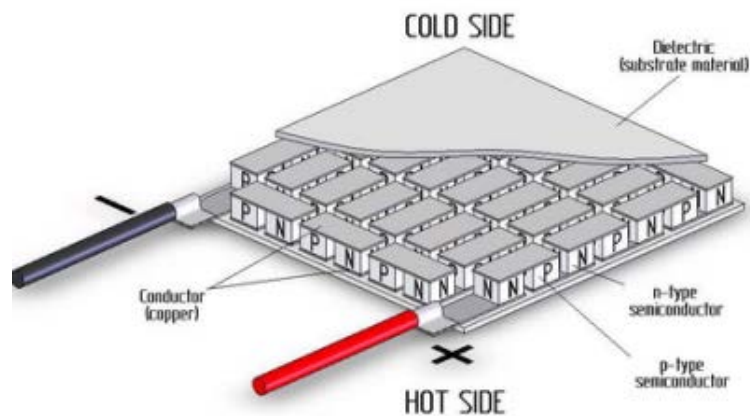
Peltierův článek se skládá ze dvou tělísek vyrobených z polovodičů (jednoho z polovodiče typu N, druhého z polovodiče typu P) a spojovacího můstku (Obrázek 2.13). Spojovacím můstkem se přivádí do článku elektrická energie a absorbuje nebo odvádí se jím teplo z Peltierova článku. [23]



Obrázek 2.13: Zapojení polovodiče P a N, spojovací můstek [23]

Při tomto zapojení jsou z polovodiče typu N (majoritní nosiče elektrony) odváděny elektrony směrem ke zdroji. Opačným směrem jsou pak z polovodiče typu P odváděny jeho majoritní nosiče-díry. Ve spojovacím můstku klesá počet volných nosičů náboje a tedy klesá kontaktní napětí mezi spojovacím můstkem a polovodiči. Spojovací můstek se tedy ochlazuje, zatímco druhý spoj se ohřívá. [23]

Jednotlivé P a N polovodiče se spojovacím můstkem se obvykle zapojují do série do větších celků a tvoří samostatný Peltierův článek (2.14).



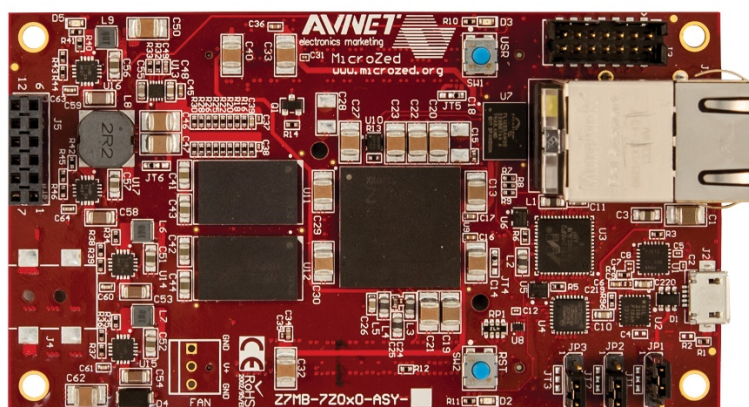
Obrázek 2.14: Peltierův článek [24]

3 NÁVRH IP BLOKŮ

3.1 Popis desky MicroZed

Jako hardwarová platforma je použita deska MicroZed. Jedná se o vývojovou desku založenou na Zynq-7000 All Programmable SoC (Software on Chip). Nese totiž Xilinx XC7Z020-1CLG400C. Jedná se o FPGA a ARM procesor v jednom. Zynq 7020 má uvnitř dvě ARM Cortex-A9 CPU. To Xilinx nazývá jako Processing System, dále jen PS. FPGA pak nazývá jako Programmable Logic, dále jen PL.

Parametry jsou: 1GB DDR3 RAM, 128MB SPI Flash, microSD. Mezi konektorovou výbavu patří 1Gbit Ethernet, USB2.0 a dva mikro-konektory (microheaders). Oba konektory mají 100 uživatelských pinů nebo 48 LVDS párů pro připojení programovatelné logiky a jsou připojeny ke dvěma I/O paměťovým bankám, které jsou součástí PL.



Obrázek 3.1: Deska MicroZed [31]

3.2 Vývojové prostředí Vivado

Pro programování poskytuje Xilinx vlastní vývojové prostředí, které je součástí balíčku nazývaného jako Vivado Design Suite. Tento balíček je volně stažitelný ze stránek společnosti Xilinx. Pro registrované uživatele je uvolněna také licence.

Vivado Design Suite poskytuje prostředí pro konfiguraci, implementaci a ověření IP bloků. Při tvorbě softwaru byl využit program Vivado 2016.4, který slouží pro programování ve VHDL nebo Verilog. Funkce jednotlivých bloků byla napsána v jazyce VHDL. Balíček také obsahuje Xilinx SDK 2016.4 pro programování v jazyce C/C++.

Vivado Design Suite používá projekty pro konfiguraci a řízení celého procesu návrhu. Nový projekt lze vytvořit ve Vivado IDE (Integrated Development Environment). Po vytvoření projektu lze použít Vivado IP Integrator pro vytvoření nového designu a

skládat jednotlivé IP bloky do požadovaného systému. Xilinx umožňuje použít již vytvořené IP (Intellectual Property) bloky s rozhraní AXI4. Tyto bloky lze nalézt v IP Catalog a lze je přímo vkládat do vytvořeného designu.

IP bloky slouží k přenosu, případně transformaci dat pomocí rozhraní AXI4, ale neslouží k jejich interpretaci. Mezi již vytvořené IP bloky patří například:

- AXI FIFO – slouží jako vyrovnávací paměť
- AXI Interconnect IP – pro propojení AXI memory-mapped bloků
- AXI Direct Memory Access (DMA) – používá se pro převod mezi AXI memory-mapped a AXI Stream

Vivado IDE také umožňuje vytvářet uživatelské IP bloky pomocí průvodce. IP bloky lze vytvářet z různých zdrojů, například ze zdrojových souborů RTL. Lze také vytvářet IP bloky s AXI4 rozhraním, což umožňuje propojit uživatelské bloky s bloky dostupnými ve Vivado IP Catalog. Uživatelské AXI4 bloky je pak možné řídit přímo z procesoru. Lze tak poskládat celý systém pouze na úrovni rozhraní.

Pro kontrolu celého systému obsahuje Vivado IP Integrator DRC (Design Rule Check), který může zkontrolovat, zda jsou AXI4 signály správně propojeny.

Je zde pět hlavních fází, kterými musí celý návrh systému projít, než může být nahrán do desky MicroZed. Patří sem Vivado Synthesis, Vivado Implementation, Vivado Timing Analysis, Vivado Power Analysis, Bitstream Generation.

Pro každou fázi jsou následně dostupné různé zprávy a analýzy. Po vygenerování bitstreamu lze exportovat popis hardwaru do SDK. SDK slouží jako vývojové prostředí pro tvorbu kódu v jazyku C nebo C++. Procesor má přístup k IP blokům přes registry, které zapisují a čtou z AXI4 sběrnice.

3.2.1 Popis AXI4

AXI (Advanced eXtensible Interface) je součástí ARM AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture) rodiny sběrnic určené pro mikrokontroléry. První verze AXI byla uvedena spolu s AMBA 3.0 v roce 2003. V roce 2010 byla uvedena AMBA 4.0 spolu s druhou verzí AXI, jinak také označovanou jako AXI4.

AXI je rozhraní vedené vždy mezi jedním AXI master a AXI slave, reprezentující IP bloky, které si mezi sebou vyměňují informace. AXI master je ten kdo zahajuje přenos. Naopak AXI slave je ten kdo odpovídá a odesílá data.

Rozhraní je definováno jako soubor signálů s podobnou funkcí. Například AXI4 rozhraní obsahuje velké množství různých signálů, které je třeba správně propojit. Tyto signály ovšem bývají seskupeny do jednoho AXI rozhraní a propojení bloků je tak mnohem přehlednější.

