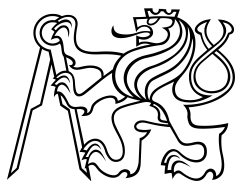


Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky

## Senzorový modul s bezkontaktním měřením teploty pro zabezpečovací systémy

**Bc. Matěj Šťastna**

Vedoucí práce: Ing. Adam Bouřa, Ph.D.  
Květen 2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šťastna** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **474619**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Specializace: **Technologie internetu věcí**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Senzorový modul s bezkontaktním měřením teploty pro zabezpečovací systémy**

Název diplomové práce anglicky:

**Sensor Module with Contact-less Temperature Sensor for Security Systems**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou bolometrů a termočlánkových senzorů pro bezkontaktní měření teploty [1] a radiometrickým modulem Teledyne FLIR Lepton 2.5 [2]. Prostudujte komunikační rozhraní, která se využívají pro účely bezdrátového sběru sensorových dat [3, 4].
2. Na základě získaných poznatků zvolte vhodné technické řešení a realizujte kompaktní zařízení pro zobrazení a analýzu termosnímku s ohledem na účely vyhodnocení pohybu osob ve střeženém prostoru a včasného varování při překročení kritické teploty.
3. Sestavte testovací pracoviště, proveďte měření a kriticky zhodnoťte dosažené parametry vašeho řešení. Na základě výsledků testování případně navrhněte další možná vylepšení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] GE Measurement & Control: ZTP-135SR Thermometrics Thermopile IR Sensor, Datasheet, 2012
- [2] FLIR Systems, Inc.: LWIR MICRO THERMAL CAMERA MODULE FLIR Lepton 2.5, datasheet, 2019 URL: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/227/lepton\\_2pt5\\_datasheet\\_04195-2580098.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/227/lepton_2pt5_datasheet_04195-2580098.pdf)
- [3] Hac, A.: Wireless sensor network design, John Wiley & Sons, Ltd, 2003, ISBN 0-470-86736-1
- [4] Garlík, B.: Inteligentní budovy, BEN - technická literatura, Praha 2012, ISBN 978-80-7300-440-8

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Adam Bouřa, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **01.02.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

Ing. Adam Bouřa, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Víték, Ph.D.  
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

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Adamu Bouřovi, Ph.D. za trpělivost, věcné připomínky a náměty k vylepšení práce. Dále můj dík patří rodině, a to zejména rodičům za vstřícnost, pochopení i přes všechna vzniklá úskalí v rámci studia a ochotu podat za všech okolností pomocnou ruku. A obrovský dík též zasluhuje má přítelkyně Kristýna, která mě po celou dobu studia vytrvale podporovala a motivovala k úspěšnému dokončení.

## Prohlášení

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

V Praze, 26. května 2023

.....

## Abstrakt

Práce se věnuje infračervené kameře Lepton 2.5 výrobce FLIR, využívající mikrobolometrický snímač pro bezkontaktní měření teploty. Cílem práce je vytvořit kompaktní zařízení pro účely zabezpečovacího systému. K tomuto účelu vytvořen návrh univerzálního hardwarového řešení rozšiřující vývojovou desku NUCLEO řady F4 o rozhraní k termokameře Lepton 2.5 skrze Lepton Breakout Board v2.0. Navrhnuté rozšíření disponuje radiovým modulem výrobce REYAX pro komunikaci skrze bezdrátové rozhraní LoRa, možností zápisu pořízených dat na SD kartu a bateriovým napájením pro přenositelnost. Vytvořeno je též programové řešení obsluhy zmíněných komponent s detekcí pohybu a kritické teploty snímané scény. Získané snímky jsou včetně zvýrazněné detekce vykreslovány na barevné displeji GFX01M1 se současným vyvoláním výstrahy v rámci sensorové sítě do modulu alarmu. Závěrem je na sérii testů demonstrována relevancnost navrženého systému a z dosažených výsledků jsou reflektovány podmínky pro další možná vylepšení.

**Klíčová slova:** Bezkontaktní měření teploty, Mikrobolometr, FLIR, Lepton, LoRa, Detekce pohybu, Sensorové sítě, STM32, GFX01M1

**Vedoucí práce:** Ing. Adam Bouřa, Ph.D.  
Katedra mikroelektroniky, FEL

## Abstract

The thesis focuses on the Lepton 2.5 infrared camera from FLIR using a microbolometer sensor for non-contact temperature measurement. The aim of the work is to create a compact device for security system purposes. For this purpose, a universal hardware solution design has been created, extending the NUCLEO F4 series development board with an interface to the Lepton 2.5 thermal camera via the Lepton Breakout Board v2.0. The extension is equipped with a radio module from REYAX for communication via the LoRa wireless interface, the ability to write captured data to an SD card, and a battery power solution for portability. A software solution is also created to operate the mentioned components with motion detection and critical temperature detection of the captured scene. The acquired images, including highlighted detection, are rendered on the GFX01M1 color display with the simultaneous triggering of an alert within the sensor network to the alarm module. Finally, the relevance of the proposed system is demonstrated through a series of tests, and the results obtained are used to reflect suggestions for further possible improvements.

**Keywords:** Contact-less Temperature Sensor, Microbolometer, FLIR, Lepton, Motion detection, Sensor networks, STM32, GFX01M1

**Title translation:** Sensor Module with Contact-less Temperature Sensor for Security Systems

**Supervisor:** Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	<b>5 Testování</b>	<b>43</b>
<b>2 Analýza</b>	<b>3</b>	5.1 Snímání teploty .....	43
2.1 Měření teploty .....	3	5.2 Detekce .....	44
2.1.1 Kontaktní měření teploty ....	3	5.2.1 Zaznamenaný pohyb .....	44
2.1.2 Bezkontaktní měření teploty ..	4	5.2.2 Pomalé změny .....	45
2.2 Termokamery FLIR Lepton .....	6	5.2.3 Kritická teplota .....	46
2.2.1 Lepton 2.5 .....	6	5.3 LoRa .....	46
2.3 Senzorové sítě .....	10	5.3.1 Dosah .....	47
2.3.1 Komunikační rozhraní .....	10	5.3.2 Prostupnost .....	47
2.3.2 Bluetooth .....	11	5.4 Vyhodnocení .....	48
2.3.3 WiFi .....	11	5.4.1 Náměty na vylepšení .....	48
2.3.4 ZigBee .....	12	<b>6 Závěr</b>	<b>51</b>
2.3.5 LoRa .....	12	<b>Bibliografie</b>	<b>53</b>
2.3.6 Srovnání .....	12	<b>A Kompletní konfigurace hodin</b>	<b>59</b>
2.4 Rádiové moduly REYAX .....	13	<b>B Schéma plošného spoje</b>	<b>60</b>
2.4.1 RYLR998 .....	13	<b>C Návrh plošného spoje</b>	<b>61</b>
<b>3 Hardware</b>	<b>17</b>	<b>D Výsledná podoba vytištěné</b>	
3.1 Lepton Breakout Board v2.0 ...	18	<b>krabičky pro termokamerový modul</b>	<b>62</b>
3.2 LoRa modul RYLR998 .....	20		
3.3 Displej .....	20		
3.4 Komunikace s terminálem .....	21		
3.5 Paměťové médium .....	21		
3.6 Hodiny reálného času .....	22		
3.7 Bzučák .....	23		
3.8 Baterie .....	23		
3.8.1 Ochranný obvod .....	24		
3.8.2 Nabíjecí obvod .....	25		
3.8.3 Měnič napětí .....	26		
3.9 Přidané ovládací prvky .....	27		
3.10 Návrh plošného spoje .....	27		
3.10.1 Chyba v návrhu .....	28		
3.11 Návrh krabičky kamerového modulu .....	30		
<b>4 Software</b>	<b>31</b>		
4.1 Termokamerový modul .....	31		
4.1.1 Inicializace .....	32		
4.1.2 Čtecí cyklus VoSPI paketů ..	33		
4.1.3 Zpracování snímku .....	35		
4.1.4 Vykreslení snímku na displeji	36		
4.1.5 Vyvolání alarmu .....	38		
4.1.6 Uložení snímku .....	39		
4.1.7 Obsluha USART přerušení ..	39		
4.1.8 Uživatelské rozhraní .....	40		
4.2 Modul alarmu .....	41		
4.2.1 Uživatelské rozhraní .....	42		

## Obrázky

2.1	Termočlánek . . . . .	4	5.1	Snímání scény . . . . .	43
2.2	Wienův posunovací zákon . . . . .	5	5.2	Pořízené snímky . . . . .	44
2.3	Planckův zákon . . . . .	5	5.3	Prázdný střežený prostor . . . . .	45
2.4	Planckův zákon . . . . .	6	5.4	Narušitel ve střeženém prostoru . . . . .	45
2.5	LEPTON 2.5 se závěrkou . . . . .	7	5.5	Detekce rozsvícené lampy . . . . .	46
2.6	Rozhraní SPI . . . . .	8	5.6	Detekce kritické teploty . . . . .	46
2.7	Proměnlivý hodinový signál . . . . .	8	5.7	Umístění modulů . . . . .	47
2.8	Podoba VoSPI paketu . . . . .	9	5.8	Mapa dosahu . . . . .	47
2.9	Desynchronizace pomalým čtením . . . . .	9	5.9	Umístění přijímače v garážích . . . . .	48
2.10	Desynchronizace vynecháním . . . . .	9	A.1	Konfigurace hodinových signálů . . . . .	59
2.11	Ukázka výstupních režimů . . . . .	10	B.1	ThermalCamera Breakout Board . . . . .	60
2.12	Klasifikace přenosových médií . . . . .	11	C.1	Návrh plošného spoje . . . . .	61
2.13	Modul RYLR998 . . . . .	14	D.1	Krabička z 3D tiskárny . . . . .	62
2.14	Struktura RYLR998 LoRa sítě . . . . .	14			
3.1	NUCLEO-F411RE . . . . .	17			
3.2	Rozložení vývodů STM32F411 . . . . .	18			
3.3	Lepton Breakout Board v2.0 . . . . .	19			
3.4	Rozložení vývodů LBB v2.0 . . . . .	19			
3.5	X-NUCLEO-GFX01Mx . . . . .	20			
3.6	Rozložení pinů SD karty . . . . .	21			
3.7	Zapojení SD karty . . . . .	22			
3.8	Schéma napájení STM32F411 . . . . .	22			
3.9	Odstraněná propojka SB45 . . . . .	23			
3.10	Baterie CR2032 . . . . .	23			
3.11	Varianty bzučáku . . . . .	23			
3.12	Zapojení bzučáku . . . . .	23			
3.13	Aktivní bzučák . . . . .	23			
3.14	Konfigurace externího napájení . . . . .	24			
3.15	Schéma ochranného obvodu . . . . .	25			
3.16	Dvoufázové nabíjení CC/CV . . . . .	26			
3.17	Schéma nabíjecího obvodu . . . . .	26			
3.18	Schéma nabíjecího obvodu . . . . .	27			
3.19	Schéma ovládacích prvků . . . . .	27			
3.20	Osazený plošný spoj modulu . . . . .	28			
3.21	Přerušení signálu CK . . . . .	28			
3.22	Oprava slotu na SD kartu . . . . .	29			
3.23	Kompletní sestava . . . . .	29			
3.24	3D model krabičky . . . . .	30			
4.1	Hlavní cyklus programu . . . . .	31			
4.2	Hlavní datové struktury . . . . .	32			
4.3	Průběh komunikace s kamerou . . . . .	34			
4.4	Postup zvětšení snímku . . . . .	36			
4.5	Zobrazený snímek na displeji . . . . .	38			
4.6	Výpis v terminálu . . . . .	41			
4.7	Diagram algoritmu alarmu . . . . .	41			



## Tabulky

2.1 Porovnání radiových protokolů .	13
3.1 Rozložení vývodů LBB v2.0 . . . .	19
3.2 Rozložení vývodu modulu displeje	21
3.3 Rozložení pinů SD karty . . . . .	21
5.1 Flir Lepton . . . . .	44
5.2 Fluke Ti25 . . . . .	44
5.3 Diference . . . . .	44
5.4 Výsledky měření prostupnosti . .	48



# Kapitola 1

## Úvod

Teplota je jednou ze základních stavových fyzikálních veličin, jejíž monitoring najde uplatnění v takřka každém sensorovém či řídicím systému od využití v potravinářství, medicíně, meteorologie přes strojírenství, techniku až např. po astronautiku. Bezkontaktní měření teploty pro bezpečnostní systémy vyniká oproti běžně používaným kamerám v podobě kvalitního nočního vidění, kdy v zásadě noc naopak naopak nabízí lepší podmínky díky obecně nižším teplotám prostředí, což má za vliv většího kontrastu snímané scény. Termokamery navíc nabízejí kromě základní detekce teploty snímané scény případně rozpoznávání pohybu, například i možnost detekce požárů. V posledních letech pak termokamery našly hojně využití u vstupů do chráněných rizikových budov pro detekci nakažených osob projevujících se zvýšenou teplotou či horečkou.

Cílem této diplomové práce je vytvořit kompaktní zařízení pro účely zabezpečovacího systému s využitím bezkontaktního snímání teploty střeženého prostoru termokamerou FLIR Lepton 2.5 a následnou analýzou pořízených dat. Snahou je vytvořit zabezpečovací systém tvořený modulem s termokamerou, který bude v pořízených snímcích detekovat pohyb či naměřenou kritickou teplotu a následně tuto skutečnost reflektovat pomocí bezdrátového přenosu modulu alarmu, jenž na vyvolanou výstrahu zareaguje signalizací.



## Kapitola 2

### Analýza

V rámci teoretické přípravy práce jsou uvedeny základní principy měření teploty, přičemž detailněji je rozebrána metoda bezkontaktního měření teploty a to zejména princip funkce bolometrů, který je použit v práci využívané termokameře FLIR Lepton. Dále přiblížena problematika senzorových sítí a zvoleno vhodné bezdrátové rozhraní, přičemž rozebrán k tomu využitý vysílač. Nakonec jsou uvedeny běžně používané metody pro detekci změn v obraze.

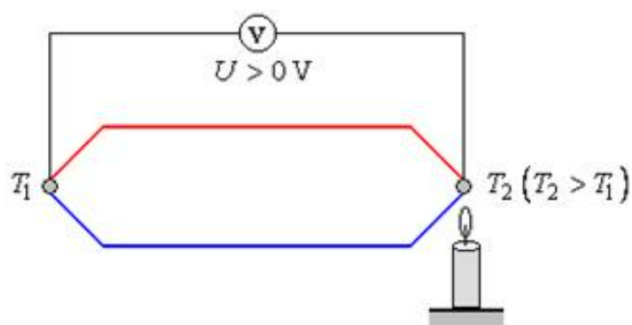
### 2.1 Měření teploty

Při měření teploty není obecně měřena přímo daná teplota, ale jiná fyzikální veličina teplotou ovlivňována (např. odpor) [1]. V praxi jsou dva možné přístupy měření teploty - kontaktní a bezkontaktní.

#### 2.1.1 Kontaktní měření teploty

Při kontaktním měření musí být senzor v přímém styku s danou měřenou látkou, plynem, kapalinou aby mohla být informace o teplotě předána. U kontaktních teploměrů rozlišujeme dle fyzikálního principu dvě základní skupiny. Těmi jsou datační teploměry, které změnu teploty indikují změnou tlaku, objemem či délkovou roztažností (např. bimetalový pásek) a teploměry využívající elektrických vlastností jako termoelektrického jevu, změnou elektrického odporu či změnou prahového napětí.

Jedním ze základních a nejběžnějších principů pro kontaktní měření využívající elektrických vlastností je termočlánek, který využívá Seebeckův termoelektrický jev. Jeho princip spočívá ve spojení dvou vodičů z různých materiálů, kdy v případě rozdílných teplot v místech spojů lze mezi těmito spoji naměřit tzv. termoelektrické napětí, přičemž při malých teplotních rozdílech platí téměř lineární závislost [2]. Termočlánky vynikají svou jednoduchostí, širokým rozsahem teplotním rozsahem a rychlou odezvou. Dalšími příklady kontaktních senzorů jsou



Obrázek 2.1: Termočlánek [2]

### 2.1.2 Bezkontaktní měření teploty

Bezkontaktní měření povrchu těles je založené na principu měření elektromagnetického, které je měřeným objektem vyzařováno. Princip je založen na teorii záření absolutně černého tělesa, které pohlcuje veškerou na něj dopadající energii. Absolutně černým tělesem vyzařované množství energie pak závisí na teplotě  $T$  tohoto tělesa a vlnové délce záření  $\lambda$  [3]. Tuto skutečnost pak popisuje Planckův vyzařovací zákon rovnicí

$$\varphi(\lambda T) = \frac{c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (2.1)$$

kde  $c_1$  a  $c_2$  jsou konstanty

$$c_1 = 2\pi hc^2, \quad c_2 = \frac{hc}{k}, \quad (2.2)$$

přičemž  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js je Planckova konstanta,  $c$  je rychlost světla ve vakuu a  $k = 1,38 \cdot 10^{23}$  JK<sup>-1</sup> je Boltzmannova konstanta [4]. Pro malé hodnoty součinu  $\lambda T$  platí

$$e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \gg 1, \quad (2.3)$$

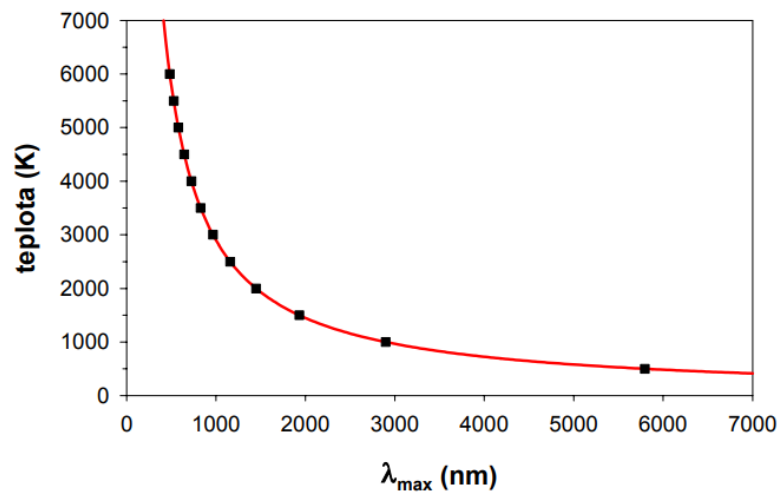
čímž získáváme zjednodušenou podobu Planckova vztahu, tzv. Wienův zákon

$$\varphi(\lambda T) = c_1 e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}. \quad (2.4)$$

Dále tzv. Wienův posunovací zákon popisuje pro zmíněnou křivku popsanou rovnicí (2.4) maximální spektrální emisivitu na dané absolutní teplotě  $T$

$$\lambda_{max} T = b, \quad (2.5)$$

kde  $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$ .



Obrázek 2.2: Wienův posunovací zákon [4]

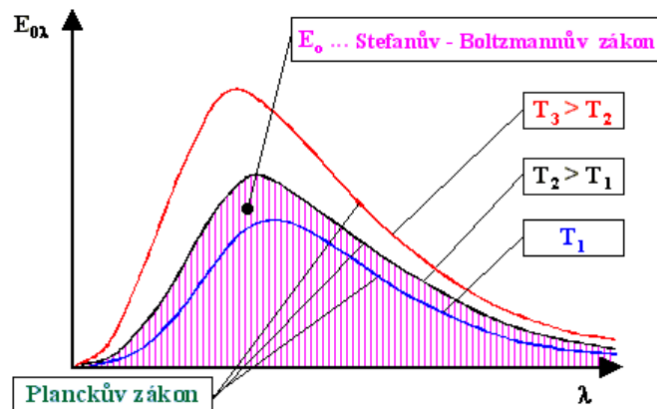
Druhým stejně významným vztahem pro bezkontaktní měření je Stefan–Boltzmannův zákon vyjadřující hustotu zářivého toku v závislosti na teplotě objektu [5]. Dle něj pro hustotu zářivého toku dokonale černého tělesa platí vztah

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \quad (2.6)$$

kde  $\sigma_0 = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  je Stefan-Boltzmannova konstanta, přičemž pro nedokoňané zářiče platí

$$E = \epsilon \sigma_0 T^4, \quad (2.7)$$

kde  $\epsilon$  je emisivita daného zářiče.

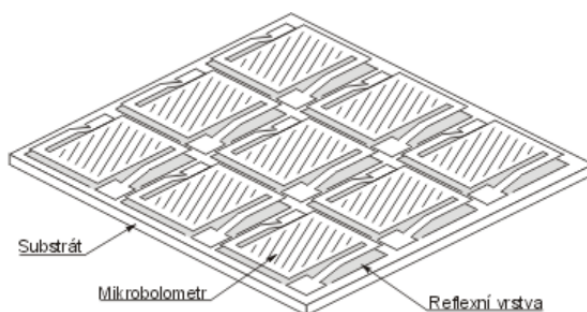


Obrázek 2.3: Závislosti spektrální hustoty dokonale černého tělesa na vlnové délce [5]

V oblasti infračerveného záření existuje několik možných přístupů snímání záření. Od pasivních infračervených detektorů (PIR - Passive InfraRed) využívajících principu termočlánku na tenké membráně, případně využívání pyroelektrického jevu generujícího ohřevem náboj [6], přes bolometry využívající tepelně závislých rezistorů, po galoyovy buňky které vlivem ohřevu uzavřeného plynu detekují změnu kapacity roztažností buňky [7].

## Bolometry

Základním principem funkce bolometrů je změna odporu bolometrického lůžka s absorpční vrstvou v závislosti na množství dopadajícího infračerveného záření. To je pro tepelnou izolaci od svého okolí zavěšeno ve vakuu na tenkých mikroskopických pilířích. Účinnost snímače bývá navíc podpořena přidáním reflexní vrstvy pod bolometrického lůžka tak, aby se neabsorbované záření odrazilo zpět do snímače [8]. Současně reflexní vrstva funguje pro infračervené záření ze strany substrátu jako izolant. Mikrobolometr je pak tvořen maticí mikroskopických bolometrových senzorů. Substrát u dnes vyráběných mikrobolometrických senzorů typicky tvoří monolitický křemík. Pro samotný bolometr se běžně používají oxidy vanadu či amorfni křemík. Typická citlivost mikrobolometrů je především na vlnové délky 7-14  $\mu\text{m}$  spadající tak do oblasti tzv. LWIR (Long Wavelength InfraRed) infračerveného spektra [9].



