

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Návrh a implementace komunikačního rozhraní pro termokameru

Jan Povolný

Studijní program: Elektronika a komunikace
Obor: Elektronika

Vedoucí: Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.
Srpen 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Povolný** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **425548**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a implementace komunikačního rozhraní pro termokameru

Název diplomové práce anglicky:

Design and Implementation of Thermal Camera Communication Interface

Pokyny pro vypracování:

1) Seznamte se s platformou FPGA Cyclone V a prostředím QUARTUS. 2) Seznamte se s obvodem UMFT602 (FTDI) a USB video class (UVC) protokolem. 3) Navrhněte, implementujte a otestujte komunikační blok pro duální streamování videa (RGB+16 bitové radiometrické data) z mikrolometrického pole (640x480) px pro frekvenci obrazu až 120 Hz pomocí UVC protokolu. 4) Nastudujte a seznamte se s mikrolometrickým polem PICO640 od společnosti ULIS a vyčítací elektronikou společnosti Workswell napojenou na platformu Cyclone V. 5) Navrhněte Non-Uniformity Correction algoritmus pro obrazová RAW data z mikrolometrického senzoru pro dvoukanalové vyčítání hodnot a implementujte NUC kalibrační rozhraní z PC. 6) Navrhněte a otestujte teplotní stabilizační algoritmus, který zajistí kompenzaci teplotního driftu mikrolometru na základě měření okolní teploty. 7) Změřte a zhodnoťte výsledky teplotní stabilizace v klimakomoře.

Seznam doporučené literatury:

[1] UMFT602X Module Datasheet [online] https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Modules/DS_UMFT602x%20module%20datasheet.pdf
[2] RATLIFF, Bradley M.; HAYAT, Majeed M.; TYO, J. Scott. Radiometrically accurate scene-based nonuniformity correction for array sensors. JOSA A, 2003, 20.10: 1890-1899.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Stanislav Vítek, Ph.D., katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **05.02.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu, panu Dr. Vítkovi, za vedení mé práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Kovářovi a také všem svým kolegům za cenné rady.

A nakonec bych chtěl poděkovat autorovi použité L^AT_EX šablony „ctuthesis“ [1], panu T. Hejdovi, poněvadž mi velice usnadnila formátování této diplomové práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 14. srpna 2020

Abstrakt

Hlavním cílem práce je návrh a implementace komunikačního rozhraní pro termokameru. Pro streamování videa do PC je použitý standard UVC (USB video class), který jako univerzální standard funguje na většině moderních operačních systémů. Videodata získaná z mikrobolometrického pole jsou zpracována pomocí FPGA a dále posílána do UVC převodníku FTDI FT602, který zajišťuje převod do UVC standardu a komunikaci po USB sběrnici. Obraz z termokamery je přenášen ve formě RAW dat (Y16) nebo barevných dat (YCbCr422) obarvených paletou.

Dále je řešena realtime implementace Non-Uniformity Correction algoritmu (NUC) pro kalibraci jednotlivých pixelů mikrobolometrického pole a průběžná aktualizace kalibračních dat pomocí závěrky.

Nakonec je řešena kompenzace teplotního driftu mikrobolometru pomocí měření vlastní teploty. Na základě měřené teploty je pomocí ladění jeho parametrů stabilizován pracovní bod senzoru.

Klíčová slova: FPGA, Cyclone V, mikrobolometr, LWIR, IR, termokamera, USB, UVC, FT602, NUC, Non-Uniformity correction, teplotní drift

Vedoucí: Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

Abstract

The main topic of this thesis is design and implementation of the thermal camera communication interface. The UVC (USB video class) standard is used to stream video to PC. As a universal standard the UVC works on most modern operating systems. The video data acquired from the microbolometer are processed by an FPGA and then transferred further to the UVC bridge FTDI FT602. The FT602 provides conversion to the UVC standard and communication via USB. Image from the thermal camera is sent as a RAW data stream (Y16) or a color stream (YCbCr422) of data colored by palette.

Realtime implementation of the Non-Uniformity Correction algorithm (NUC) is proposed to calibrate pixels of the microbolometer. Calibration data are continually updated from a shutter.

To compensate temperature drift of the microbolometer, the sensor parameters are tuned based on the measured temperature of the sensor to stabilize the operating point.

Keywords: FPGA, Cyclone V, microbolometer, LWIR, IR, thermal camera, USB, UVC, FT602, NUC, Non-Uniformity correction, temperature drift

Title translation: Design and Implementation of Thermal Camera Communication Interface

Obsah

1 Úvod	1
2 Termografický systém	3
2.1 Mikrobolometrický senzor - ULIS PICO640	3
2.1.1 Princip mikrobolometru	3
2.1.2 Měření odporu mikrobolometru	4
2.2 Vyčítací elektronika - Workswell Thermal Core	5
2.3 FPGA - Intel Cyclone V	6
3 Streamování videa pomocí UVC	9
3.1 UVC protokol	9
3.1.1 Nastavení kamery	9
3.1.2 Přenos videostreamu	11
3.2 FTDI FT602	14
3.2.1 Vstupní rozhraní pro video ..	14
3.3 Implementace	19
4 Obarvení termodat paletou	23
5 Kalibrace	27
5.1 Non-Uniformity correction (NUC)	27
5.1.1 Jednobodová korekce	30
5.1.2 Dvoubodová korekce.....	34
5.1.3 Aktualizace offsetu ze závěrky	40
5.1.4 Implementace	42
5.2 Kompenzace teplotního driftu mikrobolometru	45
5.2.1 Teplotní drift mikrobolometru	45
5.2.2 Ladění senzoru	47
5.2.3 Kompenzace teplotního driftu	49
6 Závěr	53
Literatura	55
A Seznam použitých zkratk	57

Obrázky

2.1 Princip měření mikrobolometru. . .	3	5.3 Histogramy citlivostí a offsetů jednotlivých pixelů.	29
2.2 Měření odporu mikrobolometru. . .	4	5.4 Citlivosti jednotlivých pixelů. . .	29
2.3 Workswell Thermal Core	5	5.5 Offsety jednotlivých pixelů. . . .	30
2.4 Intel Cyclone V - ALM	6	5.6 Výstup korigovaný jednobodovou korekcí jednotlivých pixelů pro různé teploty černého tělesa. Zvolená kalibrační teplota je 50 °C.	31
2.5 Cyclone V - DSP blok	7	5.7 Výstup korigovaný jednobodovou korekcí jednotlivých pixelů pro různé teploty černého tělesa. Zvolená kalibrační teplota je 110 °C.	32
3.1 Blokové schéma převodníku FTDI FT602.	14	5.8 Snímky černého tělesa při 150 a 110 °C před a po jednobodové korekci pro zvolenou kalibrační teplotu 110 °C.	32
3.2 FT602 - přenos 1 s Multi-Channel FIFO protokolem.	16	5.9 Snímek černého tělesa při 150 °C před a po korekci pro zvolenou kalibrační teplotu 110 °C.	33
3.3 FT602 - přenos 2 s Multi-Channel FIFO protokolem.	16	5.10 Výstup jednotlivých pixelů pro různé teploty černého tělesa po korekci citlivosti. Zvolené kalibrační teploty jsou 90 a 140 °C.	35
3.4 FT602 - přenos s 245 Synchronous FIFO protokolem.	17	5.11 Korigovaný výstup dvoubodovou korekcí jednotlivých pixelů pro různé teploty scény. Zvolené kalibrační teploty scény jsou 90 a 140 °C.	36
3.5 FT602 - Přenos snímku videa. . .	18	5.12 Snímky černého tělesa při 90 a 110 °C před a po dvoubodové korekci. Zvolené kalibrační teploty jsou 90 a 140 °C.	36
3.6 FT602 - formát YCbCr422.	18	5.13 Snímek černého tělesa při 110 °C před a po dvoubodové korekci. Zvolené kalibrační teploty jsou 90 a 140 °C.	37
3.7 Blokové schéma modulu pro streamování videa do FT602.	19	5.14 Snímek scény 1 před a po dvoubodové korekci.	38
3.8 UVC stream v aplikaci Workswell Thermal Core Control.	21	5.15 Snímek scény 2 před a po dvoubodové korekci.	39
3.9 UVC stream v aplikaci Workswell Thermal Core Control.	21		
4.1 Implementace LUT pro obarvení dat paletou jako dual-port RAM. . .	24		
4.2 Termodata ze scény 1 obarvená paletou „blue-red“.	24		
4.3 Termodata ze scény 1 obarvená různými paletami.	25		
4.4 Termodata ze scény 2 obarvená různými paletami.	26		
5.1 Odezvy jednotlivých pixelů na různé teploty černého tělesa.	28		
5.2 Odezvy jednotlivých pixelů na různé teploty černého tělesa.	28		

5.16 Srovnání časového vývoje nehomogenity obrazu po dvoubodové korekci s tovární a aktualizovanou kompenzací offsetu.	42
5.17 Blokové schéma modulu pro dvoubodovou NUC korekci.	43
5.18 Blokové schéma modulu pro aktualizaci kompenzace offsetu ze závěrky.	44
5.19 Průměrný výstup pro 2 teploty scény v závislosti na teplotě senzoru.	45
5.20 Průměrná citlivost pro 2 teploty scény v závislosti na teplotě senzoru.	46
5.21 Průměrný offset v závislosti na teplotě senzoru.	46
5.22 Průměrná citlivost a offset v závislosti na parametru gain. ...	47
5.23 Průměrná citlivost a offset v závislosti na teplotě senzoru pro různé gainy.	48
5.24 Průměrná citlivost a offset v závislosti na G_{FID} pro různé gainy.	48
5.25 Průměrná citlivost a offset v závislosti na G_{SK} pro různé gainy.	49
5.26 Průměrný výstup v závislosti na teplotě senzoru s a bez kompenzace teplotního driftu mikrobolometru..	52
5.27 Průměrná citlivost a offset v závislosti na teplotě senzoru s a bez kompenzace teplotního driftu mikrobolometru.	52

Tabulky

3.1 Hlavička video paketu.	13
3.2 Výsledná velikost navrženého modulu pro komunikaci s převodníkem FT602 pro streamování videa pomocí UVC.	20
4.1 Výsledná velikost navrženého modulu pro obarvení termodat paletou.	24
5.1 Porovnání naměřených směrodatných odchylek homogenních scén pro různé teploty černého tělesa před a po korekci.	40
5.2 Výsledná velikost navrženého modulu pro realtime aplikaci dvoubodové NUC korekce.	43
5.3 Výsledná velikost navrženého modulu pro aktualizaci koeficientu kompenzace offsetu pomocí závěrky.	45
A.1 Seznam použitých zkratk.	57

Kapitola 1

Úvod

Mikrobolometrické senzory pro termokamery měří teplotu objektů nepřímo. Dopadající IR záření ze scény ohřívá mikrobolometr, což vede ke změně jeho elektrického odporu. Z této změny odporu jsme schopni zpětně dopočítat teplotu scény. Teplota mikrobolometru ovšem také silně závisí na teplotě okolního prostředí a dalších faktorech, což ovlivňuje měřený odpor. Ve výsledku tak vlastní teplota senzoru výrazně mění charakteristiky jednotlivých pixelů, a to především citlivost a offset. Řešením může být například chlazení senzoru na stabilní teplotu nebo měření vlastní teploty senzoru a z ní odvozená kompenzace teplotního driftu pomocí ladících parametrů mikrobolometru.

Dalším z problémů mikrobolometrických polí a termokamer obecně je jejich nehomogenita. Jednotlivé pixely nejsou fyzicky stejné vlivem rozptylů technologických parametrů při výrobě a navíc jsou různě ovlivněny použitou optikou termokamery. Celkově se nehomogenita projeví např. při záběru na černé těleso, které má homogenní povrchovou teplotu. Jednotlivé pixely budou mít různou odezvu na stejnou teplotu scény a také různou citlivost na její změny. Tato nehomogenita se u termokamer řeší algoritmem Non-Uniformity correction (NUC), který může mít různé podoby.

Pro komunikaci s termokamerou a přenos obrazu např. do PC lze použít různá rozhraní. Jednou ze zajímavých možností může být použití USB, které může kromě přenosu dat termokameru zároveň napájet. Ve standardu USB je od verze 2.0 definovaná třída UVC (USB video class), která má podporu většiny moderních operačních systémů, což značně ulehčuje implementaci přenosu videa z pohledu vývoje aplikačního softwaru.

Kapitola 2

Termografický systém

Základem použitého termografického systému je mikrobolometrický senzor francouzské společnosti ULIS - PICO640. Ten je připojen do vyčítací elektroniky české firmy Workswell, součástí této elektroniky je FPGA Intel (dříve Altera) Cyclone V.

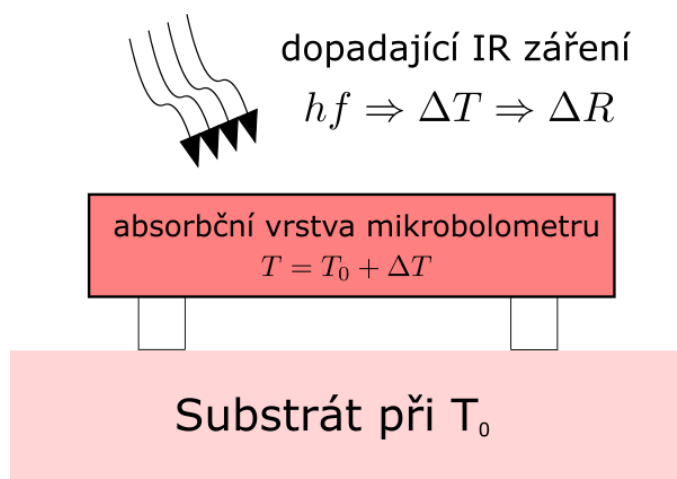
2.1 Mikrobolometrický senzor - ULIS PICO640

2.1.1 Princip mikrobolometru

Mikrobolometrické pole je senzor, který obsahuje matici jednotlivých mikrobolometrů (pixelů). ULIS PICO640 má těchto mikrobolometrů 640x480 (rozlišení senzoru). Tyto mikrobolometry měří nepřímo intenzitu dopadajícího IR záření, zjednodušený princip měření je vidět na obr. 2.1. Mikrobolometr má na začátku klidovou teplotu T_0 a dopadající IR záření ho ohřeje na teplotu

$$T = T_0 + \Delta T. \quad (2.1)$$

To dále vede ke změně elektrického odporu mikrobolometru ΔR , kterou můžeme měřit a z ní zpětně dopočítat intenzitu dopadajícího IR záření.

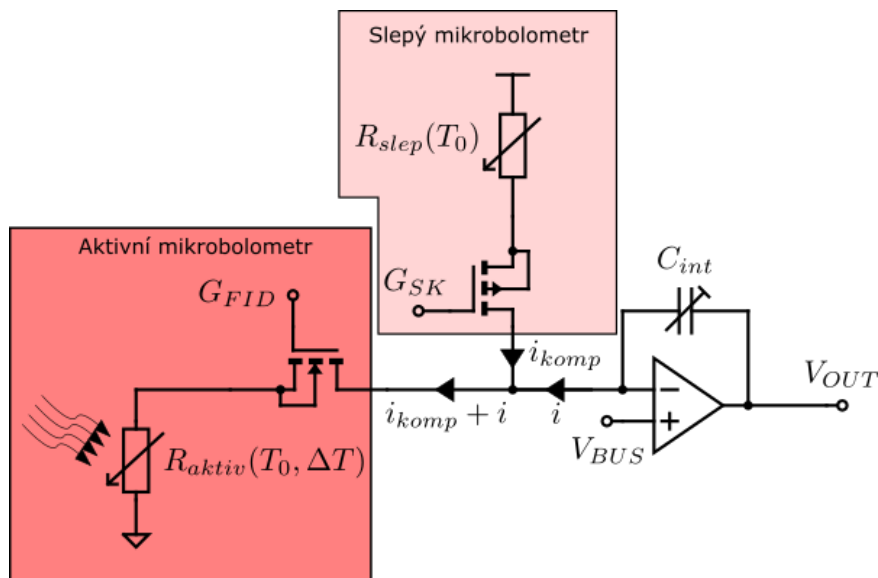


Obrázek 2.1: Princip měření mikrobolometru.

2.1.2 Měření odporu mikrobolometru

Součástí senzoru je vyčítací elektronika (ROIC - readout integrated circuit), která převádí měřený odpor mikrobolometru na napětí. Její součástí je také kompenzace offsetu způsobeného vlastní teplotou senzoru. Dále pak na výstupní analogový videosignál přepíná jednotlivé mikrobolometry (pixely) v matici.

Na obr. 2.2 je vidět zjednodušený princip konverze měřeného odporu na napětí a kompenzace teplotního offsetu. Každý sloupec matice pixelů má

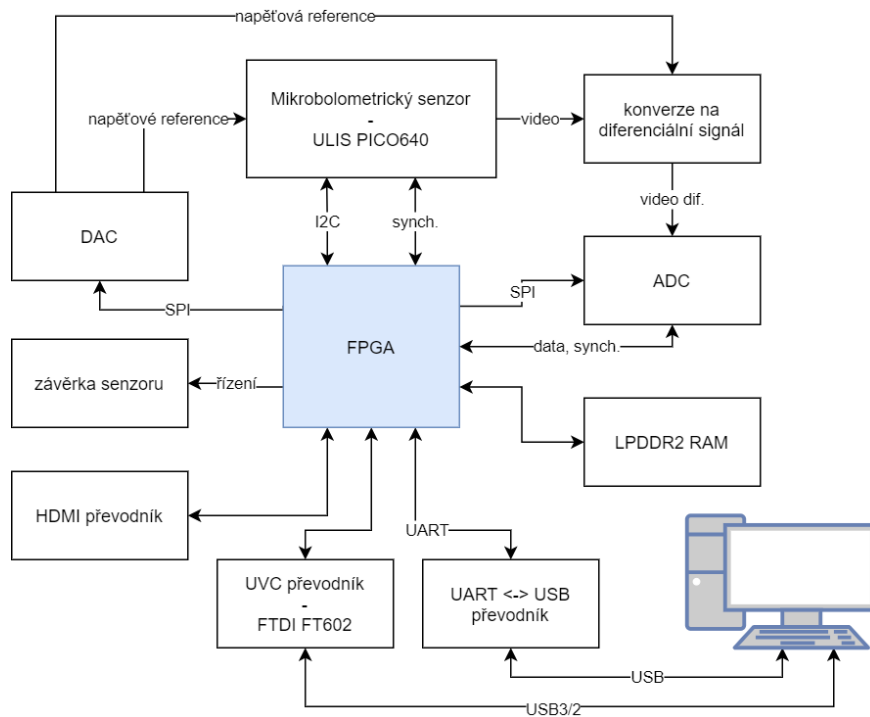


Obrázek 2.2: Měření odporu mikrobolometru.

kompenzační slepý mikrobolometr, který je odstíněn od dopadajícího IR záření, a jeho odpor tak odpovídá vlastní teplotě senzoru T_0 . Jestliže proud slepým mikrobolometrem označíme i_{komp} a proud aktivním mikrobolometrem (pixel) $i_{komp} + i$, tak do integrátoru poteče proud i . Z proudu, který teče aktivním mikrobolometrem, jsme tedy odečetli proud, který teče slepým mikrobolometrem a je úměrný vlastní teplotě senzoru T_0 . Výsledný proud i , který teče přes integrátor, má tak částečně kompenzován offset daný teplotou senzoru T_0 . Tento proud se dále integruje v integrátoru s kapacitou C_{int} na výstupní napětí V_{OUT} . Integrační kapacita C_{int} je nastavitelná pro různá výstupní zesílení. Proudů aktivním a slepým mikrobolometrem jsou pak regulovatelné pomocí MOSFETů s řídicími napětími G_{FID} a G_{SK} .

2.2 Vyčítací elektronika - Workswell Thermal Core

Vyčítací elektronika Workswell Thermal Core je schématicky znázorněna na obr. 2.3. Centrálním prvkem je FPGA Intel Cyclone V, které nastavuje všechny periferie, zajišťuje komunikaci s PC a zpracovává naměřená data z mikrobolometrického senzoru. FPGA nejprve prostřednictvím DAC nastaví napěťové reference senzoru G_{FID} a G_{SK} popsané v 2.1.2, kterými lze ladit parametry měření. Dále nastaví napěťovou referenci pro konverzi videa ze senzoru na diferenciální signál do AD převodníku. FPGA nastavuje senzor pomocí I2C sběrnice a od senzoru dostává synchronizační signály, podle kterých řídí vzorkovací hodiny do AD převodníku. Navzorkovaná data – pixely jednotlivých snímků – FPGA kvůli kapacitě ukládá do externí paměti LPDDR2. Před senzorem je umístěna závěrka, která je ovládána z FPGA. Zpracovaná data jsou pak odesílána na HDMI převodník pro zobrazení obrazu např. na monitoru a také na UVC převodník FTDI FT602, který data odesílá dále přes USB do PC pomocí UVC protokolu. Celý systém se pak nastavuje z PC pomocí UARTu.