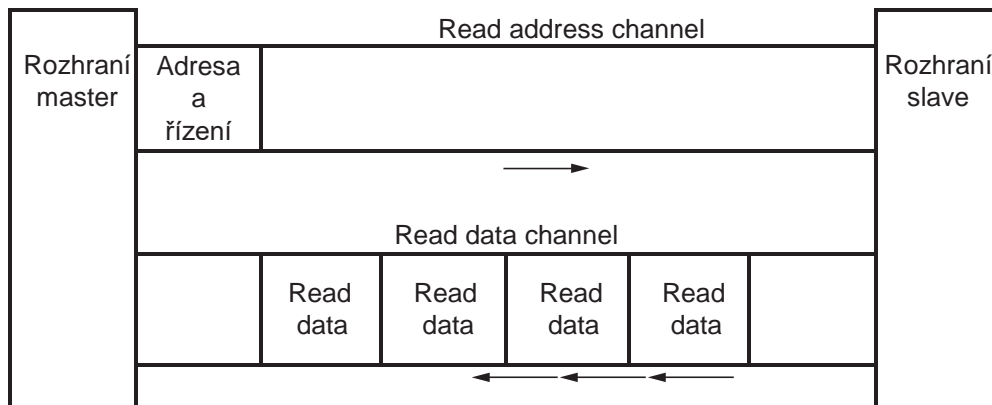
Existují tři typy AXI4 rozhraní: AXI4, AXI4-Lite a AXI4-Stream.

AXI4 a AXI4-Lite patří mezi memory-mapped protokoly. Kdykoliv je přenos zahájen, tak obsahuje adresu, na kterou chce zapisovat nebo ze které chce číst. Memory-mapped AXI master a slave jsou propojeny strukturou nazývanou jako AXI Interconnect blok. AXI Interconnect IP blok obsahuje množství master a slave rozhraní a používá se tak pro směrování dat mezi jedním nebo více AXI master a slave.

AXI4 a AXI4-Lite rozhraní se skládají z pěti různých kanálů: Read Address Channel, Read Data Channel, Write Address Channel, Write Data Channel, Write Response Channel.

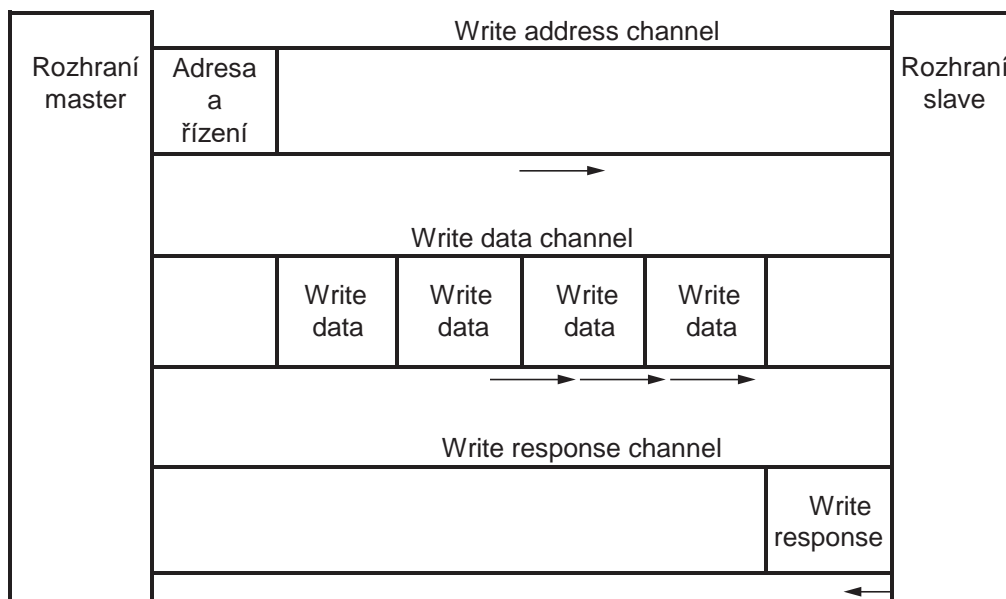
Data se mohou pohybovat oběma směry mezi master a slave současně a velikost datových přenosů se může lišit. U AXI4 lze přenést až 256 datových slov během jedné události. AXI4-Lite umožňuje pouze jeden datový přenos během jedné události.

Následující obrázek ukazuje jak se na AXI4 používá Read Address Channel a Read Data Channel během události read.



Obrázek 3.2: AXI4, událost read

Další obrázek ukazuje, jak se během události write používá Write Address Channel, Write Data Channel, Write Response Channel.



Obrázek 3.3: AXI4, událost write

Jak lze vidět na obrázcích, tak AXI4 používá oddělený datový a adresní kanál jak pro read, tak pro write, což umožňuje současný obousměrný přenos.

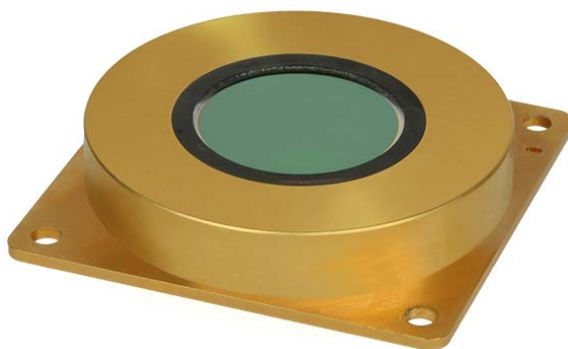
AXI4-Stream protokol definuje pouze jediný kanál pro přenos dat. AXI4-Stream Channel dokáže modelovat Write Data Channel, ale na rozdíl od AXI4 umožňuje přenášet jakékoliv množství dat. Každý AXI4-Stream funguje jako jeden jednosměrný kanál, ve kterém funguje handshaking.

3.3 Řízení detektoru BIRD17-XGA

Základem celého návrhu je infračervený detektor BIRD17-XGA. Jedná se o pokročilý detektor s vysokým rozlišením 1040 x 768 pixelů, kde velikost pixelu je 17 μm . Tento detektor využívá technologii nazývanou jako ohniskový svazkový detektor neboli FPA (Focal Plane Array). Kde FPA je 2D matice obsahující pole detektorů, v tomto případě se jedná o pole mikrobolometrů, v ohniskové vzdálenosti optické čočky.

Mikrobolometry jsou tvořeny oxidem vanadičným a jsou umístěny na křemíkovém integrovaném obvodu, jinak nazývaném také ROIC (ReadOut Integrated Circuit). Mikrobolometr je nechlazený element, který snímá tepelné záření. Princip snímání tepelného záření je založen na změně odporu materiálu po změně jeho teploty v důsledku absorpce tepelného záření (viz kap. 2.4.1).

Detektor dokáže zpracovávat infračervené záření dlouhé vlnové délky v rozsahu 8 – 14 μm a umožňuje bezkontaktní měření teploty v rozsahu -40°C až 80°C . Teplotní citlivost detektoru charakterizuje parametr NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). Což je poměr dopadajícího IR záření k vnitřnímu šumu detektoru. Teplotní citlivost detektoru je $\text{NETD} = 45 \text{ mK}$. [25]

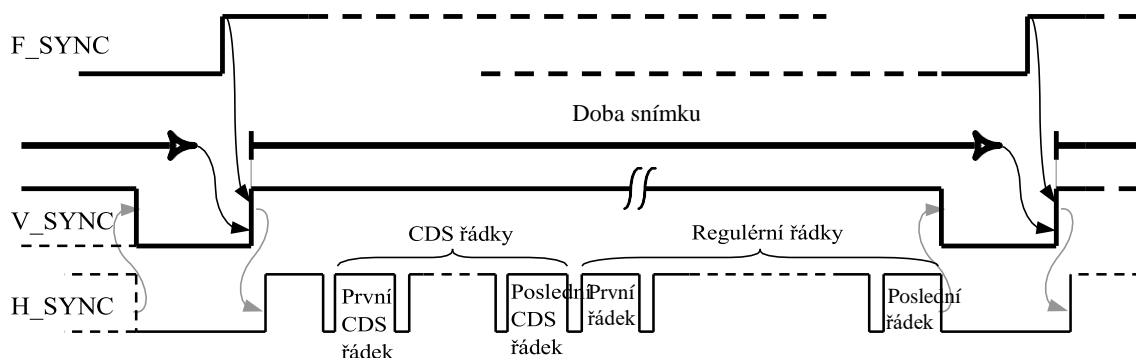


Obrázek 3.4: Detektor Bird XGA [25]

Aby nedocházelo k přehřívání, je součástí detektoru také TEC (ThermoElectric Cooler). TEC je tvořen Peltierovým článkem, jinak také Peltier (viz kap.), který odvádí teplo od ohřívané strany k chladné straně. Proto je součástí chladné strany TECu také pasivní chladič, který dále rozptyluje generované teplo.