Obrázek 2.4: Mřížka mikrobolometru [8]

## 2.2 Termokamery FLIR Lepton

Společnost Teledyne FLIR je jedním z předních světových lídrů v oblasti vývoje termokamer [10]. V nabídce poskytují kamery pro široké odvětví využití od komplexního řešení pro záchranné složky, přes kompaktní mobilní zařízení pro každodenní využití po dostupné vývojové moduly.

Tato práce se věnuje modelové řadě mikrokamer Lepton vhodné pro kompaktní mobilní zařízení. Jedná se o řešení snímání dlouhovlnného infračerveného záření (od 8 od 14 mikronů) tzv. LWIR (angl. Long-Wave Infrared) s mikrobolometrickým senzorovým polem skládajícím se z detektorů na bázi oxidu vanadičného ( $\text{VOx}$ ) [11, 12]. V nabídce modelové řady jsou senzory o rozměrech 10,6 x 12,7 x 6,34 mm s rozlišením od 80x60 a 160x120 aktivních pixelů. Klíčovými vlastnostmi senzorů jsou minimální teplotní citlivost 50 mK, integrované digitální zpracování snímku včetně automatické tepelné kompenzace šumu prostředí, korekce nerovnoměrnosti snímače, integrace spotmeteru, snímková frekvence pod 9 Hz, SPI video rozhraní a I2C rozhraní pro ovládaní. Pro připojení moduly disponují 32 pinovým konektorem Molex. Práce se věnuje modelu ve verzi Lepton 2.5.

### 2.2.1 Lepton 2.5

Tato verze disponuje sestavou objektivu s pevným ohniskem o rozlišení 80x60 pixelů a pozorovacími úhly 50°. Součástí modulu je odjímatelná závěrka sloužící jako reference





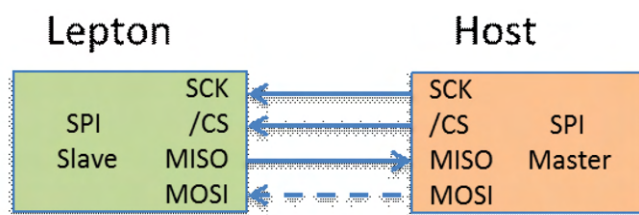
**Obrázek 2.5:** LEPTON 2.5 s nazenou závěrkou [12]

pro radiometrické funkce a pro automatickou aktualizaci vnitřních korekčních členů používaných pro zlepšení obrazu. Výrobce doporučuje použití sestavy se závěrkou 8pro aplikace s pevnou montáží, kam použití jakožto zabezpečovacího zařízení spadá. Celkový rozměr s nasazenou závěrkou činí 11,8 x 12,7 x 7,2. Jedná se tak o velmi kompaktní řešení pro teplotní snímání. Pro napájení modulu je třeba zajistit 2,8 V pro samotný senzor, dále 1,2 V pro digitální jádro a 2,8-3,1 V pro vstupně výstupní vývody. Nominální odběr modulu je pak 160 mW, přičemž špičkově po dobu ~1 s dosahuje 800 mW při aktivaci závěrky.

## ■ Komunikační rozhraní

Modul krom základního módu nabízí mnoho konfigurovatelných funkcí jakožto aktivaci telemetrie obsahujících mimo jiné např. vnitřní teplotu senzoru atd., vypnutí režimu radiometrie, nastavení zisku, možnost aktivace výběru oblasti zájmu, či výběr barevné palety výstupních dat. Veškeré funkce lze nastavit příkazy skrze rozhraní I2C, které je tomuto účelu vyhrazeno. Nicméně táto práce si vystačí se základním nastavením modulu.

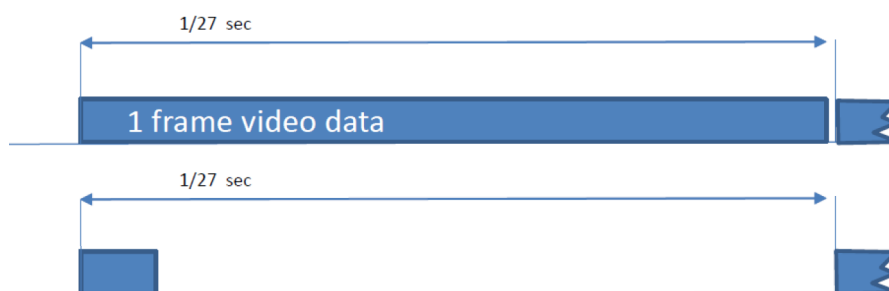
Pro hlavní obrazový výstup senzoru slouží rozhraní SPI. Dle výrobcem uvedené dokumentace by komunikace měla probíhat v módu 3: CPOL=1, CPHA=1, nicméně během práce s modulem se toto nastavení ukázalo jako chybné a modul komunikuje v módu 1: CPOL=0, CPHA=1. Komunikace probíhá výhradně ve směru Slave → Master. Rozhraní tedy vyžaduje pouze 3 vodiče. Lepton využívá vlastní komunikační protokol VoSPI.



Obrázek 2.6: Rozhraní SPI [12]

### VoSPI protokol

Snahou protokolu je efektivní a ověřitelný video přenos, který založený na paketech bez vložených časových signálů a bez požadavku na řízení toku [12]. Umožněn je tak flexibilní takt hodinového signálu s maximální rychlostí 20 MHz (obr. 2.7), přičemž veškerou komunikace iniciuje Master. Minimální takt hodinového signálu je dán zvoleným režimem výstupních dat, který ovlivňuje množství přenášených bitů na snímek. Kritické při tom je v rámci video přenosu dodržet přečtení všech 27 snímků/s, které modul odesílá. Data jsou přenášena počínaje nejvýznamnějším bajtem ve formátu big endian.



Obrázek 2.7: Proměnlivý hodinový signál [12]

Ač je třeba dodržet snímkovací frekvenci 27 Hz, je výrobcem z legislativních důvodů země výrobce (US) omezena frekvence unikátních snímků na 9 Hz. Z toho důvodu modul v rámci jednoho nepřerušovaného video přenosu odesílá po každém snímku dva duplikáty.

### VoSPI paket

Protokol je založen na tzv. minimálním přenosu Slave/Master. Každý paket začíná 4 B hlavičkou složenou z 2 B ID, dále 2 B CRC a následně 160-240 B dat dle zvoleného barevného režimu Raw14 (základní režim) či RGB888 (obr. 2.8). První 4 b ID jsou rezervovány, tedy skutečné ID tvoří až dalších 12 b. ID označuje aktuální paket v celkovém přenášeném snímku, přičemž jeden paket představuje jeden řádek snímku (80 pixelů). Celý rámec tedy obsahuje v případě vypnuté telemetrie 60 paketů, v případě zapnuté telemetrie 63 paketů. S každým novým snímkem je ID nulováno.

Současně ID s hodnotou xFxx, kde x představuje libovolnou hodnotu, označuje tzv. Discard paket, tedy paket nevalidních dat. Tento typ paketu je přenášen před provedením synchronizace, případně při desynchronizaci a dále je odeslán po přečtení celého snímku do doby přenosu snímku následujícího.

ID	CRC	Payload
4 bytes		160 or 240 bytes (depending upon bit resolution setting)

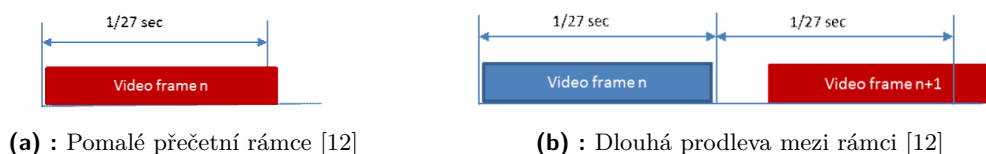
Obrázek 2.8: Podoba VoSPI paketu [12]

### ■ Inicializace VoSPI

Pro zahájení video přenosu je potřeba provést synchronizační sekvenci. Potřeba je tak odepnout CS (Chip Select) do log. úrovně high a ponechat neaktivní hodinový signál po dobu alespoň periody 5 rámců ( $> \sim 185$  ms). Tím je aktivován vnitřní časový limit modulu, která vyvolá synchronizaci. Následné připnutí CS (do log. úrovně low) spustí odesílání prvního paketu. Dále je třeba kompletně přečíst veškeré discard pakety do příchodu prvního validního paketu (po přinutí CS by se měl objevit do 39 ms)

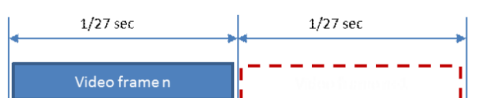
### ■ Desynchronizace VoSPI

K desynchronizace toku může dojít z několika důvodů. Prvním je příliš pomalé přečtení rámců, kdy není dodržena frekvence 27 Hz na snímek (obr. 2.9a). Druhou příčinou může být příliš dlouhou prodleva mezi přečtením dalšího rámcu, která opět zapříčiní nedodržení vyčtení celého dalšího rámcu v limitu (obr. 2.9b).



Obrázek 2.9: Desynchronizace pomalým čtením

Třetí variantou je pak kompletní vynechání rámcu, což opět vyvolá desynchronizaci toku VoSPI rámců (obr. 2.10).



Obrázek 2.10: Desynchronizace vynecháním rámcu [12]

### ■ Výstupní režimy

Modul nabízí dva možné režimy výstupu dat, a to Raw14 a RGB888. První zmíněný Raw14 (obr. 2.11a), který je současně výchozím nastavením, je vhodný pro 14-bitový formát dat v případě vypnuté komprese dat (AGC), případně 8-bitový formát v případě zapnuté komprese, či 16-bitový formát v případě zapnutého teplotního přepočtu TLinear.

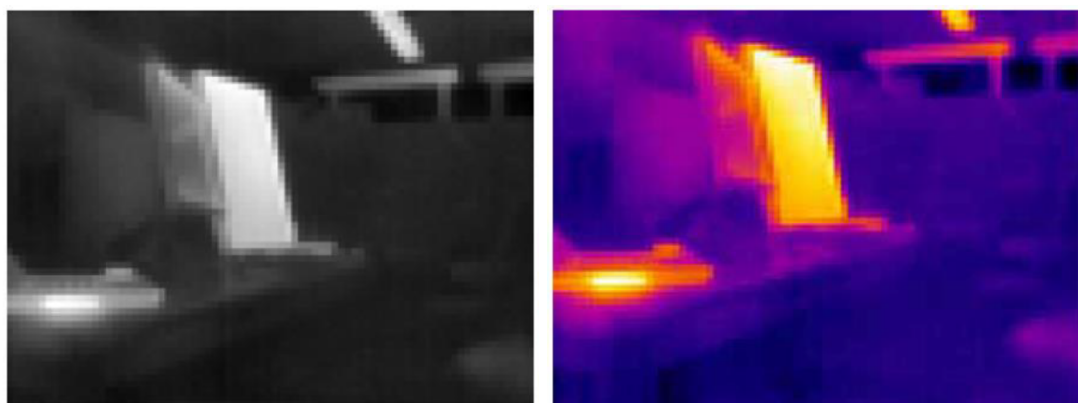
Jelikož je v základu zapnuta Radiometrie společně s aktivací módu TLinear je výstupní formát dat přepočten z 14-bitové reprezentace digitálního čítače hodnoty pixelu na 16-bitovou hodnotu odpovídající skutečně měřené teplotě v Kelvinech přenásobené měřítkovým faktorem. Měřítka je opět volitelné pomocí příkazu přes I2C v rozmezí 0,1 a

0,01, přičemž v základním nastavením je rozlišení 0,01. Pro přepočtení naměřené teploty z výstupních dat tak platí

$$t = xk \text{ [K]},$$

kde  $x$  je výstupní hodnota a  $k$  měřítkový faktor. Tedy např. výstupní hodnota 30000 odpovídá teplotě 300,00 K.

Druhým režimem je RGB888 (obr. 2.11b) a jak již jeho název napovídá jedná se 24-bitový formát kdy každý pixel tvoří trojice bajtů - 1 B pro každou ze složek RGB hodnoty barvené palety v pořadí červená, zelená, modrá. V základu je možné uživatelsky zvolit jednu z 8 předdefinovaných barevných palet, podle které bude obraz v odstínech šedé přepočten do barev. Případně lze definovat a nahrát paletu vlastní. Barevný režim RGB888 však neumožňuje současně využití funkce radiometrie.



(a) : Raw14

(b) : RGB888 - výchozí paleta

**Obrázek 2.11:** Ukázka výstupních režimů [12]

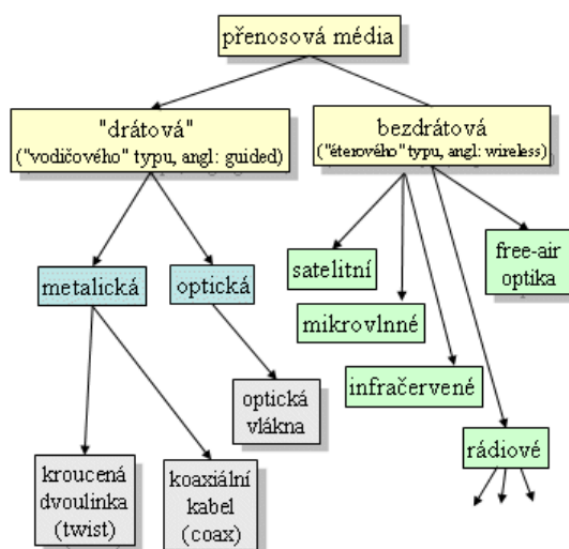
## 2.3 Senzorové sítě

Senzorová síť je počítačově přístupná síť mnoha prostorově rozmístěných zařízení, která využívá snímačů ke sledování podmínek na různých místech, jako je teplota, zvuk, vibrace, tlak nebo pohyb [13]. Pro sdílení informací v rámci senzorové sítě slouží komunikační rozhraní využívající komunikačních protokolů jakožto společných „jazykových pravidel“ [14].

### 2.3.1 Komunikační rozhraní

Základním dělením komunikačních rozhraní z hlediska přenosového média je na drátová a bezdrátová. Drátové médium využívá metalického případně optického spoje pro přenos informace. Výhodou drátového řešení je směrový tok dat s minimálním vyzařováním do okolí (úmyslně minimalizované), vysoké stabilní přenosové rychlosti či stabilita [15]. Nicméně tyto výhody jsou zároveň i nevýhodami, kdy bývá rozšiřitelnost drátových sítí náročná či nereálná (např. do špatně přístupných oblastí), kdy je třeba na nová místa k zařízením dotáhnout potřebný vodič. Alternativou jsou bezdrátové sítě, které přenosu informace využívají elektromagnetické vlnění šířené volným prostorem do širokého okolí. V případě bezdrátového přenosu jsou informace modulovány do jedné či více nosných vln na konkrétních frekvencích [16]. Oproti drátovému řešení nabízejí mobilitu, snadnější

škálovatelnost a umožňují integraci velkého množství senzorů s mnohdy minimálními náklady. Nevýhodou bezdrátového řešení je například rušení komunikace okolními vysílači, kdy např. v husté zástavbě může být tvorba robustní bezdrátové sítě značně náročná.



**Obrázek 2.12:** Klasifikace přenosových médií [15]

Z bezdrátové domény se v oblasti chytrých senzorových sítí využívá zejména frekvenční oblasti rádiových vln. Nejrozšířenějšími standardy komunikačních protokolů v oblasti IoT jsou např. Bluetooth, WiFi, ZigBee, LoRa, Buňkové sítě (zejména 4G/LTE a 5G) [17] či v poslední době nově vznikající protokol Matter [18].

### 2.3.2 Bluetooth

Technologie Bluetooth je standardem IEEE 802.15.1 [19] bezdrátových osobních sítí PAN (Personal Area Networks) krátkého dosahu v řádu nižších desítek metrů operující ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz. Hlavní devízou Bluetooth technologie je schopnost funkce v frekvenčně hustě využitém prostředí využitím rozprostřeného spektra s přeskoky mezi kanály [20]. S novým standardem BLE (Bluetooth Low Energy) přináší efektivně minimální energetickou spotřebu pro nízkoenergetické bateriové aplikace s přenosem krátkých bloků dat na malé vzdálenosti [21]. Velkou limitací původního standardu Bluetooth (Bluetooth Classic) mohlo být naparování současně pouze 7 zařízení. To nástupce BLE již v teorii toto omezení značně navyšuje.

### 2.3.3 WiFi

Jedním z nejběžněji rozšířeným rozhraním bezdrátového přenosu jsou WiFi sítě založené na standardu IEEE 802.11 lokálních počítačových sítí LAN (Local Area Networks) [22]. Oproti standardu Bluetooth nabízí vysoké přenosové rychlosti dosahující stovky Mbit/s (v případě WiFi 6 až 9,6 Gbit/s) ve frekvenčních pásmech 2,4 GHz a 5 GHz s dosahem v řádu desítek metrů [23]. Nicméně rozmístění přístupových bodů, skrze které zařízení

do WiFi sítě přistupují, lze pokrytí sítě značně rozšířit až na plochu několik kilometrů čtverečních. Současně však v hustě obydlených oblastech s velkým množstvím WiFi sítí se snaha dlouhé dosahu naráží na silné okolní rušení. V případě jednoduchých bateriových zařízení může být oproti jiným standardům nevýhodou i přílišná náročnost. WiFi síť je tak zejména vhodná pro pokrytí lokální méně rozlehle oblasti.

#### ■ 2.3.4 ZigBee

V poslední době zejména v domácích IoT řešeních velmi oblíbený a široce používaný bezdrátový protokol příbuzný BLE založený na standartu IEEE 802.15.4 využívající 2,4 GHz frekvenční pásmo. Jedná se o standart propojení nízkoenergetických zařízení v rámci osobních sítí PAN na krátké vzdálenosti v řádu desítek metrů [24]. Výhodou ZigBee je též její topologie typu „mesh“, kdy je zapotřebí centrálního řídicího koordinátoru a okolních zařízení, které mohou být buď typu koncového zařízení s omezenou funkcí, nebo plnohodnotným funkčním uzlem umožňujícím vytváření redundantních spojení [25]. Tím umožňuje vytvořit robustní samoopravitelnou stabilní síť s dosahem za hranice dosahu centrálního koordinátoru [26]. Oproti technologii BLE tak ZigBee síť nabízí vyšší dosah, za cenu nižší přenosové rychlosti [17]. Hodí se tak pro sběr základních dat z jednoduchých úsporných senzorů. Velkou předností ZigBee sítě 3.0 je pak kompatibilita komunikace zařízení napříč výrobci s možností tvorby rozsáhlých sítí o stovkách uzlů.

#### ■ 2.3.5 LoRa

Komunikační protokol LoRa (zkr. Long Range), se kterým původně přišla společnost Cycleo, dosahuje oproti výše uvedeným protokolům dosahů vzdáleností v řádech jednotek až desítek kilometrů [14]. Cílem vývoje tohoto standardu byl protokol s dlouhým dosahem a zároveň nízkou energetickou náročností, který je tak vhodný pro bateriově napájené senzory. LoRa standardně operuje na frekvencích zahrnující pásma 169 MHz, 434 MHz 868 MHz a 923 MHz s přenosovými rychlostmi do 50 kbit/s. Koncepce protokolu využívá typicky hvězdicové topologie, kdy středobodem sítě je hlavní brána zprostředkující výměnu informace s dalším komunikačním rozhraním [27]. S řešením širokého pokrytí regionálních, národních až nadnárodních rozsahu přišla LoRa Alliance s protokolem LoRaWAN (Wide Area Network) [28]. S využitím této licencované síťové architektury lze ve většině případů za drobný poplatek přenechat řešení centrálních bran lokálnímu poskytovateli LoRaWAN sítě a využít veškerých výhod již vystavěné rozsáhlé sítě vysílačů, které v české republice poskytují České radiokomunikace [29].

#### ■ 2.3.6 Srovnání

Z uvedených bezdrátových protokolů byl pro potřeby této práce zvolen komunikační protokol LoRa. Ten v poměření s ostatními nabízí dobrou propustnost s dlouhým dosahem a postačující přenosovou rychlostí. Srovnání vybraných parametrů nabízí následující tabulka 2.1.

Protokol	frekvence	přenosové rychlosti	dosah	spotřeba
Bluetooth	2,4 GHz	jednotky Mbit/s	~10 m	nízká
WiFi <sup>1</sup>	2,4 a 5 GHz	~300 Mbit/s (9,6 Gbit/s)	~200 m	střední
ZigBee	2,4 GHz	~250 Kbit/s	~10-100 m	nízká
LoRa	434, 868, 908 MHz	~50 Kbit/s	~10 km	nízká

**Tabulka 2.1:** Porovnání komunikačních protokolů [14]

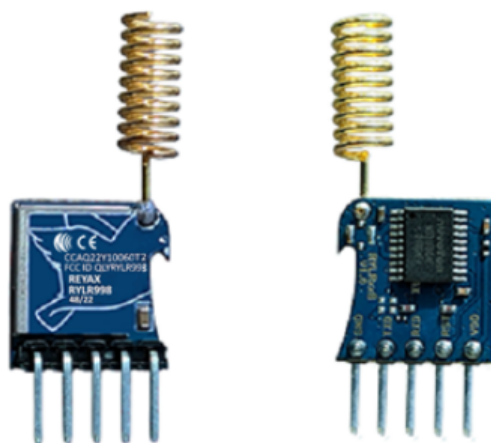
## 2.4 Rádiové moduly REYAX

Společnost REYAX Technology Corporation, LTD je světovým lídrem bezdrátového přenosu v oblasti IoT [30]. Nabízí široké spektrum IoT řešení zahrnující standardy LoRa, Wi-Fi, RFID, GNSS, RF či Bluetooth. V nabídce modulů využívající protokol LoRa je na výběr jsou na výběr jak model využívající LoRaWAN síť, tak moduly poskytující vlastní řešení skrze REYAX proprietární protokol. Z nabídky modulů nabízejících možnost proprietárního protokolu je pro účely této práce zvolen model RYLR998. Záměrem je vytvořit řešení senzorové mikrosítě pod vlastní správou.