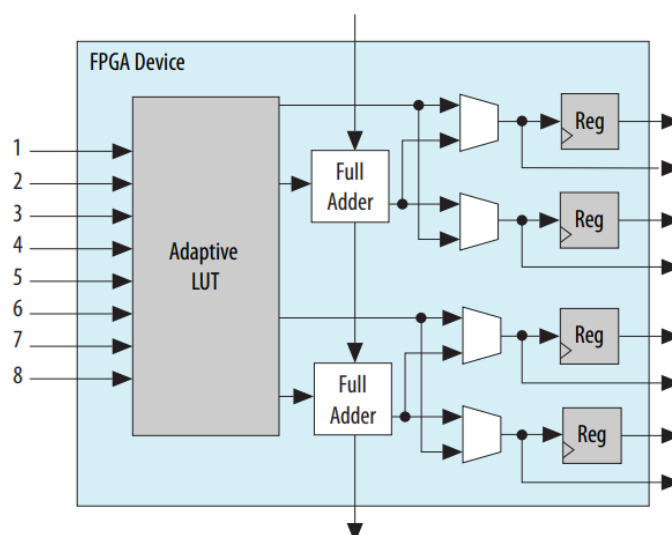
Obrázek 2.3: Workswell Thermal Core.

2.3 FPGA - Intel Cyclone V

Ve vyčítací elektronice Workswell Thermal Core je použito dnes již starší FPGA střední řady Intelu - Cyclone V, které ovšem stále plně postačuje na řešení všech zadaných problémů. Cyclone V je postaven na 28nm výrobní technologii firmy TSMC.

ALM

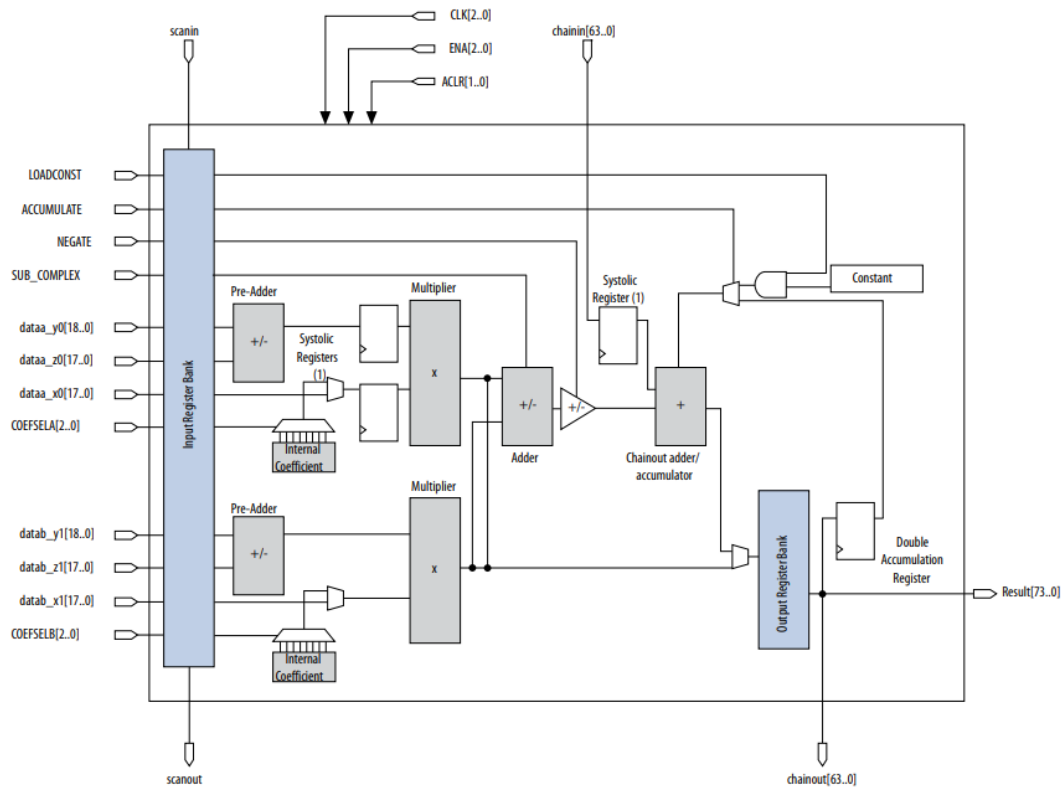
Základní stavební jednotkou je ALM (Adaptive Logic Module). Struktura ALMu je vidět na obr. 2.4, základem je 8bitová vyhledávací tabulka (LUT – lookup table), která slouží pro implementaci libovolné logické funkce s 6 vstupy a dá se rozdělit na 2 části. ALM dále obsahuje 2 úplné sčítačky a 4 registry s programovatelným propojením. Až 25 % ALMů se pak dá využít jako rozprostřená paměť.



Obrázek 2.4: Intel Cyclone V - ALM. [2]

DSP

FPGA obsahuje specializované DSP bloky, které mají široké využití v oblasti digitálního zpracování signálu (např. implementace FIR filtru) a obecně se dají využít na různé aritmetické operace. Struktura DSP bloku je na obr. 2.5. Hlavním prvkem DSP bloku jsou dvě pevné násobičky 18x19, které se dají použít buďto nezávisle nebo jako jedna násobička 27x27 nebo také jako 3 násobičky 9x9. K násobičkám jsou zároveň přiřazeny sčítačky - jedna „předsčítačka“ před každou násobičkou a dvě za násobičkami. Velice jednoduchá je tak např. implementace aritmetické operace vynásobení a přičtení, kterou umí i řada procesorů jako instrukci MAC - multiply and accumulate. Zde se ovšem jednotlivé DSP bloky dají dále propojovat a řetězit. Je zde obsažen i 64bitový akumulátor (akumulační registr).



Obrázek 2.5: Cyclone V - DSP blok. [3]

Paměť

V FPGA je k dispozici několik druhů paměti, které se liší především dostupnou kapacitou, rychlostí a přístupem. Nejrychlejším typem paměti jsou jednotlivé registry v ALMech rozprostřené po celém FGPA, ty mají zároveň naprosto paralelní přístup, což znamená nejširší sběrnici, na druhou stranu mají nejmenší kapacitu. Také je možné využít jako paměť jednotlivé LUTy v ALMech. Největší kapacitu uvnitř FPGA pak má bloková paměť, která je stále dost rychlá, ale má výrazně užší sběrnici. Jednotlivé bloky se ovšem dají spojovat paralelně pro širší výslednou sběrnici. Pokud ani bloková paměť nestačí kapacitně, je potřeba připojit k FPGA nějakou vnější paměť, např. DDR nebo SRAM.

Kapitola 3

Streamování videa pomocí UVC

3.1 UVC protokol

UVC neboli USB video class je třída USB zařízení, která pracují s videem. Nejčastěji jsou to webkamery, digitální kamery nebo různé převodníky pro video. Tuto třídu a její specifikace definuje konsorcium USB Implementers Forum (USB-IF, <https://www.usb.org/about>). První verze 1.0 této třídy byla publikována v roce 2003. Od poslední verze 1.5 publikované v roce 2012 je možné posílat pomocí UVC komprimované videostreamy, např. H.264, MPEG-2 TS a jiné. Jedna z velkých výhod UVC jako standardu je jeho podpora ve všech moderních operačních systémech. Ovladače pro UVC zařízení jsou obsaženy už v jádrech operačních systémů: Windows 10, Android, Linux nebo macOS. Zařízení mohou být také tzv. složená - obsahující více rozhraní zároveň. Takže např. kamera připojená přes USB může být složené zařízení, které obsahuje více paralelních UVC streamů nebo např. jeden UVC stream a jeden zvukový stream z mikrofonu apod.

3.1.1 Nastavení kamery

UVC standardizuje mimo jiné i některá základní nastavení kamer. Nastavení je rozděleno do několika jednotek - Camera Terminal, Selector Unit, Processing Unit, Encoding Unit a Extension Unit.

Camera Terminal

Camera Terminal ovládá mechanické nastavení kamery nebo případně nastavení senzoru. Jeho nastavení definovaná standardem jsou:

- Snímání - progresivní nebo prokládané
- Automatická expozice
- Automatická expozice - priorita
- Doba expozice
- Zaostřování

- Automatické zaostřování
- Clona
- Zoom
- Pan - horizontální otáčení
- Roll - naklápění kolem vlastní osy
- Tilt - vertikální naklápění
- Digital Windowing
- Region of Interest

Implementace každé z těchto funkcí je volitelná.

■ Selector Unit

Selector Unit vybírá zdroj videa z několika streamů.

■ Processing Unit

Processing Unit zpracovává a upravuje obraz ze senzoru. Jeho nastavení jsou:

Uživatelské nastavení.

- Jas
- Tón
- Sytost
- Ostrost
- Gamma korekce
- Digitální Zoom

Automatické nastavení.

- Vyvážení bílé
- Kompenzace protisvětla
- Kontrast

Ostatní nastavení.

- Zisk
- Frekvence sítě
- Standard analogového videa

Implementace jednotlivých funkcí je volitelná.

■ Encoding Unit

Encoding Unit ovládá enkodér, který kóduje vysílané video. Obsahuje např. nastavení rozlišení, barevného prostoru atd.

■ Extension Unit

Extension Unit je určená pro dodatečné funkce definované výrobcem. Obecný UVC ovladač sice takto implementovanou funkci nebude schopen sám použít, nicméně informaci o ní předá aplikaci a umožní jí s touto funkcí komunikovat.

■ 3.1.2 Přenos videostreamu

■ Video pakety

Jednotlivé pakety (video payload) nesoucí videodata mají hlavičku popsanou v tab. 3.1. Velikost jednotlivých polí je v bitech a povinná pole jsou zvýrazněna tučně. Offset volitelných polí se může lišit podle jejich počtu v paketu, nicméně jejich pořadí musí být dodrženo podle tabulky.

■ Video formáty

Frame-based formáty. Frame-based jsou formáty, které kódují video po jednotlivých snímcích a vyžadují tak informace o začátku a konci každého snímku. Příkladem jsou různé varianty nekomprimovaného YUV videa (používaný barevný prostor je ve skutečnosti většinou YCbCr), MJPEG nebo DV.

Stream-based a Temporally Encoded formáty. Tyto formáty kódují (a komprimují) video jak v prostoru, tak v čase. Videostream tedy není posílán po jednotlivých snímcích. Příkladem jsou MPEG-2 TS, MPEG-2 PS a MPEG-1 nebo H.264 a VP8.

Offset	Pole	Velikost	Typ	Popis
0	bHeaderLength	D[7:0]	číslo	Velikost hlavičky v bytech včetně tohoto pole.

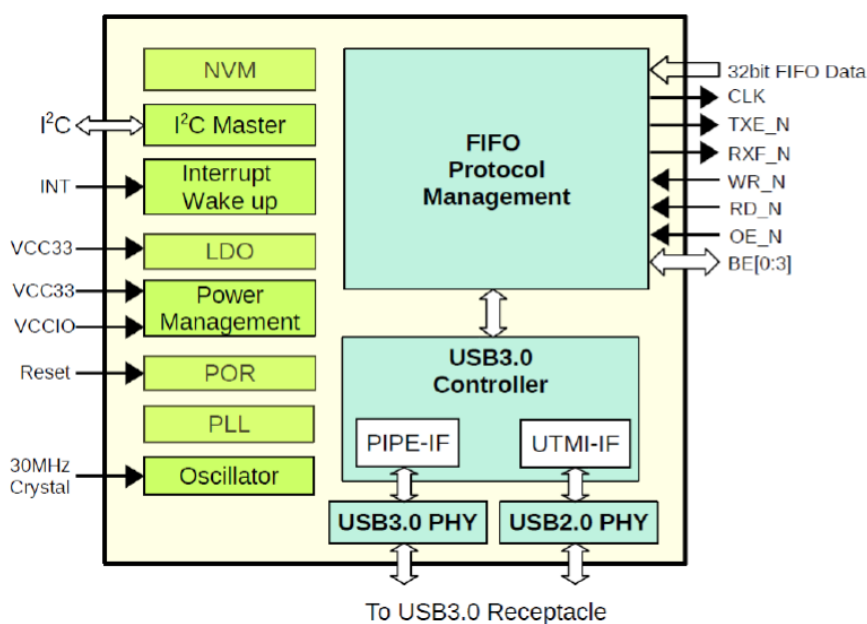
1	bmHeaderInfo	D[7:0]	bitové pole	<p>Obsahuje informace o video datech a přítomnosti volitelných polí hlavičky.</p> <p>D[0]: Frame ID - U frame-based formátů se bit přepne vždy při začátku nového snímku.</p> <p>D[1]: End of Frame - Bit je nastaven do 1, jestliže následující data obsahují konec aktuálního snímku.</p> <p>D[2]: Presentation Time - Bit je nastaven do 1, jestliže v hlavičce následuje pole dwPresentationTime.</p> <p>D[3]: Source Clock Reference - Bit je nastaven do 1, jestliže v hlavičce následuje pole dwSourceClock.</p> <p>D[4]: Payload specific bit.</p> <p>D[5]: Still Image - Bit je nastaven do 1, jestliže následující data jsou součástí samostatného snímku (nejsou součástí videostreamu).</p> <p>D[6]: Error - Bit značí chybu v přenosu pro daný payload.</p> <p>D[7]: End of header - Bit je nastaven do 1, jestliže hlavička neobsahuje žádná další pole kromě tohoto a volitelných polí zmíněných v tomto poli (Tato lehce nepřehledná konstrukce slouží pro umožnění případných dalších rozšíření v nových verzích specifikace).</p>
---	---------------------	--------	-------------	---

Různý	dwPresentationTime	D[31:0]	číslo	Presentation Time Stamp (PTS) - Čas zachycení snímku v jednotkách hodin kamery. Tento čas může být stejný pro několik payloadů jednoho snímku.
Různý	scrSourceClock	D[47:0]	číslo	A two-part Source Clock Reference (SCR) value D[31:0]: Čas v jednotkách hodin kamery. D[42:32]: 1KHz SOF čítač. D[47:43]: Rezerva, nastavené do 0. Toto pole musí být obsaženo v hlavičce minimálně jednou za 100 ms a zároveň alespoň jednou v každém snímku.

Tabulka 3.1: Hlavička video paketu. [4]

3.2 FTDI FT602

FTDI FT602 je zjednodušeně řečeno převodník nekomprimovaného videa do UVC. Podporuje přenos po USB 3.1 Gen 1 (Super Speed - 5Gbps) a USB 2.0 (High Speed - 480 Mbps), implementovaná verze UVC je 1.1. Převodník zvládne maximálně 4 paralelní video kanály a celková maximální propustnost na vstupu je 400 MB/s včetně režie - to stačí na přenos videa 1080p@60FPS. Dále podporuje nastavení kamery přes UVC, které předává dál po I2C sběrnici. Nastavitelné jsou také některé USB a UVC deskriptory, které zůstávají uložené v převodníku. Na obr. 3.1 je vidět blokové schéma převodníku.



Obrázek 3.1: Blokové schéma převodníku FTDI FT602. [5]

3.2.1 Vstupní rozhraní pro video

Převodník má vystavené vstupní 16 KB FIFO s 32bitovou datovou sběrnicí, řídicími signály a hodinami. Z pohledu sběrnice je zdroj videa (kamera) master a převodník (FT602) slave, hodiny sběrnice zde řídí slave (převodník) a dají se nastavit na 100 nebo 66 MHz. Sběrnice je řízena jedním ze dvou proprietárních protokolů: „Multi-Channel FIFO“ nebo „245 Synchronous FIFO“ protokol.

Multi-Channel FIFO

Tento protokol je určen pro streamování více paralelních kanálů (maximálně 4) a používá následující řídicí signály.

- **WR_N** ovládá master a je to požadavek na zahájení přenosu aktivní v 0.
- **RXF_N** ovládá slave a je to potvrzovací (acknowledge) signál aktivní v 0.
- **TXE_N** ovládá slave a v tomto protokolu není potřeba, oznamuje masteru, že FIFO má volné místo pro další transakci (FIFO je v idle stavu). Signál je aktivní v 0.

Datová sběrnice je 32bitová s 4bitovou sběrnici byte enable a má různé funkce i směr v různých fázích přenosu. Sběrnice má 3 stavy (fáze přenosu):

- **Idle** - DATA[31:16], DATA[7:0] a BE[3:0] drží master v 1 (všechny bity). DATA[15:8] ovládá slave a dolní část DATA[11:8] signalizuje po bitech stav jednotlivých kanálů, kde 0 značí idle. Např. když DATA[8] = 0, znamená to, že kanál 1 je ve stavu idle (má volné místo a je připraven přijmout další data), naopak když např. DATA[9] = 1, znamená to, že kanál 2 není ve stavu idle (nemá volné místo nebo není připraven přijmout další data).

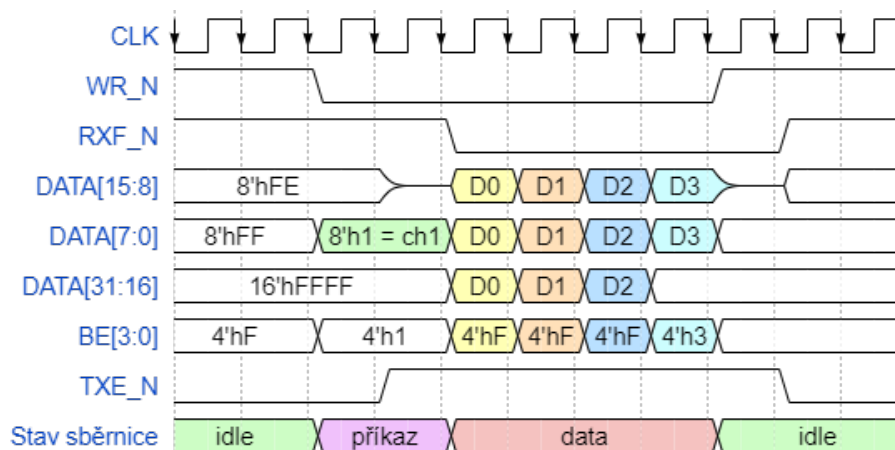
Stav kanálů na DATA[11:8]:

- DATA[8] - stav kanálu 1
 - DATA[9] - stav kanálu 2
 - DATA[10] - stav kanálu 3
 - DATA[11] - stav kanálu 4
- **Příkaz** - Jestliže je kanál ve stavu idle, master s ním může zahájit přenos stažením WR_N do 0. Zároveň nastaví BE[3:0] = 4'h1, což znamená příkaz pro zápis dat (jiný příkaz ani není k dispozici), a na DATA[7:0] zvolí kanál, se kterým chce komunikovat.

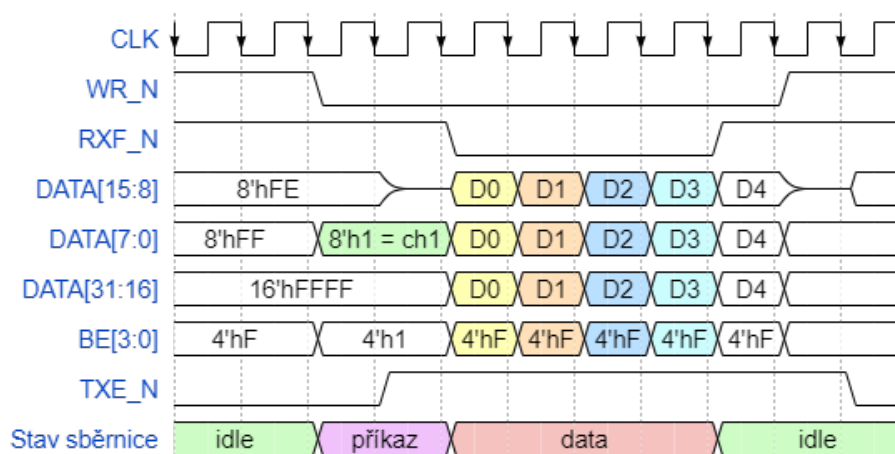
Adresy kanálů na DATA[7:0]:

- 8'h1 - kanál 1
 - 8'h2 - kanál 2
 - 8'h3 - kanál 3
 - 8'h4 - kanál 4
- **Data** - V Datové fázi slave stáhne RXF_N do 0, čímž dá vědět, že eviduje požadavek na zahájení přenosu a master pošle data na DATA[31:0] a nastaví platnost bytů v datech na BE[3:0]. Datovou fázi může ukončit buď master tím, že vrátí WR_N do 1, nebo slave (např. když mu během přenosu dojde místo), když vrátí RXF_N do 1. Po ukončení datové fáze se sběrnice vrátí do idle stavu, ovšem DATA[15:8], kterými slave v idle stavu sběrnice signalizuje stav jednotlivých kanálů, mají zpoždění a pro mastera jsou tak platná až v následujícím taktu.