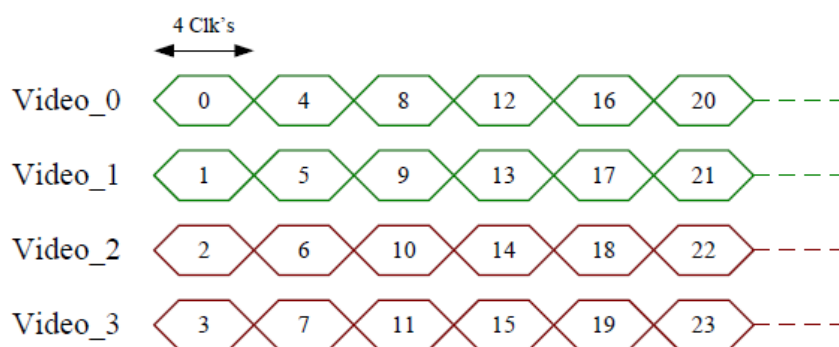
Samotný detektor vyžaduje hodinový signál o frekvenci 60 MHz. Díky tomu dokáže generovat snímky s frekvencí až 60 Hz. Frekvenci snímání lze řídit vstupním signálem

F_SYNC. Snímek je pak ohraničen dobou, kdy je signál V_SYNC na výstupu ve vysoké úrovni. Na výstupu je také generován signál H_SYNC, který je ve vysoké úrovni pro každý aktivní řádek. Dále platí, že první řádek je irrelevantní. Následujících řádky jsou CDS řádky, sloužící pro korekci. Ve výchozím stavu se jedná o 18 CDS řádků. Tedy až 20 řádek je první regulérní řádek. CDS řádky slouží pro kompenzaci videosignálu proti šumu způsobenému výstupními zesilovači. Signály V_SYNC a H_SYNC lze pak využít pro synchronizaci v ostatních blocích. Obecné znázornění těchto signálů je na obrázku 3.5. [25]



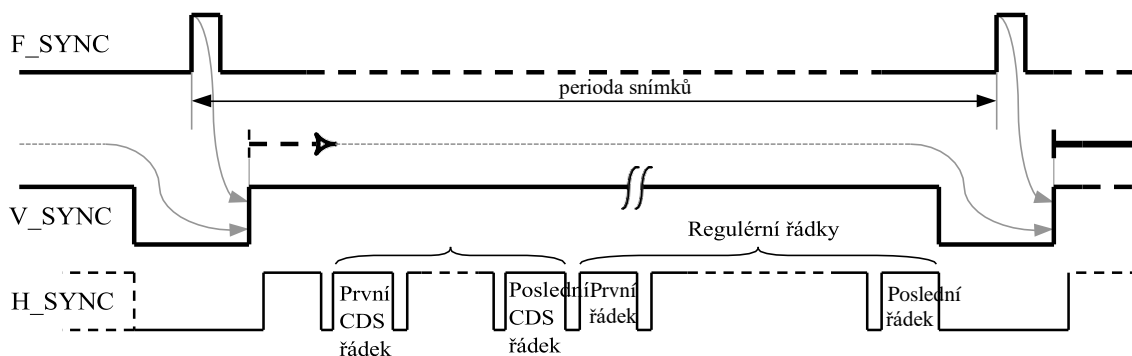
Obrázek 3.5: Znázornění signálů F_SYNC, V_SYNC a H_SYNC [25]

Zachycené IR záření je přivedeno na čtyři analogové video výstupy s napětovým rozsahem 0,5 V až 2,5 V. Každý video výstup vysouvá hodnoty jednotlivých pixelů s frekvencí 15 MHz, rychlost je tedy čtvrtinová, jak je znázorněno na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Znázornění výstupních video signálů [25]

Senzor umožňuje snímat ve dvou módech. První je vázaný vždy na příchod pulzu F_SYNC (obr. 3.7). Při příchodu tohoto pulzu na patřičný vstup senzoru, dojde ke spuštění snímání. Veškeré časování si řídí senzor sám. Je tedy možné volit si vlastní snímkovou frekvenci. Doba mezi nástupními hranami jednotlivých pulzů nesmí být kratší než doba snímku $t_{FRAME} = 16,667$ ns.



Obrázek 3.7: Spouštění snímání pomocí F_SYNC [25]

Druhý mód je pak dán stálým držením signálu F_SYNC ve vysoké. Při tomto módu není třeba kontrolovat časování, vše si provádí detektor sám. Jakmile uplyne doba snímku, detektor automaticky začne generovat nový snímek. Pokud F_SYNC přejde do nízké úrovně, tak je nejprve dokončen probíhající snímek a až poté je snímkování detektorem zastaveno. Při tomto módu je snímková frekvence maximální možná a tedy 60Hz.

3.3.1 Blok FSYNC_generator

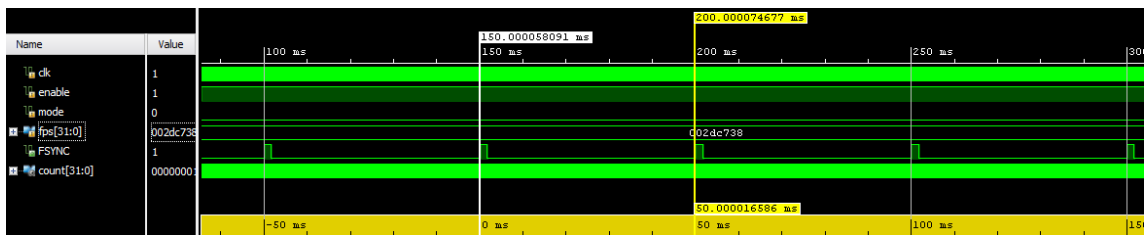
Ve Vivadu byl vytvořen řídicí blok FSYNC_gen, který generuje buď pulzy F_SYNC s frekvencí danou požadovanou snímkovou frekvencí nebo signál F_SYNC, který je stále ve vysoké úrovni. K bloku jsou připojeny vstupní hodiny s frekvencí $clk = 60\text{ MHz}$, a to proto, že senzor je také taktován frekvencí 60 MHz. Dalším vstupním signálem je *mode*, který označuje, jaký typ módu bude použit pro generování F_SYNC. Podle nastavení módu je aktivována vždy daná část kódu. Generování pulzů F_SYNC musí být zároveň povoleno signálem *enable*.

Mód pro generování pulzů je aktivován, pokud má signál *mode* hodnotu 0. V tomto módu pracuje vnitřní signál *count* jako čítač a čítá vždy do hodnoty, která odpovídá počtu taktů jedné periody dané snímkové frekvence. Pokud je například zvolena snímková frekvence $fps = 20\text{ Hz}$, tak to odpovídá 3 000 000 taktů vstupních hodin. Po uplynutí této doby přejde výstupní signál, označován jako FSYNC, do vysoké úrovně a po několika taktech přejde zpět do nízké úrovně. Takto je tedy možné generovat snímky s potřebnou frekvencí.

Pokud má vstupní signál *mode* hodnotu 1, tak se aktivuje druhá část kódu, kde je výstupní signál držen stále ve vysoké úrovni.