### 2.4.1 RYLR998

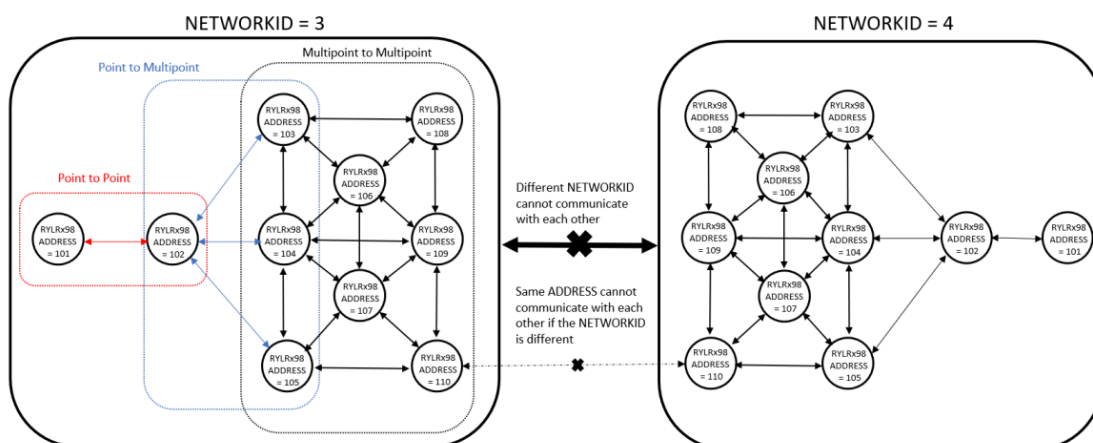
Modul anténního vysílače RYLR998 je kompaktním uceleným řešením vybavený modemem LoRa s mimořádně dlouhým dosahem a příznivou cenou. Nabízí vlastní proprietární protokol zajišťující bezpečnou komunikaci v rámci vlastního řešení lokální LoRa sítě. Díky použití AT příkazů zjednoduše implementaci do systému, a je tak vhodný pro snadné nasazení v měřítku soukromých sítí. Klíčovými vlastnostmi jsou frekvenční rozsah od 820 MHz do 960 MHz (základní pásmo je 915 MHz), maximální vysílací výkon 22 dBm a citlivost -129 dBm. Modul vyžaduje 3,3 V napájení. Při vysílání dosahuje odběr 140 mA, při příjmu pak 17,5 mA. Modul nabízí chytrý úsporný režim příjmu, kdy nominální odběr dosahuje maximálně 5,5 mA. Při usnutí pak jen necelých 15 uA. Velikost samotného modulu je 14,0 x 14,6 mm, přičemž anténa přidává k delšímu rozměru dalších 17,4 mm [31, 32].

<sup>1</sup>Verze WiFi 6 dosahuje rychlosti až 9,6 Gbit/s na vzdálenosti ~30 m za cenu vysoké spotřeby



Obrázek 2.13: Modul RYLR998 [32]

Proprietární protokol modulu umožňuje komunikaci ve směrech Point to Point, Point to Multipoint či Multipoint to Multipoint [33], s maximální délkou zprávy 240 bajtů. Současně umožňuje vytváření izolovaných sítí.



Obrázek 2.14: Struktura RYLR998 LoRa sítě [33]

Podmínky provozování zařízení s využitím radiových kmitočtů v České Republice stanovuje Český telekomunikační úřad. Kmitočtové pásmo 821-915 MHz je možné využít bez licenčních poplatků při dodržení efektivního vysílacího výkonu pod 10 mW s maximální šířkou pásma 200 kHz a dodržení klíčového poměru 1,0 %, který udává poměr doby vysílání v jedné hodině [34]. Zvolený modul se tak svými vlastnostmi zdá být vhodným adeptem pro potřeby této práce, jakožto nízkoenergetické řešení bezdrátového přenosu na dlouhé vzdálenosti.

## Rozhraní

Pro komunikace s modulem je využito rozhraní UART s 8 bitovou délkou slova, bez parity a jedním stop bitem. Základní komunikační rychlostí 115200 bps, přičemž ji lze příkazem



volit v rozmezí 300-115200 bps. Celkově je třeba zapojit 3 vodiče - Tx, Rx a RST. Pro inicializaci modulu je třeba nejprve připnout vývod RST do log. úrovně high. Odpovědí modulu je dvojice zpráv "+RESET" a "+READY".

### ■ AT příkazy

Pro komunikaci modemu je výrobcem definována sada tzv. AT příkázů. Jedná se o krátké sekvence znaků začínající vždy trojicí znaků "AT+", následně příkazem např. "SEND", případně pokračující za znakem "-" parametry daného příkazu a končící znaky "\r\n". Příklad celého příkazu pro volbu módu modemu:

```
AT+MODE=<Parametr>\r\n,
```

kde je v tomto případě parametrem znak 0, 1, 2 nebo 4. Případně se lze pomocí znaku "?" dotázat na nastavení daného parametru modemu. V případě příkladu volby módu má takový příkaz podobu:

```
AT+MODE?\r\n.
```

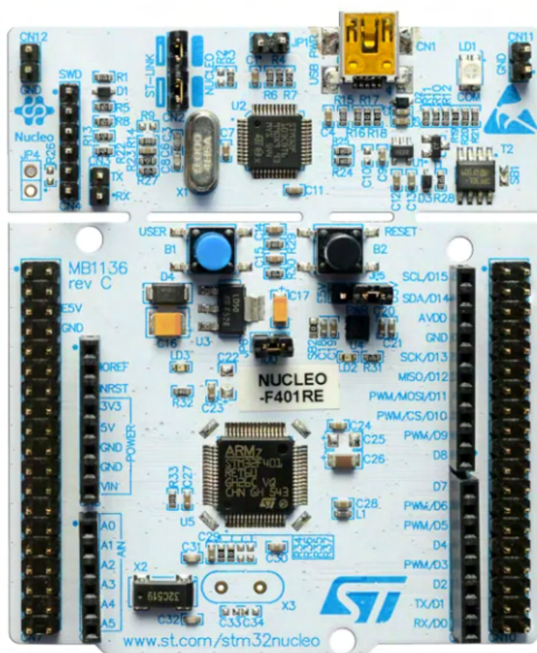
Veškeré odpovědi modemu začínají přímo znakem "+". V případě nastavení módu modemu by odpověď zněla "+OK\r\n" a v případě dotazu na aktuální nastavení modemu např. "+MODE=0\r\n". Chybnou komunikaci s modem či špatný formát příkazu následuje odpověď v podobě "+ERR=<kód chyby>\r\n".



## Kapitola 3

### Hardware

Tato kapitola pojednává o volbě a konfiguraci jednotlivých hardwarových komponent. Řízení obstará mikrokontrolér STM32F411RE [35] firmy STMicroelectronics s 32-bit jádrem ARM Cortex M4 osazený na vývojovém modulu STM32 NUCLEO-F411RE [36]. Vývojový modul současně obsahuje programátor a debugger ST-LINK/V2-1 [37]. Pro konfiguraci mikrokontroléru byl využit generátor inicializačního kódu STM32CubeMX [38] využívající knihoven STM32Cube hardwarové abstrakční vrstvy HAL (Hardware abstraction layer) [39].



Obrázek 3.1: STM32 NUCLEO-F411RE [36]

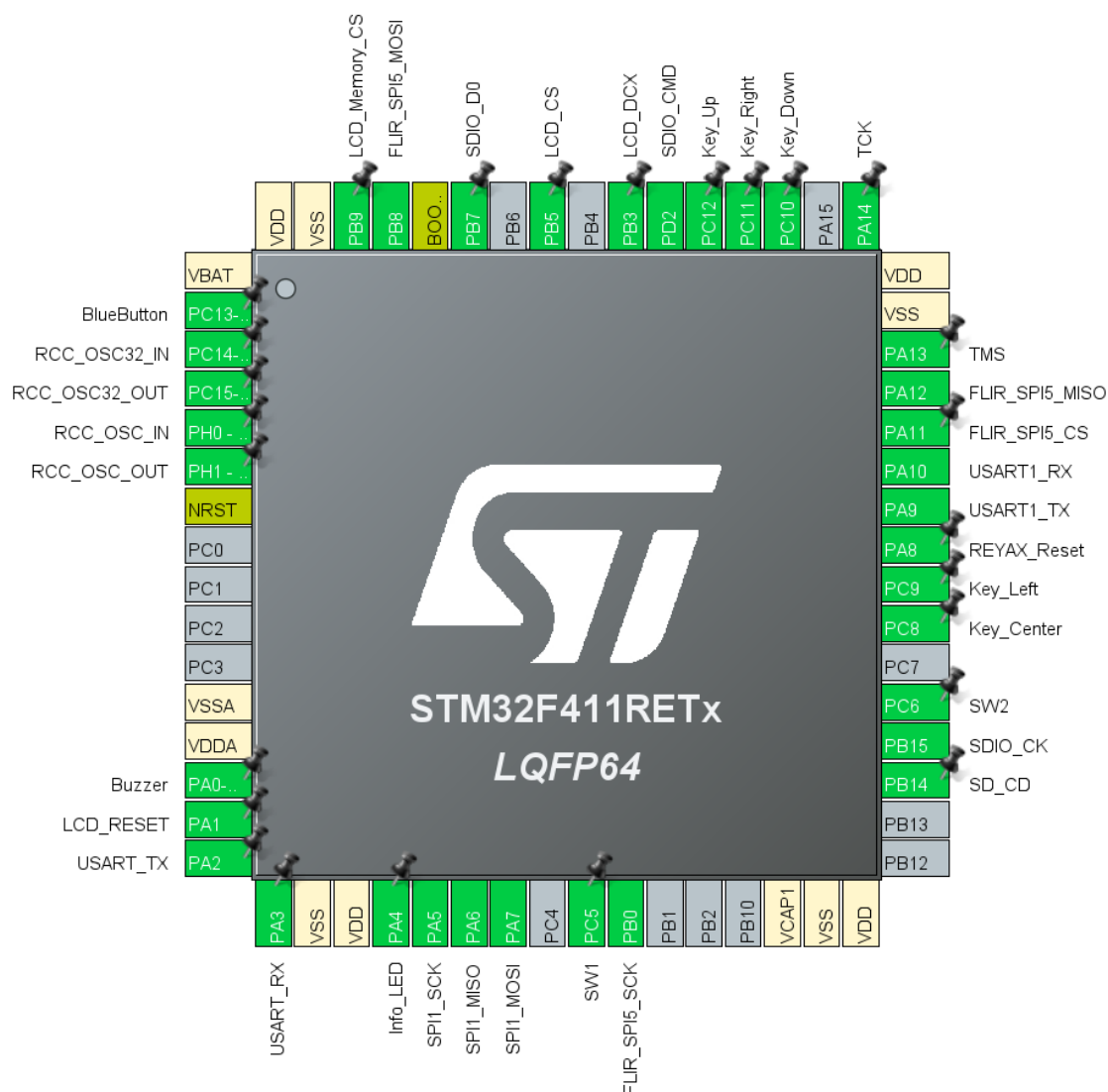
- Jádro: ARM Cortex M4
- Taktovací frekvence: 100 MHz
- Flash pamět: 512 kB
- SRAM pamět: 128 kB
- Rozhraní: I2C, USART, SPI, USB2.0
- RTC s nízkou spotřebou a 32,768 kHz oscilátorem
- 12-bit ADC převodník
- Programovatelných GPIO pinů: 50
- Konektorová patice Morpoho STMicroelectronics a patice kompatibilní s Arduino Uno V3
- Programátor a debugger ST-Link/V2-1

Projekt je tvořen dvěma moduly – hlavním termokamerovým modulem a sekundárním modulem alarmu. Kompletní využití jednotlivých vývodu mikroprocesoru (obr. 3.2) je koncipováno tak, aby se funkce obou modulů nepřekrývaly a bylo tak možné navrhnout jednu univerzální desku pro oba moduly (podrobněji v nadcházející podkapitole 3.10). Takové řešení současně usnadní vývoj softwaru pro oba moduly.

Hlavní částí projektu je samotný modul s termokamerou, který provede pořízení,

analýzu a zobrazení snímku, poskytne možnost uložení data na přenosné médium pro případnou pozdější inspekci a zajistí bezdrátové ohlášení detekce osob či kritické teploty podřízenému modulu s alarmem.

Modul alarmu bude reagovat na ohlášené události hlavním modulem. Pro tento účel je vybaven shodným radiovým modulem LoRa RYLR998, jenž též připojený na sběrnici USART1. Oproti termokamerovému modulu navíc disponuje bzučákem pro zvukovou signalizaci ohlášeného alarmu.

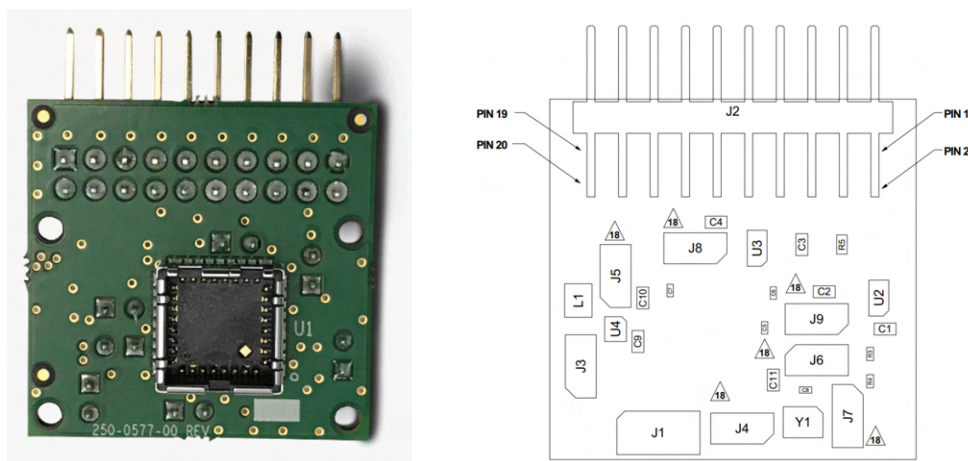


Obrázek 3.2: Kompletní rozložení vývodů STM32F411

### 3.1 Lepton Breakout Board v2.0

Jelikož termokamerový modul FLIR Lepton 2.5 disponuje konektorem Molex, je pro vývoj v rámci této práce využita oficiální propojovací deska Lepton Breakout Board v2.0 obstarávající pro modul potřebné napěťové úrovně, obsluhu startovací sekvence,

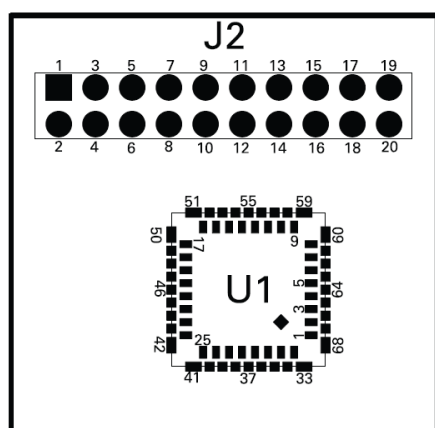
generování hlavního hodinového signálu a disponující standardním kolíkovým konektorem 2x10 s roztečí 2,54 mm [40]. Umožňuje tak napájení celého modulu v rozmezí 3-5,5 V. Pomocí propojek J5-J9 (tzv. jumperů, obr. 3.3b) je možné obsluhu napěťových úrovní, startovací sekvence a hlavního hodinového signálu vypnout. Rozměry propojovací desky jsou 29,5 x 29,0 mm.



(a) : Čelní strana s Molex konektorem [40]      (b) : Rozložení propojek na zadní straně [40]

**Obrázek 3.3:** Lepton Breakout Board v2.0

Pro projení kamerového modulu Lepton je využito pouze rozhraní SPI, tedy piny 7, (9), 10 a 12 (obr. 3.4). Jako SPI sběrnice je využita SPI5. Komunikace po sběrnici je nastavena na 8 bitovou délku slova počínaje nejvýznamnějším bitem na prvním místě (MSB), přenosovou rychlostí 12,5 Mb/s v módu 0 (polarita hodin CPOL na Low a fázi CPHA na druhou - náběžnou hranu). Přenosová rychlost je vybrána tak, aby vyhovovala maximální možné rychlosti udávané výrobcem v referenčním manuálu [12] (popsáno v kapitole 2.2.1). Breakout board je využit i pro veškerou obsluhu napěťových úrovní, hlavního hodinového signálu a startovacích sekvencí. Zapojeny jsou tedy veškeré propojky J5-J9 a 5 V napájení je přivedeno na piny 1,2 a 19.



**Obrázek 3.4:** Rozložení vývodů LBB v2.0 [40]

#	funkce	#	funkce
1	GND	2	VCC 3-5,5V
3	VPROG	4	VCC28
5	SDA	6	VCC28_IO
7	SPI_CLK	8	SCL
9	SPI_MOSI	10	SPI_CS
11	GPIO0	12	SPI_MISO
13	GPIO2	14	GPIO1
15	GPIO3	16	VCC12
17	RESET_L	18	MASTER_CLK
19	GND	20	PW_DWN_L

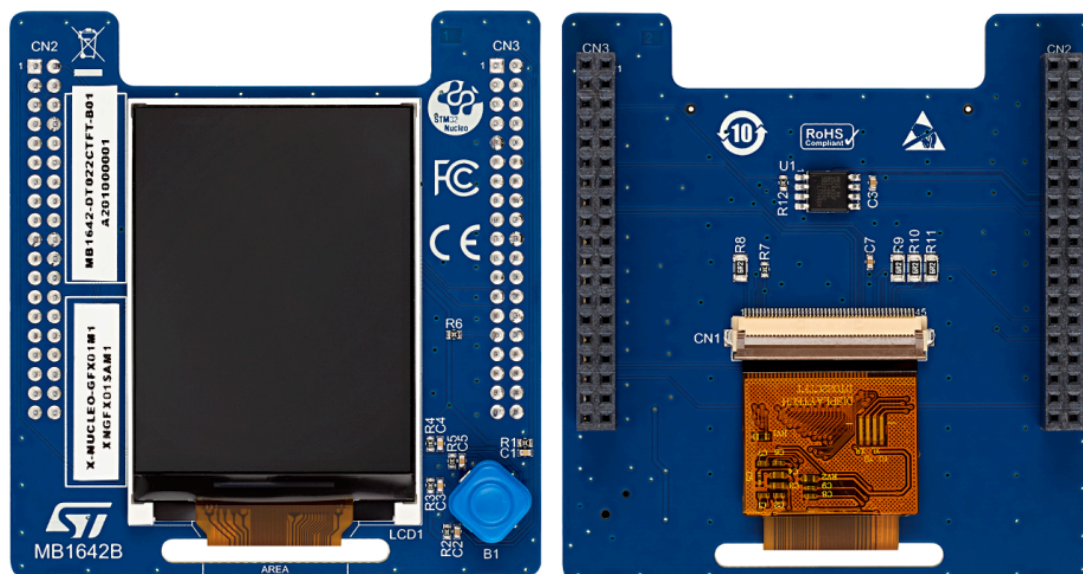
**Tabulka 3.1:** Rozložení vývodů LBB v2.0

## 3.2 LoRA modul RYLR998

Ke komunikaci s radiovým LoRa modulem RYLR998 je přiřazena sběrnice USART1 v asynchronním režimu. Parametry komunikace jsou zvoleny dle výchozího nastavení modulu [32] (detailně v kapitole 2.4.1). Přenosová rychlost je tedy 115200 Bits/s, s délkou slova 8 bitů, bez parity s jedním stop bitem. Povoleno je globální přerušení pro režim čtení sběrnice bez blokování hlavní smyčky.

## 3.3 Displej

Pro grafické zobrazení pořízených snímků ze senzoru je využita rozšiřující deska X-NUCLEO-GFX01Mx kompatibilní s deskami STM32 Nucleo-64 včetně použité desky Nucleo-F411RE. Rozšiřující modul disponuje 2,2" SPI QVGA TFT displejem a 64 Mbit SPI NOR Flash pamětí pro ukládání grafiky [41]. Pro možnost navigace v prostředí nabízí joystick detekující pozice horní, dolní, levá, pravá a středový stisk. Použitá první generace modulu s označením GFX01M1 podporuje dle uživatelské manuálu pro komunikaci s displejem a pamětí jednu společnou SPI sběrnici [42]. K propojení s Nucleo deskou je vybavena standardním 48 pinovým ST Morpho konektorem. LCD včetně SPI NOR Flash paměti vyžadují 3,3 V napájení. To je skrze Morpho konektor přivedeno na 3,3 V zdroj Nuclea z pinu 16 konektoru CN2.



(a) : Čelní strana modulu displeje [42]

(b) : Spodní strana modulu displeje [42]

**Obrázek 3.5:** Rozšiřující deska s displejem X-NUCLEO-GFX01Mx

Pro komunikaci s modulem je tak využito celkem 11 pinů včetně sběrnice SPI1. Komunikace po sběrnici je nastavena na 8 bitovou délku slova počínaje nejvýznamnějším bitem na prvním místě (MSB), přenosovou rychlostí 50 Mbits/s v módu 0 (polarita hodin CPOL na Low a fázi CPHA na první - sestupnou hranu).

STM32 GPIO	označení	STM32 GPIO	označení
PC10	Key_Down	PB3	LCD_DCX
PC11	Key_Right	PA5	SPI1_SCK
PC12	Key_UP	PA6	SPI1_MISO
PC9	Key_Left	PA7	SPI1_MOSI
PC8	Key_Center	PB5	LCD_CS
PB9	LCD_MEMORY_CS		

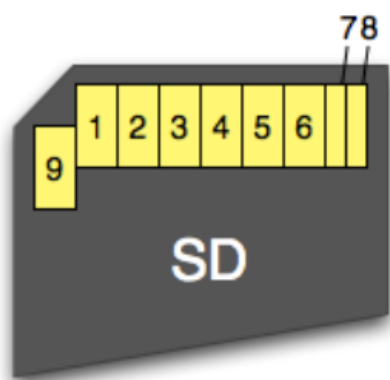
**Tabulka 3.2:** Použité vývody modulu displeje pro propojení s Nucleo deskou

### 3.4 Komunikace s terminálem

Pro komunikaci s modulem je využito USB rozhraní programátoru ST-Link, které využívá sběrnici USART2 v asynchronním režimu. Pro čtení sběrnice bez blokace hlavní smyčky je povoleno globální přerušení. Přenosová rychlost je tedy 115200 Bits/s, s délkou slova 8 bitů, bez parity s jedním stop bitem.