Na obr. 3.2 je vidět přenos 14 B na kanál 1, který ukončuje master. Na obr. 3.3 je vidět přenos 20 B, který předčasně ukončuje slave, když mu dojde místo, takže se úspěšně přenesou jenom 16 B.



Obrázek 3.2: FT602 - přenos 1 s Multi-Channel FIFO protokolem.



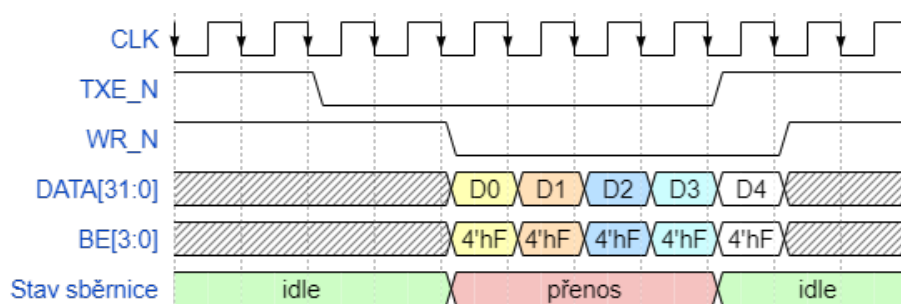
Obrázek 3.3: FT602 - přenos 2 s Multi-Channel FIFO protokolem.

■ 245 Synchronous FIFO

Tento protokol je zjednodušená verze předchozího „Multi-Channel FIFO“ protokolu a je pouze pro jeden kanál. Jeho řídicí signály jsou:

- **TXE_N** ovládá slave a signalizuje masteru, že FIFO má volné místo a je připravené na další přenos. Aktivní je v 0.
- **WR_N** ovládá master a oznamuje tím slavu zahájení přenosu, aktivní je v 0.

Datová sběrnice je zde opět 32bitová s 4bitovou sběrníci byte enable a tentokrát ji celou ovládá pouze master. Na obr. 3.4 je vidět přenos 20 B, který ukončí slave po 16 B zvednutím signálu TXE_N do 1.



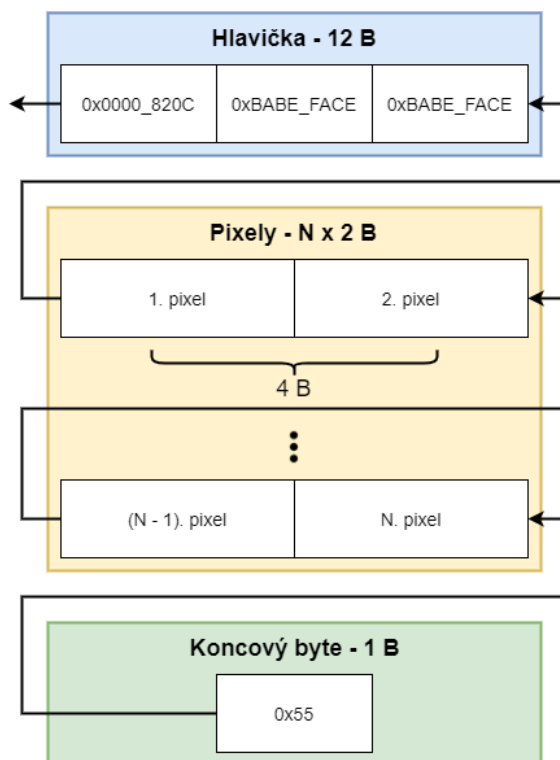
Obrázek 3.4: FT602 - přenos s 245 Synchronous FIFO protokolem.

■ Přenos snímků videa

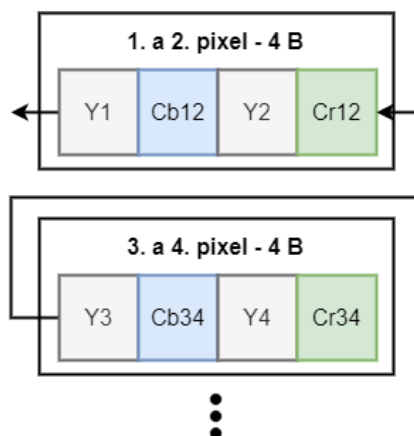
Převodník FT602 je navržený pro přenos nekomprimovaného videa ve formátu YCbCr422, který je většinou špatně označován jako YUV422 a to jak ve specifikaci UVC, tak v ovladačích většiny operačních systémů. Oba formáty jsou velmi podobné, ale liší se v barevném prostoru. Přenášet lze ovšem i některé další nekomprimované formáty např. Y16, což je jeden 16bitový kanál (16bitový černobílý obraz).

Do převodníku se po 32bitové sběrnici posílají pouze jednotlivé snímky. Snímky jsou obaleny 12 B hlavičkou, která značí začátek snímku, a koncovým bytem, který oznamuje konec snímku. Na obr. 3.5 je vidět přenos jednoho snímku videa s N pixely, kde každý pixel reprezentují 2 B. Šipky znázorňují směr toku dat a tím pádem i pořadí jednotlivých 4 B slov. Koncový byte 0x55 je potřeba poslat opravdu pouze jako 1 B, takže při jeho přenosu je třeba nastavit v byte enable sběrnici pouze jeden příslušný bit.

Při použití barevného kódování YCbCr422 není obr. 3.5 úplně přesný, poněvadž jednotlivá 2 B slova nepředstavují přímo jednotlivé pixely. Pixely jsou v tomto případě spojeny vždy po dvou do jednoho 4 B slova. Barevný prostor YCbCr má stejně jako např. RGB 3 kanály a v tomto případě má každý kanál 8 bitů. Nicméně, jak je vidět na obr. 3.6, zatímco jasový kanál Y je vzorkován pro každý pixel, barevné kanály Cb a Cr jsou vzorkovány pouze každý druhý pixel. Jinými slovy každý pixel má vlastní kanál Y, ale barevné kanály Cb a Cr spolu sdílí vždy 2 pixely.



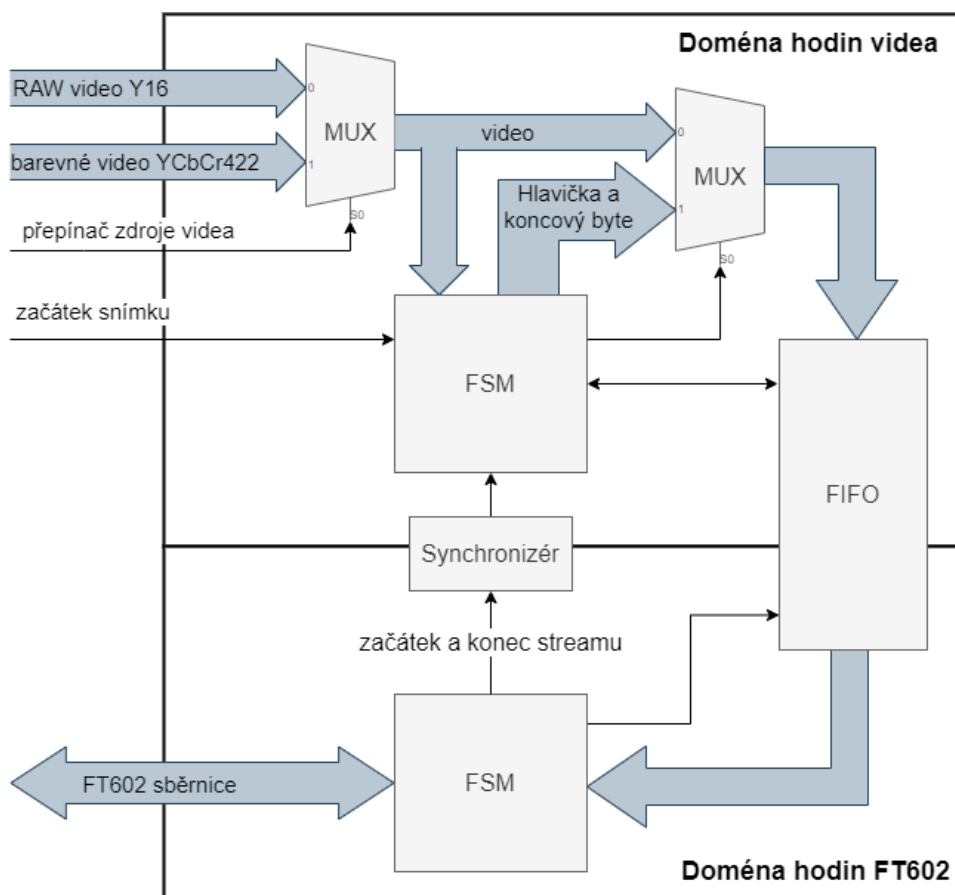
Obrázek 3.5: FT602 - Přenos snímku videa.



Obrázek 3.6: FT602 - formát YCbCr422.

3.3 Implementace

Na obr. 3.7 je vidět zjednodušené schéma modulu pro streamování videa do FT602. Zdroj videa je přepínatelný mezi RAW Y16 kanálem (radiometrická data) a barevným YCbCr422 kanálem (data obarvená paletou). Modul se dělí na dvě hlavní části - jedna je synchronní s hodinami videa a druhá s hodinami FT602 a každou z nich řídí stavový automat. V části synchronní s hodinami videa se provádí výběr ze dvou video kanálů a obalování video dat počáteční hlavičkou a koncovým bytem. Data mezi oběma doménami se předávají pomocí dvouhodinového FIFO modulu, který kromě synchronizace řeší i převod mezi různými šířkami video sběrnic a sběrnice FT602. Zatímco video sběrnice mají 16 bitů (1 pixel), FT602 má datovou sběrnici 32bitovou, a přenos do FT602 tedy probíhá vždy po 2 pixelech. Část synchronní s hodinami FT602 pak řeší samotný přenos dat mezi FPGA a UVC převodníkem, zjišťuje požadavek na zahájení streamu ze strany převodníku a také detekuje konec streamu. Na základě těchto zjištění následně posílá řídicí signály do stavového automatu části synchronní s hodinami videa.



Obrázek 3.7: Blokové schéma modulu pro streamování videa do FT602.

V tab. 3.2 je velikost modulu pro komunikaci s převodníkem FT602 pro streamování videa přes UVC. Nejprve je uvedena velikost návrhu po syntéze HDL kódu a následně velikost finální podoby implementace na FPGA.

Fáze návrhu	LUTy	Registry [bity]	Bloková paměť [bity]
Syntéza	310	255	8704
Fitter (Place & Route)	309	300	8704

Tabulka 3.2: Výsledná velikost navrženého modulu pro komunikaci s převodníkem FT602 pro streamování videa pomocí UVC.

Streamované video přes UVC má rozlišení 640x480 a FPS 60 Hz. V případě obou kanálů (RAW Y16 a barevný YCbCr422) připadají v průměru 2 B na pixel, což při daném rozlišení činí na jeden snímek:

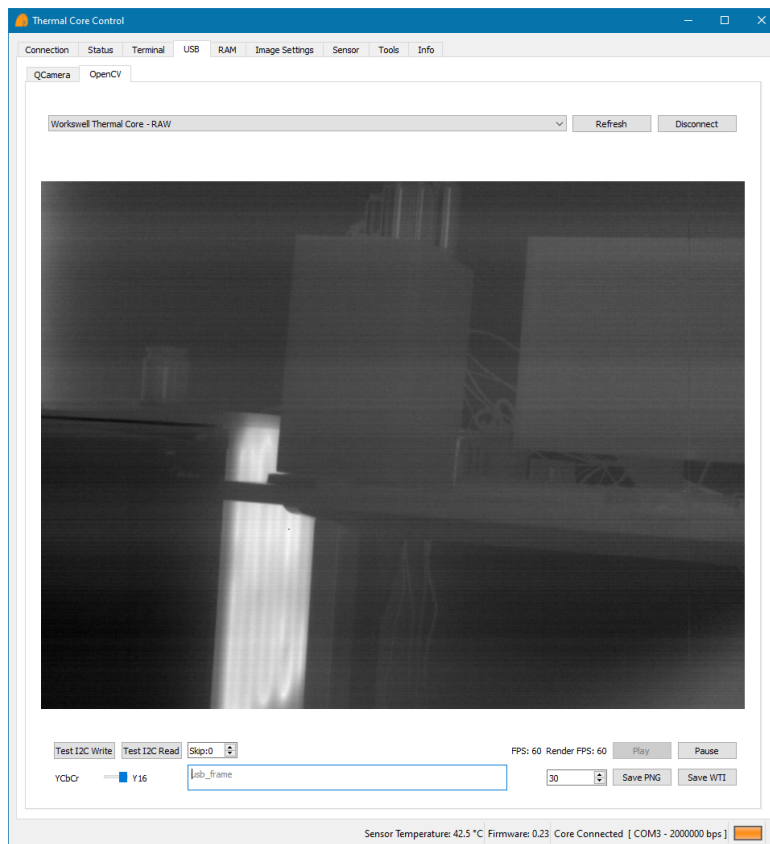
$$\frac{640 \cdot 480 \cdot 2 \text{ B}}{2^{10}} = 600 \text{ KiB.} \quad (3.1)$$

Při daném FPS je využita propustnost:

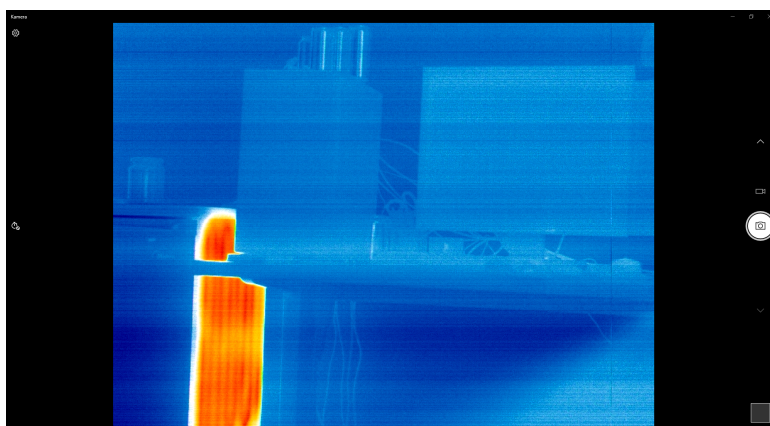
$$600 \text{ KiB} \cdot 60 \text{ Hz} = 36000 \text{ KiB/s} \doteq 295 \text{ Mbit/s.} \quad (3.2)$$

Videostream dosahuje 60 FPS i na USB 2.0 v režimu Hi-Speed (480 Mbit/s), nicméně z využití propustnosti je vidět, že v tomto režimu už nemá moc velkou rezervu.

Na obr. 3.8 je vidět UVC stream z termokamery v aplikaci Workswell Thermal Core Control. Díky univerzálnosti standardu UVC můžeme streamy kódované v YCbCr422 pouštět i v mnoha dalších aplikacích třetích stran, zde na obr. 3.9 je vidět UVC stream z termokamery v aplikaci Windows Kamera, která je primárně určena pro webkamery. Dále byl videostream testován v aplikaci VLC media player nebo Skype.



Obrázek 3.8: UVC stream v aplikaci Workwell Thermal Core Control.



Obrázek 3.9: UVC stream v aplikaci Windows Kamera.

Kapitola 4

Obarvení termodat paletou

Mikrobolometrické pole dává na výstupu napětí odpovídající odporu jednotlivých aktivních mikrobolometrů a ten je úměrný teplotě scény. Z toho je tedy jasné, že videodata z mikrobolometrického pole mají pouze jeden kanál (jsou černobílá). Z praktického hlediska může být ovšem užitečnější zobrazovat jednotlivé teploty různými barvami - obarvit data paletou. Nicméně musíme mít na paměti, že obarvení termodat paletou je částečně nevratný proces a přicházíme při něm o podstatnou část informace, kterou termodata nesou.

Paletu můžeme chápat např. jako zobrazení, které každé vstupní hodnotě přiřazuje nějakou barvu

$$p(y) = (R, G, B), \quad (4.1)$$

kde y odpovídá měřenému napětí na výstupu mikrobolometru a R , G a B jsou barevné složky RGB modelu. Nebo v našem případě:

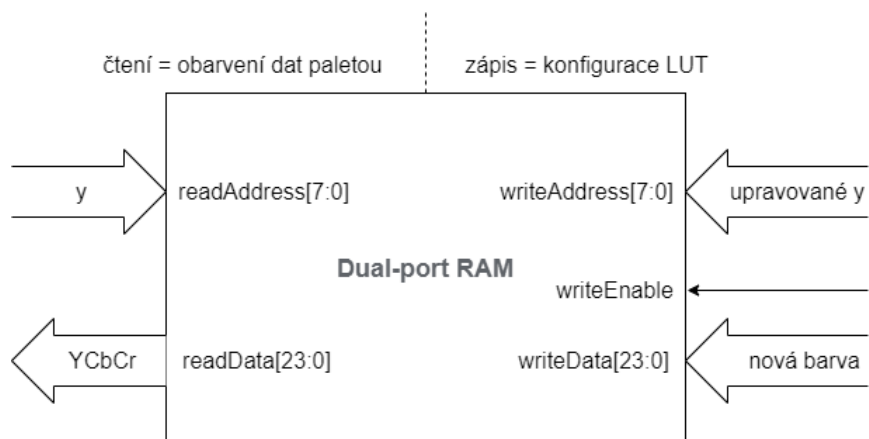
$$p(y) = (Y, Cb, Cr), \quad (4.2)$$

kde Y , Cb a Cr jsou komponenty YCbCr modelu. Praktické realizace tohoto zobrazení p mohou být velmi různé, např. se může jednat o nějaký prostý funkční předpis. V praxi budou hodnoty y , Y , Cb a Cr digitální, což mimo jiné znamená diskrétní a s omezeným rozsahem, barevné komponenty budou např. typicky 8bitové. V takovém případě si mnohdy vystačíme s 8bitovou, případně až 10bitovou paletou, což znamená, že vstupní veličinu y omezíme na rozsah 8 až 10 bitů. Vstupní množina zobrazení (vzor) tak bude mít 256 až 1024 prvků a taková paleta se dá jednoduše realizovat jako LUT (lookup table - vyhledávací tabulka). V FPGA je taková realizace velmi jednoduchá, stačí nám na to vnitřní bloková RAM, kde vstupní veličinu y použijeme jako adresu a jednotlivá slova v paměti budou představovat barevné složky barvy, která odpovídá dané adrese (vstupní veličině y).

Na obr. 4.1 je vidět implementace LUT pro obarvení termodat paletou pomocí dual-port RAM v FPGA. Čtecí port paměti je použit pro samotné obarvení a zápisový pak pro konfiguraci LUT - nahrání nové palety. Jednotlivá slova v paměti jsou 24bitová a každé slovo představuje jednu barvu reprezentovanou svým YCbCr kódem. V tab. 4.1 je velikost navrženého modulu pro obarvení termodat paletou po syntéze a následně finální verze implementované v FPGA.

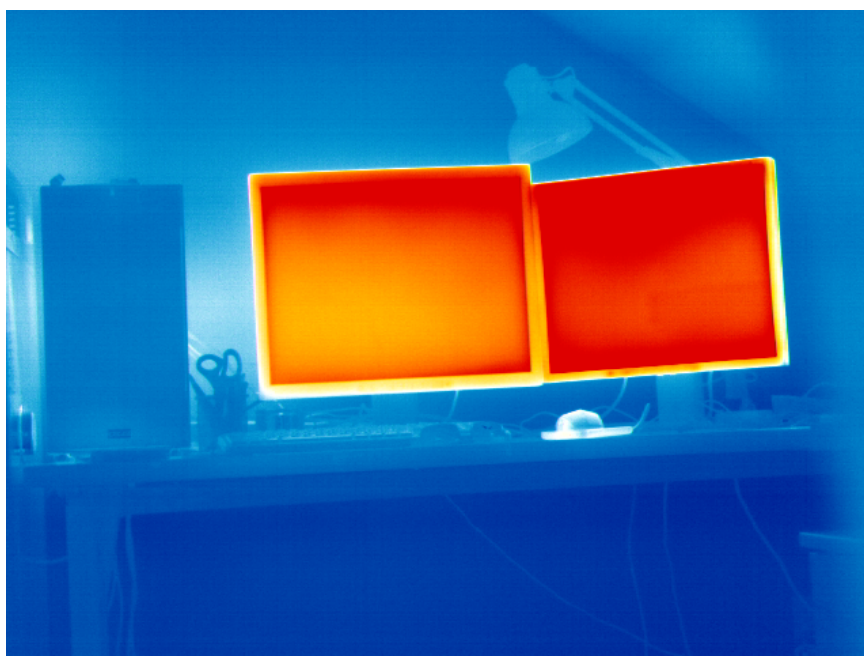
Fáze návrhu	LUTy	Registry [bity]	Bloková paměť [bity]
Syntéza	40	27	6400
Fitter (Place & Route)	40	30	6400

Tabulka 4.1: Výsledná velikost navrženého modulu pro obarvení termodat paletou.