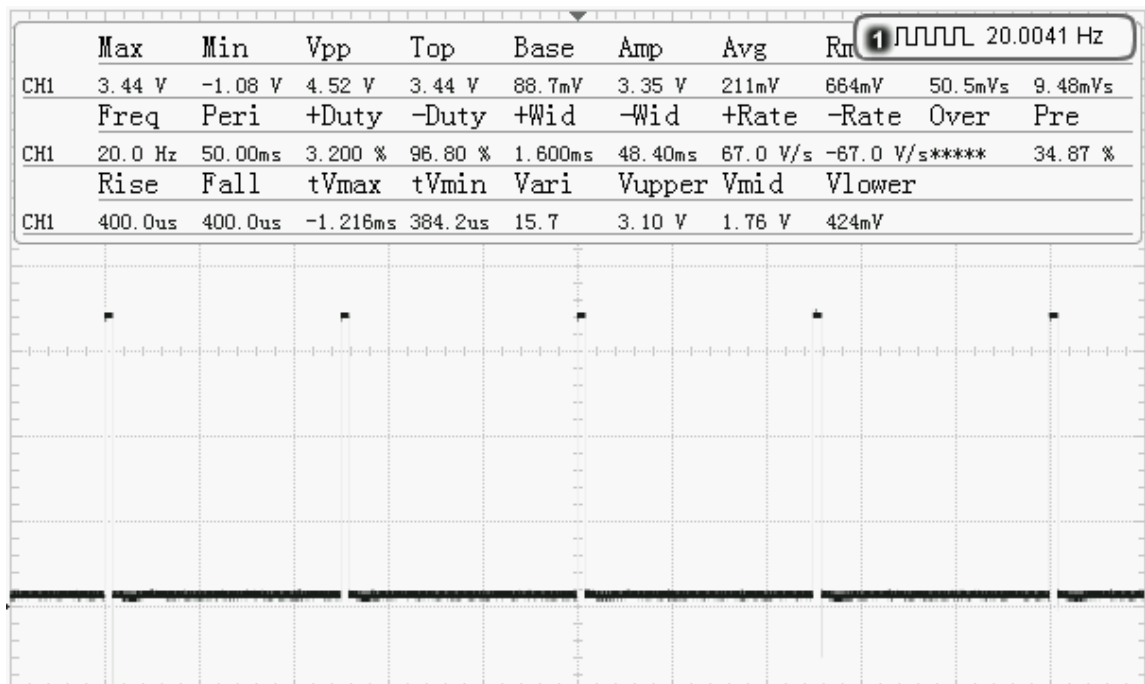
Všechny tři signály *mode*, *fps* a *enable* jsou nastavovány přímo v procesoru a do bloku jsou přenášeny pomocí AXI4-Lite rozhraní.

Blok byl nasimulován ve vývojovém prostředí Vivado. Na obrázku 3.8 je vidět výsledek simulace při snímkové frekvenci 20 Hz.



Obrázek 3.8: Simulace signálu F_SYNC

Poté bylo vytvořeno schéma ve Vivado IP Integrator a nahráno do MicorZed. Blok FSYNC_generator je připojen přes AXI4-Lite k procesoru. Řízení bloku tak lze provádět přímo z procesoru. Vyvedený signál *FSYNC* byl změřen na osciloskopu. Na obrázku 3.9 lze vidět několik cyklů signálu *FSYNC* pro snímkovou frekvenci 20 Hz.



Obrázek 3.9: F_SYNC měřený osciloskopem

3.3.2 Komunikace s detektorem

S detektorem lze komunikovat buď sériově přes UART, nebo paralelně pomocí šesti pinů. Byla vybrána pouze sériová komunikace, a proto lze s detektorem komunikovat pouze prostřednictvím UART. Detektor umožňuje komunikovat rychlostmi od 19200 Bd do 230400 Bd. Aby se detektor mohl synchronizovat na správnou rychlost je mu nutné nejprve poslat testovací sekvenci, která má tvar: 11110101. Pokud se detektoru podaří synchronizovat na danou rychlost, vyšle zpět potvrzovací sekvenci, která má tvar 00110101.

UART komunikaci stačí pouze povolit a nastavit v bloku ZYNQ7 Processing System, který je součástí Vivado IP Catalog.

3.4 Řízení A/D převodníku pro videosignál

Na výběru A/D převodníku (ADC, analog-digital converter) závisí konkrétní formát signálu, který bude přiveden do FPGA a dále zpracován. Z důvodu velké přesnosti byl vybrán převodník LTC2387-16. Jedná se o 16-bitový A/D převodník s postupnou aproximací (SAR, successive approximation register). Maximální deklarovaná rychlost převodu je 15 Msps, což dostačuje pro vzorkování jednotlivých video signálů.

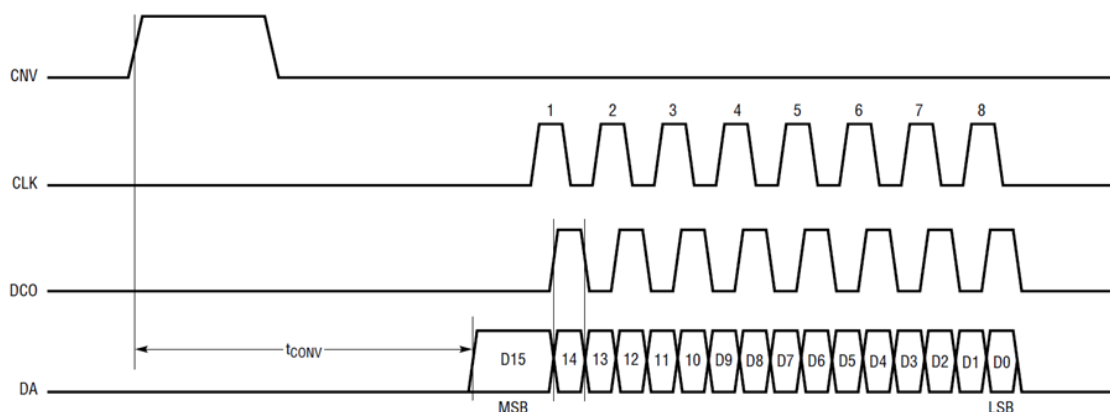
Převodník má diferenciální LVDS (Low Voltage Differential Signaling) analogový vstup v rozsahu 0 V až 4,096 V. Proto jsou mezi detektor a převodník zařazené obvody, které upravují napěťový rozsah video signálu a dále z něj vytvářejí diferenciální signál. Takto upravený video signál je pak přiveden na diferenciální vstupy A/D převodníku. Tento A/D převodník ovšem obsahuje pouze jeden diferenciální pár pro analogový signál, proto jsou použity čtyři A/D převodníky, každý pro jeden video signál.

A/D převodník vyžaduje diferenciální hodinový vstupní signál CLK_{\pm} a signál zahajující převod CNV_{\pm} . Pro vyčítání digitalizovaných vzorků slouží diferenciální výstup DA_{\pm} . Spolu s výstupem DA_{\pm} převodník také generuje DCO_{\pm} , což je přesná odezva na vstupní hodiny CLK_{\pm} , ovšem přesně synchronizovaná na hrany DA_{\pm} . V současném hardwarovém návrhu tento signál není uvažován (nejsou dále vyvedeny spoje), neboť by nedostačovala kapacita pinů pro přenos do FPGA MicroZed.

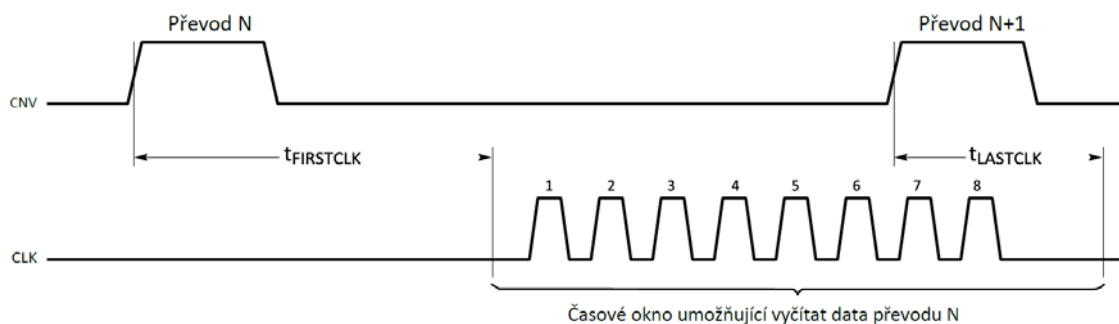
Převodník dále obsahuje digitální vstupní pin PD (Power Done). Když je tento pin v nízké úrovni, tak dojde k vypnutí převodníku. Když je naopak PD ve vysoké úrovni, tak převodník funguje normálně. V současném návrhu je PD připojen na napájecí napětí.