### 3.5 Paměťové médiu

Aby bylo možné archivovat pořízené snímky například při detekci osoby v střeženém prostoru, je k systému pro ten to účel přidána možnost zápisu na paměťové karty SD (Secure Digital) ve standardní s 9 piny. Zvolená Nucleo deska nabízí pro tento účel dvě základní rozhraní SPI a SD/SDIO MMC (Secure Digital Input Output, Multi Media Card [35, 43]). Výhodou rozhraní SDIO je možnost rychlejšího zápisu přes až 4 datové piny (v případě MMC až 8 datových pinů), širší kompatibilita s SD kartami na trhu (některé nemusí podporovat SPI rozhraní) a snadná implantace díky přímé podpoře softwarovou vrstvou FATFS řešící správu souborových systémů a dat (více kapitole 4.1.6).



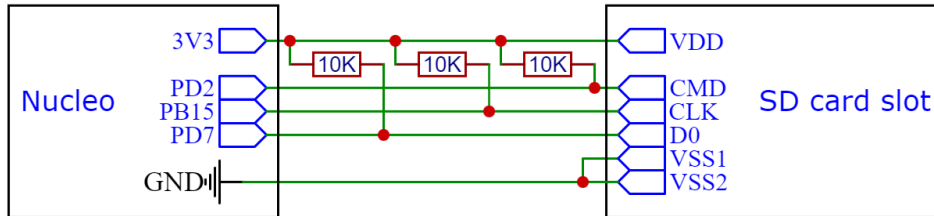
**Obrázek 3.6:** Rozložení pinů SD karty [44]

#	SD	SPI
1	CD/DAT3	CS
2	CMD	DI
3	VSS1	VSS1
4	VDD	VDD
5	CLK	SCLK
6	VSS2	VSS2
7	DAT0	DO
8	DAT1	-
9	DAT2	-

**Tabulka 3.3:** Rozložení pinů SD karty

Paměťová karta SD ve standardní velikosti disponuje 9 vývodovým rozhraním (obr. 3.6). Kvůli obsazení pinů joystickem modulu GFX01Mx lze využít pouze konfiguraci SDIO rozhraní v režimu SDR využívající jednoho datového pinu/bitů. Na propojení SD karty

jsou využity komunikační piny CMD (příkazový), CLK (hodinový signál) a D0 (datový pin), které operují v push-pull módu. K napájení SD karty vyžaduje 3,3 V. Celkem je tak využito 6 pinů (#1 – #7, tab. 3.3).

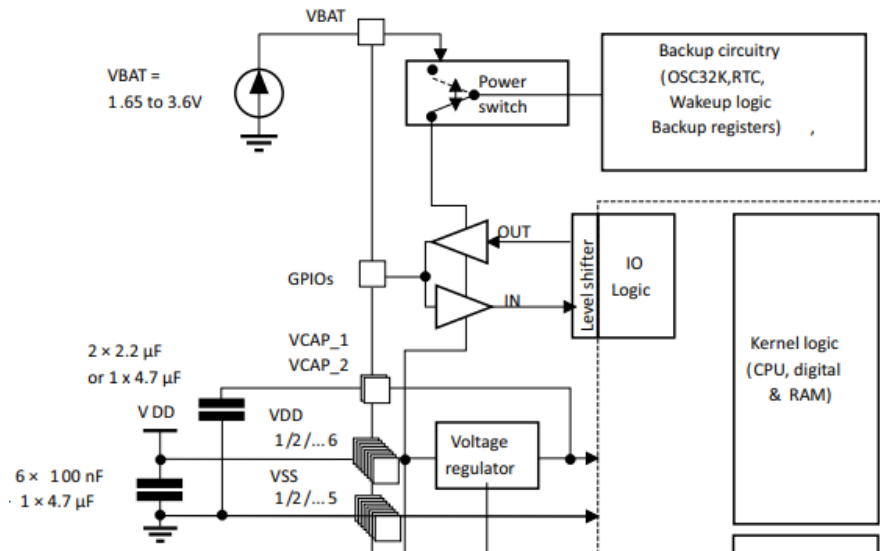


Obrázek 3.7: Zapojení SD karty

### 3.6 Hodiny reálného času

Aby bylo možné datalogování uložených snímků na SD kartu jsou využity vnitřní hodiny reálného času RTC (Real-time clock). Pro přesné měření času Nucleo deska disponuje nízkorychlostním externím oscilátorem používající 32,768 KHz křemíkový krystal [45], který lze k RTC připojit. RTC poskytuje plnohodnotné hodiny ve formátu 12/24 hodin s kalendářem včetně názvu dne týdnu a automatické kompenzace přestupného roku.

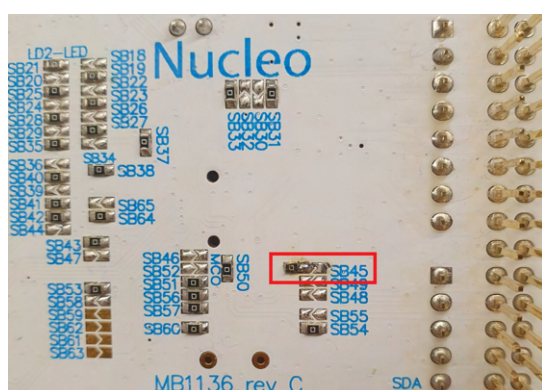
Hodinový čítač běží neustále bez ohledu na režim mikroprocesoru (běh hlavní smyčky, úsporný režim, reset atd.) po dobu připojeného hlavního napájení. Aby hodiny běžely i po odpojení napájení, je potřeba připojit záložní baterii či super-kondenzátor s napětím v rozsahu 1,65 V-3,6 V k pinu záložního zdroje VBAT. Současně je třeba odstranit  $0\ \Omega$  propojku na zadní straně desky Nucleo, která spojuje VBAT s VDD STM32 [46] (obr. 3.9).



Obrázek 3.8: Schéma napájení STM32F411 [35]

Jako záložní zdroj RTC se standartě využívají lithiové články v podobě knoflíkových baterií. Pro tento účel je k systému přidána 3 V 220 mAh baterie CR2032 [47] (obr. 3.10).





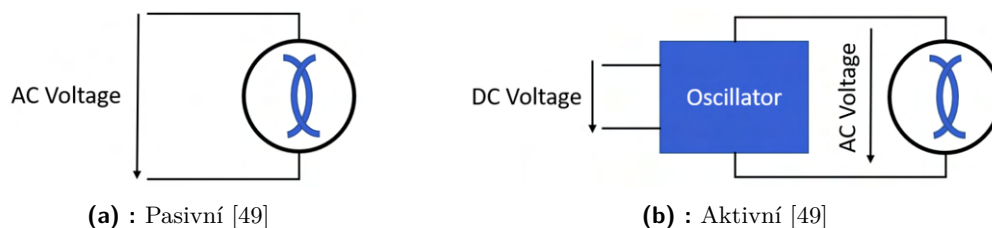
Obrázek 3.9: Odstraněná propojka SB45



Obrázek 3.10: Baterie CR2032 [48]

### 3.7 Bzučák

Pro simulaci alarmu disponuje modul aktivním piezo bzučákem. Výhodou aktivního bzučáku oproti pasivnímu je jednoduchost zapojení a obsluha. K jeho aktivaci je díky integrovanému oscilátoru, který generuje tón o pevně definované frekvenci, třeba přivést pouze stejnosměrné napájení [49]. Nevýhodou aktivního bzučáku je nemožnost ovlivnění vydávaného tónu. Nicméně pro demonstrativní účely alarmu je toto omezení nepodstatná a aktivní bzučák je vhodným řešením.

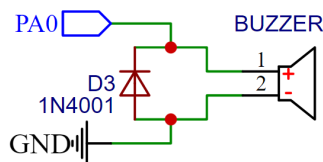


(a) : Pasivní [49]

(b) : Aktivní [49]

Obrázek 3.11: Varianty bzučáku

Zvolený bzučák vyžaduje pro aktivaci 3,3 V s odběr 25 mA. Vydávaný monotonní tón je o frekvenci  $2,3 \pm 0,5$  kHz. Bzučák je připojen s paralelní diodou pro eliminaci napěťový špiček na digitální výstupní pin PA0.



Obrázek 3.12: Zapojení bzučáku



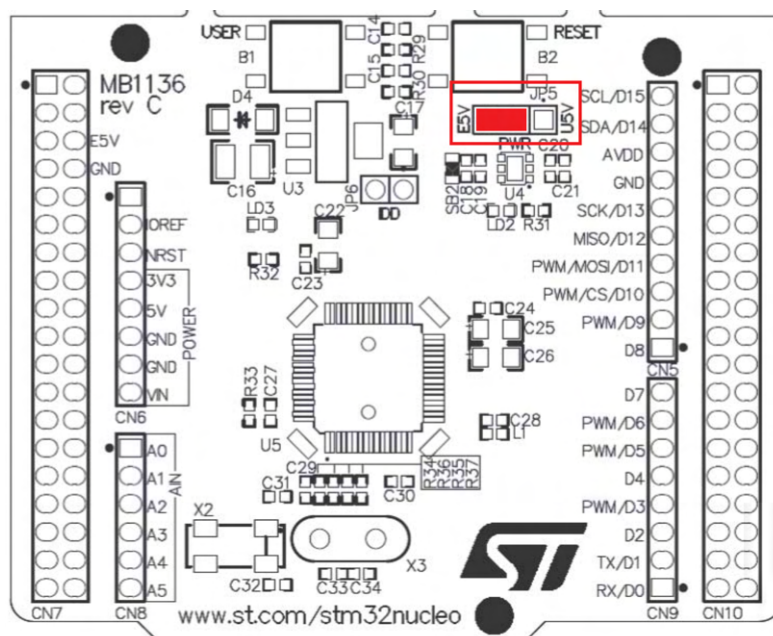
Obrázek 3.13: Aktivní bzučák

### 3.8 Baterie

Pro kompaktnost a přenositelnost obou modulů je k systému přidána běžně používaná Lithium-iontová baterie ve velikosti 18650. Její výhodou je relativně vysoká kapacita

společně s malými rozměry, dostupností a příznivou cenou [50]. Vyniká dlouhou životností s velkým počtem nabíjecích cyklů a nominálním napětím 3,6 V. Její největší nevýhodou je riziko při přílišném vybití, kdy dochází k fatálnímu poškození a oživení baterie již může být obtížné či nemožné. Při dlouhodobém nevyužití baterie je proto dobré pravidelné preventivní nabíjení, aby nedošlo k samovolnému úplnému vybití. Dále je rizikem vznícení způsobené zkratem (např. při poškození baterie - promáčknutí článku) či přebitím [51]. Z těchto důvodů je nutné k akumulátoru přidat ochranný obvod, který zajistí odpojení baterie při kryptických úrovních napětí.

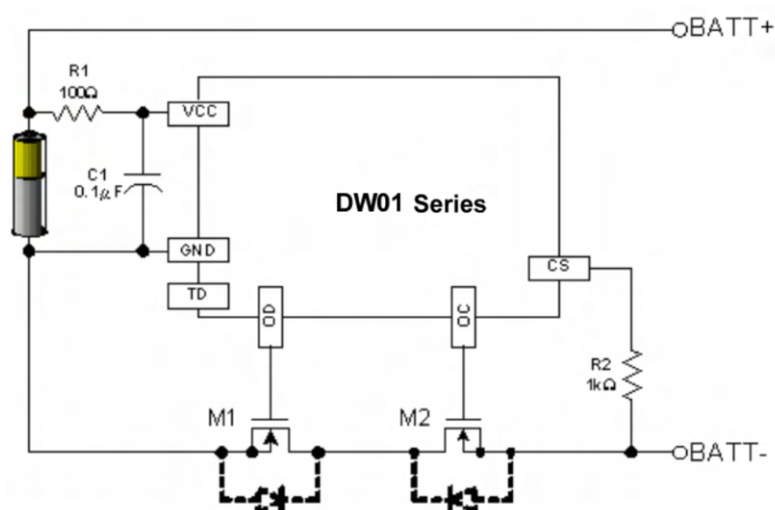
Pro použití externího zdroje je třeba nastavit propojku JP5 na čelní straně Nucleo desky do polohy EV5 [46]. Tím je mikroprocesor odpojen od napájení VDD skrze U5V USB port programátoru ST-Link a k externímu napájení lze využít vývody VIN a E5V. Programátor ST-Link zůstává napájen skrze USB a lze jej stále využít k programování a debugování mikroprocesoru. Vývod VIN je určen pro externí zdroje v rozsahu 7-12 V s maximálním odběrem 800 mA. Vývod E5V je pak určen pro nižší vstupní rozsah 4,75-5,25 V s maximálním odběrem 500 mA.



Obrázek 3.14: Konfigurace externího napájení [46]

### 3.8.1 Ochranný obvod

Pro ochranu baterie obvod byl zvolen ochranný integrovaný obvod lithium-iontových baterií řady DW01 výrobce Fortune Semicon [52] určený k ochraně jedno článkových baterií. Tento obvod zajišťuje ochranu proti vybití (odpojení baterie při poklesu napětí pod  $2,38 \pm 0,01$  V), přepětí (odpojení baterie při překročení úrovně napětí  $4,25 \pm 0,05$  V) a ochranu před zkratem (odpojení baterie při překročení proudu  $150 \pm 10$  mA). Vyniká nízkým klidovým odběrem 3 uA. Použito je výrobcem udávané typické zapojení obvodu (obr. 3.15).



Obrázek 3.15: Schéma ochranného obvodu [52]

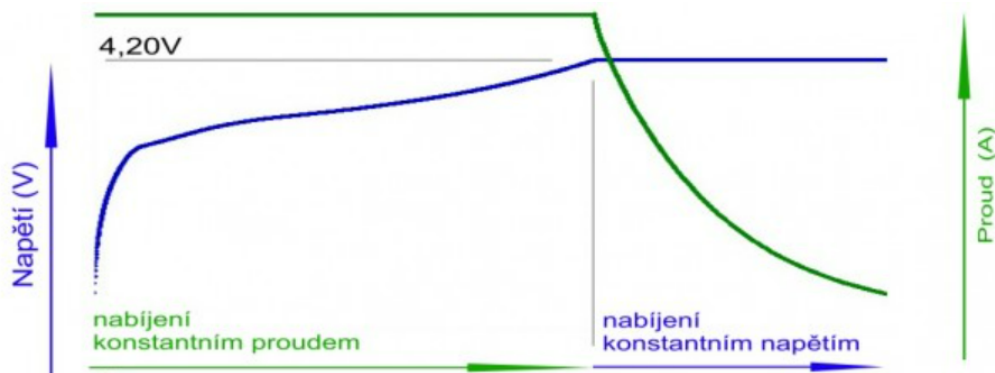
### 3.8.2 Nabíjecí obvod

Aby bylo možné nabíjet Lithium-iontovou baterii přímo v modulu, byl pro obsluhu korektního nabíjení zvolen mikrokontrolér lineárního nabíjení jedno článkových lithium-iontovou baterií MCP73831/2 výrobce Microchip Tech [53]. Hlavními přednostmi tohoto kontroléru je dvoufázové nabíjení konstantním proudem/konstantním napětím (CC/CV) s volitelnou úrovní nabíjecího proudu v rozmezí 15–500 mA s funkcí pomalého startu (předkondicionování baterie), v případě detekce velmi vybité baterie. Mikrokontrolér disponuje vývodem pro stavovou signalizační diodu. Konkrétně byla zvolena varianta mikrokontroléru s označením MCP73831T-2ACI/OT.

První fází nabíjecího cyklu je rychlonabíjení konstantním proudem  $I_{REG}$ . Ten je možné programovatelně zvolit pomocí velikosti rezistoru  $R_{PROG}$  dle vztahu

$$I_{REG} = \frac{1000 \text{ V}}{R_{PROG}}, \quad (3.1)$$

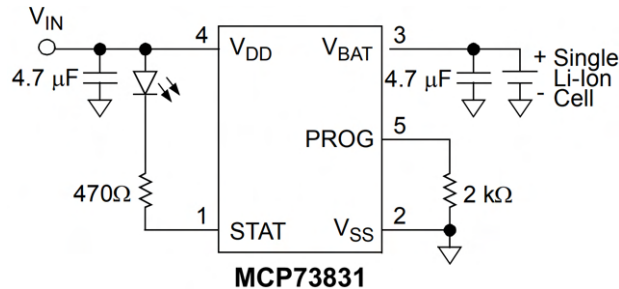
kde hodnota  $I_{REG}$  je v mA a hodnota  $R_{PROG}$  v kΩ. Nabíjení konstantním proudem  $I_{REG}$  probíhá do dosažení napětí na baterii  $V_{BAT}$  úrovně  $V_{REG}=4,2 \text{ V}$ . Následně nastává druhá stabilizační fáze nabíjení konstantním napětím  $V_{REG}$ , kdy nabíjecí proud důsledkem nasycení baterie postupně klesá. Nabíjení je ukončeno v momentě, kdy nabíjecí proud klesne pod úroveň 10% z nastaveného nabíjecího proudu  $I_{REG}$ .



Obrázek 3.16: Průběh dvoufázového nabíjení CC/CV [54]

Funkce pomalého startu je aktivována pokud je napětí na baterii menší než prahová hodnota předkondicionování ( $V_{PTH}$ ), která je u zvoleného mikrokontroléru továrně nastavena na 66,5% z napětí baterie. Dokud napětí baterie nepřesáhne hodnotu ( $V_{PTH}$ ), nabíjení konstantním proudem klesne na úroveň 10% z nastaveného nabíjecího proudu  $I_{REG}$ .

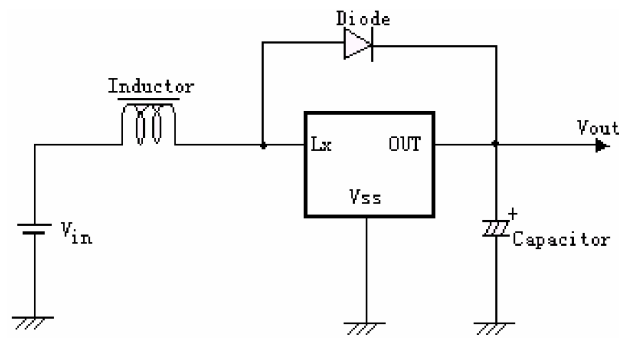
Použito je výrobcem udávané typické zapojení obvodu (obr. 3.17) se zvoleným odporem  $R_{PROG}$  velikosti  $2\text{ k}\Omega$ , tedy maximálním nabíjecím proudem  $I_{REG}=500\text{ mA}$ .



Obrázek 3.17: Schéma nabíjecího obvodu [53]

### 3.8.3 Měnič napětí

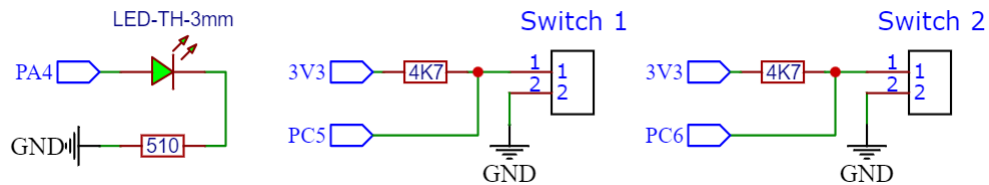
Aby bylo možné využít k připojení externího napájení vývod E5V, je nutné napětí baterie posílit. Pro tento účel je přidán posilovač napětí využívající step-up měnič stejnosměrného napětí ME2108 od firmy MicrOne [55]. Ten nabízí volitelné výstupní napětí v rozmezí 2,0-7,0 V s maximální frekvencí 180 kHz. Pro 5 V výstupní napětí je využito výrobcem udávané typické zapojení obvodu (obr. 3.18) s komponentami  $C=24\text{ nF}$ ,  $L=22\text{ }\mu\text{H}$  a Schottky diodou SS14F-PJ.



Obrázek 3.18: Schéma nabíjecího obvodu [55]

### 3.9 Přidané ovládací prvky

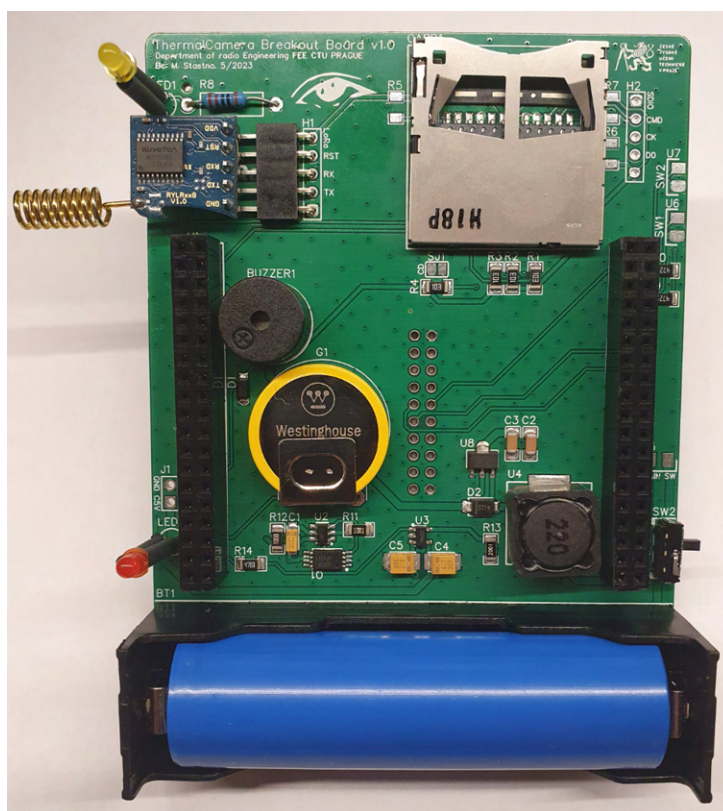
Návrh desky je finálně doplněn od dva vstupní vývody PC5 a PC6 určené k připojení tlačítek/spínačů a jedné informativní diodě na vývodu PA4.