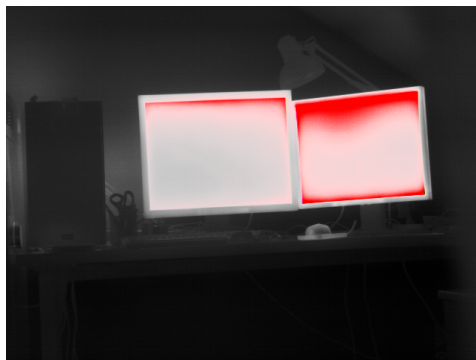


Obrázek 4.1: Implementace LUT pro obarvení dat paletou jako dual-port RAM.

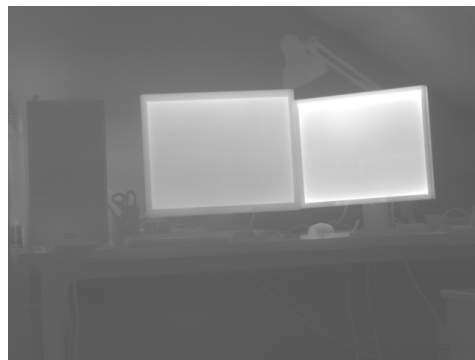
Na obr. 4.2 a 4.3 jsou vidět termodata ze scény 1 obarvená různými 8bitovými paletami. Dále na obr. 4.4 jsou vidět obarvená termodata ze scény 2.



Obrázek 4.2: Termodata ze scény 1 obarvená paletou „blue-red“.



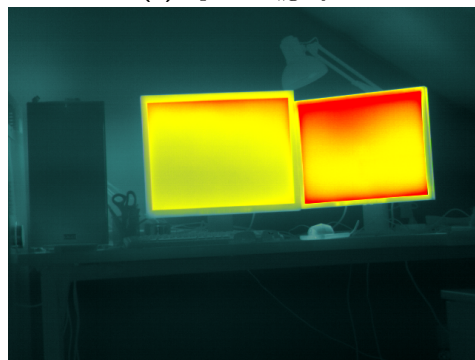
(a) : paleta „black-red“



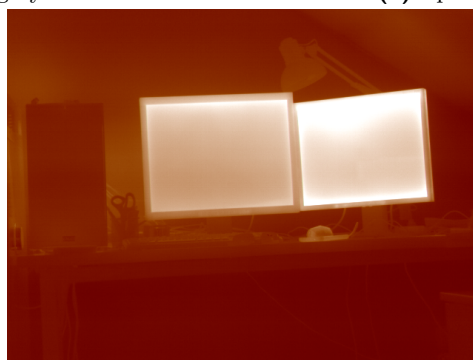
(b) : paleta „gray“



(c) : paleta „gray-inverted“

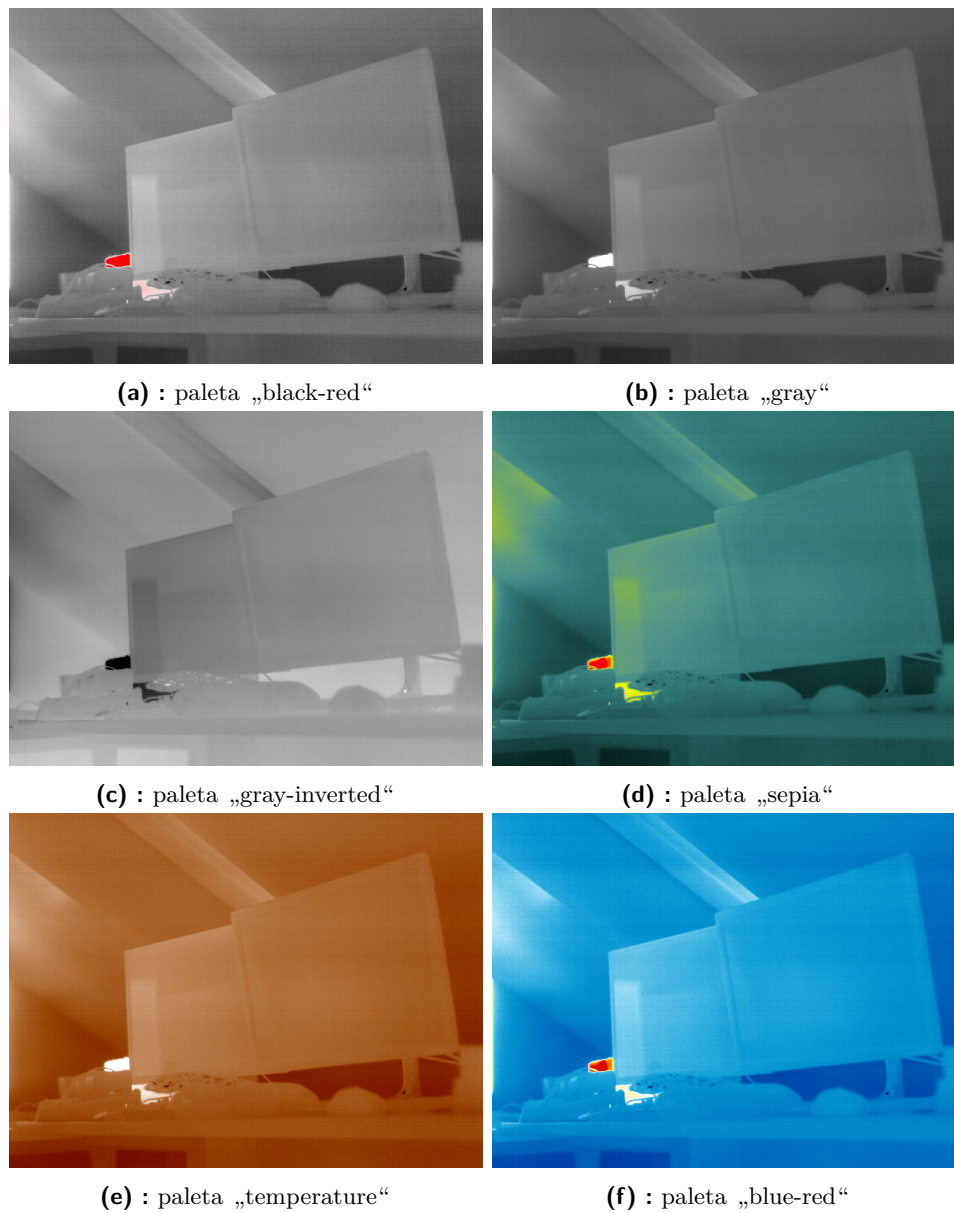


(d) : paleta „sepia“



(e) : paleta „temperature“

Obrázek 4.3: Termodata ze scény 1 obarvená různými paletami.



Obrázek 4.4: Termodata ze scény 2 obarvená různými paletami.

Kapitola 5

Kalibrace

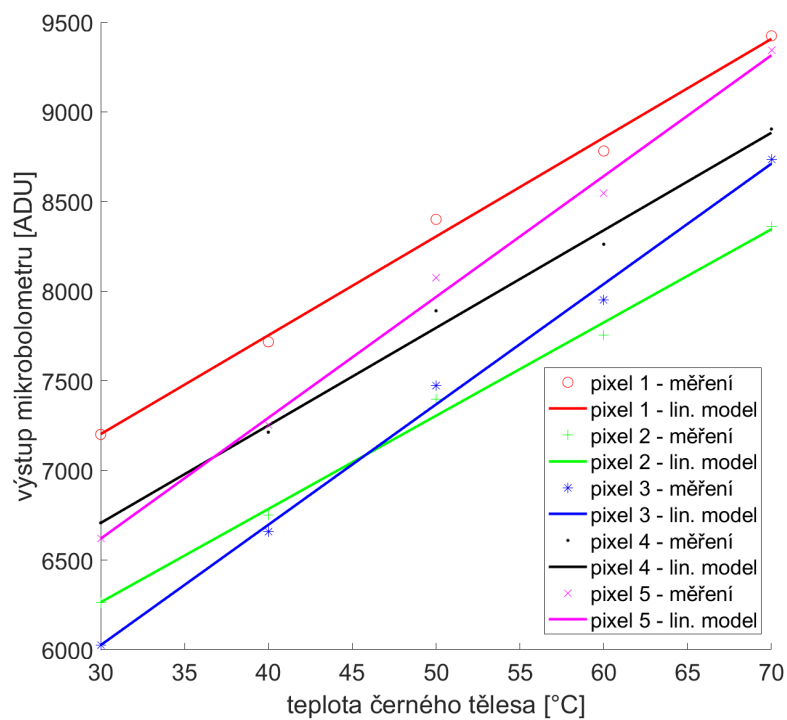
5.1 Non-Uniformity correction (NUC)

Mikrobolometrické pole je ve své podstatě soustava mnoha jednotlivých senzorů (mikrobolometrů), které jsou velice podobné, nicméně kvůli různým vlivům mají více či méně různé výstupní charakteristiky. Jedním z hlavních faktorů je rozptyl technologických parametrů při samotné výrobě senzoru, kdy jednotlivé mikrobolometry v poli nejsou fyzicky úplně stejné. Stejně tak nejsou úplně stejné ani jednotlivé větve vyčítací elektroniky senzoru (ROIC) pro různé řádky a sloupce pixelů. Dalšími důležitými vlivy jsou geometrie použité optiky termokamery nebo nehomogenní ohřívání senzoru - např. od okolní elektroniky.

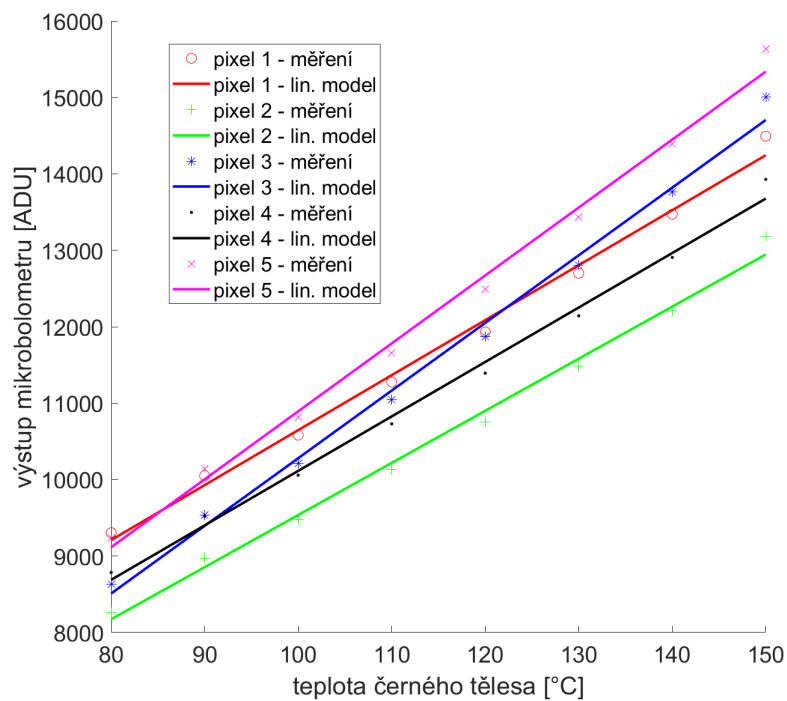
Tuto nehomogenitu mikrobolometrického pole lze nejlépe sledovat při pohledu na černé těleso. Jestliže zakryjeme celé zorné pole termokamery černým tělesem, které má homogenní povrchovou teplotu, měly by všechny pixely mít stejnou odezvu. Kvůli nehomogenitě senzoru tomu ovšem tak nebude a bude patrná nehomogenita i v obraze. Na obr. 5.1 a 5.2 je vidět odezva pěti různých pixelů na homogenní scéně s různými teplotami černého tělesa. Uvažujme lineární model mikrobolometru

$$y = k \cdot T + b, \quad (5.1)$$

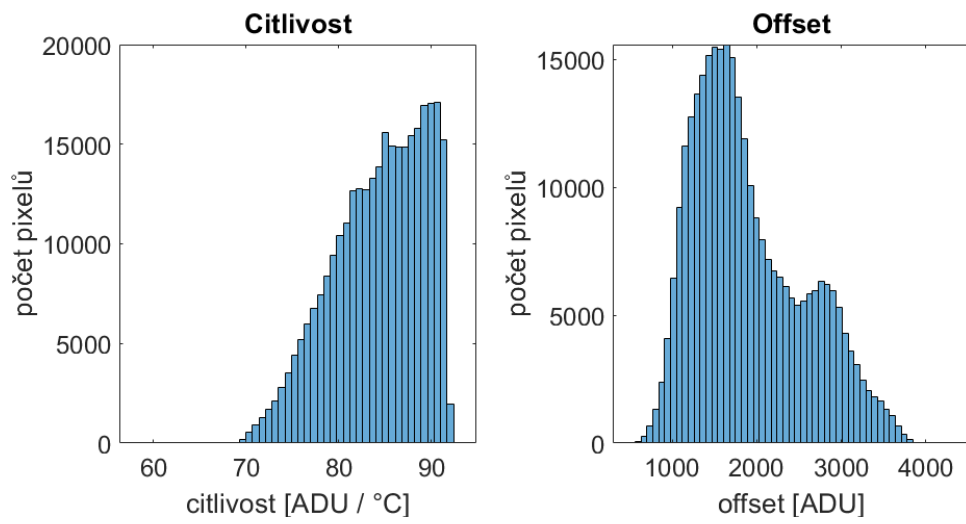
kde T je teplota scény, k je citlivost mikrobolometru a b je jeho offset. Na obr. 5.1 a 5.2 je dobře vidět, že jednotlivé pixely mají různé citlivosti i offsety. Na obr. 5.3 je pak podrobněji vidět rozložení citlivostí a offsetů jednotlivých pixelů v histogramu. Prostorové rozložení citlivostí a offsetů jednotlivých pixelů na ploše senzoru je pak vidět na obr. 5.4 a 5.5. U citlivosti je vidět patrný efekt optiky termokamery, kdy ve středu senzoru je citlivost největší a klesá postupně ke krajům [6]. Z toho je také jasné, že výsledné citlivosti jednotlivých pixelů budou vždy ovlivněny výběrem použitého objektivu a jiné optiky.



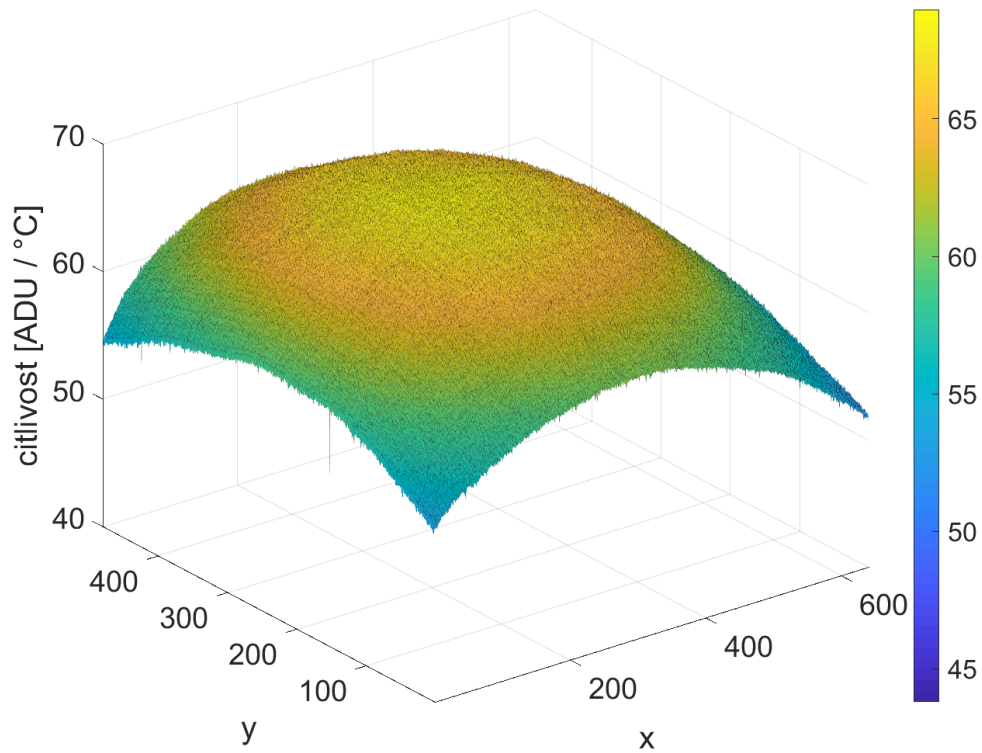
Obrázek 5.1: Odezvy jednotlivých pixelů na různé teploty černého tělesa.



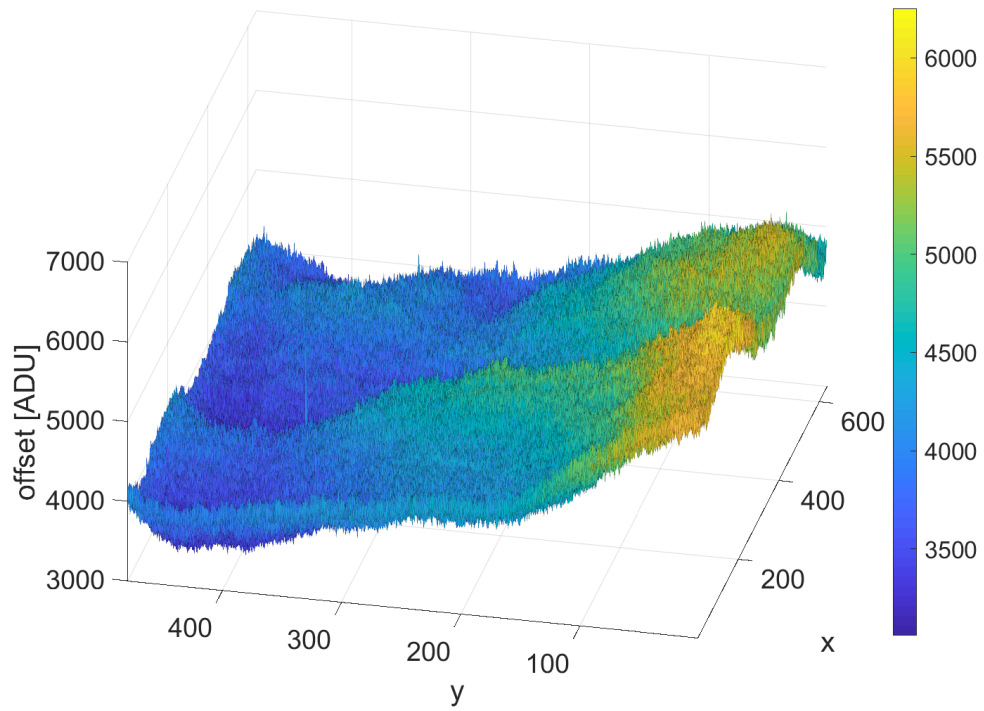
Obrázek 5.2: Odezvy jednotlivých pixelů na různé teploty černého tělesa.



Obrázek 5.3: Histogramy citlivostí a offsetů jednotlivých pixelů.



Obrázek 5.4: Citlivosti jednotlivých pixelů.



Obrázek 5.5: Offsety jednotlivých pixelů.