Převodník také umožňuje dvouřádkový výstup, kdy jsou data vyčítána pomocí dvou diferenciálních výstupů DA_{\pm} a DB_{\pm} . Pokud je vstupní pin TWOLANES ve vysoké úrovni, tak jsou používány oba výstupy. Naopak pokud je v nízké úrovni, tak je výstup DB_{\pm} neaktivní. V současném návrhu je tento vstupní pin nepřipojen, a proto jsou data pouze na výstupu DA_{\pm} .

Převod je zahájen při příchodu nástupné hrany signálu CNV_{+} . Jakmile je převod dokončen, mohou se následně začít vyčítat data. Na výstupu DA_{\pm} se nejprve objeví nejvýznamnější bit (MSB, most significant bit) a to nejdříve po uplynutí doby $t_{CONV}=63ns$ od nástupné hrany CNV_{+} (viz obr. 3.10). Ostatní data jsou následně vysouvána pomocí 8 pulzů hodinového signálu CLK_{\pm} . Data jsou na výstupu DA_{\pm} aktualizována jak při nástupné, tak při sestupné hraně hodinových pulzů CLK_{\pm} . Data mohou být pomocí hodinových pulzů vysouvána pouze, když je současný převod ukončen a zároveň není ukončen převod následující (obr. 3.11). Zároveň je první pulz hodinového signálu CLK_{\pm} povolen nejdříve $t_{FIRSTCLK} = 65 ns$ po nástupné hraně CNV_{+} . [27]



Obrázek 3.10: Vyčítání dat pomocí CLK [27]



Obrázek 3.11: Časové okno umožňující vyčítat data [27]

Aby převodník mohl korektně vzorkovat video signál ze senzoru, je nutné, aby doba mezi jednotlivými převody byla právě $t_{CYC} = 66,666 \text{ ns}$, to odpovídá 15 MHz. Z datasheetu je zřejmé, že první nástupná hrana hodinového signálu CLK+ může přijít nejdříve $t_{FIRSTCLK} = 65 \text{ ns}$ po nástupné hraně současného převodu N a poslední sestupná hrana nejdéle $t_{LASTCLK} = 49 \text{ ns}$ po příchodu nástupné hrany následujícího převodu N + 1. Je zde tedy okno trvající maximálně 50,666 ns určené pro vyčítání dat pomocí 8 pulzů CLK±. Frekvence hodinového signálu CLK± musí tedy být nejméně 160 MHz. [27]

3.4.1 Blok ADC_video

Pro řízení A/D převodníku byl v prostředí Vivado vytvořen blok ADC_video. Tento blok je taktován hodinovým signálem o frekvenci 180 MHz, což je 12-ti násobek 15 MHz a signál CNV, tak může být generován pomocí signálu CLK.

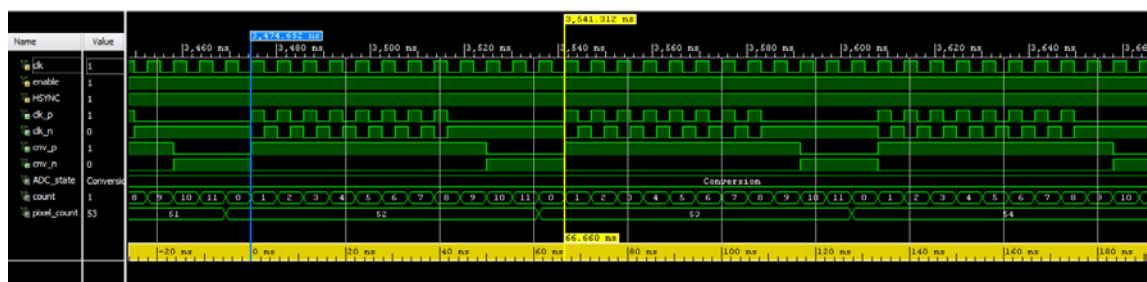
Byl navržen jednoduchý stavový automat, který je spouštěn signálem *enable*, který může přecházet mezi stavy Idle, Conversion a Testpat. Stav Conversion je normální stav převodníku, kdy dochází k převodu. Převod je zahájen ve chvíli, kdy se na vstupu tohoto bloku objeví signál H_SYNC ve vysoké úrovni. Touto událostí přejde ze stavu Idle do stavu Conversion. Signál H_SYNC představuje dobu, kdy je vyčítán z detektoru jeden řádek. Ve stavu Conversion pracují dva čítače. První čítač *count* čítá 12 taktů hodinového

signálu, to odpovídá právě jedné periodě CNV. Druhý čítač *pixel_count* zvětší svou hodnotu vždy po 12-ti taktech prvního čítače. Slouží pro určení toho, který pixel se právě zpracovává. Jakmile je napočítáno 260 pixelů, což odpovídá právě čtvrtině pixelů jednoho řádku, tak přejde automat do stavu Idle a převodník vyčkává na další příchod H_SYNC.

Na obrázku je vidět, že signál CNV+ je ve vysoké úrovni právě devět pulzů CLK, poté přejde do nízké úrovně. V době kdy je CNV+ ve vysoké úrovni je vysláno 8 pulzů CLK, které slouží pro vyčítání dat z převodníku. Při každé nástupné a sestupné hraně je vyčten jeden bit 16-bitového výstupní hodnoty. Oba signály CNV a CLK jsou z bloku vysílány jako diferenciální. Na obrázku lze vidět jejich průběh.

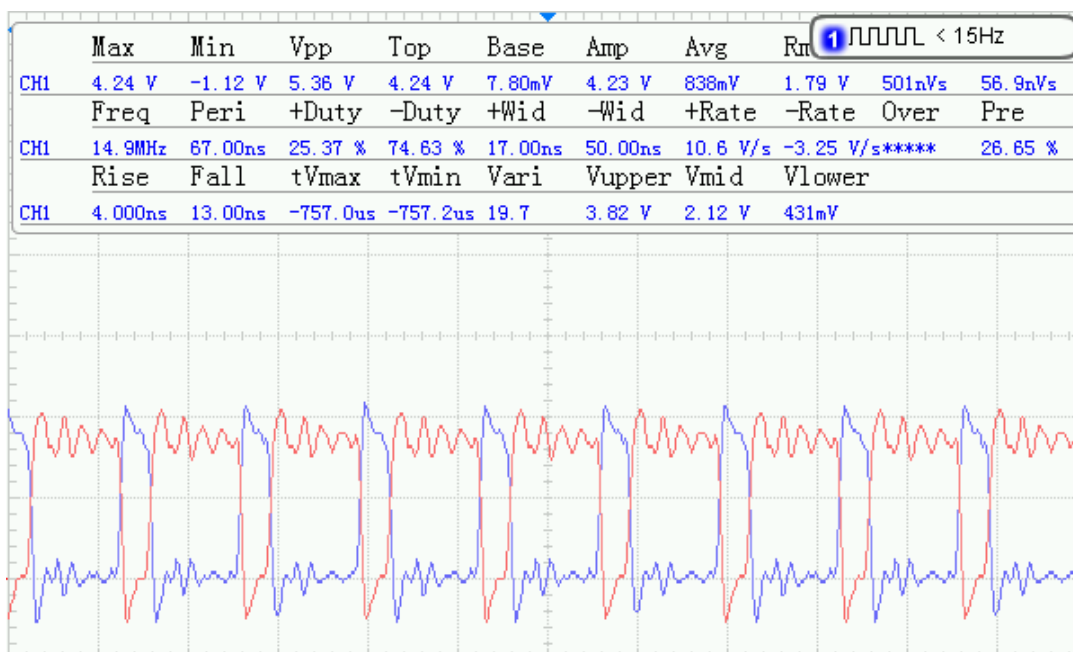
Převodník také umožňuje generovat testovací signál, který slouží pro otestování, zda převodník funguje správně. Testování je aktivováno, když je vstupní signál TESTPAT ve vysoké úrovni. Pokud vše funguje správně, tak se na výstupu DA+ objeví 16-bitový vzor, který má hodnotu: 1010 0000 0111 1111.