Obrázek 3.19: Schéma zapojení informativní diody a vývodů pro spínače

### 3.10 Návrh plošného spoje

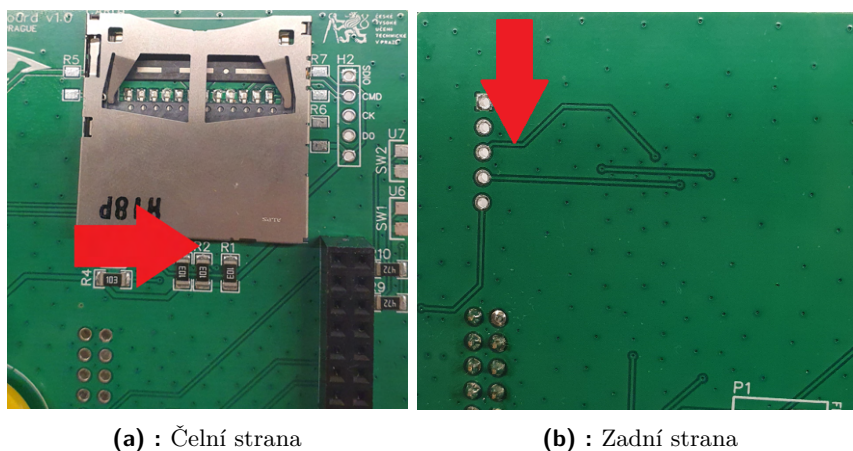
Návrh modulů je koncipován tak, aby bylo možné obsáhnout veškeré funkce obou modulů na jedné desce, použitelné jako univerzální kompaktní rozšíření hlavní Nucleo desky. K propojení s deskou je využito oboustranný Morpoho konektor. Jelikož je třeba displejový modul GFX01Mx připojit na čelní stranu Nucleo desky, je nutné pro připojení rozšiřujícího modulu využít zadní stranu Morpoho konektoru. Při návrhu bylo snahou nepřekročit dosavadní maximální rozměry desky Nucleo s nasazeným displejem. Jelikož modul s displejem výrazně přesahuje rozměry Nuclea, nabídlo se tento přesah příhodně využít pro uložení baterie, která svou délkou včetně držáku takřka koresponduje s šířkou Nucleo desky. Uložení baterie jsou tak definovány celkové rozměry. Pro návrh plošného spoje je využito freewareový webový návrhový nástroj EasyEDA, obsahující rozsáhlou sbírku bezplatných knihoven [56].



Obrázek 3.20: Osazený plošný spoj modulu

### 3.10.1 Chyba v návrhu

U vyrobeného plošného spoje byla posléze objevena chyba v návrhu způsobena špatnou maskou slotu na SD kartu, která má chybně přiřazené rozložení pinů. Oprava je řešena přidáním nového slotu na zadní stranu desky. K propojení drátky jsou využity rezervní vývody SDI rozhraní, které byly již při návrhu desky umístěny vedle SD slotu. Současně je třeba na dvou místech přerušit signálovou cestu CK, která je vlivem chyby uzemněna.

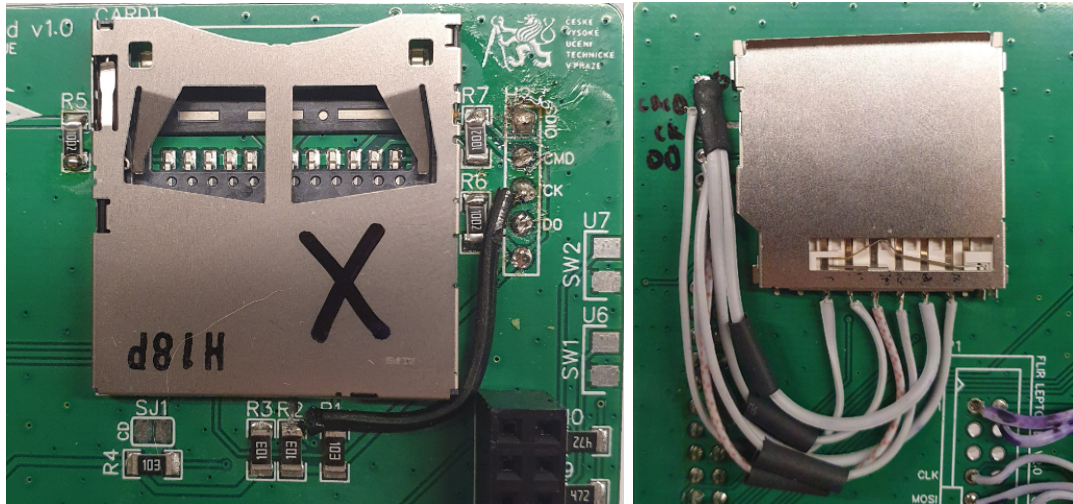


(a) : Čelní strana

(b) : Zadní strana

Obrázek 3.21: Místa k přerušení k přerušení uzemněné cesty signálu CK

Pro využití rezervních vývodů SPI rozhraní i pro CK je tak následně nutné toto přerušení cesty přemostit. Výslednou podobu opravy včetně přidaného slotu na SD kartu na zadní stranu plošného spoje je vidět na následující dvojici obrázků 3.22.

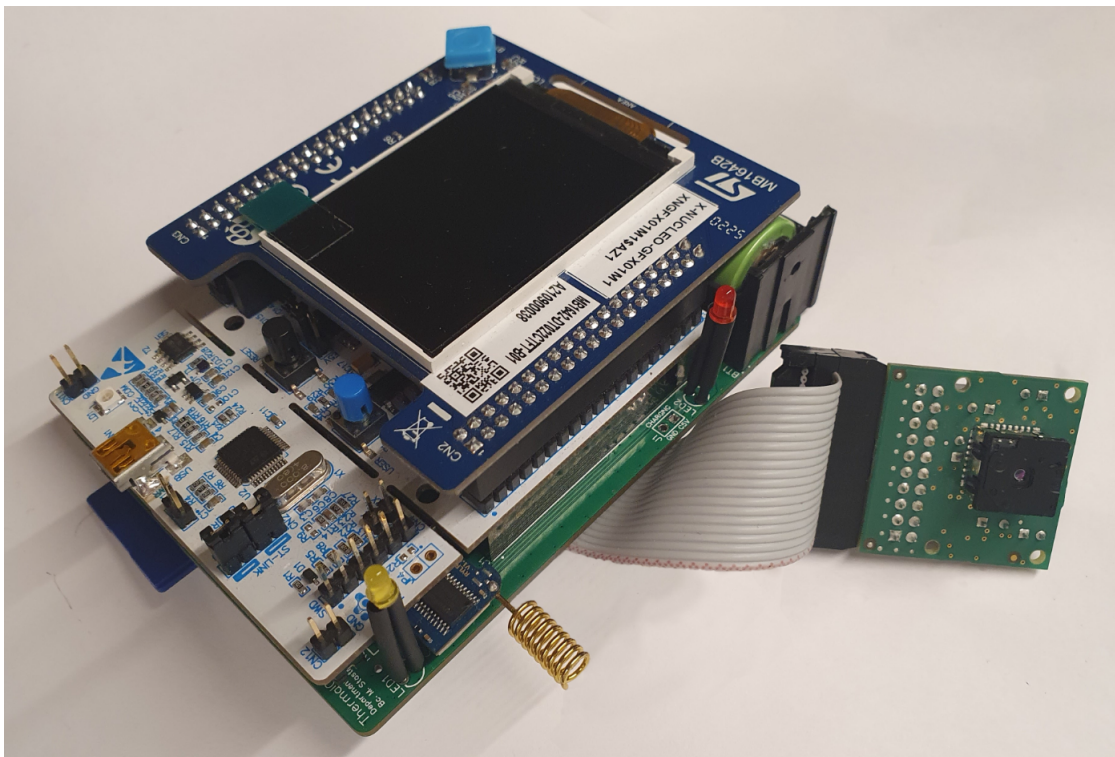


(a) : Čelní strana s přemostěním

(b) : Zadní strana

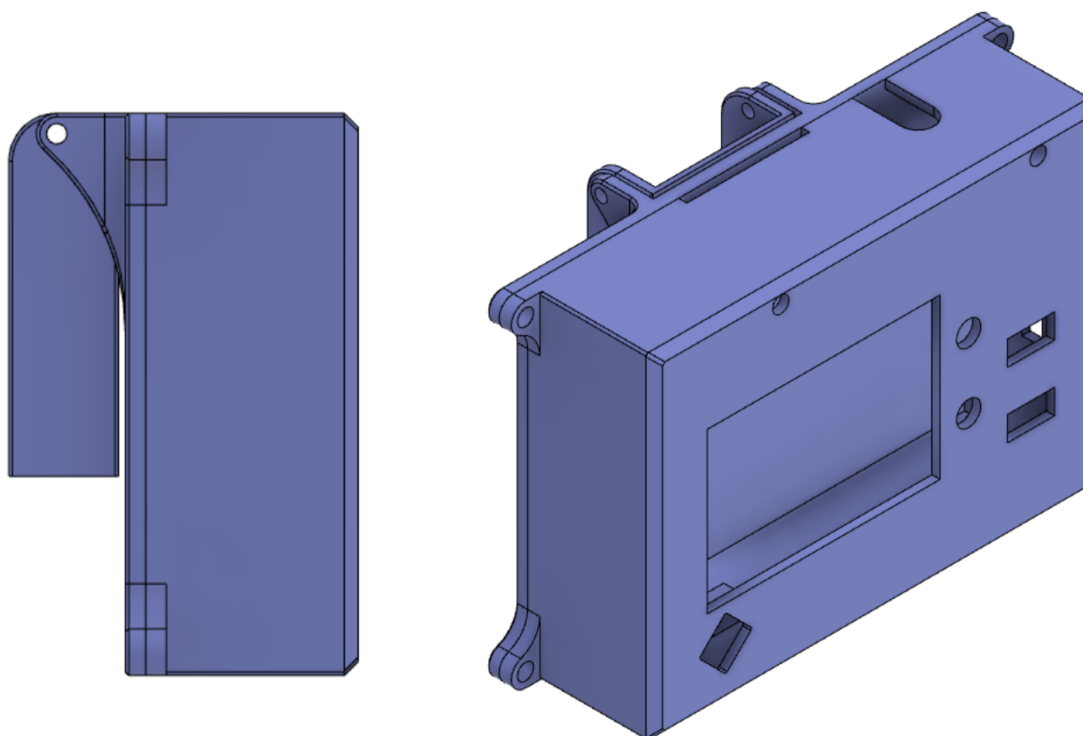
**Obrázek 3.22:** Opravené řešení slotu pro SD kartu

Výsledná podoba kompletně sestaveného kamerového modulu s nasazenou Nucleo deskou včetně nasazeného modulu displeje, připojenou kamerou i rádiovým Lora modulem.

**Obrázek 3.23:** Kompletně sestavený kamerový modul

### 3.11 Návrh krabičky kamerového modulu

Pro vymodelování krabičky byl použit 3D modelovací nástroj Fusion 360. Návrh byl koncipován tak, aby byly veškeré ovládací prvky přístupné z čelní strany. Hlavní předností návrhu je bezpečné upevnění kamery v pohyblivém kloubu, který umožňuje natočení kamery jak do pozice "zrcadlo" snímající scénu před displejem, tak do klasické polohy snímající scénu za displejem. Pro výrobu krabičky byl následně zvolen 3D tisk.



**Obrázek 3.24:** 3D model krabičky termokamerového modulu



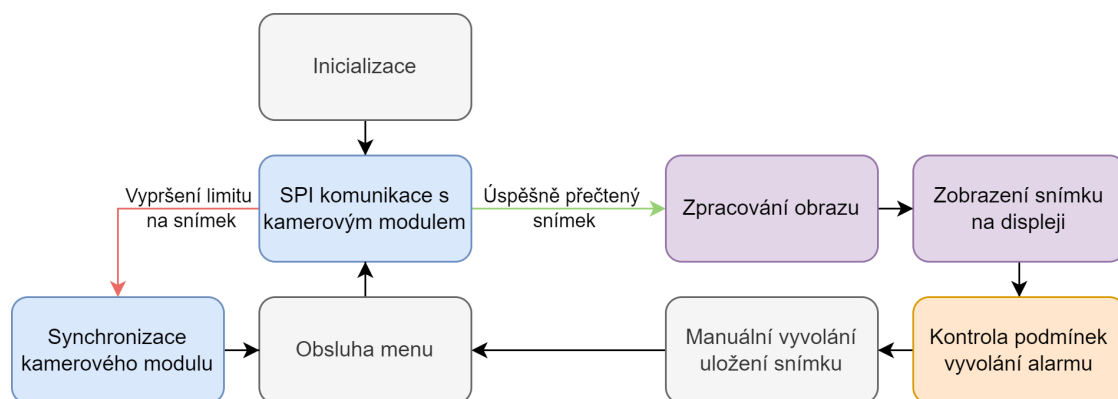
## Kapitola 4

### Software

V této kapitole je popsáno samotné programové řešení obou modulů. Psaní a kompilace kódu probíhalo ve vývojovém prostředí STM32CubeIDE [57]. Projekt kromě standardních knihoven *stdio.h*, *stdlib.h*, *string.h*, *stdbool.h* a *stdarg.h* využívá především knihovnu HAL *stm32f4xx\_hal.h* [39] pro konfiguraci a obsluhu periférií mikrokontroléru. Dále je pro potřeby displeje použit softwarový rozšiřující balík X-CUBE-DISPLAY [58] ve verzi 2.2.0 a pro správu souborového systému FAT rozšiřující modul FATFS [59] určený pro malé vestavné systémy.

### 4.1 Termokamerový modul

Struktura programu pro termokamerový modul je rozdělena do menších funkčních celků dle hardwarových komponent. Hlavní program *main.c* mimo jiné obsahuje kompletní řešení komunikace s kamerovým modulem. Dále *app\_display.c* obstarává komunikaci s displejem a vykreslování snímků, *reya\_x\_rylr998.c* nabízí řešení týkající se komunikace s radiovým LoRa modulem, *rtc.c* obsahuje funkce týkající se vnitřních hodin reálného času a *sd\_card.c* pro obsluhu souborového systému a ukládání snímků. Průběh programu vyobrazuje diagram na následujícím obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Algoritmus hlavního cyklu programu

### 4.1.1 Inicializace

Nejprve jsou uvedeny vybrané inicializované proměnné a datové struktury. Inicializováno je bytové pole *imagePacketBuffer* o velikosti jednoho VoSPI paketu, který ve zvolené základní konfiguraci modulu FLIR tvoří 164 B.

```

1  static uint8_t imagePacketBuffer[FLIR_PACKET_SIZE];
2
3  static struct Image img = {.w=80, .h=60, .Bpp=2};
4  static struct Image imgBackground = {.w=80, .h=60, .Bpp=2};
5  static struct Detection detection = {PERSON_DIFFERENCE,
6                                     PERSON_SENSITIVITY,
7                                     .background_valid=false};
8  static struct CriticalTemp criTemp = {CRITICAL_TEMP_LEVEL,
9                                       CRITICAL_TEMP_SENS};
10 static struct VideoStreamStats vss={.last_timestamp = 0};

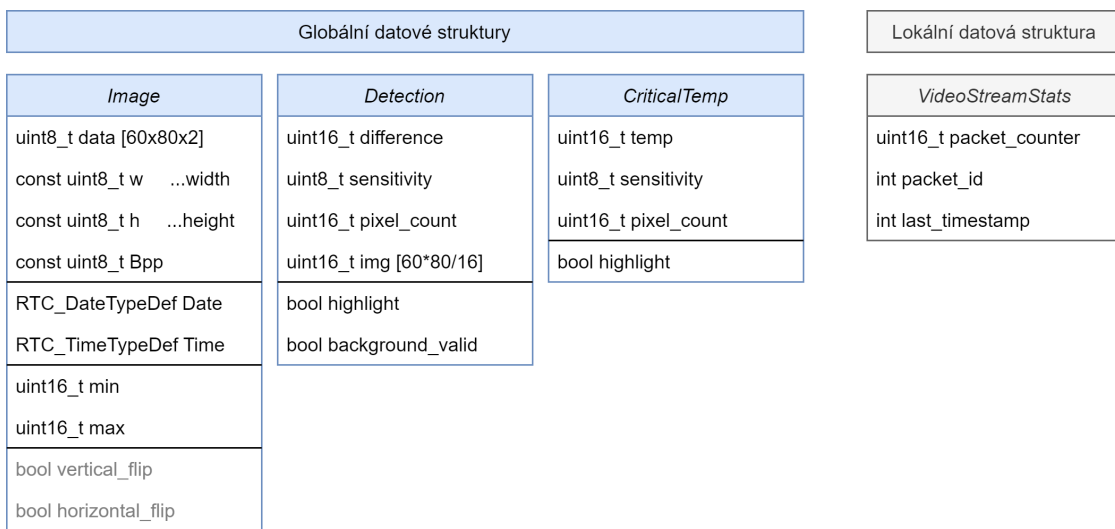
```

**Kód 4.1:** Vybrané inicializované proměnné

Následně jsou připraveny obrazové datové struktury *img* a *imgBackground* pro získané snímky z kamery. Definována v nich je velikost snímku a rozlišení *Bpp=2*, které označuje 2 B na pixel. Struktura *imgBackground* bude později využito pro detekci v obraze.

Dále jsou inicializovány datovou strukturou *detection* a *criTemp*, které obsahují nastavení a výsledky detekcí ze správcování snímku. V případě struktury *detection* jsou definovány základní vlastnosti pro detekci osoby, tedy minimální rozdílnost snímku oproti pozadí *PERSON\_DIFFERENCE*, citlivost a invalidita snímku pozadí, označující, že detekce není připravena (podrobněji v podkapitole 4.1.3). Obdobně jsou definovány parametry detekce kritické teploty, kterými jsou kritická teplota v  $K \times 10^2$  a citlivost detekce.

Poslední - lokální datovou strukturou VoSPI komunikace je *VideoStreamStats*. Jak název napovídá, obsahuje statistiky aktuálně přeneseného snímku. Vynulována je časová značka sloužící pro hrubý výpočet snímkové frekvence.



**Obrázek 4.2:** Hlavní datové struktury (zadefinované v main.c a main.h)

Inicializovány systémové hodiny a veškeré rozhraní STM32 mikrokontroléru, kdy je u inicializace vnitřních hodin reálného času zkontrolován registr zálohy *RTC\_BKP\_DR1* [60]. Pokud je nastaven, použije se pro inicializaci času a kalendáře. Dále je inicializován displej *MX\_DISPLAY\_Init()*, kdy je displej aktivován a je určena jeho orientace včetně orientace joysticku. Následně je inicializována SD karta *sc\_card\_init()* a komunikace s rádiovým LoRa modulem *RYRL998\_Init* připojeného na rozhraní *huart1*, kdy jsou definovány parametry LoRa sítě, kterými jsou např. přiřazení adresy modulu - pro hlavní kamerový modul *DEVICE\_ADDRESS=100*, ID sítě *NETWORK\_ID=3* či frekvenční pásmo *BAND=868,5 MHz*. Nakonec je inicializován termokamerový modul Lepton funkcí *FLIR\_sync()*.

```

1 static void FLIR_sync(void){
2     HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, FLIR_SPI5_CS_Pin, GPIO_PIN_SET);
3     HAL_Delay(200);
4     HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, FLIR_SPI5_CS_Pin, GPIO_PIN_RESET);
5 }

```

**Kód 4.2:** Synchronizační sekvence Lepton modulu

#### 4.1.2 Čtecí cyklus VoSPI paketů

Hlavní smyčka začíná inicializací čtecího cyklu VoSPI komunikace resetováním proměnné *packet\_id*. Očekávan je tak první validní paket s identifikačním číslem rovným nule označující první validní paket zahájeného VoSPI přenosu nového snímku. Následně je zahájen samotný čtecí cyklus.

```

1 while (1){
2     vss.packet_id = -1;
3
4     for (vss.pc=0; vss.pc<1000; vss.pcr++){
5         HAL_SPI_Receive(&hspl5, (uint8_t*)&imagePacketBuffer[0],164,5);
6
7         if((imagePacketBuffer[0] & 0xf) == 0x0f){
8             // Invalid discard frame
9             continue;
10        }
11        else{ // Valid frame
12            if (imagePacketBuffer[1] == (vss.packet_id + 1)) {
13                vss.packet_id = imagePacketBuffer[1];
14                memcpy(img.data+vss.packet_id*FLIR_PACKET_PAYLOAD,
15                    imagePacketBuffer+4,
16                    sizeof(imagePacketBuffer)-4*sizeof(uint8_t));
17
18                if(vss.packet_id == 59){ // Image transmission complete
19                    Img_timestamp(&img);
20                    Img_background_Snapshot(&img, &imgBackground,
21                                            &background_countdown,
22                                            &detection);

```

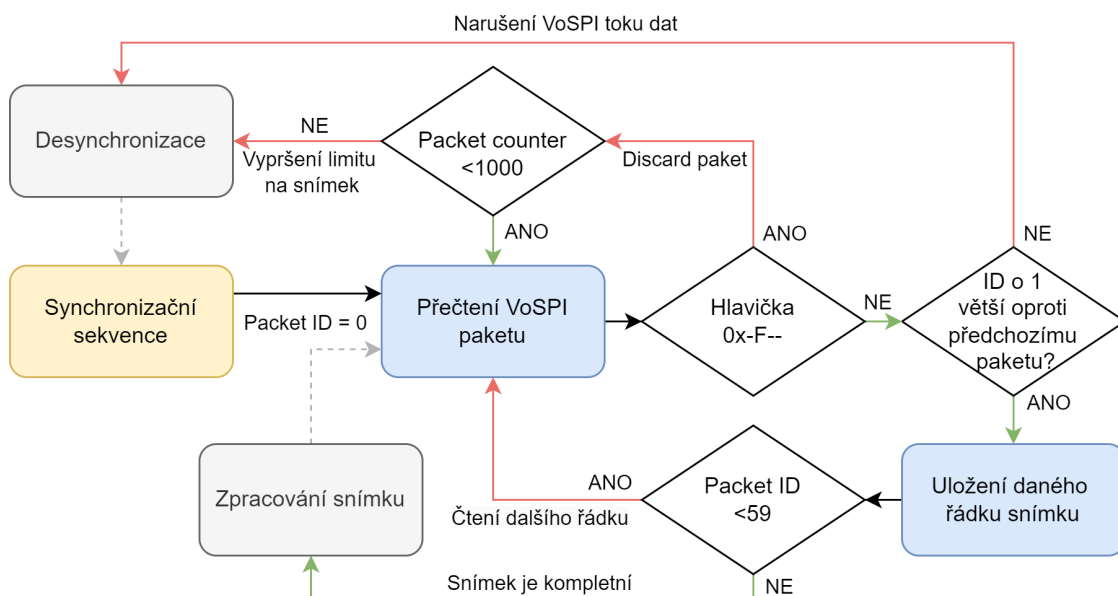
```

23     Img_postprocessing (&img, imgBackground,
24                        &detection, &criTemp);
25     Display_Image(img, detection, criTemp);
26     Detection_check(detection, criTemp);
27     Manual_capture_check(img);
28
29     Video_Stream_Info(&vss);    // Printf info
30     break;
31 }
32 }else break;    // packet flow disrupted
33 }
34 }
35
36 if (vss.packet_id<59) FLIR_sync();    // Re-sync
37 Menu_Handler(&invoke_menu, uart2RX_buffer); // Control via terminal
38 LoRa_Receive_Handler(&Ryrl998);    // Check incoming msg
39 }

```

Kód 4.3: Hlavní smyčka

Nejprve je přečten celý paket do pole *imagePacketBuffer*. Pokud jsou 4 nejnižší bity prvního bytu hlavičky (kterou tvoří celkem 4 B) paketu rovny hexadecimální hodnotě 0xf, jedná se o paket k zahození a je rovnou přistoupeno k dalšímu pokusu o přečtení validního VoSPI paketu. Jedná-li se o validní paket, je zkontrolováno jeho ID, které tvoří nejnižší 3 byte hlavičky. První validní paket musí začínat s ID=0 a každý následující validní paket musí mít ID o jedna vyšší. Tím je zajištěn nepřerušovaný tok paketů jedno snímku. V případě, že je toto pravidlo porušeno, je čtecí cyklus rovnou ukončen, neboť došlo k de-synchronizaci komunikace.