5.1.1 Jednobodová korekce

Jednobodová korekce je nejjednodušší varianta NUCu a kompenzuje pouze offsety jednotlivých pixelů tak, aby pro zvolenou kalibrační teplotu scény měly všechny pixely stejný výstup – průměrnou hodnotu ze všech pixelů. Korigovaný výstup pro zvolenou kalibrační teplotu tedy bude:

$$y'_{ij}(T_k) = y_{ij}(T_k) - b_{ij} = \langle y(T_k) \rangle, \quad (5.2)$$

kde y'_{ij} je korigovaný výstup, y_{ij} je výstup před korekcí, b_{ij} je korekce offsetu, T_k je zvolená kalibrační teplota scény (černého tělesa) a $\langle \dots \rangle$ je operátor aritmetického průměru přes všechny pixely. Z rovnice (5.2) můžeme určit korekci offsetu pro každý pixel:

$$b_{ij} = y_{ij}(T_k) - \langle y(T_k) \rangle. \quad (5.3)$$

Výsledný korigovaný výstup bude

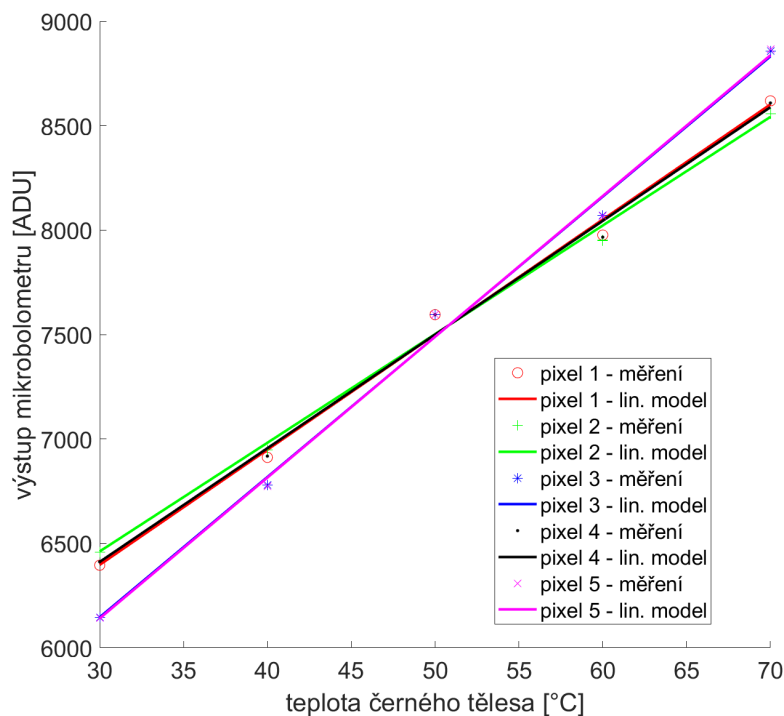
$$y'_{ij} = y_{ij} - b_{ij}. \quad (5.4)$$

Po dosazení z rovnice (5.2) dostaneme

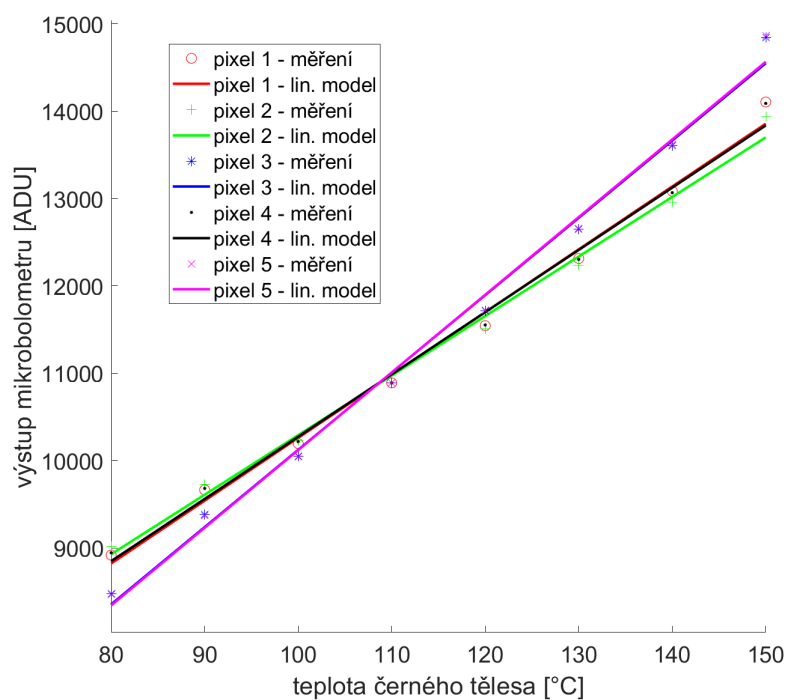
$$y'_{ij} = y_{ij} - y_{ij}(T_k) + \langle y(T_k) \rangle. \quad (5.5)$$

Pro určení korekce offsetu tedy stačí snímek homogenní scény při zvolené kalibrační teplotě. Pro potlačení šumu je ovšem vhodné nasnímat snímků víc a nejprve je před dalším postupem zprůměrovat. Tato metoda je velmi jednoduchá a navíc v praxi, pokud využijeme závěrky jako referenční homogenní scény, se obejde bez nutnosti tovární kalibrace. Kamera se závěrkou se tak může kalibrovat sama za běhu a aktualizovat v průběhu času korekci offsetu.

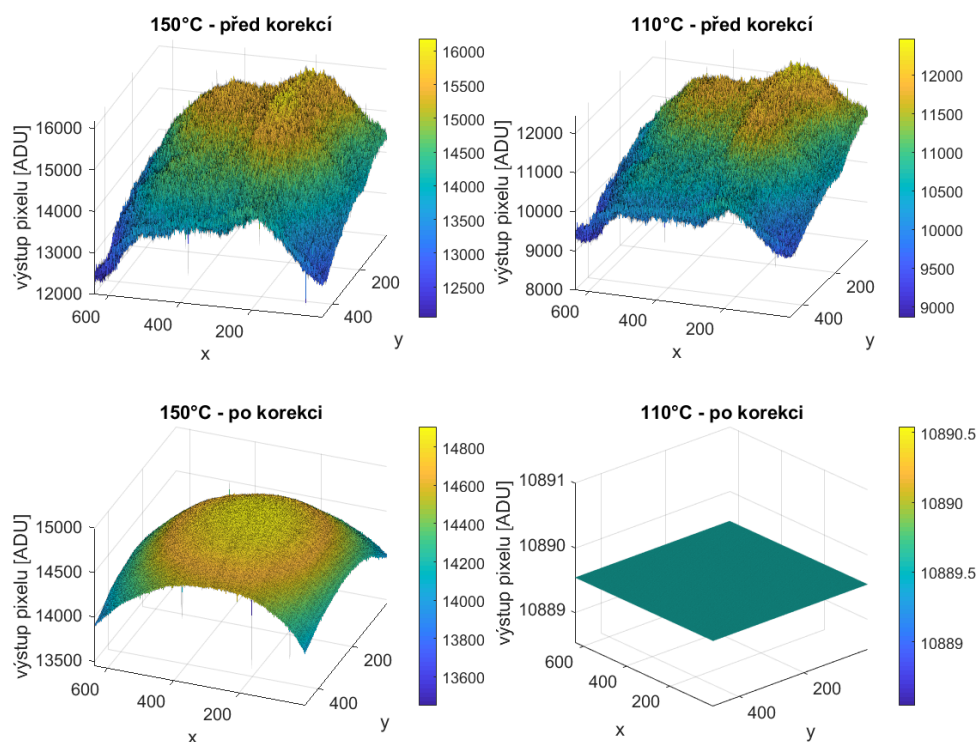
Po jednobodové korekci tedy budou mít všechny pixely stejný výstup pro zvolenou kalibrační teplotu scény a zmenší se nehomogenita pixelů na blízkém okolí této kalibrační teploty, jak můžeme vidět na obr. 5.6 a 5.7. Nicméně pro pixely s různou citlivostí bude s rostoucí vzdáleností od kalibrační teploty nehomogenita opět relativně rychle narůstat. Jak již bylo popsáno v kapitole 5.1, citlivosti pixelů nejsou na ploše senzoru rozloženy náhodně, ale vlivem optiky termokamery jsou nejvyšší ve středu senzoru a postupně se snižují ke krajům senzoru. A tedy i zbytková nehomogenita po jednobodové korekci nebude mít už původní „náhodný“ charakter, ale bude rozložena podobně jako citlivosti. To můžeme pozorovat na obr. 5.8, kde jsou prostorově zobrazeny snímky černého tělesa při 150 a 110 °C před a po jednobodové korekci při zvolené kalibrační teplotě 110 °C. Na obr. 5.9 jsou tyto snímky.



Obrázek 5.6: Výstup korigovaný jednobodovou korekcí jednotlivých pixelů pro různé teploty černého tělesa. Zvolená kalibrační teplota je 50 °C.

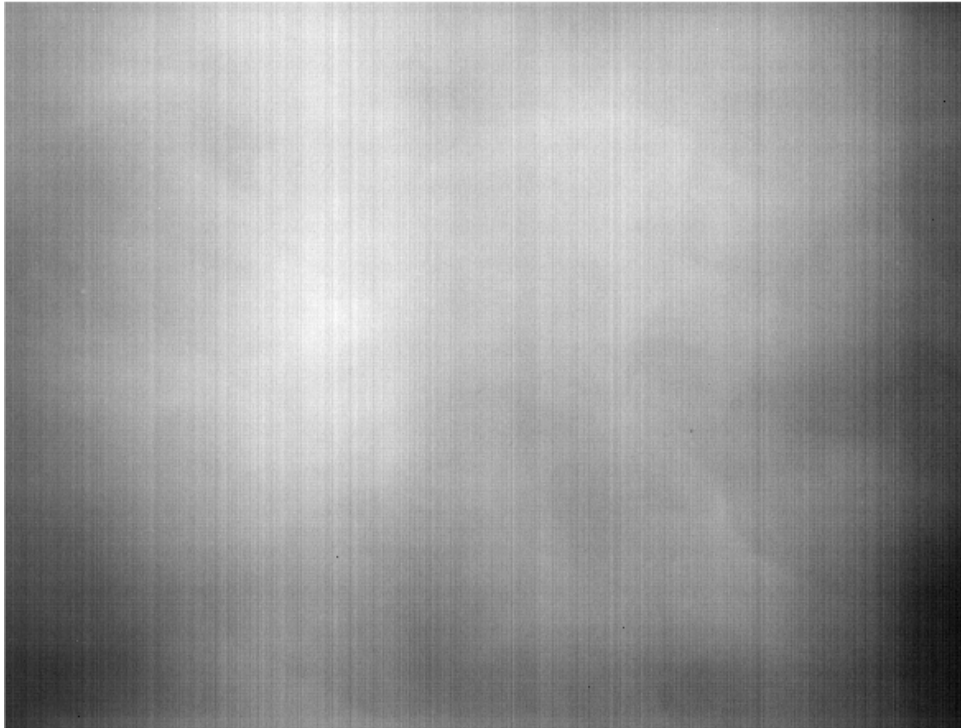


Obrázek 5.7: Výstup korigovaný jednobodovou korekcí jednotlivých pixelů pro různé teploty černého tělesa. Zvolená kalibrační teplota je 110 °C.

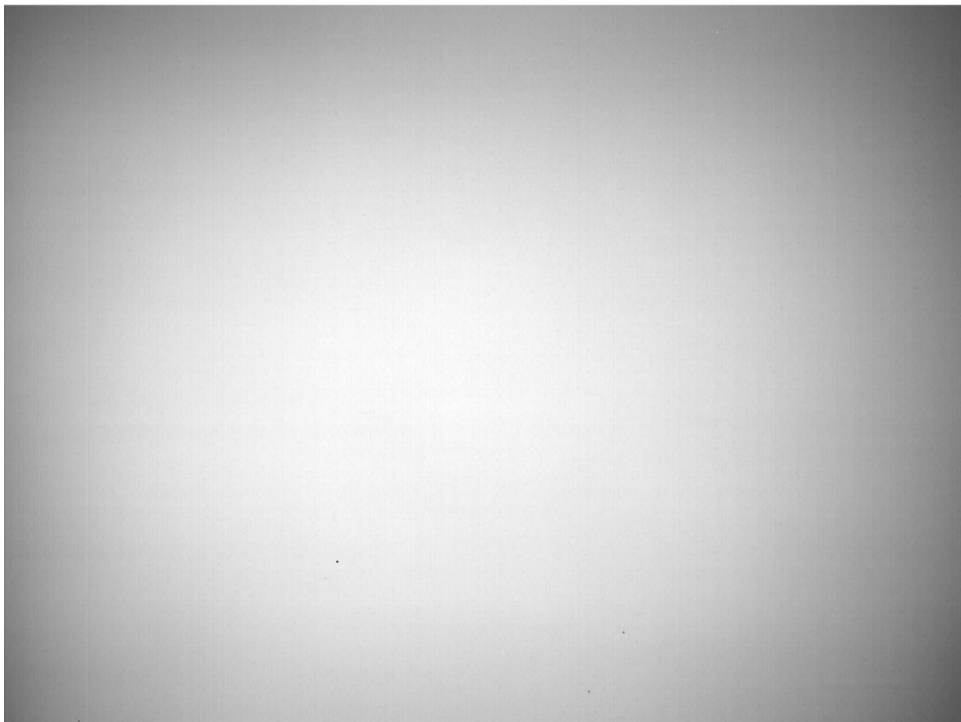


Obrázek 5.8: Snímky černého tělesa při 150 a 110 °C před a po jednobodové korekci pro zvolenou kalibrační teplotu 110 °C.

před korekcí



po korekci



Obrázek 5.9: Snímek černého tělesa při 150 °C před a po korekci pro zvolenou kalibrační teplotu 110 °C.

5.1.2 Dvoubodová korekce

Korekce citlivosti

Dvoubodová korekce přidává kromě offsetů ještě kompenzaci citlivostí jednotlivých pixelů [7]. V prvním kroku jsou kompenzovány citlivosti:

$$y'_{ij} = k_{ij} \cdot y_{ij}, \quad (5.6)$$

y_{ij} je výstup před korekcí a k_{ij} je kompenzace citlivosti. Citlivosti jsou kompenzovány tak, aby pro dvě zvolené kalibrační teploty scény T_2 a T_1 měly všechny pixely stejnou citlivost – průměr citlivostí všech pixelů. Korigovaná citlivost pixelů tedy bude

$$k'_{ij} = \frac{\Delta y'_{ij}}{\Delta T} = \left\langle \frac{\Delta y}{\Delta T} \right\rangle = \frac{\langle \Delta y \rangle}{\Delta T}, \quad (5.7)$$

kde $\Delta y'_{ij}$ je změna výstupu s kompenzovanou citlivostí při změně teploty scény ΔT a $\langle \dots \rangle$ značí operátor aritmetického průměru přes všechny pixely. Po úpravě dostaneme

$$y'_{ij}(T_2) - y'_{ij}(T_1) = \langle y(T_2) - y(T_1) \rangle. \quad (5.8)$$

Na levé straně dosadíme z (5.6) a na pravé využijeme linearitu operátoru

$$k_{ij}y_{ij}(T_2) - k_{ij}y_{ij}(T_1) = \langle y(T_2) \rangle - \langle y(T_1) \rangle. \quad (5.9)$$

Po další úpravě dostaneme výslednou kompenzaci citlivosti pro jednotlivé pixely

$$k_{ij} = \frac{\langle y(T_2) \rangle - \langle y(T_1) \rangle}{y_{ij}(T_2) - y_{ij}(T_1)}. \quad (5.10)$$

Na obr. 5.10 je vidět výstup vybraných pixelů po korekci citlivosti pro různé teploty scény. Zvolené kalibrační teploty jsou 90 a 140 °C.

Korekce offsetu

V druhém kroku jsou kompenzovány offsety podobně jako při jednobodové korekci popsané v části 5.1.1:

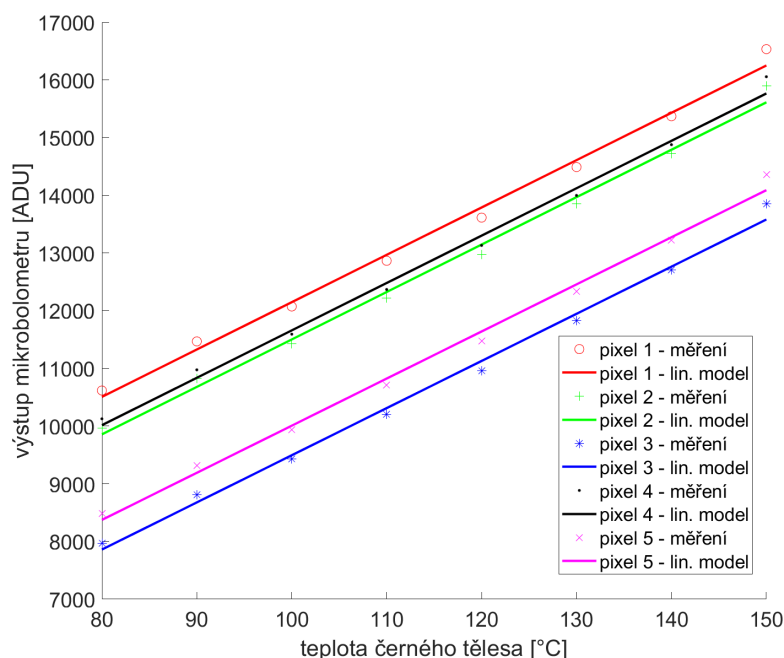
$$y''_{ij} = y'_{ij} - b_{ij}, \quad (5.11)$$

kde y'_{ij} je výstup po korekci citlivosti a b_{ij} je kompenzace offsetu. Kompenzace offsetů jsou zvoleny tak, aby při obou kalibračních teplotách scény byl korigovaný výstup stejný pro všechny pixely – průměr ze všech pixelů:

$$y''_{ij}(T_1) = \langle y(T_1) \rangle, \quad y''_{ij}(T_2) = \langle y(T_2) \rangle. \quad (5.12)$$

Po dosazení z (5.11) dostaneme

$$b_{ij} = y'_{ij}(T_1) - \langle y(T_1) \rangle. \quad (5.13)$$



Obrázek 5.10: Výstup jednotlivých pixelů pro různé teploty černého tělesa po korekci citlivosti. Zvolené kalibrační teploty jsou 90 a 140 °C.

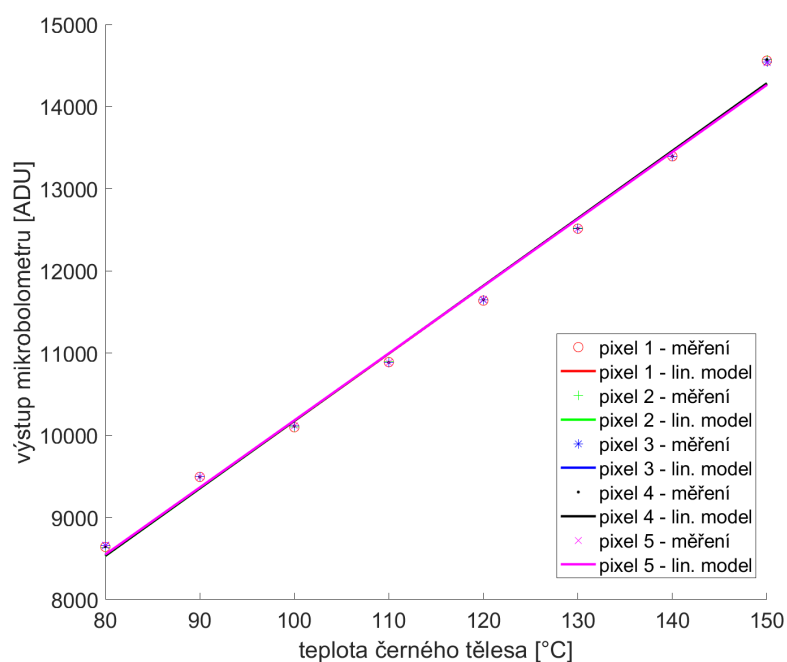
Dosadíme za y'_{ij} z (5.6) a dostaneme výslednou kompenzaci offsetu

$$b_{ij} = k_{ij}y_{ij}(T_1) - \langle y(T_1) \rangle. \quad (5.14)$$

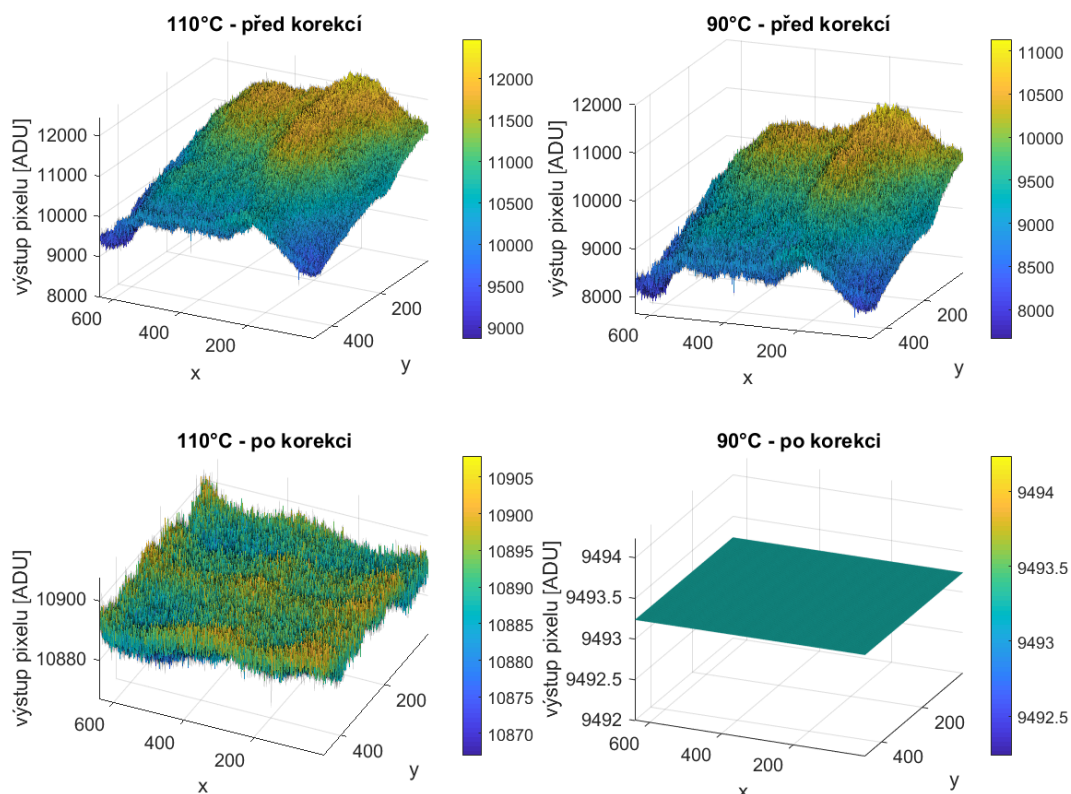
Dosazením (5.6) za y'_{ij} do (5.11) dostaneme výsledný vztah pro korigovaný výstup po dvoubodové korekci:

$$y''_{ij} = k_{ij} \cdot y_{ij} - b_{ij}. \quad (5.15)$$

Na obr. 5.11 vidíme korigovaný výstup vybraných pixelů dvoubodovou korekcí. Zvolené kalibrační teploty jsou $T_2 = 140^\circ\text{C}$ a $T_1 = 90^\circ\text{C}$. Kompenzační koeficienty jsou vypočítané tak, že výstup homogenní scény po dvoubodové korekci bude pro dané dvě kalibrační teploty homogenní. Pokud by charakteristika jednotlivých pixelů (mikrobolometrů) byla skutečně lineární, pak by i pro ostatní teploty homogenní scény byl výstup po korekci rovněž homogenní. Ve skutečnosti však nelinearity charakteristik jednotlivých pixelů způsobí pro ostatní teploty homogenní scény zbytkovou nehomogenitu výstupu i po korekci. Na obr. 5.12 jsou prostorově zobrazeny snímky černého tělesa při 110 a 90 °C před a po dvoubodové korekci. Snímek černého tělesa při 110 °C před a po korekci je pak na obr. 5.13. Na obr. 5.14 je snímek scény 1 a na obr. 5.15 scény 2 před a po dvoubodové korekci.