Na obrázku 3.12 lze vidět simulaci tohoto bloku.



Obrázek 3.12: Simulace signálů CLK± a CNV±

Poté bylo vytvořeno schéma ve Vivado IP Integrator. Blok ADC_video je připojen přes AXI4-Lite k bloku procesoru. Řízení bloku tak lze provádět přímo z procesoru. Vyvedený signál CNV± byl změřen na osciloskopu. Na obrázku 3.13 lze vidět několik cyklů signálu CNV±, jehož frekvence je přibližně 15 MHz.



Obrázek 3.13: CNV \pm měřené osciloskopem

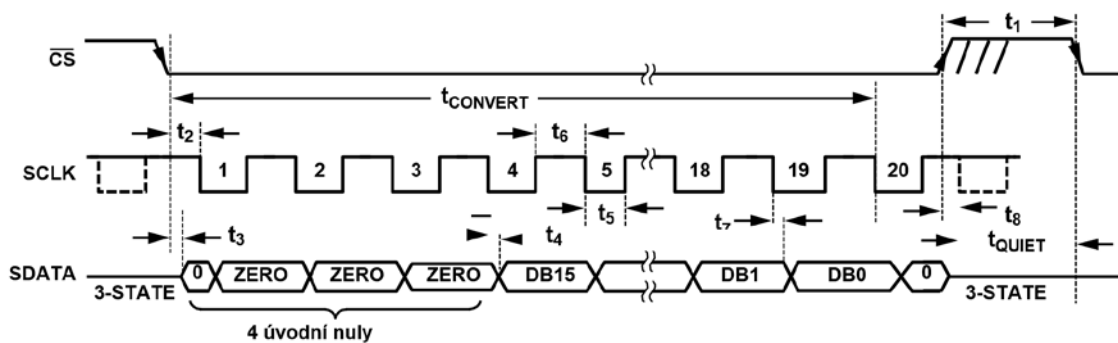
3.5 Regulace teploty detektoru

Detektor BIRD17-XGA je vybaven Peltierovým článkem pro regulaci teploty. TEC stabilizuje detektor na určitou teplotu, aby poskytoval co nejlepší výsledky. Z datasheetu vyplývá, že detektor je stabilizovaný při pokojové teplotě (25°C). Pokud není přibližně této teploty dosaženo, tak detektor poskytuje horší snímky. Teplota senzoru je zjišťována pomocí teplotní diody, která je umístěna přímo na FPA. Teplota samotného snímače by měla být udržována konstantní. Analogová hodnota teplotní diody musí být mezi jednotlivými snímky.

Analogový výstupní signál diody měřící teplotu je digitalizován pomocí A/D převodníku AD7680ARJZ. Jedná se o 16-bitový převodník s postupnou aproximací (SAR). Analogový vstupní signál může být v rozsahu 0 V až V_{DD} , kde V_{DD} je napájecí napětí převodníku a je připojeno na napětí 5 V. Zpracování převodníku a sběr dat je řízen signály CS a SCLK.

Převod je zahájen sestupnou hranou signálu CS a musí zůstat v nízké úrovni, dokud se převod nedokončí. Aby proběhl kompletní převod je vyžadováno nejméně 20 sestupných hran signálu SCLK (obr. 3.14). Data se objeví na sériovém výstupu SDATA. Výstupní data jsou nejprve uvozena čtyřmi nulami, až poté následují platná data začínající nejvýznamnějším bitem (MSB). Po vyčtení dat z SDATA, přejde výstup do stavu vysoké impedance.

Místo 20 sestupných hran lze také využít 24 sestupných hran signálu SCLK. První čtyři bity jsou opět nuly, následuje 16-bitová hodnota vzoru a převod je zakončen čtyřmi nulami. [28]

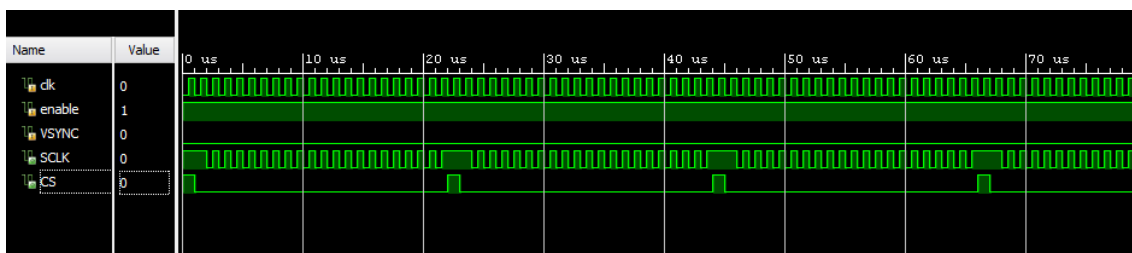


Obrázek 3.14: Časování signálů CS, SCLK a SDATA [28]

Maximální frekvence SCLK, kterou dokáže převodník zpracovat je 2,5 MHz, minimální pak 250 kHz. Z datasheetu vyplývá, že první sestupná hrana SCLK může přijít nejdříve $t_2 = 10$ ns po sestupné hraně CS. Dále platí, že minimální šířka pulzu signálu CS je $t_1 = 10$ ns. Minimální nutná doba před začátkem dalšího převodu $t_{\text{QUIET}} = 100$ ns.

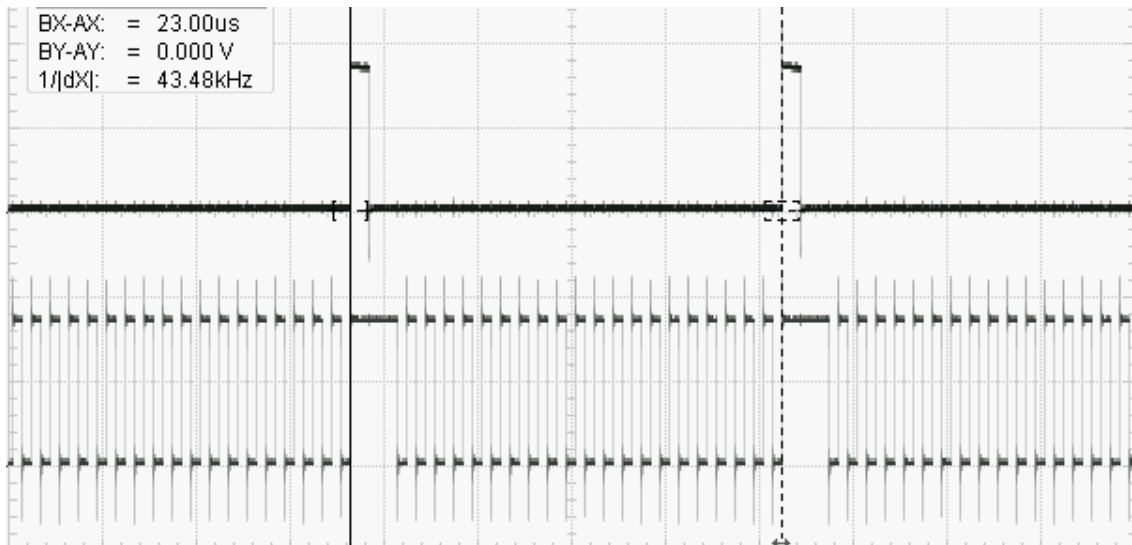
3.5.1 Blok ADC_diode

Tento blok slouží nejen pro řízení převodníku AD7680ARJZ, ale zároveň jsou na něj připojena výstupní sériová data převodníku SDATA. Vstupní hodiny tohoto bloku mají frekvenci 1 MHz. Blok obsahuje čítač, který čítá 21 pulzů hodinového signálu, což odpovídá periodě CS. Čítání je povoleno signálem *enable*. Pokud má signál *enable* hodnotu 0, signál CS a SCLK jsou drženy ve vysoké úrovni a nedochází k žádnému převodu. AD převodník začne převádět při přechodu CS do nízké úrovně. V době kdy je CS v nízké úrovni musí být generováno právě 20 sestupných hran SCLK. Data jsou vyčítána vždy se sestupnou hranou SCLK.