Obrázek 4.3: Čtecí cyklus VoSPI komunikace s kamerovým modulem

V případě, že je přečten validní příchozí paket korektního řádku, je jeho obsah tvořený zbylými 160 B za hlavičkou překopírován do odpovídajícího řádku matice snímku *img.data* dle ID paketu, které přímo koresponduje s pořadím řádku přenášeného snímku. Pokud ještě celkem nebylo přečteno všech 60 paketů daného snímku, pokračuje se čtením dalšího paketu. Je-li již přečten kompletně celý snímek, přiřadí se mu časové razítko *Img\_timestamp()* a čtecí cyklus je ukončen zpracováním snímku.

Pokud se úspěšně nepovede získat kompletní snímek po ani přečtení 1000 paketů, je detekována desynchronizace komunikace se senzorem a zahájí se synchronizační sekvence *FLIR\_sync()* (kód 4.2).

### 4.1.3 Zpracování snímku

Pro detekci osob pomocí rozpoznání změn v obraze je třeba nejprve uložit otisk pozadí snímané scény *Img\_background\_Snapshot()*. Snímek použitý pozadí pro referenci je uložen s pátým úspěšným přeneseným snímkem z termokamery. Tím je zajištěno, že modul Leptno již provedl automatickou kalibraci snímané scény a snímek pozadí je validní. Uložena je tak kopie *img* jako *imgBackground*, přičemž je nastaven parametr detekce *imgBackground* na hodnotu *true*.

Před samotným zpracováním snímku jsou inicializovány parametry nového snímku. Parametry *img->min* a *img->max* reprezentující minimální a maximální naměřenou teplotu jsou nastaveny do krajních poloh rozsahu. Vynulovány jsou proměnné *criTemp->pixel\_count* a *detection->pixel\_count* počítající pixely vyhovující detekčním parametrům. Vymazáno je bytové pole *detection->img*, tvořící bitovou matici o velikosti obrazu (`uint8_t [(w*h)/8=300]`). Tato bitová matice následně reprezentuje obraz v podobě pixelů, které vyhovují detekční podmínce změny oproti pozadí.

```

1 static void Img_postprocessing(struct Image *img, struct Image
   imgBackground, struct Detection *detection, struct CriticalTemp *
   criTemp){
2     // reset stats to the default values
3     img->min = 0xFFFF;
4     img->max = 0x0000;
5     criTemp->pixel_count = 0;
6     detection->pixel_count = 0;
7     for (int i=0; i<300; i++) detection->img[i]=0; //clear bit array
8
9     uint16_t pos;
10    uint16_t pixel;
11    for (int y=0; y<img->h; y++){
12        for (int x=0; x<img->w; x++){
13            pos = img->Bpp*(x + y*img->w);
14            // pixel in 16 bit format (TLinear enabled)
15            pixel = (img->data[pos]<<8 | img->data[pos +1]);
16
17            // temperature limits
18            if (pixel<img->min) img->min=pixel;
19            if (pixel>img->max) img->max=pixel;

```

```

20 // critical temperature detection
21 if (pixel>criTemp->temp) criTemp->pixel_count++;
22 // change detection
23 if (abs(pixel-imgBackground.data[pos]) >
24     detection->difference){
25     detection->pixel_count++;
26     // set corresponding pixel in the bit matrix
27     SetBit(detection->img, x+img->w*y);
28 }
29 }
30 }
31 }

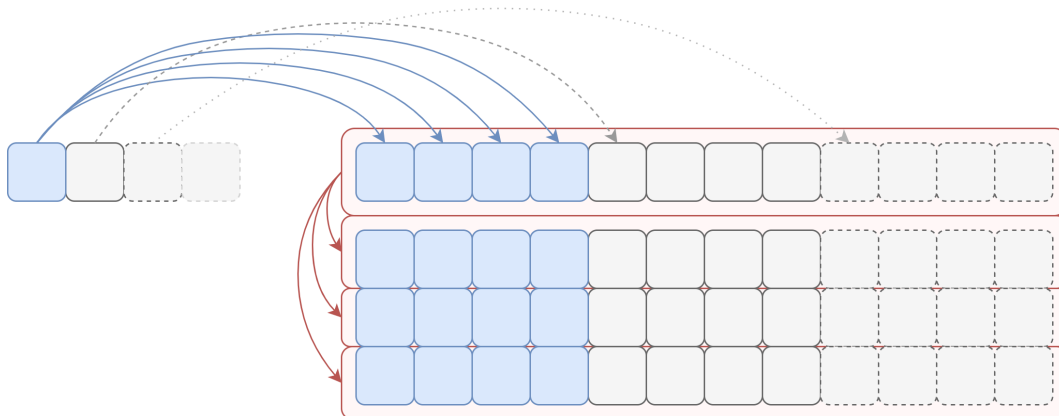
```

Kód 4.4: Zpracování obrazu

Šestnácti bitová hodnota pixelu přímo odpovídá naměřené teplotě v  $K \times 10^2$ . Pokud je tak při procházení celého obrazu hodnota pixelu větší jak aktuální *img->max* či menší jak aktuální *img->min*, krajní hodnoty jsou aktualizovány. Tím je získán teplotní rozsah snímané scény. Dále je pokud je hodnota pixelu vyšší než definovaná kritická teplota *criTemp->tem*, je inkrementováno počítadlo *criTemp->pixel\_count*. Obdobně pokud je rozdíl hodnoty pixelu od odečteného pozadí mimo mez *detection->difference*, je inkrementováno počítadlo pixelů difference *detection->pixel\_count*. Současně je daný pixel označen v bitové matici *detection->img*.

#### 4.1.4 Vykreslení snímku na displeji

Jelikož je displej velikosti  $320 \times 240$  pixelů s rozlišením 2 B na pixel, bylo by pro připravení kompletního snímku třeba pole velikosti 153,6 kB. Otázka správy paměti se tak stává kritickou. Řešením je rozdělení snímku na menších sektory, po kterých je obraz vykreslen. Současně je třeba při návrhu algoritmu vykreslení obrazu brát v potaz i zvětšení snímku, které je třeba provést, neboť snímek z kamery se na displej vejde přesně  $4 \times$ . Pro optimální algoritmus zvětšení snímku je zvoleno postupné vykreslování po sektor o šířce celého řádku displeje a výšce násobku měřítko zvětšení (tedy násobku 4). Tím je možné snadné zvětšení v ose sloupce displeje přímým kopírováním celých řádků obrazu.



Obrázek 4.4: Postup zvětšení snímku

Pro kontrastní zobrazení snímané scény je hodnota pixelu nejprve přeškálována dle minimální *img.min* a maximální *img.max* naměřené teploty scény na 8 bitovou hodnotu *shade*. Dále je získaný odstín šedě přepočten na hodnotu barvy formátu RGB585. Pro pixel je zvolena barevná paleta dle detekčních podmínek. Tedy pokud teplota pixelu převyšuje kritickou teplotu *criTemp.temp*, je výslednou barvou odstín červené. Dále pokud daný pixel označen v bitové matici *detection.img*, je výslednou barvou odstín žluté. Pokud ani jedna z předchozích variant nenastává, zůstává výslednou barvou odstín šedé.

```

1 void Display_Image(struct Image img, struct Detection detection,
2                   struct CriticalTemp criTemp){
3     static uint16_t framebuffer[(CHUNK_WIDTH*CHUNK_HEIGHT)];
4     static uint16_t pixel;
5     static uint8_t  shade;
6
7     for (int chunk=0; chunk<20; chunk++){
8         int y_offset = chunk*FRAME_CHUNK_HEIGHT;
9         for (int y=y_offset; y<y_offset+FRAME_CHUNK_HEIGHT; y++){
10            for (int x=0; x<FRAME_CHUNK_WIDTH; x++){
11                pixel =(img.data[2*x+160*y])<<8|img.data[2*x+160*y+1];
12                // 8 bit color component (RGB888 format) in greyscale
13                shade = ((pixel-img.min)*255)/(img.max-img.min);
14                // if pixel in critical temp range
15                if (pixel>criTemp.temp){
16                    // convert to red color range
17                    pixel = RGB888_to_RGB585(shade, 0, 0);
18                }
19                // if a change is detected in the pixel
20                else if (TestBit(detection.img, x+80*y)){
21                    // convert to yellow color range
22                    pixel = RGB888_to_RGB585(shade, shade, 0);
23                }else{
24                    // convert to greyscale
25                    pixel = RGB888_to_RGB585(shade, shade, shade);
26                }
27
28                // insert pixel into row SCALE times
29                pixel_copy(framebuffer, pixel, x, y-y_offset, SCALE);
30            }
31            // repeat row by SCALE factor
32            row_copy(framebuffer, y-y_offset, SCALE);
33        }
34        BSP_LCD_FillRGBRect (0, 0, framebuffer, 0, chunk*CHUNK_HEIGHT,
35                             CHUNK_WIDTH, CHUNK_HEIGHT);
36        BSP_LCD_WaitForTransferToBeDone(0);
37    }
38 }

```

**Kód 4.5:** Vykreslení snímku na displeji

Připravený naplněný sektor displeje je následně s využitím balíčku ovladačů pro podporu desek BSP [61] použitím funkce `BSP_LCD_FillRGBRect(instance, framebuffer, x, y, w, h)` přes sběrnici SPI zobrazen v odpovídající části displeje.



Obrázek 4.5: Zobrazený snímek na displeji

#### 4.1.5 Vyvolání alarmu

O vyvolání alarmu jak v případě kritické teploty, tak při detekci osoby ve scéně rozhoduje počet detekovaných pixelů snímku `criTemp->pixel_count` a `detection->pixel_count`. Pokud počet detekovaných pixelů větší než zvolený práh citlivosti `criTemp.sensitivity` či `detection.sensitivity` je vyvolán odpovídající alarm. Odeslán je tak příkaz s kódem alarmu pomocí rádiového modulu LoRa do modulu alarmu simulující sirénu.

```

1 int8_t RYRL998_Send(struct RYLR998 *Ryrl998, UART_HandleTypeDef huart,
2                   uint16_t Address, char *Data){
3     char buff[260];
4     sprintf((char*)buffer, "AT+SEND=%d,%d,%s\r\n",
5             Address, strlen(Data), Data);
6     HAL_UART_Transmit(&huart, (uint8_t*)buff, strlen(buff), 100);
7     HAL_Delay(100);
8     return RYRL998_CheckOK(Ryrl998);
9 }

```

Kód 4.6: Použití AT příkazu k odeslání zprávy LoRa modulem RYRL998

Kromě odeslání výstrahy do modulu alarmu je na straně kamerového modulu vyvolání alarmu doprovázeno rozblíknutím žluté signalizační diody LED1. Signalizační ledka bliká po dobu splnění detekčních podmínek.



### 4.1.6 Uložení snímku

Pro práci s SD kartou a uložení snímku z kamery je využit obecný open source modul pro obsluhu souborových systémů FATFS [62]. Podle typu události vyvolávající uložení snímku, jako například manuálně – stiskem středu joysticku modulu displeje, je snímek uložen do odpovídající složky dané události, tedy např. v uvedeném případě "Manually\_Captured\_Snapshots". Před uložením je zkontrolováno, zda složka existuje a případně je vytvořena. Následně vytvořen bitmapový soubor snímku s názvem dle časového razítka vytvoření *img.Date* a *img.Time* ve formátu "20RR-MM-DD\_(HH-MM-SS).ppm". Informace o datu a času pořízení snímku je navíc přidána i do metadat souboru jakožto datum poslední změny souboru.

Zvolený bitmapový formát ppm je grafického open source balíčku Netpbm (dříve Pbmplus) [63]. Ten nabízí jednoduché řešení pro základní bitmapové soubory, kterými jsou "ppm" pro monochromatické bitmapy s jedním bitem na pixel, "pgm" pro bitmapy v odstínech šedé, "pmm" pro barevné bitmapy a "pnm", který je abstrakcí již zmíněných. Pro možnost uložení snímku včetně zvýrazněných detekovaných pixelů totožně jako na displeji tak byl zvolen barevný formát pmm. Soubor se skládá ze dvou částí, hlavičky a samotné bitmapy. Hlavička začíná tzv. magickým identifikátorem, kterým je v případě ppm dvojice znaků "P3" nebo "P6". Magický identifikátor určuje podobu zápisu hodnoty pixelu. V případě identifikátoru P3 je hodnota zapsána v ASCII textové podobě trojicí číselných hodnot (r g b) v definovaném rozmezí. V případě identifikátoru P6 jsou hodnoty v bytovém formátu s jedním bytem na každou z rgb složek barvy. Pro jednodušší analýzu a možnost odečtení teploty vybraného pixelu již přímo otevřením textového souboru byl vybrán formát P3.

Hlavička pokračuje určením šířky a výšky obrázku a na dalším řádku určením maximální hodnoty složky barvy. Obdobně jako u displeje je naměřené hodnoty pixelu přepočtena do rozmezí 0–255. Na další řádek je ještě přidán komentář s informací o minimální a maximální teplotě v Kelvinech, kterým odpovídají krajní meze hodnot dat. Dále již pokračuje samotná bitmapa, kdy složky barev jsou odděleny mezerou a pixely dvojitou mezerou.

```

1 P3
2 80 60
3 255
4 # Temperature range <min:296,99, max:306,67> [K]
5 000 000 000 004 004 004 004 004 004 003 003 003 004 004 004 ...
6 163 163 000 212 212 000 218 218 000 230 230 000 226 226 000 ...
7 212 212 000 228 228 000 229 229 000 235 235 000 236 236 000 ...
8 ...

```

**Kód 4.7:** Podoba části ppm souboru

### 4.1.7 Obsluha USART přerušení

Pro neblokovaní hlavní smyčky je pro příjem po obou využívaných USART rozhraních použito vyvolání přerušení. V rámci obsluhy přerušení je nejprve detekováno rozhraní, které přerušení vyvolalo a následně je odbaveno.

```

1 void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart){
2     if(huart->Instance==USART1){
3         int8_t i = 0;
4         while (uart1RX_buffer[i] != '\n'){
5             i++;
6             HAL_UART_Receive(&huart1, &uart1RX_buffer[i], 1, 100);
7         }
8         Ryrl998.Rx = true;
9         Ryrl998.ResponseSize = i+1;
10        memcpy(Ryrl998.Response, uart1RX_buffer, Ryrl998.ResponseSize);
11        if (RYRL998_ParseReceive(&Ryrl998) == 0){
12            Ryrl998.ReceiveFlag = true;
13        }
14        HAL_UART_Receive_IT(&huart1, uart1RX_buffer, 1);
15    }
16
17    else if (huart->Instance==USART2){
18        if (!invoke_menu && (uart2RX_buffer[0] == 'm' ||
19                            uart2RX_buffer[0] == 'M')){
20            invoke_menu = true;
21        }
22        else HAL_UART_Receive_IT(&huart2, uart2RX_buffer, 1);
23    }
24 }

```

Kód 4.8: Obsluha USART přerušení

V případě USART1 se jedná o příjem zprávy z LoRa modulu. Nejprve je ve smyčce přichodí zpráva kompletně přečtena a uloženo do *Ryrl998.Response*. Následně zpráva tvořená AT příkazem rozebrána funkcí *RYRL998\_ParseReceive(&Ryrl998)*, kdy výsledkem jsou krom přijatých dat v *Ryrl998->Payload* i informace o proběhlém přenosu *Ryrl998->RSSI* a *Ryrl998->SNR*.

V případě USART2 je zkontrolován přijatý znak z komunikace terminálu a pokud se shoduje se znakem pro vyvolání menu nastavení, je tento požadavek reflektován nahozením příznaku *invoke\_menu*. K odbavení požadavku následně dojde až po dokončení hlavní smyčky čtení a zpracování obrazu z kamerového modulu.

#### 4.1.8 Uživatelské rozhraní

Pro kontrolu stavu a nastavení modulu je připraveno uživatelské rozhraní přes sériovou linku s připojeným počítačem. Ke grafickému vykreslení jsou použity ANSI Escape sekvence [64]. Na hlavní stránce jsou vypsané základní informace o stavu systému, jakožto nastavený interní čas a datum, zda jsou úspěšně připojeny SD karta a radiový modul LoRa a jaký byl poslední přijatý znak z terminálu. Dále jsou uvedeny podrobnosti komunikace s kamerovým modulem FLIR. V případě pokusu o uložení snímku je reflektován výsledek a obdobně informováno o proběhlé LoRa komunikaci. Rozhraní nabízí uživatelsky přenastavit interní čas i datum.

```

COM7 - PuTTY
FLIR Thermal Camera
ČVUT FEL - Master Thesis Bc. M. Stastna, 2023
Internal Clock: 17:53:49, 23.05.2023
SD card mounted: Yes [0]
LoRa initialize: Yes [0]
For menu press key ... 'm'

FLIR module:
Num of discarded pkgs before success: 192
min: 29789, max: 29888, freq: 3 Hz
Sync with the FLIR module (At 17:53:32)

Snapshot was saved: Successfully
Snapshot timestamp: 17:53:39

LoRa module:
Sent command: Captured manually (At 17:53:43)

COM7 - PuTTY
FLIR Thermal Camera
ČVUT FEL - Master Thesis Bc. M. Stastna, 2023
Internal Clock: 18:12:40, 23.05.2023
SD card mounted: Yes [0]
LoRa initialize: Yes [0]

Set time in format 24h.
Use keys 'a' & 'd' to move between digits.

<a HH:MM:SS d>

For save press key ... 's'
For exit press key ... 'e'

```

(a) : Hlavní stránka

(b) : Nastavení času

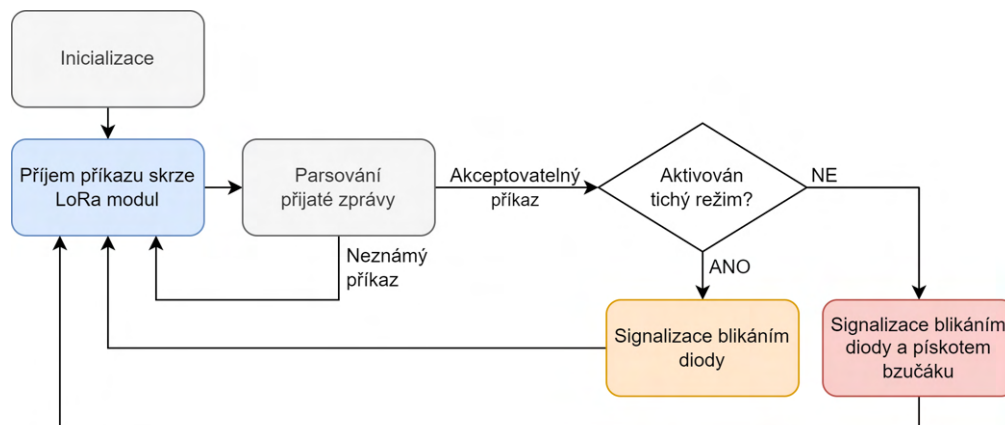
Obrázek 4.6: Výpis přes sériovou linku v terminálu PuTTY

Dále je možné ovládat modul skrze dva přepínače SW1 a SW2, joystick modulu displeje a modré tlačítko USER B1 Nucleo desky. Přepínač SW1 slouží pro vertikální překlopení snímku z kamery jak pro vykreslení na displeji, tak pro uložení na SD kartu. Přepínač SW2 slouží pro vypnutí/zapnutí barevného zvýraznění pixelů splňující detekční podmínky. Stiskem středu joysticku je pak vyvoláno manuální uložení snímku na SD kartu.

## 4.2 Modul alarmu

Díky použití shodného rozložení využívaných vývodů modulu alarmu s hlavním kamerovým modulem, je většina programu shodná. Při inicializaci LoRa modulu je pro příjem nastavena adresa zařízení `DEVICE_ADDRESS=1`.

Po úspěšné inicializaci modulu je v hlavní smyčce vyčkáváno na příjem příkazu skrze LoRa modul. Následně je dle typu přijatého příkazu vyvolán odpovídající alarm rozblíkáním signalizační diody `Info_LED` a v případě povolené zvukové signalizace rozeznáním bzučáku. Každá z variant akceptovatelných příkazů *Manually*, *CriTemp* a *Person* je signalizována svou unikátní sérií blikání/pípání. Jiné přijaté zprávy jsou ignorovány.



Obrázek 4.7: Diagram algoritmu alarmu

### ■ 4.2.1 Uživatelské rozhraní

Výsledek inicializace i průběh veškeré komunikace je průběžně vypisován po sériové lince do připojeného terminálu, opět s využitím ANSI Escape sekvencí. Dále je možné přepínačem SW1 zvolit tichý mód, kdy alarm signalizován pouze signalizační diodou InfoLED a bzučák není aktivován.