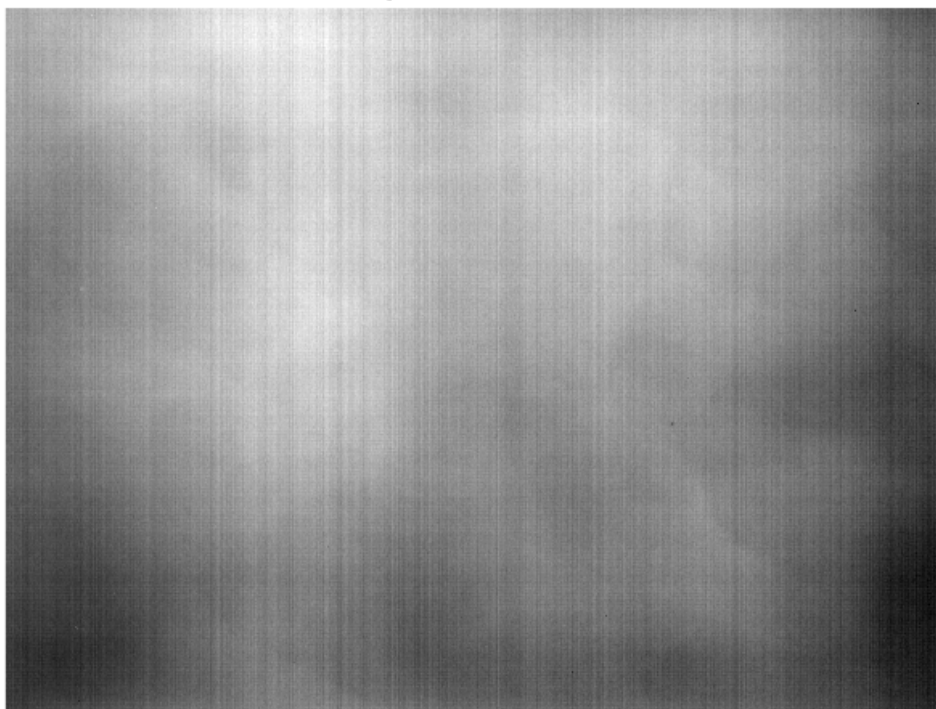


Obrázek 5.11: Korigovaný výstup dvoubodovou korekcí jednotlivých pixelů pro různé teploty scény. Zvolené kalibrační teploty scény jsou 90 a 140 °C.

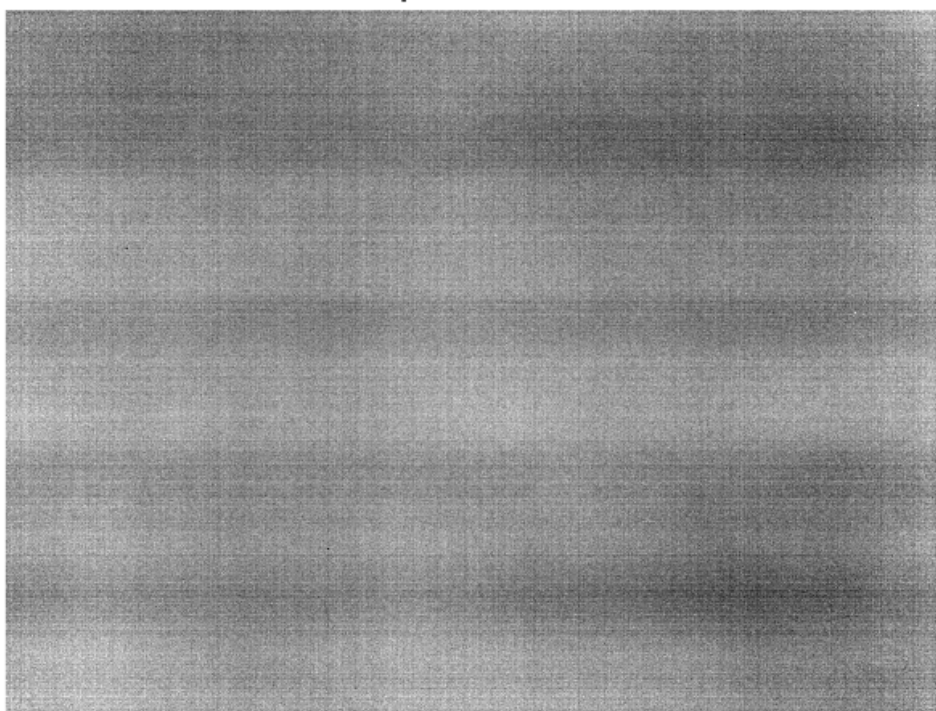


Obrázek 5.12: Snímky černého tělesa při 90 a 110 °C před a po dvoubodové korekci. Zvolené kalibrační teploty jsou 90 a 140 °C.

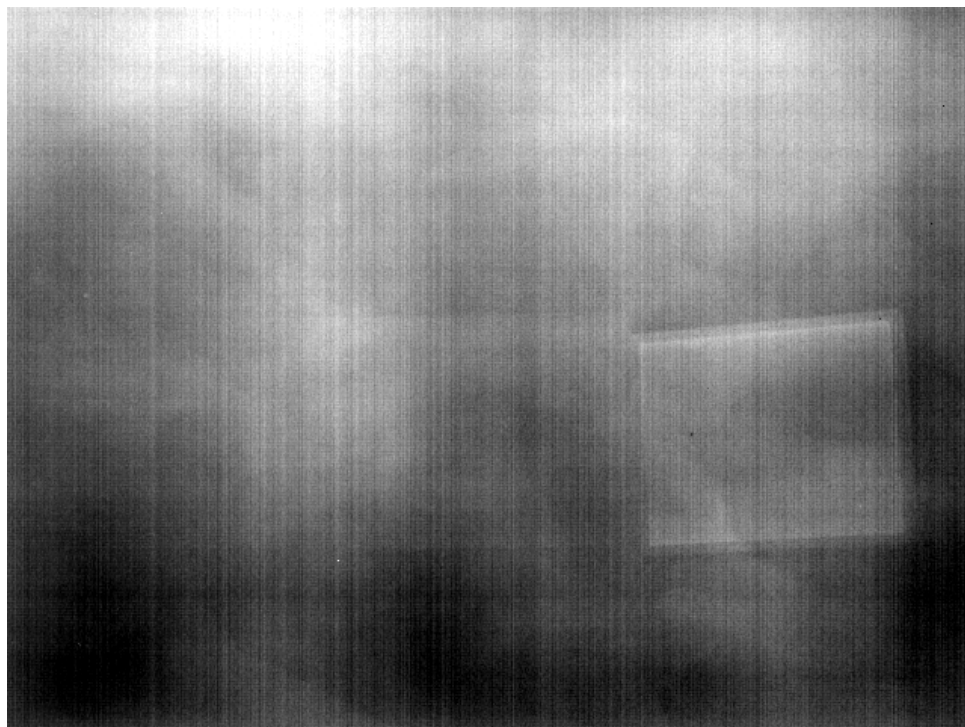
před korekcí



po korekci



Obrázek 5.13: Snímek černého tělesa při 110 °C před a po dvoubodové korekci. Zvolené kalibrační teploty jsou 90 a 140 °C.

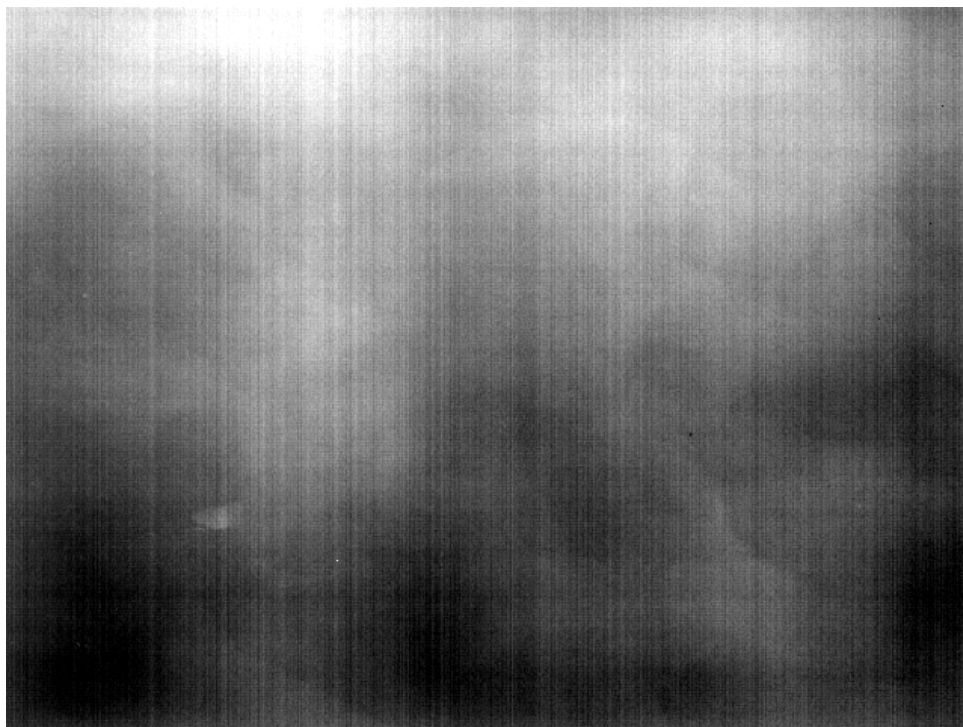


(a) : před korekcí

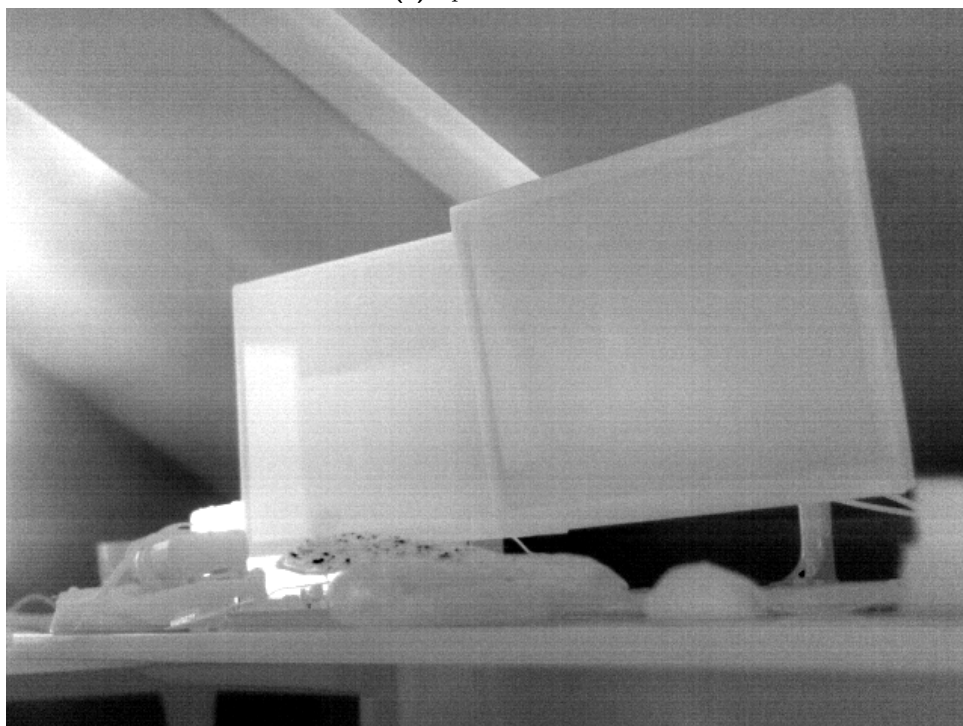


(b) : po korekci

Obrázek 5.14: Snímek scény 1 před a po dvoubodové korekci. Zvolené kalibrační teploty jsou 30 a 40 °C.



(a) : před korekcí



(b) : po korekci

Obrázek 5.15: Snímek scény 2 před a po dvoubodové korekci. Zvolené kalibrační teploty jsou 30 a 40 °C.

Jak je vidět z testovacích snímků, dvoubodová korekce je výrazně účinnější než jednobodová. Její hlavní výhodou je, že homogenizuje obraz na celém kalibračním rozsahu teplot scény na rozdíl od jednobodové korekce, která homogenizuje obraz pouze na blízkém okolí kalibrační teploty scény. V tab. 5.1 jsou porovnány naměřené hodnoty směrodatných odchylek homogenních scén před a po jednobodové a dvoubodové korekci. Dvoubodová korekce na druhou stranu vyžaduje pro běh zhruba 2x větší paměť, protože je potřeba si pamatovat 2 koeficienty na každý pixel (k_{ij} a b_{ij}), zatímco jednobodová korekce si vystačí s jedním koeficientem na pixel (b_{ij}). Další nevýhodou je nutnost tovární kalibrace každého kusu pro 2 kalibrační teploty scény (černého tělesa), což značně komplikuje výrobní proces. Navíc je potřeba koeficienty při výrobě do kamery uložit, což vyžaduje mít v kameře dostatečně velkou nevolatilní paměť.

Teplota scény [$^{\circ}C$]	$\langle y \rangle$ [ADU]	σ [ADU]	σ_{1bod} [ADU]	σ_{2bod} [ADU]
80	8652	624	132	9
90	9493	637	86	0
100	10112	648	47	5
110	10890	669	0	4
120	11651	690	48	5
130	12517	717	98	5
140	13396	751	153	0
150	14556	782	215	16

Tabulka 5.1: Porovnání naměřených směrodatných odchylek homogenních scén pro různé teploty černého tělesa před a po korekci. $\langle y \rangle$ je průměrná odezva přes všechny pixely, σ je směrodatná odchylka před korekcí (RAW výstupu), σ_{1bod} po jednobodové a σ_{2bod} po dvoubodové korekci.

5.1.3 Aktualizace offsetu ze závěrky

Jak se v čase mění okolní prostředí senzoru, mění se postupně i charakteristiky jednotlivých pixelů. Velký vliv na chování senzoru má jeho vlastní teplota a teplota okolí. Dále je tato problematika rozebrána v kap. 5.2. Z hlediska homogenity obrazu je důležité, že teplota senzoru a jeho okolí mohou výrazně měnit citlivosti a offsety jednotlivých pixelů. Kalibrační koeficienty napočítané při tovární kalibraci podle předchozích kapitol jsou určeny ve zvoleném pracovním bodě, tedy pro zvolenou stabilní teplotu senzoru a prostředí. Jestliže se tedy např. teplota senzoru změní, spolu s ní se změní i citlivosti a offsety jednotlivých pixelů a jejich kompenzace napočítané při tovární kalibraci už nebudou tak dobře kompenzovat nehomogenitu senzoru.

Jednou z možností, jak kompenzovat tuto dynamickou část nehomogenity senzoru, danou především teplotním driftem, je použití závěrky. Jestliže bude závěrka v kameře mít dostatečně velkou emisivitu a bude dostatečně homogenní, co se týče teploty a vyzařování v IR oblasti, můžeme ji využít jako náhradu za černé těleso. Pak je možné průběžně aktualizovat kompenzaci

offsetu pomocí závěrky jako černého tělesa.

Výpočet kompenzací offsetu je stejný jako při dvoubodové korekci s tím, že zde jako referenční homogenní scénu použijeme snímky závěrky. Nové kompenzace offsetu se určí tak, aby korigovaný výstup závěrky byl stejný pro všechny pixely – průměr ze všech pixelů:

$$y''_{ij}(T_z) = \langle y(T_z) \rangle, \quad (5.16)$$

kde T_z je teplota závěrky. Po dosazení z (5.11) a úpravě dostaneme

$$b'_{ij} = y'_{ij}(T_z) - \langle y(T_z) \rangle, \quad (5.17)$$

kde b'_{ij} je nová kompenzace offsetu. Po dosazení z (5.6) dostaneme výslednou kompenzaci offsetu, kde koeficienty k_{ij} představují kompenzace citlivostí určené při tovární dvoubodové korekci:

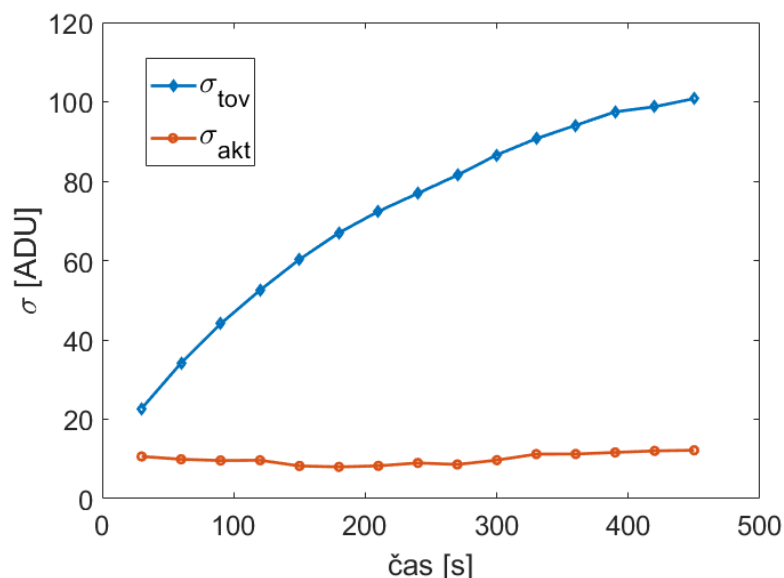
$$b'_{ij} = k_{ij}y_{ij}(T_z) - \langle y(T_z) \rangle. \quad (5.18)$$

Nový korigovaný výstup po aktualizaci kompenzace offsetu pomocí závěrky bude

$$y''_{ij} = k_{ij} \cdot y_{ij} - b'_{ij}. \quad (5.19)$$

Na obr. 5.16 můžeme vidět srovnání časového vývoje nehomogenity obrazu po dvoubodové korekci, kdy v jednom případě byly kalibrační koeficienty kompenzace offsetu b_{ij} konstantní a ve druhém případě byly průběžně aktualizovány pomocí závěrky. Nejprve byla provedena „tovární“ kalibrace dvoubodové korekce s kalibračními teplotami scén 30 a 60 °C. Poté bylo ve 30sekundových intervalech snímáno černé těleso při teplotě 60 °C. V prvním případě byly po celou dobu konstantní koeficienty kompenzace offsetu b_{ij} . Ve druhém případě byla před každým snímáním černého tělesa provedena aktualizace koeficientů kompenzace offsetu pomocí závěrky. Během měření rostla postupně teplota senzoru z 30 na 37 °C, což koresponduje s postupným nárůstem nehomogenity obrazu při konstantních koeficientech kompenzace offsetu. Nehomogenita je měřena pomocí směrodatné odchylky scény - σ_{tov} pro konstantní „tovární“ kompenzaci offsetu a σ_{akt} pro průběžně aktualizovanou kompenzaci offsetu pomocí závěrky.

Stejně jako v ostatních částech kalibrace i zde by měly být všechny snímky použité pro kalibraci snímány vícekrát a před použitím by měly být nejdříve zprůměrovány v čase, aby byl potlačen šum.