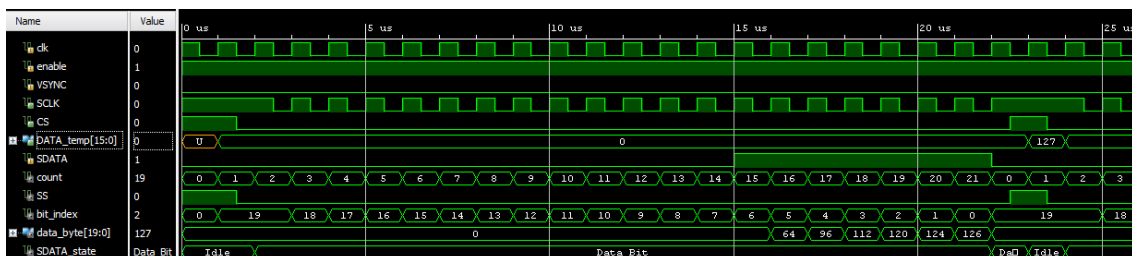
Obrázek 3.15: Simulace signálů CS a SCLK

Opět bylo vytvořeno schéma ve Vivado IP Integrator. Blok ADC_diode je zde připojen přes AXI4-Lite k bloku procesoru. Vytvořené schéma bylo otestováno na desce MicroZed. Vyvedený signál SCLK a CS byl změřen na osciloskopu (obr. 3.16).



Obrázek 3.16: CS a SCLK měření osciloskopem

Blok ADC_diode také obsahuje sériově-paralelní převodník. SDATA jsou z převodníku vyčítána vždy se sestupnou hranou SCLK. Sériová data jsou proto zachytávána se vzestupnou hranou SCLK. Přijatá data mají vždy velikost 20 bitů, proto jsou ořezána na 16 bitů a následně poslána na paralelní výstup. Přijatá sériová data představuje signál SDATA. Výstupní paralelní data představuje signál DATA_temp (obr. 3.17).



Obrázek 3.17: Simulace sériově-paralelního převodníku

3.5.2 Blok PSD_regulator

Výstupní 16-bitová hodnota teploty je z bloku ADC_diode přivedena do bloku PSD_regulator.

PID regulace je algoritmus, který se používá v průmyslovém odvětví k regulaci téměř čehokoliv. V našem případě je použit pro přesnou regulaci teploty. PID regulátor je složený z P-proporcionální, I-integrační a D-derivační složky. PID regulátor realizuje funkci

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.1)$$

kde K_p je proporcionální konstanta, K_i je integrační konstanta, K_d je derivační konstanta, $e(t)$ je chyba v čase t a e je požadovaná teplota. Konstanty získáme jejich manuálním nastavením.

PSD regulátor je diskretní verzí PID regulátoru. I složka je nahrazena sumací a D složka diferencí. Čím více se zvětšuje proporcionální složka, tím více se bude projevovat rozdíl mezi požadovanou a aktuální teplotou. Sumační složka oproti proporcionální nezačne působit okamžitě. Jedná se o sumu současné a předchozí odchylky. Derivační složka pak působí proti jakékoliv změně teploty a je dána jako rozdíl současné a předchozí odchylky.

Tyto tři složky jsou vždy násobeny proporcionální, sumační a diferencní konstantou. Všechny tyto složky se pak následně sečtou. Aby bylo možné aplikovat PSD regulaci, je velmi důležité nalezení optimálních hodnot konstant pro konkrétní případ.

Pro nastavení konstant se dá použít Zieger-Micholsova metoda. Tato metoda je použitelná pro lineární spojité i diskretní regulační obvody. Princip této metody spočívá v tom, že přivedeme regulátor do tzv. kritického stavu (mez stability), přičemž regulátor pracuje pouze s proporcionální složkou, a tedy integrační a derivační složky nejsou použity. Postupně se zvyšuje proporcionální konstanta K_p , až obvod začne kmitat. Tuto hodnotu označíme jako K_u . Odtud lze pak pomocí tabulky odvodit hodnoty konstant jednotlivých složek. Tyto hodnoty lze pak dále ladit. [29]

Control Type	K_p	K_i	K_d
<i>P</i>	$0.5K_u$	-	-
<i>PI</i>	$0.45K_u$	$1.2K_p/T_u$	-
<i>PD</i>	$0.8K_u$	-	$K_p T_u/8$
<i>classic PID</i> ^[2]	$0.60K_u$	$2K_p/T_u$	$K_p T_u/8$

Obrázek 3.18: Nastavení hodnot složek P, I a D [29]

Teplotu detektoru je třeba udržovat na hodnotě 25°C. Převodník AD7680ARJZ převádí napětí v rozsahu 0 V až V_{DD} , kde $V_{DD} = 5$ V. Nejmenší měřitelný rozdíl je napětí je tedy 76,3 μ V. Z datasheetu detektoru dále vyplývá, že při teplotě senzoru 25°C je výstupní napětí teplotní diody 1,857 V. Odtud vychází, že při této teplotě by měla být výstupní hodnota převodníku přibližně 24338.

Protože je třeba detektor buď chladit, nebo zahřívát byly vytvořeny dva bloky pro PSD regulaci PSD_regulator_cooler a PSD_regulator_heater. Vždy funguje pouze jeden podle toho, zda je naměřená hodnota menší nebo větší než 25°C. Z datasheetu detektoru dále vyplývá, že s rostoucí teplotou klesá výstupní napětí diody, což oba bloky respektují.

Pokud je rozdíl velký tak hodnota roste rychle. Pokud je naopak menší, tak roste pomaleji. Pokud je rozdíl nulový nebo menší, tak je nastavena hodnota 0. Oba regulátory provádí PSD výpočet pouze, když je rozdíl teploty změřené a požadované menší než 15°C. Pokud tedy teplota překročí tento rozsah, tak výstupní hodnota je maximální a střída má hodnotu 1.

Hodnota 24338 je tedy nastavena v obou blocích jako hodnota, které je třeba dosáhnout. Nejprve je spočítán rozdíl naměřené a požadované teploty, označován jako *diff*. Následně jsou vypočítány jednotlivé složky P, I a D vynásobené o konstanty K_p , K_i a K_d . Tyto složky jsou pak přičteny k původní výstupní hodnotě, které je ze začátku nastavena na 0. Poté je odeslána hodnota z bloku PSD_regulator_cooler do bloku PWM_generator_cooler a hodnota z bloku PSD_regulator_heater do bloku PWM_generator_heater.

3.5.3 Blok PWM_generator

Před samotný Peltierův článek je připojen H-můstek DRV592, který je přímo uzpůsoben pro řízení TECu. Pro jeho řízení je ovšem nutné vytvořit PWM (Pulse Width Modulation) generátor. Maximální frekvence spínání může být 1 MHz. H-můstek samozřejmě obsahuje ochranu před tepelným a napěťovým přetížením. H-můstek má dva vstupy. Na první vstup je připojen signál pro řízení chlazení a na druhý vstup pak signál pro řízení ohřevu. H-můstek je nakonec připojen přes LC filtr k Peltierovu článku, který je součástí detektoru. [30]

Byly tedy vytvořeny dva bloky s názvem PWM_generator_cooler pro chlazení a PWM_generator_heater pro zahřívání, které slouží jako PWM generátor. Střída je dána hodnotou nastavenou PID regulátorem. Střída je dána vztahem:

$$D = \frac{T_a}{T}, \quad (3.1)$$

kde T_a je doba signálu ve vysoké úrovni a T je perioda signálu.

Na vstup bloku je přiveden hodinový signál o frekvenci 100 MHz. Chladit nebo ohřívat lze pouze, když je signál detektoru VSYNC v nízké úrovni, aby nedocházelo k rušení snímků.

První část kódu funguje jako čítač, který čítá nástupné hrany signálu clk do hodnoty 2097, což odpovídá jedné periodě.

Druhá část kódu pak nastavuje počet taktů clk, kdy je výstupní signál ve vysoké úrovni podle hodnoty PID. Jedna perioda je dána 2097 takty clk. Střída pulzního signálu, který prochází přes H-můstek, ovlivňuje velikost proudu, který prochází přes Peltierův článek. Změnou proudu protékajícího Peltierovým článkem, pak lze ovládat stupeň chlazení.