## Kapitola 5

### Testování

Nejprve byl testu podroben samotný termokamerový modul. Připraveno bylo testovací pracoviště s vyhřívanou podložkou obsahující různé materiály pro měření emisivity a ověřena byla akurátnost snímaných teplot v porovnání s referenční termokamerou. Dále byly testům podrobeny detekční vlastnosti modulu z hlediska detekce osob a detekování kritické teploty. Třetí série testů se zaměřuje bezdrátovou komunikaci modulu termokamery s alarmem. Ověřen je dosah ve volném prostoru a prostupnost signálu uvnitř budovy.

#### 5.1 Snímání teploty

Otestováno bylo snímání teploty v porovnání s termokamerou Fluke Ti25 [65]. Pomocí obou kamer byla nasnímána scéna tvořící šest materiálu vyhřátých příprvkem pro měření emisivity.



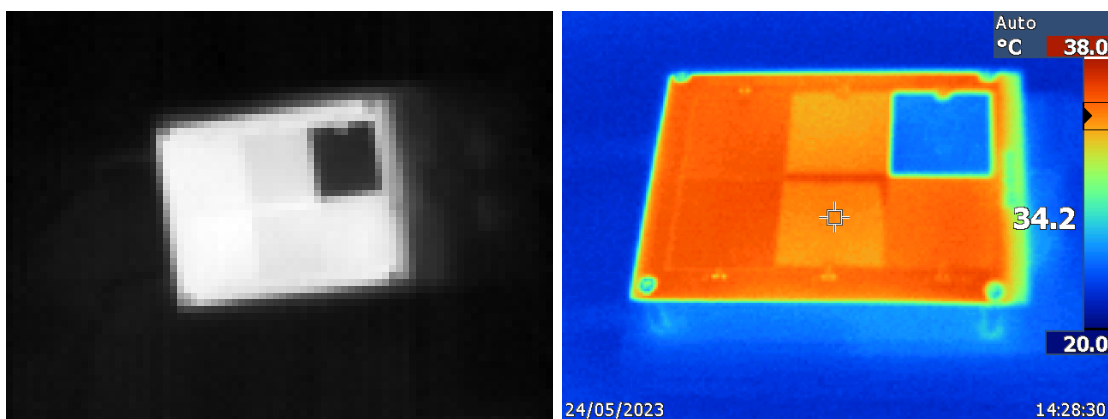
(a) : FLIR Lepton

(b) : Fluke Ti25

Obrázek 5.1: Snímání scény

Z pořízených snímků je na první pohled patrný rozdíl v lepším kontrastu zobrazení teplot povrchů. Příčinou rozdílu je patrně zvolená jednodušší barevná paleta, která nenabízí dostatečně detailní kontrast uložených dat. Citlivost snímače je díky škálování na 255 b hloubku barev značně komprimována a detaily se tak ztrácejí. Nutno však podotknout, že tento aspekt komprese se projevuje pouze u zobrazení snímku na displeji a jeho uložení

na SD kartu. Detekce osob v obraze, respektive zaznamenaných změn teploty je počítáno v plném rozsahu výstupních dat senzoru.



(a) : FLIR Lepton

(b) : Fluke Ti25

Obrázek 5.2: Pořízené snímky

Následně byla provedena korekce získaných dat ze senzoru Lepton, kdy jako reference byla zvolena data z kamery Fluke. Pro srovnání rozsahů výstupních dat byla zvolena průměrná teplota nejteplejší nejteplejšího ze snímaných vzorků - náplastí a obdobně nejchladnějšího vzorku - mědi. Vypočtené průměrné teploty srovnaných dat snímku uvádí následující tabulky 5.1, 5.2, 5.3.

35,61	34,45	24,85
35,92	35,08	35,55

35,23	33,43	24,85
35,92	34,26	35,23

-0,38	-1,02	0
0	-0,81	-0,32

Tabulka 5.1: Flir Lepton [°C]

Tabulka 5.2: Fluke Ti25 [°C]

Tabulka 5.3: Diference [°C]

Především z tabulky 5.3 je patrné, že po použití korekce se teploty ze senzoru FLIR Lepton příliš neliší od nominálních z termokamery FLuke Ti25.

## 5.2 Detekce

Pro otestování detekčních schopností jsou připraveny různé scénáře, které demonstrativně převedou daný problém.

### 5.2.1 Zaznamenaný pohyb

Test pro detekci pohybu, respektive detekci osoby ve střeženém prostoru proběhl inicializací modulu s prázdnou scénou. Tím by pořízen korektní referenční snímek pozadí. Následně do střeženého prostoru vnikl narušitel, kterého termokamerový modul ihned spolehlivě rozpoznal a aktivoval alarm. Tato skutečnost je z obrázku 5.4a jasně patrná.



(a) : Snímek pořízený termokamerou

(b) : Snímek pořízený fotoaparátem

**Obrázek 5.3:** Prázdný střežený prostor

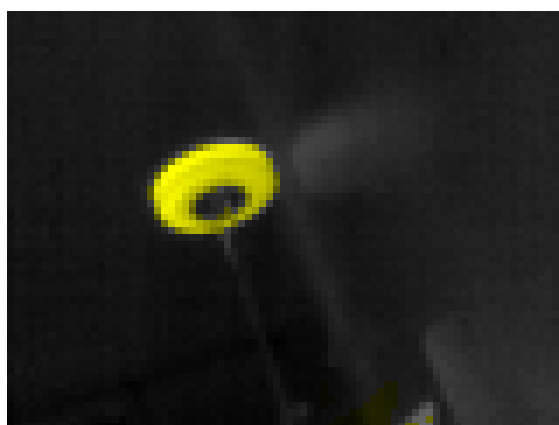
(a) : Snímek pořízený termokamerou

(b) : Snímek pořízený fotoaparátem

**Obrázek 5.4:** Narušitel ve střeženém prostoru

### ■ 5.2.2 Pomalé změny

Problém aplikovaného algoritmu detekce změn v obraze spočívá v jeho absolutním spoléháním na korektnost uloženého snímku pozadí scény. Pokud se teplota scény výrazně nemění, detekce funguje spolehlivě, nicméně problém z dlouhodobého hlediska nastává ignorováním pomalých teplotních změn ve scéně. Tedy například je-li referenční snímek pořízen během chladného rána, postupem dne dojde ke kompletnímu znehodnocení detekce vlivem postupného ohřívání scény. Obdobné pokud scéna zahrnuje například světlo, které je při pořízení reference zhasnuté, dojde postupně při rozsvícení k vyhodnocení změny teploty jakožto příčiny k vyvolání alarmu.

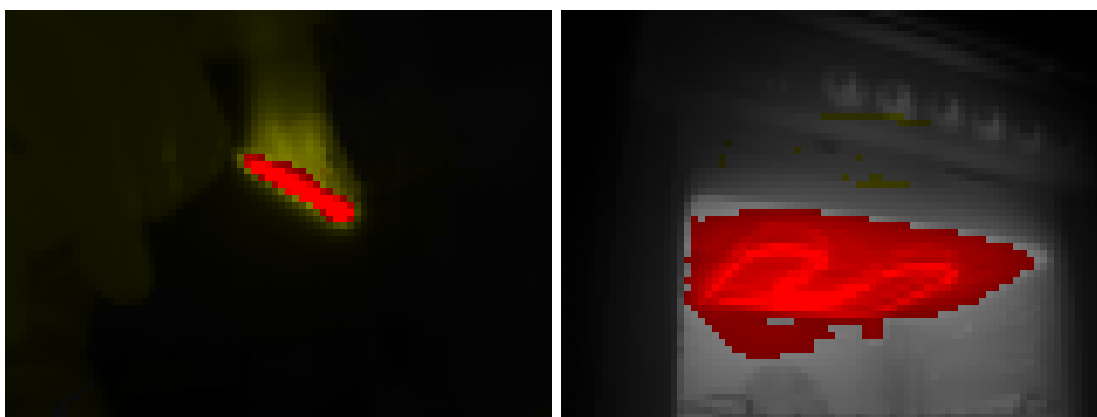


Obrázek 5.5: Detekce rozsvícené lampy

### ■ 5.2.3 Kritická teplota

Pro otestování detekce kritické teploty byla použita zapálená sirka a rozžhavená topná spirála trouby. V případě sirky, simulující scénář požáru ve střeženém prostoru, byla nejprve nasnímána prázdná scéna. Následně byla do scény vložena zapálená sirka. Z pořízeného snímku (obr. 5.6a) je názorně vidět jak detekce změny v obraze v oblasti plamene (žlutá část), která by již sama o sobě vyvolala alarm, tak rozžhavená část spalované sirky, která vyvolává alarm způsobený kritickou teplotou (červená část).

Druhým testem byl pohled do zapnuté otevřené trouby na rozžhavenou topnou spirálu. Na pořízeném snímku (obr. 5.6b) je zřetelně rozpoznatelná rozžhavená topná spirála vystupující svou teplotou  $180^{\circ}\text{C}$  z okolní detekované oblasti s teplotou okolo  $108^{\circ}\text{C}$ .



(a) : Zapálená sirka

(b) : Rozžhavená topná spirála trouby

Obrázek 5.6: Detekce kritické teploty

## ■ 5.3 LoRa

Dále bylo přistoupeno k základnímu otestování bezdrátové komunikace z hlediska dosahu volným prostorem ve městě a z hlediska dostupnosti komunikace v rámci budovy.



### 5.3.1 Dosah

Při testování dosahu rádiové komunikace pomocí LoRa modulů RYKR998 na frekvenci 868,5 MHz ve výchozím nastavení byl termokamerový modul umístěn nehybně na okraj Vyšehradských hradeb. Následně byl modul alarmu vzdalován do momentu kompletního výpadku komunikace. Test probíhal tak, že kamerový modul cyklicky odesílal příkaz vyvolání alarmu. Výpadek komunikace byl detekován v moment, kdy modul alarmu přestal reagovat na pravidelnou příchozí komunikaci. Kompletní výpadek nastal zhruba 1 km daleko u Divadla Na Fidlovačce.



(a) : Umístění vysílače - Vyšehrad

(b) : Ztráta komunikace - Divadlo Na Fidlovačce

Obrázek 5.7: Umístění modulů

Druhou fází testu byl návrat modulu přesunem v tramvaji. Modul poprvé zareagoval na rohu ulic Jaromírova a Sekaninova ve vzdálenosti přibližně 0,8 km.



Obrázek 5.8: Mapa dosahu [Snímek mapy získán z mapy.cz]

### 5.3.2 Prostupnost

Druhým testem bezdrátové komunikace byl zkouška propustnosti v době s železobetonovými stěnami. Nejprve byla změřena síla signálu RSSI a poměr signál - šum SNR s umístěním vysílače i přijímače ve stejné místnosti přibližně ve vzdálenosti přibližně 3 m. Následně byl vysílač ponechán v místnosti 5. nadzemního patra, přičemž přijímač byl postupně přesouván o patra níže až do finálního 1. podzemního patra. Po celou dobu

testu byla komunikace mezi oběma moduly bez větších výpadků. I ve finálním uspořádání byly změřeny parametry komunikace. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 5.4.



Obrázek 5.9: Umístění přijímače v 1. p.p.

Patro přijímače	RSSI [dBm]	SNR [-]
5. n.p.	-38	11
1. p.p.	-106	-8

Tabulka 5.4: Výsledky měření prostupnosti

## 5.4 Vyhodnocení

Série testů týkající se měření teploty, ověřila relevantnost detekčních schopností termokamerového modulu. Dále byl ověřen dosah s prostupností bezdrátové komunikace termokamerového modulu s modulem alarmu. Získané výsledky prokazují použitelnost systému pro zabezpečovací účely strážného prostoru. Nicméně testy současně poukázaly na slabá místa v návrhu, která by mohly být následujícím předmětem dalších prací.

### 5.4.1 Náměty na vylepšení

Z hlediska hardwarové stránky, co se týče návrhu plošného spoje, bude nutné reflektovat chybu v současném návrhu ohledně slotu na SD kartu. Dále pro eliminaci nutnosti přepínače, který zajistí odpojení baterie od systému při nabíjení, by bylo vhodné návrh plošného spoje doplnit například o mosfet, který zmíněný přepínač zastoupí a postará se o automatické odpojení baterie. Případně přidat standardní běžně pro napájení využívaný souosý konektor s obvodovým řešením umožňující nabíjet běžným 12 V, případně až 24 V napětím. Ohledně vybrané bezdrátové komunikace by mohlo být zajímavé využití LoRa WAN modulu pro dosažení většího dosahu. Vhodným výběrem z nabídky výrobce REYAX může být např. sofistikovanější model REYAX RYLR998, který podporuje LoRa WAN a současně též používá uvedené AT příkazy. Nejdůležitější otázkou ovšem může být zvolení silnějšího mikrokontroléru umožňující sofistikovanější metody rozpoznání předmětů v obraze, např. s využitím hloubkového řešení. Zajímavou volbou by mohl být například nově uvedený mikrokontrolér STM32N6 disponující akcelerátorem pro neuronové sítě [66].

Z hlediska softwaru je jednoznačně prostor na vylepšení v řešení vykreslení obsahu na displeji např. tak, aby vykreslování neblokovalo čtení snímku z termokamery a byla tak naplno využita snímkovací frekvence, kterou modul nabízí. Toho by mělo být možné docílit využitím DMA či více vláknového řešení programu. Dále by mohlo být v určitých situacích užitečné implantovat možnost volby jiné barevné palety pro dosažení vykreslení

kontrastnějších snímků. Případně celkově vylepšit a naplno využít potenciál displeje společně s připraveným joystickem pro komplexní uživatelské rozhraní bez nutnosti připojeného počítače. Přímo na displeji by mohly být zobrazeny mezní teploty či spotmeter. Aktuální řešení detekce změn v obraze by bylo vhodné vylepšit o progresivní kalibraci referenčního snímku pozadí pro eliminaci falešně pozitivní detekce, způsobené pozvolným ohříváním scény. V neposlední řadě by bylo příhodné implementovat komplexnější proces bezdrátové komunikace použitím např. handshaking metody pro zaručení vyvolání alarmu.



## Kapitola 6

### Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit kompaktní zařízení pro účely zabezpečovacího systému s využitím bezkontaktního snímání střeženého prostoru termokamerou FLIR Lepton 2.5. Pro dosažení toho cíle je nejprve provedena teoretická analýza, v rámci které jsou uvedeny metody zejména bezkontaktního měření teploty, přičemž je podrobeněji rozebrána problematika bolometru, který využívá pro snímání kamera FLIR Lepton 2.5. Dále je detailně prostudován zmíněný kamerový modul, zejména ze stránky podoby vyčítání naměřených dat přes rozhraní SPI a modelem používaným VoSPI protokolem. Následně jsou prostudovány varianty bezdrátových protokolů využívaných v sensorových sítích. Na základě poznatků je pro účely budovaného zabezpečovacího systému zvolen LoRa modul RYRL998 výrobce REYAX. Popsány jsou jeho vlastnosti a způsob komunikace přes rozhraní UART s využíváním AT příkazů.

V další kapitole je přistoupeno k výběru zbylých hardwarových komponent, které jsou nutné pro dosažení komplexního kompaktního řešení modulů zabezpečovacího systému. Jako mikrokontrolér je využita vývojová deska STM32 Nucleo-F411RE osazená jádrem AMR Cortex M4. Výhodou vývojové desky je integrovaný programátor a debugger ST-Link/V2-1, který usnadňuje vývoj. Další využitou výhodou této vývojové desky je pro STMicroelectronics standartně používaný Morpho konektor. Díky němu je možné přímo připojit desku X-NUCLEO-GFX01M1 rozšiřující sestavu o 2,2" SPI QVGA TFT LCD displej, který je využit pro vykreslení termokamerou pořízených snímků. Pro připojení samotného termokamerového snímače FLIR Lepton 2.5 je využita vývojová Lepton Breakout Board v2.0, který obstarává pro termokamerový snímač startovací sekvence, potřebné napěťové úrovně a který především disponuje standardním kolíkovým konektorem pro připojení k mikroprocesoru. Dále k systému přidána SD karta využívající pro komunikaci rozhraní SDIO a pro možnost ukládání snímku včetně informace o datu a čase pořízení jsou přidány hodiny reálného času včetně ošetření proti výpadku napájení připojením záložní knoflíkové baterie CR2032. Pro účely zvukového alarmu je dále modul vybaven aktivním piezo bzučákem. Aby byla možná snadná přenositelnost systému, je modul pro napájení vybaven Lithium-iontovým akumulátorem včetně ochranného a nabíjecího obvodu. Jelikož je nominální napětí Li-ion akumulátoru nižší, než vyžaduje napájecí pin Nucleo určený pro napájení z baterie, je mezi baterii a Nucleo přidán 5 V měnič napětí. Následně je pro pohodlné robustní zapojení všech komponent celého modulu vyroben plošný spoj, při jehož návrhu byl kladen důraz na kompaktnost a univerzálnost vzniklé rozšiřující desky. Nakonec je pro ochranu celého modulu vymodelována krabička, která je vyrobena pomocí 3D tisku.

V rámci řešení softwaru je při návrhu datové struktury kladen důraz na zpětnou přehlednost programového řešení. Obslužný program čte získané snímky z termokamery a po následné analýze dat, kde pro detekci pohybu zvolena metoda odečítání referenčního snímku pozadí, zobrazuje pořízené snímky na LCD displeji včetně zvýraznění bodů obrazů vyhovujících detekčním podmínkám. Ty jsou dvojího typu, první podmínkou jak již bylo zmíněno je detekce pohybu, druhou pak detekování kritické teploty, která v reálu odpovídá např. detekci požáru. V obou případech je při detekování vyvolán alarm, v rámci kterého je odeslána příslušná výstraha pomocí LoRa rozhraní do modulu alarmu, který na přijatý příkaz následně reaguje odpovídající signalizací. Termokamerový modul dále umožňuje uložení pořízeného snímku na SD kartu v bitmapovém formátu pmm. Dále je možné po sériové lince kontrolovat stav systému, případně nastavit datum a čas přes grafické rozhraní vykreslené v připojeném terminálu.

V závěru práce je v rámci série testů ověřena kvalita detekčních schopností co se týče rozpoznání pohybu vlivem změny teploty scény oproti referenci a reakce na naměřené kritické teploty. Dále byly ověřeny možnosti bezdrátové radiové komunikace skrze LoRa rozhraní z hlediska dosahu, který dosahoval přibližně 1 km a prostupnosti v rámci budovy. Získané výsledky ukázaly adekvátnost vytvořeného systému pro účely zabezpečovacího systému. Nicméně současně poukázaly na slabá místa vytvořeného řešení, jako zejména nedokonalé rozpoznávání relevantních změn od pomalu průběžně vznikající odchylek od retenčního snímku, čímž jsou způsobeny falešně pozitivní detekce pohybu. Popsaný problém by vyřešilo například aplikování progresivní korekce referenční scény. Kompletní podmínky pro vylepšení systému s náměty na zadání dalších prací jsou reflektovány ve vyhodnocení výsledků provedených testů.

## Bibliografie

- [1] Miloš Kmínek Karel Kadlec. *MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA*. 2005. URL: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>.
- [2] Martin Všetíčka Jaroslav Reichl. *Encyklopedie fyziky*. 2023. URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>.
- [3] Luděk Mareš. *Teplota a její měření*. 2006. URL: <https://vytapeni.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/3115-teplota-a-jeji-mereni>.
- [4] Jaroslav Hamrle. *Tepelné záření. Záření absolutně černého tělesa*. 2018. URL: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%5C%20zakon.pdf>.
- [5] Josef Štetina Milan Pavelek Eva Janotková. *Vizualizační a optické měřicí metody*. 2007. URL: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/>.
- [6] Magda Králová. *Pyroelektrický a piezoelektrický jev*. 2007. URL: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektrostatika/pyroelektricky-piezoelektricky-jev>.
- [7] Georgii Dudashvili. *Development of a Thermal imager with a Radiometric Module FLIR 500-0763-01 for the Purposes of Security Technology*. 2022. URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/103411>.
- [8] Jan Pech. *Mikrobolometrické obrazové snímače*. 2003. URL: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03015/index.html>.
- [9] Jana Pokorná Jan Sova. *Bezdotykové měření teplotních polí – senzory*. 2018. URL: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018\\_02\\_cam.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018_02_cam.php).
- [10] Teledyne FLIR LLC. *The World's Sixth Sense*. 2023. URL: <https://www.flir.com/about/about-flir/>.
- [11] Teledyne FLIR LLC. *Lepton*. 2023. URL: <https://www.flir.com/products/lepton/?model=500-0763-01&vertical=microcam&segment=oem>.
- [12] Inc FLIR Systems. *FLIR LEPTON® Engineering Datasheet*. 2018. URL: <https://www.flir.eu/products/lepton/?vertical=microcam&segment=oem>.
- [13] G. Percivall C. Reed M. Botts. “OGC® Sensor Web Enablement: Overview And High Level Architecture”. In: (2013). White Paper. URL: [www.opengis.net/doc/wp/swe-high-level-architecture](http://www.opengis.net/doc/wp/swe-high-level-architecture).
- [14] Andy Ambanloc. *What Communication Protocol to Use and When*. 2023. URL: <https://neuronetworks.com/blog/wireless-communication-protocols/>.