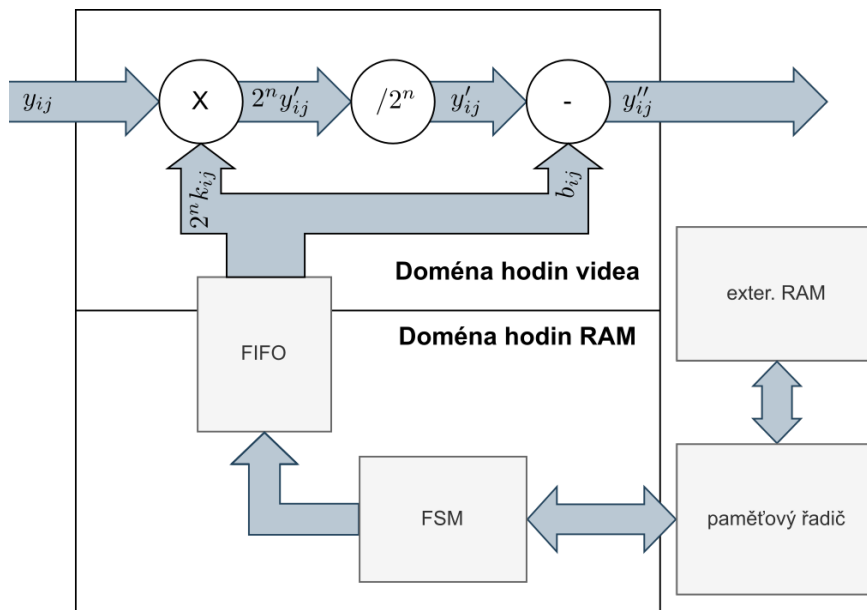
Obrázek 5.16: Srovnání časového vývoje nehomogenity obrazu po dvoubodové korekci s tovární (σ_{tov}) a aktualizovanou (σ_{akt}) kompenzací offsetu. Časový vývoj nehomogenity je sledován na snímcích černého tělesa při 60 °C.

5.1.4 Implementace

Dvoubodová korekce

Na obr. 5.17 je zjednodušené blokové schéma modulu pro aplikaci dvoubodové NUC korekce v reálném čase v FPGA. Kalibrační koeficienty pro kompenzaci citlivosti (k_{ij}) a offsetu (b_{ij}) pro každý pixel jsou uloženy v externí RAM. Kompenzace citlivostí jsou čísla řádově v intervalu (0;2), takže v paměti jsou uloženy jako celé číslo ve tvaru $2^n k_{ij}$. Celý modul je rozdělen na 2 části – jedna je synchronní s hodinami videa a druhá s hodinami paměťového řadiče. V části synchronní s hodinami videa probíhá vlastní výpočet korekce. Druhá část je řízena stavovým automatem (FSM), který načítá kalibrační koeficienty pro jednotlivé pixely z externí RAM a zajišťuje jejich synchronizaci s videostreamem. Kalibrační koeficienty jsou mezi oběma částmi předávány pomocí dvouhodinového FIFO modulu, který jednak zajišťuje hodinovou synchronizaci a jednak řeší převod mezi různými šířkami sběrnic na straně paměti a výpočtu.

V tab. 5.2 je vidět velikost výsledného modulu pro realtime aplikaci dvoubodové NUC korekce v FPGA. Modul využívá integrované násobičky v DSP bloku pro aplikaci koeficientu kompenzace citlivosti, který je pro každý pixel jiný.



Obrázek 5.17: Blokové schéma modulu pro dvoubodovou NUC korekci.

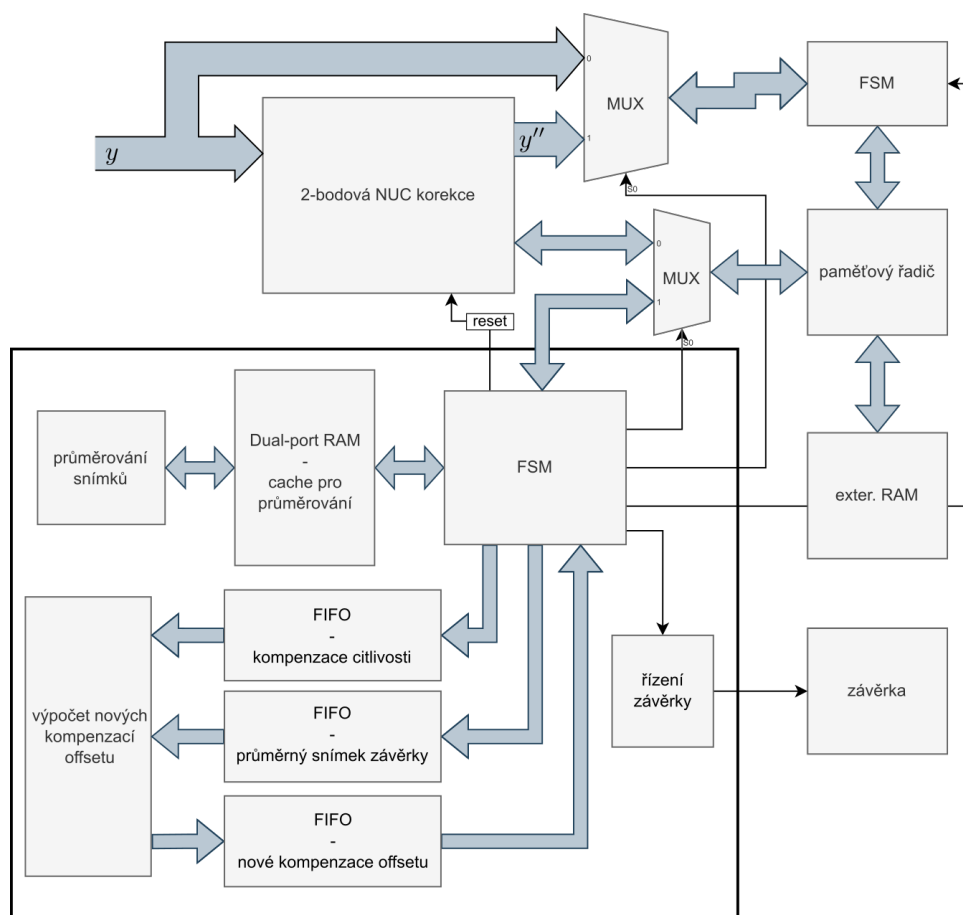
Fáze návrhu	LUTy	Registry [bity]	Bloková paměť [bity]	DSP bloky
Syntéza	154	256	15360	1
Fitter (Place & Route)	200	293	15360	1

Tabulka 5.2: Výsledná velikost navrženého modulu pro realtime aplikaci dvoubodové NUC korekce.

■ Aktualizace offsetu ze závěrky

Modul pro aktualizaci koeficientů kompenzace offsetu pomocí závěrky je znázorněn zjednodušeným blokovým schématem na obr. 5.18. Je zde také naznačena jeho integrace spolu s modulem pro dvoubodovou korekci. Modul je řízen stavovým automatem (FSM). Před začátkem aktualizace koeficientů stavový automat přepne zdroj videa na původní data (y) a vydá pokyn pro zavření závěrky. Poté je zachycena série snímků závěrky do externí paměti. Stavový automat následně přepne paměťový kanál, který je sdílen s modulem pro dvoubodovou korekci, a začne z externí paměti vyčítat části snímků závěrky. Ty uloží do cache pro průměrování, která je implementována jako Dual-port RAM v interní blokové paměti. Z této cache si části snímků začne vyčítat modul pro průměrování snímků, který je zprůměruje v čase (každý pixel zvlášť) a výslednou část průměrného snímku závěrky zapíše postupně zpět do cache. Z cache si ji vyčte zpět stavový automat, který ji následně zapíše zpět do externí paměti. Po zprůměrování celého snímku závěrky v čase se přejde do fáze výpočtu a aktualizace koeficientů kompenzace offsetu. Nejprve se z externí paměti začne vyčítat část zprůměrovaného snímku závěrky do FIFO modulu a poté se vyčte do dalšího FIFO modulu odpovídající část koeficientů kompenzace citlivosti (k_{ij}). Následně modul pro výpočet nových

koeficientů vypočítá nové kompenzace offsetu (b_{ij}), které zapíše opět do FIFO modulu. Po dokončení výpočtu nových koeficientů je stavový automat z FIFO modulu vyčte a zapíše zpět do externí paměti. Tento cyklus se opakuje, dokud nejsou aktualizovány koeficienty pro všechny pixely. Po dokončení dá stavový automat pokyn k otevření závěrky, přepne zpět kanál do externí paměti na modul dvoubodové korekce a celý modul dvoubodové korekce vyresetuje. Nakonec přepne zdroj videa zpět na korigovaná data (y'').



Obrázek 5.18: Blokové schéma modulu pro aktualizaci kompenzace offsetu ze závěrky.

Dále je v tab. 5.3 velikost modulu pro aktualizaci koeficientů kompenzace offsetu. Tento modul také používá integrované násobičky v DSP blocích. Jedna násobička je použita pro výpočet nového koeficientu a druhá je použita v průměrovacím modulu, který průměruje snímky závěrky, jako část aproximace dělení.

Fáze návrhu	LUTy	Registry [bity]	Bloková paměť [bity]	DSP bloky
Syntéza	709	765	34304	2
Fitter (Place & Route)	816	964	34304	2

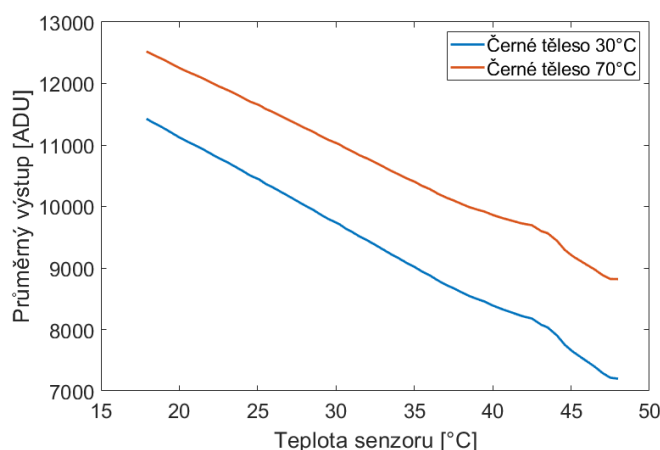
Tabulka 5.3: Výsledná velikost navrženého modulu pro aktualizaci koeficientu kompenzace offsetu pomocí závěrky.

5.2 Kompenzace teplotního driftu mikrobolometru

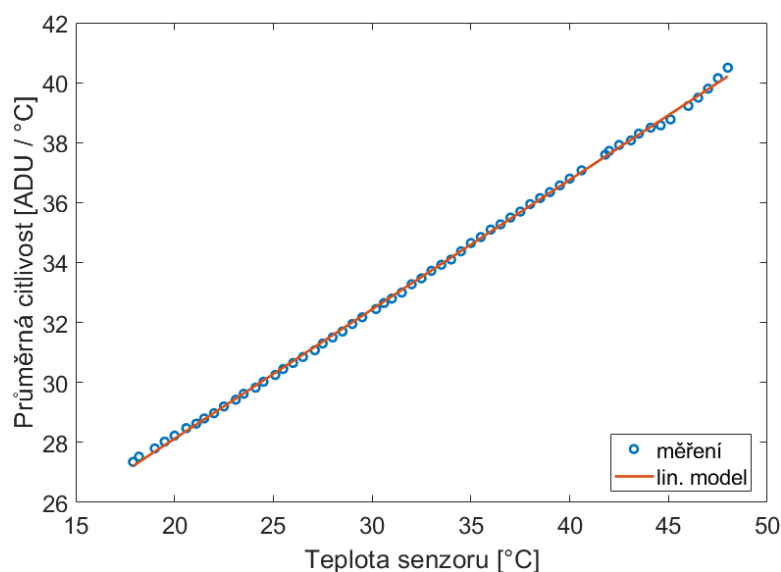
Výstup mikrobolometru je mimo teplotu samotné scény velmi silně závislý i na mnoha jiných faktorech. Především jsou to parametry jeho okolního prostředí, použitá optika termokamery a také např. vlastní teplota senzoru [8]. V této kapitole je rozebrán vliv teploty okolí, která mění teplotu senzoru a následně podstatně mění i charakteristiky jednotlivých pixelů. Dále je ukázán vliv ladících parametrů na výstup senzoru a navržen postup pro stabilizaci tohoto výstupu pomocí ladících parametrů pro různé teploty senzoru.

5.2.1 Teplotní drift mikrobolometru

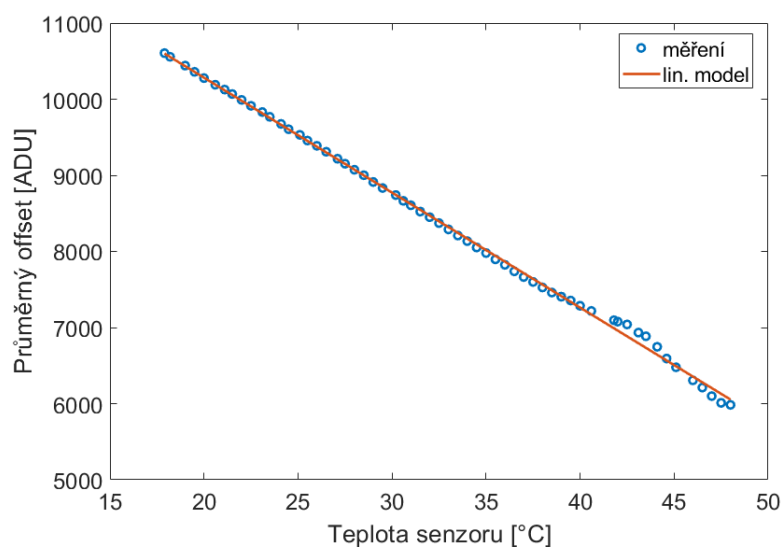
Předpokládejme dále lineární model mikrobolometru podle vztahu (5.1). Na obr. 5.19 můžeme vidět závislost průměrné odezvy při konstantní teplotě scény na teplotě senzoru. Pro test byla použita černá tělesa o teplotě 30 a 70 °C. V grafu je patrná nelinearita na intervalu teplot senzoru 40 až 45 °C, která byla pravděpodobně způsobena příliš rychlou změnou teploty okolí. Z obrázku je vidět, že výstup mikrobolometru s rostoucí teplotou senzoru výrazně klesá. Na obr. 5.20 je průměrná citlivost pro zvolené dvě teploty scény v závislosti na teplotě senzoru. Jak je vidět z obrázku, závislost citlivosti na teplotě senzoru je možné docela dobře aproximovat lineárně. Závislost offsetu na teplotě senzoru můžeme pozorovat na obr. 5.21. I zde je možné docela dobře použít lineární model.



Obrázek 5.19: Průměrný výstup pro 2 teploty scény v závislosti na teplotě senzoru.



Obrázek 5.20: Průměrná citlivost pro 2 teploty scény v závislosti na teplotě senzoru. Zvolené teploty scén jsou 30 a 70 °C.



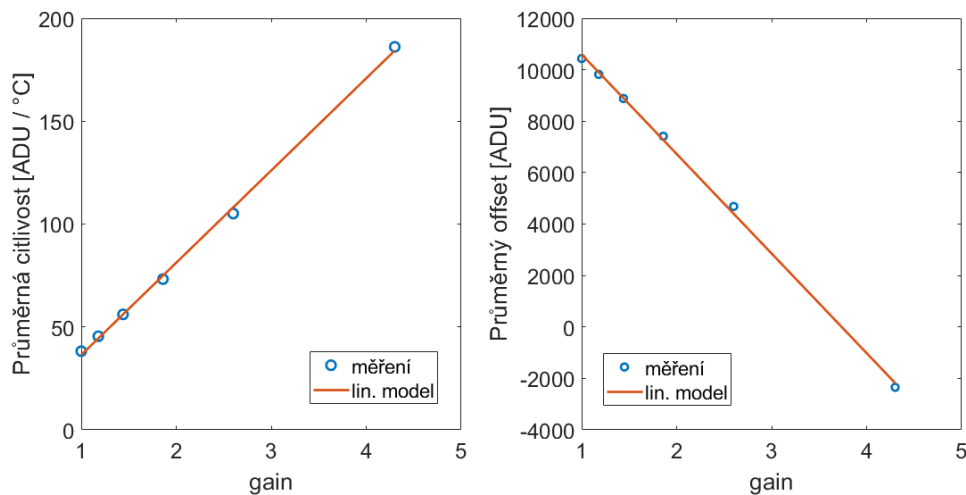
Obrázek 5.21: Průměrný offset v závislosti na teplotě senzoru.

Celkově tedy vidíme, že s rostoucí teplotou senzoru roste citlivost jednotlivých pixelů, ale zároveň klesá jejich offset. Z toho je ovšem jasné, že pokud teplota senzoru nebude stabilizovaná a budou se měnit citlivosti a offsety pixelů, tak kalibrační koeficienty pro dvoubodovou NUC korekci získané za určité pracovní teploty senzoru při tovární kalibraci nebudou již nadále platné. Tento problém částečně řeší aktualizace koeficientů kompenzace offsetu pomocí závěrky, jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, ovšem koeficienty kompenzace citlivosti zůstávají stejné. V důsledku toho se při velké změně teploty senzoru zhorší účinek korekce a spolu s tím vzroste nehomogenita korigovaného výstupu.

5.2.2 Ladění senzoru

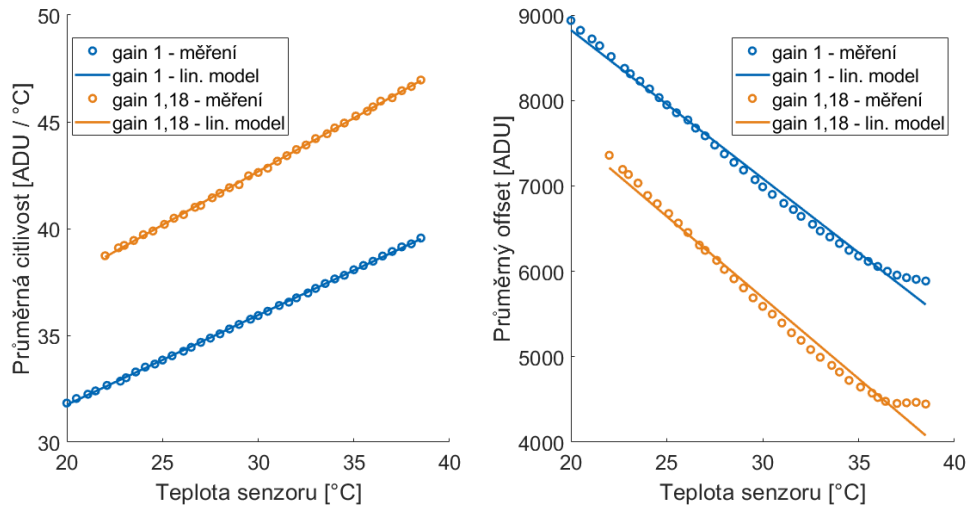
Jak již bylo popsáno v kapitole 2.1.2, výstup mikrobolometru lze regulovat několika parametry. Toho můžeme využít pro kompenzaci jeho teplotního driftu a regulovat citlivost a offset pomocí ladících parametrů senzoru tak, aby zůstaly konstantní při změně teploty senzoru.

Jedním z ladících parametrů je volitelná vnitřní integrační kapacita, která mění zároveň citlivost i offset. Alternativně můžeme použít „gain“, který je v podstatě úměrný převrácené hodnotě kapacity. Na obr. 5.22 můžeme vidět závislost průměrné citlivosti a offsetu na gainu. Jak je vidět, se vzrůstajícím gainem stoupá lineárně citlivost a klesá lineárně offset senzoru. Gain má celkem šest volitelných hodnot v rozsahu 1 až 4,3 a slouží k hrubému nastavení citlivosti a offsetu. Jak se ukázalo v následujících měřeních, hodnota zvoleného gainu zároveň silně ovlivňuje vliv ostatních parametrů na citlivost a offset. Stejně tak gain ovlivňuje vliv teploty senzoru na citlivost a offset. Vliv dalších parametrů, včetně teploty senzoru, na citlivost a offset je proto dále měřen vždy pro dva gainy: 1 a 1,18. Pro další měření jsou použita černá tělesa o teplotách 30 a 100 °C.