4 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout IP bloky pro obsluhu obrazového senzoru, regulaci teploty senzoru a komunikaci s AD převodníky.

Termokamery lze využít téměř ve všech významných oborech lidské činnosti. Nicméně využití této termokamery by mělo být při zkoumání rostlin.

Semestrální práce se skládá ze tří kapitol. V 1. kapitole je nejprve vysvětleno, co je to vlastně záření a je podrobně popsáno infračervené záření, které je důležité pro pochopení principu termokamer. 2. kapitola se věnuje popisu oboru termografie a jejího využití a popisuje typy detektorů využívaných pro zachycení infračerveného záření. Ve 3. kapitole je rozebrán popis vlastního návrhu IP bloků.

Návrh bloků probíhal v jazyce VHDL v prostředí Vivado 2016.4. Řízení bloků pak probíhá z procesoru a je programováno v jazyku C.

Jako detektor infračerveného záření byl použit Bird17-XGA. Jehož analogový video signál je digitalizován v A/D převodníku LTC2387-16.

Pro obsluhu obrazového senzoru byl navržen blok FSYNC_generator, který generuje signál FSYNC nutný pro spouštění samotného snímání. Pro řízení A/D převodníku pak blok ADC_video, který slouží jak pro spouštění vzorkování, tak pro vysouvání digitalizovaných vzorků.

Detektor Bird17-XGA vyžaduje pro správnou funkci teplotu 25°C. K tomu slouží Peltierův článek, který je součástí detektoru. Intenzita chlazení nebo ohřevu článku je řízena střídou procházejícího proudu. Teplota detektoru získaná z teplotní diody je zpracována ve vytvořených blocích a na základě této teploty je generován potřebný signál. Střída tohoto signálu pak určuje velikost proud protékajícího Peltierovým článkem.

Proto byl vytvořen bloky ADC_diode, pro řízení A/D převodníky, který digitalizuje analogový signál teplotní diody. Následně byly vytvořeny dva PSD regulátory, které nastavuje míru chlazení nebo ohřevu. Nakonec byly vytvořeny dva PWM bloky, které na základě dat z PSD regulátorů nastavují velikost střídě. Signál o dané střídě je pak přiveden do H-můstku, který je přímo určen k řízení Peltierova článku. Do Peltierova článku pak LC filtr přichází potřebná velikost proudu. Aktivováno je vždy pouze chlazení nebo ohřev a to podle toho zda je teplota větší než požadovaná nebo menší.

Tyto bloky byly následně odsimulovány.

Aby bylo možné ověřit funkčnost celého systému, bylo třeba jej otestovat na deskách vytvořených firmou PSI. Bohužel tyto desky nebyly v potřebném termínu vyrobeny, a proto nemohl být systém otestován.

LITERATURA

- [1] O záření. *Solární energie* [online]. 2006 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/kap1.htm>
- [2] *Physics at school* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_vlna&l=cz&zoom=0
- [3] Elektromagnetické spektrum. *PION* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.pion.cz/cs/clanek/elektromagneticke-spektrum>
- [4] Elektromagnetické spektrum. *Wikipedie* [online]. 2002 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum
- [5] *Infračervené záření* [online]. 2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://player.slideplayer.cz/32/10113134/#>
- [6] BRYNDA, Petr. *Úvod do teorie termovizního měření* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie_brynda.pdf
- [7] GORČICA, Jakub. *Bezdotykové měření povrchových teplot ve strojírenství*. Vysoké učení technické Brno, 2009.
- [8] MALÍK, Dalibor. *Zpracování dat z termokamery*. Vysoké učení technické Brno, 2012.
- [9] *Infračervené záření* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.mvp.cufo.cz/materialy/19.html>
- [10] Co to je a jak se chová infračervené záření. *PALADIX* [online]. 2003 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://www.paladix.cz/clanky/co-to-je-a-jak-se-chova-infracervene-zareni.html>
- [11] PEPRNÍČKOVÁ, Anna. *Absorpční měření nanočástic v IR oblasti*. Vysoké učení technické Brno, 2013.
- [12] Termografie. *Wikipedie* [online]. 2002 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termografie>
- [13] Konstrukce termokamery. *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [14] Electronics hub. *IR sensor* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.electronicshub.org/ir-sensor/#Types_of_IR_Sensors
- [15] Vše o infračervené technologii. *PROHEAT s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.proheat.cz/products/vse-o-infracervene-technologie/>
- [16] ТЕПЛОВИЗИОННАЯ АППАРАТУРА В МЕДИЦИНЕ. *НПО АМБ* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://teplovisor.ru/teplovizionnaya-apparatura-v-medicine>
- [17] NOVÁK, Jiří. *Kalibrace termovizního systému (kamery) Fluke Ti30*. Masarykova univerzita, 2007.
- [18] *Termoelektrický článek* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_8_2.htm
- [19] Bolometr. *Wikipedie* [online]. 2002 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bolometr>

- [20] *Mikrobolometrické obrazové snímáče* [online]. 2003 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03015/index.html#kap10>
- [21] Seebeckův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. c2006-2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [22] Thomsonův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. c2006-2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/912-thomsonuv-jev>
- [23] Peltierův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. c2006-2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [24] Peltierův článek. *Pokusy z fyziky* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://pokusy.upol.cz/skolni-pokusy/elektrina-a-magnetismus/peltieruv-clanek/peltieruv-clanek-41/>
- [25] Bird XGA, 17 μ m. *SemiConductor Devices* [online]. c2014 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.scd.co.il/Bird-XGA-17>
- [26] Výběr vhodné architektury analogového převodníku. *DNS* [online]. **2010**(1) [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyvoj/id:4687/vyber-vhodne-architektury-analogoveho-prevodniku>
- [27] LTC2387-16. *Linear Technology* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/238716f.pdf>
- [28] AD7680. *Analog Device* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7680.pdf>
- [29] *Stavíme kvadroptéru: PID regulátor* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/stavime-kvadropteru-pid-regulator/>
- [30] DRV529. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv592.pdf>
- [31] MicroZed. *AVNET* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://zedboard.org/product/microzed>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

f	frekvence
λ	vlnová délka
c	rychlost světla
T	perioda
n_λ	index lomu
v_λ	rychlost elektromagnetického záření
ε	koeficient emisivity
M_λ	intenzita spektrálního vyzařování
E	energie
I	intenzita záření
h	redukováná Planckova konstanta
k	Boltzmannova konstanta
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta
φ	úhel ve stupních
b	Wienova konstanta
r	vzdálenost
Q	teplo
I	proud
π_{AB}	Peltierův koeficient
U	napětí
R	proud
L	indukčnost
C	kapacita
T	teplota
D	střída
K_p	proporcionální konstanta
K_i	integrační konstanta
K_d	derivační konstanta
IR	infrared, infračervený

NIR	near infrared, blízké infračervené záření
SWIR	short wave infrared, infračervené záření krátké vlnové délky
MWIR	medium wave infrared, infračervené záření střední vlnové délky
LWIR	long wave infrared, infračervené záření dlouhé vlnové délky
FIR	far infrared, infračervené záření vlnové délky
FPA	focal plane arrey, ohniskové pole
DPS	deska plošných spojů
QWIP	quantum well infrared photodetector, kvantový infračervený detektor
FPGA	field programmable gate array, programovatelné hradlové pole
ADC	analog-digital converter, analogový-digitální převodník
LVDS	low-voltage differential signaling
SAR	successive approximation register, registr s postupnou aproximací
CCD	charge-coupled device, zařízení s vázanými náboji
SoC	software on chip
PS	Processing System
PL	Programmable Logic
VHDL	VHSIC Hardware Description Language
IDE	Integrated Development Environment
IP	Intellectual Property
DMA	Direct Memory Access
DRC	Design Rule Check
AXI	Advanced eXtensible Interface
AMBA	Advanced Microcontroller Bus Architecture
ROIC	ReadOut Integrated Circuit
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
TEC	thermotlectric cooler, termoelektrické chlazení
MSB	most significant bit, nejvýznamnější bit