- [15] B. Garlík. *Elektrotechnika a inteligentní budovy*. 2014. URL: [www.tzb2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/skripta-etb-garlik.pdf](http://www.tzb2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/skripta-etb-garlik.pdf).
- [16] M. Šafránek Z. Kocur. *Bezdrátové systémy v přístupové síti*. 2008. URL: [www.access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008020002](http://www.access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008020002).
- [17] M. K. Pratt. *Top 12 most commonly used IoT protocols and standards*. 2022. URL: [www.techtarget.com/iotagenda/tip/Top-12-most-commonly-used-IoT-protocols-and-standards](http://www.techtarget.com/iotagenda/tip/Top-12-most-commonly-used-IoT-protocols-and-standards).
- [18] Silicon Laboratories. *Matter: A Unified Approach to IoT Device Development*. 2023. URL: [www.silabs.com/wireless/matter](http://www.silabs.com/wireless/matter).
- [19] IEEE SA Standart Association. *IEEE 802.15.1-2005*. 2005. URL: [www.techtarget.com/iotagenda/tip/Top-12-most-commonly-used-IoT-protocols-and-standards](http://www.techtarget.com/iotagenda/tip/Top-12-most-commonly-used-IoT-protocols-and-standards).
- [20] J. Horáček. *Indoor Bluetooth localisation*. 2023. URL: [www.dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/107309/F3-DP-2023-Horacek-Jakub-Indoor-Bluetooth-localisation.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](http://www.dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/107309/F3-DP-2023-Horacek-Jakub-Indoor-Bluetooth-localisation.pdf?sequence=-1&isAllowed=y).
- [21] Petr Novák. *BLE – Základní informace / komunikace*. 2020. URL: <https://cyber.felk.cvut.cz/novakpe/Information/Communication/BlueToothLE/10-BlueToothLE-Info.pdf>.
- [22] IEEE SA Standart Association. *IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. 2021. URL: [www.ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9363691](http://www.ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9363691).
- [23] Intel Corporation. *What Is Wi-Fi 6?* 2021. URL: [www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/wifi-6.html](http://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/wifi-6.html).
- [24] Connectivity Standards Alliance. *The Full-Stack Solution for All Smart Devices*. 2022. URL: [www.csa-iot.org/all-solutions/zigbee/](http://www.csa-iot.org/all-solutions/zigbee/).
- [25] John C. Bicket et al. “Architecture and Evaluation of the MIT Roofnet Mesh Network ( DRAFT )”. In: URL: <http://web.archive.org/web/20170829215347/http://pdos.csail.mit.edu/~rtm/roofnet-b.pdf>.
- [26] Connectivity Standards Alliance. *ZigBee Specification FAQ*. 2022. URL: [www.csa-iot.org/all-solutions/zigbee/zigbee-faq/](http://www.csa-iot.org/all-solutions/zigbee/zigbee-faq/).
- [27] Jiří Pech. *IOT TECHNOLOGIE: LORA A LORAWAN (3/5)*. 2019. URL: [www.eman.cz/blog/iot-technologie-lora-a-lorawan-3-5/](http://www.eman.cz/blog/iot-technologie-lora-a-lorawan-3-5/).
- [28] LoRa Alliance. *What is LoRaWAN® Specification*. 2023. URL: [www.lora-alliance.org/about-lorawan/](http://www.lora-alliance.org/about-lorawan/).
- [29] České Radiokomunikace. *Připojení k IoT síti LoRaWAN*. 2023. URL: [www.cra.cz/pripojeni-k-iot-siti-lorawan](http://www.cra.cz/pripojeni-k-iot-siti-lorawan).
- [30] LTD. REYAX TECHNOLOGY CO. *A World Leader in Providing IoT Solution*. 2023. URL: [www.reyax.com](http://www.reyax.com).
- [31] LTD. REYAX TECHNOLOGY CO. *LoRa*. 2023. URL: [www.reyax.com//lora.php?cat\\_m=4](http://www.reyax.com//lora.php?cat_m=4).



- [32] LTD. REYAX TECHNOLOGY CO. *RYLR998 Datasheet*. 2021. URL: [www.reyax.com/products/RYLR998](http://www.reyax.com/products/RYLR998).
- [33] LTD. REYAX TECHNOLOGY CO. *LoRa® AT command guide*. 2021. URL: [www.reyax.com/products/RYLR998](http://www.reyax.com/products/RYLR998).
- [34] Český telekomunikační úřad. *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/07.2021-8: k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu*. 2021. URL: [www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/vo-r10-072021-8.pdf](http://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/vo-r10-072021-8.pdf).
- [35] STMicroelectronics. *STM32F411xC/E advanced Arm®-based 32-bit MCUs, RM0383, Reference manual*. 2018. URL: [www.st.com/resource/en/reference\\_manual/rm0383-stm32f411xce-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](http://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0383-stm32f411xce-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf).
- [36] STMicroelectronics. *NUCLEO-F411RE*. 2023. URL: [www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f411re.html](http://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f411re.html).
- [37] STMicroelectronics. *ST-LINK/V2, ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32*. 2023. URL: [www.st.com/en/development-tools/st-link-v2.html](http://www.st.com/en/development-tools/st-link-v2.html).
- [38] STMicroelectronics. *STM32CubeMX*. 2023. URL: [www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html](http://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html).
- [39] STMicroelectronics. *Description of STM32F4 HAL and low-layer drivers, UM1725, User manual*. 2023. URL: [www.st.com/resource/en/user\\_manual/um1725-description-of-stm32f4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf](http://www.st.com/resource/en/user_manual/um1725-description-of-stm32f4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf).
- [40] Inc. FLIR Systems. *LEPTON camera Breakout Board V2.0 Datasheet*. 2021. URL: [www.flir.eu/products/lepton-breakout-board-v2.0](http://www.flir.eu/products/lepton-breakout-board-v2.0).
- [41] STMicroelectronics. *SPI display expansion boards for STM32 Nucleo-64, Data brief*. 2021. URL: [www.st.com/en/evaluation-tools/x-nucleo-gfx01m1.html?rt=db&id=DB4236#documentation](http://www.st.com/en/evaluation-tools/x-nucleo-gfx01m1.html?rt=db&id=DB4236#documentation).
- [42] STMicroelectronics. *SPI display expansion boards for STM32 Nucleo-64, User manual*. 2022. URL: [www.st.com/en/evaluation-tools/x-nucleo-gfx01m1.html?rt=db&id=DB4236#documentation](http://www.st.com/en/evaluation-tools/x-nucleo-gfx01m1.html?rt=db&id=DB4236#documentation).
- [43] JEDEC. *About e.MMC*. 2023. URL: [www.jedec.org/standards-documents/technology-focus-areas/flash-memory-ssds-ufs-emmc/e-mmc](http://www.jedec.org/standards-documents/technology-focus-areas/flash-memory-ssds-ufs-emmc/e-mmc).
- [44] ElectronicCircuitsDesign.com. *SD MicroSD Card pinout*. 2020. URL: <http://www.electroniccircuitsdesign.com/pinout/sd-microsd-card-pinout.html>.
- [45] ECS Inc. *STM32 MCU SERIES LSE 32,768 KHZ CRYSTAL SELECTION TOOL*. 2023. URL: [www.csxtal.com/stm32-mcu-series-lse-32-768khz-crystal-selection-tool/](http://www.csxtal.com/stm32-mcu-series-lse-32-768khz-crystal-selection-tool/).
- [46] STMicroelectronics. *UM1724, User manual, STM32 Nucleo-64 boards (MB1136)*. 2020. URL: [www.st.com/resource/en/user\\_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf](http://www.st.com/resource/en/user_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf).

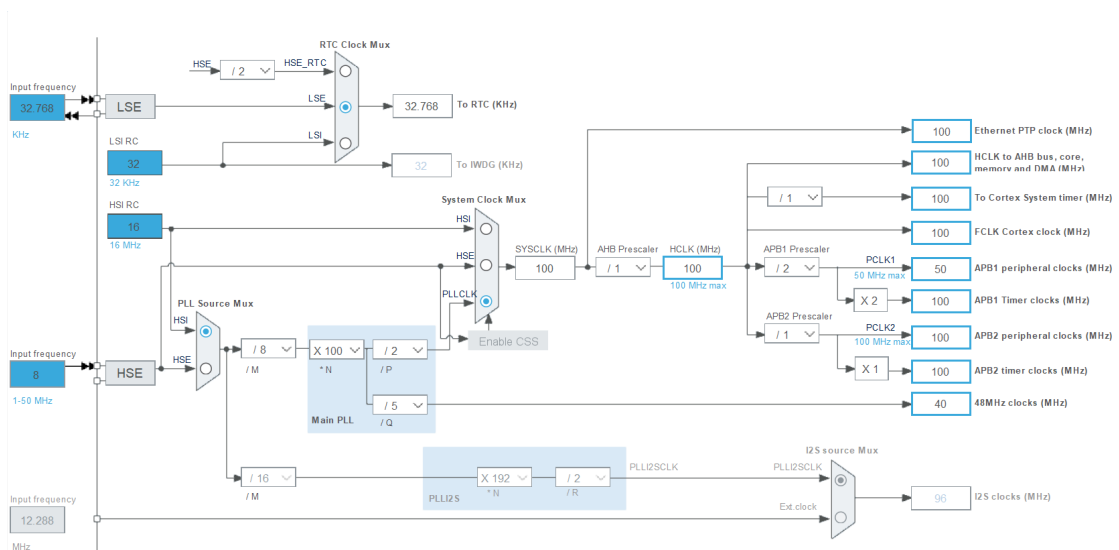
- [47] WESTINGHOUSE. *Lithium Button Cell CR2032-L, Specification Approval Sheet*. 2016. URL: [www.img.gme.cz/files/eshop\\_data/eshop\\_data/4/542-099/dsh.542-099.1.pdf](http://www.img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/4/542-099/dsh.542-099.1.pdf).
- [48] NetDirect. *WESTINGHOUSE CR2032-pins knoflíková baterie*. 2023. URL: <https://www.gme.cz/v/1506667/westinghouse-cr2032-pins-knoflikova-baterie>.
- [49] DIYIOT. *Active and Passive Buzzer for Arduino, ESP8266 and ESP32*. 2021. URL: [www.diyIoT.com/active-passive-buzzer-arduino-esp8266-esp32/](http://www.diyIoT.com/active-passive-buzzer-arduino-esp8266-esp32/).
- [50] Bruce Feng. *What Are The Main Characteristics of Lithium-Ion Batteries?* 2023. URL: [www.linkedin.com/pulse/what-main-characteristics-lithium-ion-batteries-bruce-feng/](http://www.linkedin.com/pulse/what-main-characteristics-lithium-ion-batteries-bruce-feng/).
- [51] Yuqing Chen et al. “A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards”. In: *Journal of Energy Chemistry* 59 (2021), s. 83–99. ISSN: 2095-4956. DOI: [ww.doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017](https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017). URL: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495620307075](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495620307075).
- [52] Fortune Semicon. *One Cell Lithium-ion/Polymer Battery Protection IC, DW01x, Datasheet*. 2014. URL: [www.datasheet.lcsc.com/lcsc/1810081612\\_Fortune-Semicon-DW01C-G\\_C35306.pdf](http://www.datasheet.lcsc.com/lcsc/1810081612_Fortune-Semicon-DW01C-G_C35306.pdf).
- [53] Microchip Technology. *MCP73831/2, Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion, Li-Polymer Charge Management Controllers*. 2014. URL: [www.datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437\\_Microchip-Tech-MCP73831T-2ACI-OT\\_C424093.pdf](http://www.datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437_Microchip-Tech-MCP73831T-2ACI-OT_C424093.pdf).
- [54] VELO Fiala. *Metody nabíjení baterií*. 2023. URL: [www.velofiala.cz/n/metody-nabijeni-baterii](http://www.velofiala.cz/n/metody-nabijeni-baterii).
- [55] Nanjing Micro One Electronics. *DC/DC Step up Converter ME2108 Series*. URL: [www.datasheet.lcsc.com/lcsc/1811061121\\_MICRONE-Nanjing-Micro-One-Elec-ME2108A33PG\\_C236803.pdf](http://www.datasheet.lcsc.com/lcsc/1811061121_MICRONE-Nanjing-Micro-One-Elec-ME2108A33PG_C236803.pdf).
- [56] EasyEDA. *An Easier and Powerful Online PCB Design Tool*. 2022. URL: [www.easyeda.com/#](http://www.easyeda.com/#).
- [57] STMicroelectronics. *Integrated Development Environment for STM32*. 2023. URL: [www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html](http://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html).
- [58] STMicroelectronics. *Display module software expansion for STM32Cube*. 2023. URL: [www.st.com/en/embedded-software/x-cube-display.html](http://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-display.html).
- [59] ChaN. *FatFs - Generic FAT Filesystem Module*. 2013. URL: [http://elm-chan.org/fsw/ff/00index\\_e.html](http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html).
- [60] STMicroelectronics. *AN3371, Application note, Using the hardware real-time clock (RTC) in STM32 F0, F2, F3, F4 and L1 series of MCUs*. 2012. URL: [www.st.com/resource/en/application\\_note/an3371-using-the-hardware-realtime-clock-rtc-in-stm32-f0-f2-f3-f4-and-l1-series-of-mcus-stmicroelectronics.pdf](http://www.st.com/resource/en/application_note/an3371-using-the-hardware-realtime-clock-rtc-in-stm32-f0-f2-f3-f4-and-l1-series-of-mcus-stmicroelectronics.pdf).
- [61] STMicroelectronics. *STM32Cube BSP drivers development guidelines, UM2298, User manual*. 2019. URL: [www.st.com/resource/en/user\\_manual/um2298-stm32cube-bsp-drivers-development-guidelines-stmicroelectronics.pdf](http://www.st.com/resource/en/user_manual/um2298-stm32cube-bsp-drivers-development-guidelines-stmicroelectronics.pdf).

- [62] STMicroelectronics. *Developing applications on STM32Cube™ with FatFs, UM1721, User manual*. 2019. URL: [www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00105259-developing-applications-on-stm32cube-with-fatfs-stmicroelectronics.pdf#page=1](http://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00105259-developing-applications-on-stm32cube-with-fatfs-stmicroelectronics.pdf#page=1).
- [63] Paul Bourke. *PPM / PGM / PBM image files*. 1997. URL: <http://paulbourke.net/dataformats/ppm/>.
- [64] Christian Petersen. *ANSI Escape Sequences*. 2023. URL: <https://gist.github.com/fnky/458719343aabd01cfb17a3a4f7296797>.
- [65] Fluke Corporation. *Ti9, Ti10, Ti25, TiRx, TiR and TiR1 Thermal Imagers, Users Manual*. 2007. URL: [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/ti10\\_\\_\\_umeng0200.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/ti10___umeng0200.pdf).
- [66] ST life.augmented Blog. *STM32N6: Get a sneak peek at the future of AI-powered MCUs*. 2023. URL: <https://blog.st.com/stm32n6/>.



# Příloha A

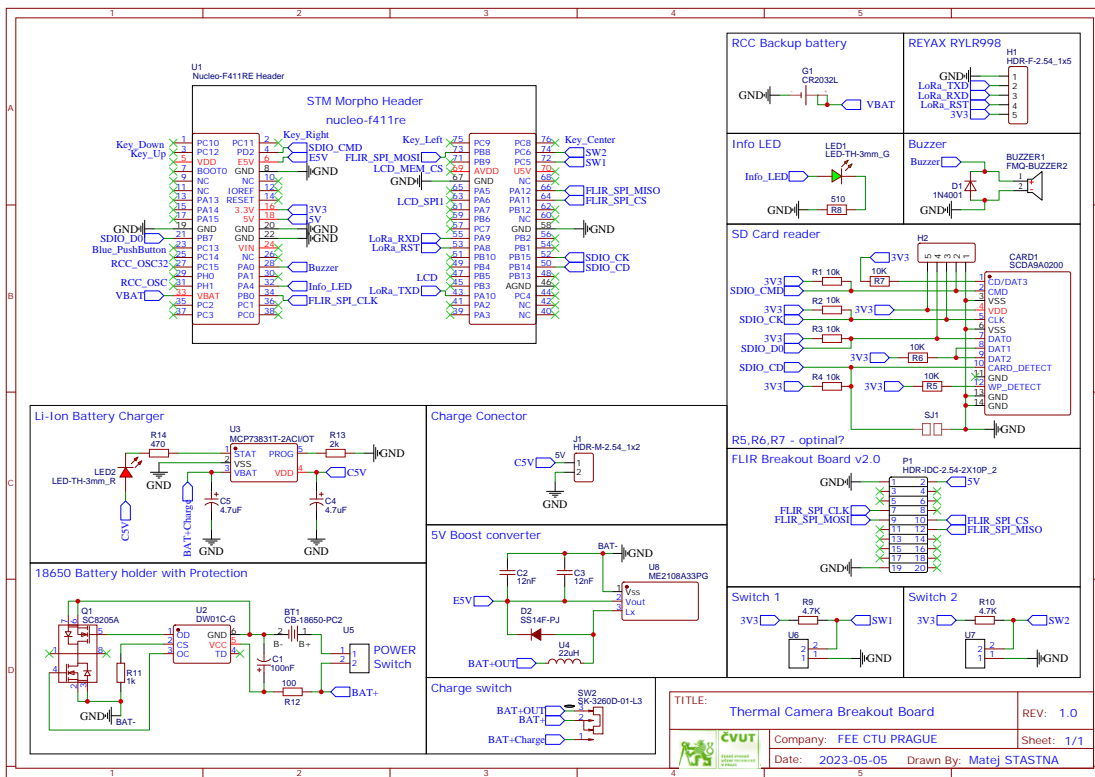
## Kompletní konfigurace hodin



Obrazek A.1: Konfigurace hodinových signálů

# Příloha B

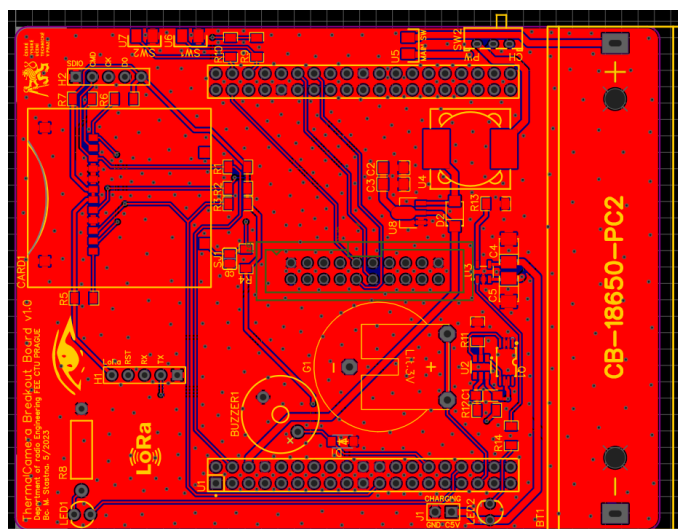
## Schéma plošného spoje



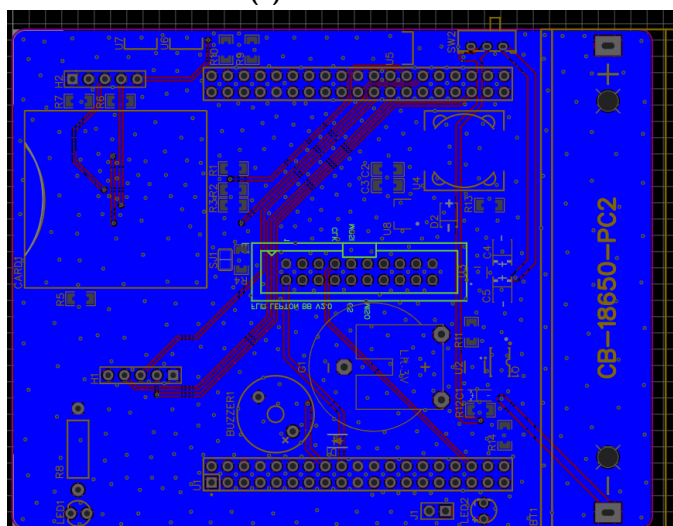
Obrázek B.1: ThermalCamera Breakout Board v1.0

## Příloha C

### Návrh plošného spoje



(a) : Čelní strana

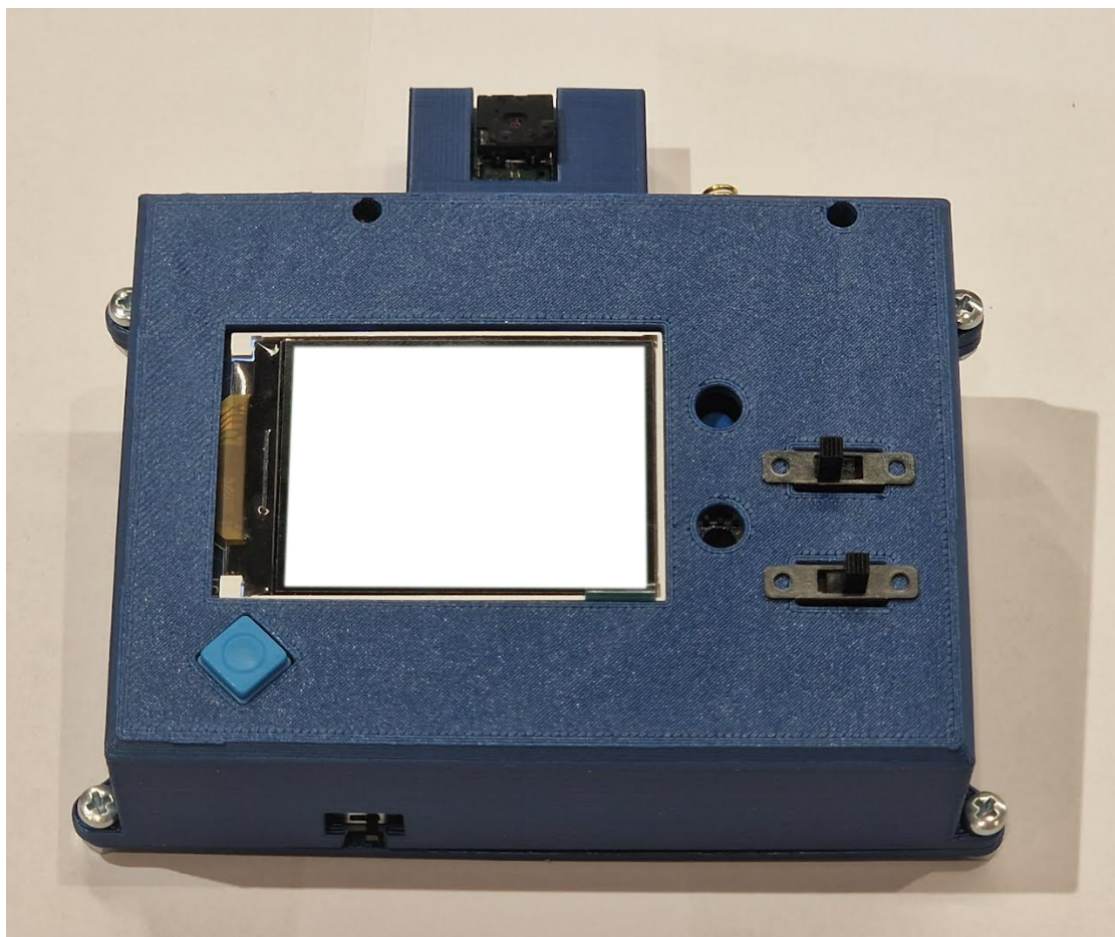


(b) : Zadní strana

Obrázek C.1: Návrh plošného spoje

## Příloha D

### Výsledná podoba vytištěné krabičky pro termokamerový modul



Obrázek D.1: Krabička z 3D tiskárny