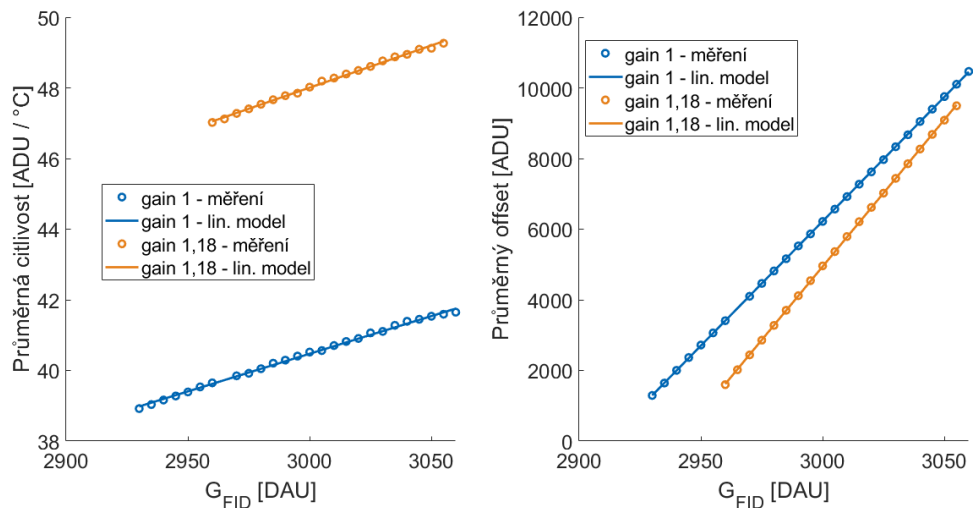


Obrázek 5.22: Průměrná citlivost a offset v závislosti na parametru gain.

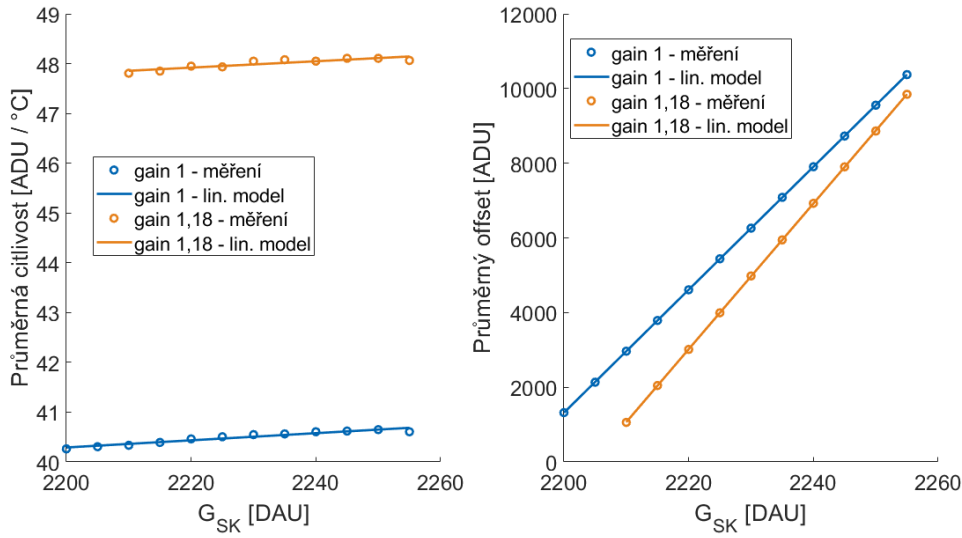
Na obr. 5.23 je závislost citlivosti a offsetu na teplotě senzoru pro dva různé gainy. U offsetu je vidět na konci teplotního rozsahu menší nelinearita patrně způsobená příliš rychlou změnou teploty okolí. Dalšími parametry jsou napěťové reference G_{FID} a G_{SK} . Parametr G_{FID} reguluje proud aktivním a G_{SK} slepým mikrobolometrem. Na obr. 5.24 je závislost citlivosti a offsetu na parametru G_{FID} pro dva různé gainy, podobně na obr. 5.25 na parametru G_{SK} .



Obrázek 5.23: Průměrná citlivost a offset v závislosti na teplotě senzoru pro různé gainy.



Obrázek 5.24: Průměrná citlivost a offset v závislosti na G_{FID} pro různé gainy.



Obrázek 5.25: Průměrná citlivost a offset v závislosti na G_{SK} pro různé gainy.

5.2.3 Kompenzace teplotního driftu

Zmíněné parametry gain, G_{FID} a G_{SK} tedy ovlivňují na určitém intervalu citlivost a offset senzoru lineárně, případně se dá závislost aproximovat lineárním modelem s rozumnou přesností. Stejně tak je to s teplotou senzoru. Na průměrnou citlivost a průměrný offset se můžeme dívat jako na funkce těchto parametrů a teploty senzoru. Citlivost tedy bude

$$k = k(\mathbf{p}) \quad (5.20)$$

a offset

$$b = b(\mathbf{p}), \quad (5.21)$$

kde \mathbf{p} je pracovní bod daný zvolenými parametry a teplotou senzoru:

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} T \\ g \\ GFID \\ GSK \end{pmatrix}, \quad (5.22)$$

kde T je teplota senzoru, g je gain, $GFID$ je parametr G_{FID} a GSK je parametr G_{SK} . Zvolíme si počáteční pracovní bod senzoru v lineární oblasti

$$\mathbf{p}_0 = \begin{pmatrix} T_0 \\ g_0 \\ GFID_0 \\ GSK_0 \end{pmatrix}, \quad (5.23)$$

tak abychom dosáhli požadované počáteční citlivosti

$$k_0 = k(\mathbf{p}_0) \quad (5.24)$$

a počátečního offsetu

$$b_0 = b(\mathbf{p}_o). \quad (5.25)$$

Funkce $k(\mathbf{p})$ a $b(\mathbf{p})$ obecně neznáme, takže může být velmi obtížné analyticky najít vhodný pracovní bod \mathbf{p}_o , nicméně můžeme ho ladit experimentálně. Poněvadž funkce obecně neznáme, není jednoduché určit ani změnu citlivosti a offsetu pro nějakou obecnou změnu pracovního bodu $\Delta\mathbf{p}$. Mějme Jednou z možností je funkce $k(\mathbf{p})$ a $b(\mathbf{p})$ lineárně aproximovat pomocí 1. řádu taylorova rozvoje [9] na okolí pracovního bodu. Z měření v kapitole 5.2.2 bylo navíc patrné, že lze nalézt dostatečně velké intervaly, na kterých je citlivost a offset senzoru v závislosti na ladících parametrech i vlastní teplotě lineární. Při změně pracovního bodu $\mathbf{p} = \mathbf{p}_o + \Delta\mathbf{p}$ tak pro citlivost dostaneme

$$k(\mathbf{p}_o + \Delta\mathbf{p}) \approx k(\mathbf{p}_o) + \nabla k(\mathbf{p}_o)\Delta\mathbf{p} = k(\mathbf{p}_o) + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial k(\mathbf{p}_o)}{\partial p_i} \Delta p_i \quad (5.26)$$

a podobně pro offset

$$b(\mathbf{p}_o + \Delta\mathbf{p}) \approx b(\mathbf{p}_o) + \nabla b(\mathbf{p}_o)\Delta\mathbf{p} = b(\mathbf{p}_o) + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial b(\mathbf{p}_o)}{\partial p_i} \Delta p_i, \quad (5.27)$$

kde p_i jsou prvky \mathbf{p} . Jestliže se nám změní teplota senzoru z původní T_0 o ΔT , změní se i pracovní bod o

$$\Delta\mathbf{p} = \begin{pmatrix} \Delta T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (5.28)$$

Tím pádem se změní i citlivost

$$k(\mathbf{p}_o + \Delta\mathbf{p}) = k(\mathbf{p}_o) + \Delta k \quad (5.29)$$

a offset

$$b(\mathbf{p}_o + \Delta\mathbf{p}) = b(\mathbf{p}_o) + \Delta b. \quad (5.30)$$

Když dosadíme do (5.29) a (5.30) aproximace (5.26) a (5.27), dostaneme

$$k(\mathbf{p}_o) + \Delta k \approx k(\mathbf{p}_o) + \nabla k(\mathbf{p}_o)\Delta\mathbf{p}, \quad (5.31)$$

$$b(\mathbf{p}_o) + \Delta b \approx b(\mathbf{p}_o) + \nabla b(\mathbf{p}_o)\Delta\mathbf{p} \quad (5.32)$$

a po úpravě dostaneme

$$\Delta k \approx \nabla k(\mathbf{p}_o)\Delta\mathbf{p}, \quad (5.33)$$

$$\Delta b \approx \nabla b(\mathbf{p}_o)\Delta\mathbf{p}. \quad (5.34)$$

Cílem kompenzace teplotního driftu senzoru je změnit parametry senzoru (ostatní prvky pracovního bodu) tak, aby v ideálním případě byly změny citlivosti a offsetu

$$\Delta k = 0, \Delta b = 0. \quad (5.35)$$

Hledáme tedy změnu pracovního bodu

$$\Delta \mathbf{p}' = \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta g \\ \Delta GFID \\ \Delta GSK \end{pmatrix}, \quad (5.36)$$

tak aby platilo

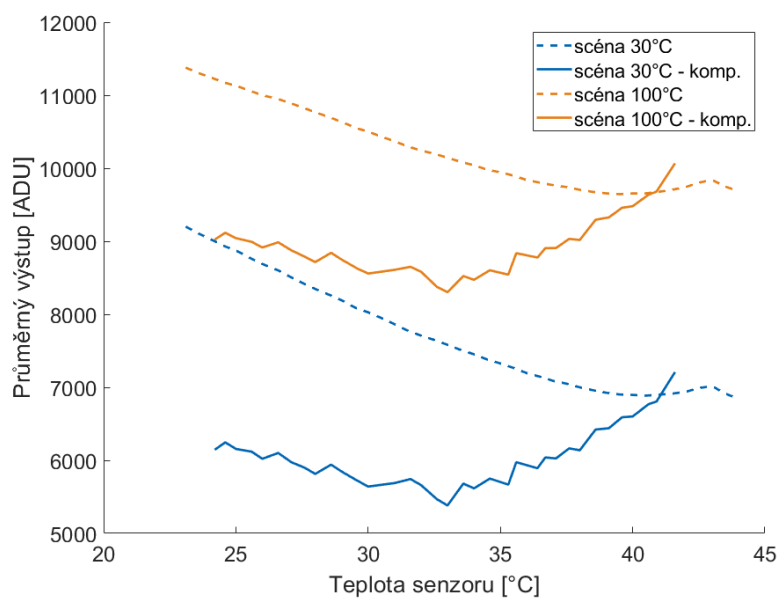
$$\nabla k(\mathbf{p}_0) \Delta \mathbf{p}' = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial k(\mathbf{p}_0)}{\partial p_i} \Delta p'_i = 0 \quad (5.37)$$

$$\nabla b(\mathbf{p}_0) \Delta \mathbf{p}' = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial b(\mathbf{p}_0)}{\partial p_i} \Delta p'_i = 0. \quad (5.38)$$

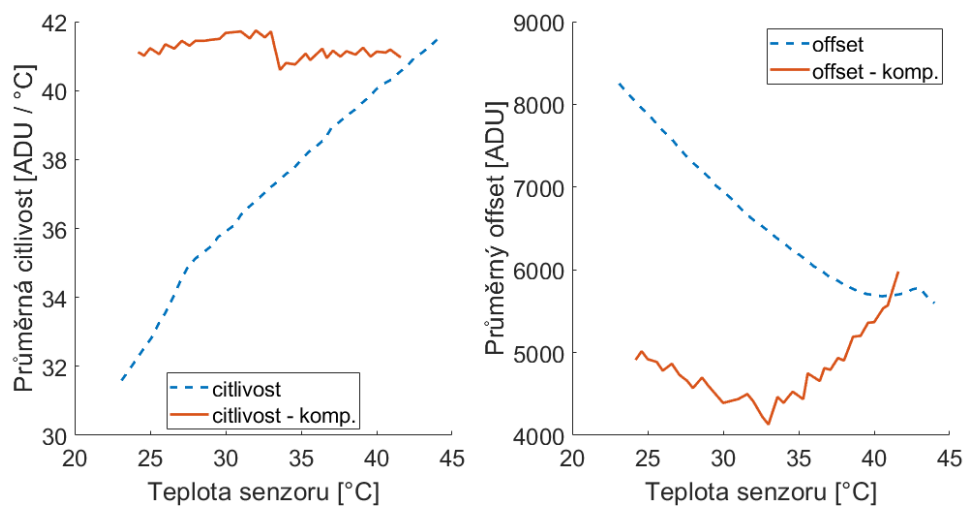
V našem případě lze parametr gain (g) nastavovat pouze velmi hrubě v několika krocích a navíc měření v kapitole 5.2.2 ukázalo, že vliv ostatních parametrů a teploty senzoru na citlivost a offset je silně závislý na zvoleném gainu. To znamená, že parciální derivace podle ostatních parametrů a teploty senzoru $\frac{\partial k}{\partial p_i}$ a $\frac{\partial b}{\partial p_i}$ se liší pro různé gainy. Proto byla metoda dále modifikována tak, že v prvním kroku se nejprve podle změny teploty senzoru volí změna gainu a až ve druhém kroku se dopočítává změna ostatních parametrů pracovního bodu. Ve druhém kroku se navíc podle zvoleného gainu g' vybírají příslušné koeficienty parciálních derivací pro daný gain

$$\left(\frac{\partial k}{\partial p_i} \right)_{g=g'}, \left(\frac{\partial b}{\partial p_i} \right)_{g=g'}.$$

Pro testování metody byla vypočítána tabulka nastavení ladících parametrů pro různé teploty senzoru s krokem $0,5^\circ\text{C}$. Podle aktuální teploty senzoru pak byl vždy nastaven nejbližší pracovní bod z tabulky. Použita byla černá tělesa o teplotách 30 a 100°C . Na obr. 5.26 je průměrný výstup v závislosti na teplotě senzoru s a bez kompenzace teplotního driftu. Na obr. 5.27 je dále závislost citlivosti a offsetu na teplotě senzoru s a bez kompenzace teplotního driftu. U citlivosti s kompenzací teplotního driftu je patrný menší skok mezi teplotami 30 a 35°C , který je způsoben změnou gainu v tomto intervalu.



Obrázek 5.26: Průměrný výstup v závislosti na teplotě senzoru s a bez kompenzace teplotního driftu mikrobolometru.



Obrázek 5.27: Průměrná citlivost a offset v závislosti na teplotě senzoru s a bez kompenzace teplotního driftu mikrobolometru.

Kapitola 6

Závěr

V této práci je popsán návrh a implementace modulu pro komunikaci FPGA s UVC převodníkem FTDI FT602 pro streamování videa pomocí UVC standardu. Použitý protokol pro komunikaci s převodníkem je „Multi-Channel FIFO“, který umožňuje paralelní streamování až 4 videokanáů. Streamovat lze buď RAW termodata ve formátu Y16 nebo případně termodata obarvená paletou ve formátu YCbCr422. Paleta je 8bitová a je implementována jako vyhledávací tabulka (LUT - lookup table), která je v FPGA implementována pomocí Dual-port RAM v interní blokové paměti. Samotné obarvení termodat je realizováno jako čtení z této paměti, kde vstupní termodata jsou použita jako adresa. Paletu lze libovolně změnit zápisem do této paměti. Streamování videa v barevném i RAW formátu bylo testováno v aplikaci Workswell Thermal Core Control. Barevné video ve formátu YCbCr422 lze pak streamovat do velkého množství aplikací, ať už jsou to různé video přehrávače nebo aplikace pro webkamery. Testování proběhlo v aplikacích VLC media player, Windows Kamera a Skype. Streamovat video lze přes USB ve verzi 2.0 a vyšší, nicméně pro verzi 2.0 a rozlišení videa 640x480 je maximem jeden videostream při FPS 60 Hz.

Dále je rozebrána metoda Non-Uniformity correction (NUC) pro korekci nehomogenity obrazu a popsán návrh modulu pro realtime aplikaci dvoubodové varianty korekce v FPGA. Nehomogenita je daná především rozptylem technologických parametrů při výrobě senzoru, dále použitou optikou termokamery nebo také nehomogenním zahříváním senzoru – např. od okolní elektroniky. Návrh vyžaduje pro běh poměrně velkou paměť, poněvadž na každý pixel je potřeba si pamatovat dva kalibrační koeficienty – kompenzaci citlivosti a offsetu. V tomto případě se tak tabulka kalibračních koeficientů nevešla do interní paměti FPGA a bylo třeba využít externí RAM. Pro finální produkt je pak potřeba nevolatilní (např. flash) paměť stejné velikosti, do které se uloží kalibrační koeficienty při „tovární“ kalibraci. V FPGA pak bylo využito integrovaných násobiček v DSP blocích pro výpočet korekce. Výsledky dvoubodové korekce byly porovnány s původním stavem a také s jednodušší jednobodovou variantou na homogenních scénách s černými tělesy. Pro porovnání byla použita směrodatná odchylka homogenních scén. Jednobodová korekce se ukázala jako účinná pouze na okolí kalibrační teploty scény, zatímco dvoubodová korekce byla účinná na celém intervalu mezi dvěma

kalibračními teplotami.

Dvoubodová varianta NUCu je pak doplněna o modul pro aktualizaci koeficientů kompenzace offsetu pomocí závěrky. Především kvůli teplotnímu driftu mikrobolometru se postupně s časem zhoršuje účinek korekce, a je proto vhodné koeficienty aktualizovat. K tomu slouží vnitřní závěrka jako náhrada černého tělesa, ze které se průběžně aktualizují koeficienty kompenzace offsetu. Snímky závěrky použité pro výpočet nových koeficientů jsou v modulu nejprve zprůměrovány pro potlačení šumu. Modul v FPGA využívá 2 integrované násobičky v DSP blocích – jednu pro výpočet nových koeficientů a druhou pro aproximaci dělení při průměrování snímků závěrky. Výsledky dvoubodové korekce s aktualizací koeficientů kompenzace offsetu jsou porovnány se základní variantou bez aktualizace. Pro test jsou použity snímky černého tělesa s konstantní teplotou a je sledován časový vývoj směrodatné odchylky homogenní scény.

Nakonec je navrhnutá metoda pro kompenzaci teplotního driftu mikrobolometru. Při změně teploty senzoru se podstatně mění i jeho charakteristiky – především citlivost a offset. Tyto charakteristiky se zároveň dají regulovat pomocí několika ladících parametrů senzoru. Navržená metoda tedy kompenzuje změny citlivosti a offsetu dané změnou teploty senzoru pomocí změny ladících parametrů. Pro testování metody jsou použity snímky dvou černých těles s konstantní teplotou a je sledován vývoj výstupu, citlivosti a offsetu v závislosti na teplotě senzoru. Zde je největší prostor pro další postup, poněvadž bylo experimentálně zjištěno, že některé ladící parametry se silně ovlivňují navzájem mezi sebou, případně jejich efekt na citlivost nebo offset senzoru je ovlivněný jeho aktuální teplotou. Tato provázanost některých ladících parametrů mezi sebou nebo případně s teplotou, jejíž vliv se snaží parametry kompenzovat, vede k nutnosti dále upravit a modifikovat navrhnutou metodu kompenzace. Zároveň je ovšem potřeba metodu optimalizovat z hlediska složitosti její aplikace při „tovární“ kalibraci, aby nadměrně nezatěžovala výrobní proces.



Literatura

- [1] T. Hejda, “ctuthesis.” [online], 2015. [cit. 31. 7. 2020], [<https://github.com/tohecz/ctuthesis/>].
- [2] Intel, “Cyclone V Device Overview.” [online], 2018. [cit. 31. 7. 2020], [https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyclone-v/cv_51001.pdf].
- [3] Intel, “Cyclone V Device Handbook.” [online], 2020. [cit. 31. 7. 2020], [https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyclone-v/cv_5v2.pdf].
- [4] USB-IF, “Universal Serial Bus Device Class Definition for Video Devices.” [online], 2012. [cit. 31. 7. 2020], [<https://www.usb.org/document-library/video-class-v15-document-set>].
- [5] FTDI, “FT602Q IC Datasheet.” [online], 2019. [cit. 31. 7. 2020], [https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT602Q].
- [6] H. Budzier and G. Gerlach, “Calibration of uncooled thermal infrared cameras,” *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2015. DOI: 10.5194/jsss-4-187-2015.
- [7] T. Orzanowski, “Nonuniformity correction algorithm with efficient pixel offset estimation for infrared focal plane arrays,” *SpringerPlus*, 2016. DOI: 10.1186/s40064-016-3534-1.
- [8] M. Vollmer and K.-P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging*. Wiley-VCH Verlag, 2010.
- [9] J. Hamhalter and J. Tišer, *Diferenciální počet funkcí více proměnných*. ČVUT, 2005.

Příloha A

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
UVC	USB video class
FPGA	Field-programmable gate array
RAW	surová data
NUC	Non-Uniformity correction
LWIR	Longwave infrared
IR	infrared – infračervené
ALM	Adaptive logic module
FIFO	First In First Out – fronta
LUT	lookup table – vyhledávací tabulka
ROIC	readout integrated circuit
DAC	DA převodník
DAU	relativní jednotky DA převodníku
ADC	AD převodník
ADU	relativní jednotky AD převodníku
LPDDR2	Low-Power DDR SDRAM
DSP	Digital signal processing
MAC	multiply and accumulate

Tabulka A.1: Seznam použitých zkratk