

Detektor pohybu s IR maticovým snímačem s bezdrátovou technologií IQRF

Motion detector with IR matrix sensor using IQRF
Technology

Jakub Filipec

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Velička

Ostrava, 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá implementací algoritmu pro detekci a klasifikaci pohybu. Cílem bylo realizovat samotné vyhodnocování na úrovni mikrokontroléru a kompletní řešení implementovat do internetu věcí pomocí bezdrátové technologie IQRF. Práce se tedy mimo výběr vhodných metod digitálního zpracování obrazu a návrhu samotných algoritmů, zabývá také návrhem a realizací IQRF komunikačního modulu pro již existující hardware, a tedy rozšíření jeho modularity o technologii, již neposkytuje výrobce. V rámci práce vznikl také požadavek pro snadnou a rychlou vizualizaci dat posílaných z maticového infračerveného snímače, jenž byl vyřešen realizovanou počítačovou aplikací. Samotný výsledek práce byl otestován a navrhnutá možná reálná použití včetně ukázky možnosti vizualizace a naprogramované aplikace ve vývojovém prostředí Node-RED.

Klíčová slova: IQRF, maticový snímač, detekce pohybu, infračervené záření, internet věcí, vestavěné systémy, digitální zpracování obrazu, Node-RED, AMG8833, Hardwario

Abstract

This bachelor thesis deals with the implementation of an algorithm for motion detection and its classification. The aim was to realise the evaluation on microcontroller unit itself and to implement the complete solution into the Internet of Things using IQRF wireless technology. Thus, in addition to selecting suitable methods of digital image processing and design of algorithms themselves, this work also deals with the design and implementation of IQRF communication module for already existing hardware, and thus the extension of its modularity by technology not provided by the manufacturer. This work also created a requirement for easy and fast visualization of data sending from a matrix infrared sensor, which was solved by a developed desktop application. The results of the work itself were tested and possible real use cases were suggested, including example of possible visualization and created application with development tool Node-RED.

Keywords: IQRF, matrix sensor, motion detection, infrared radiation, Internet of Things, embedded systems, digital image processing, Node-RED, AMG8833, Hardwario

Rád bych poděkoval Ing. Janovi Veličkovi za cenné rady, odborné vedení a vstřícnost při konzultacích a vypracování této bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	6
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	10
1 Úvod	11
2 Teoretický rozbor	12
2.1 Možnosti detekce pohybu	12
2.1.1 PIR - Pasivní infračervený detektor	12
2.1.2 Mikrovlnný detektor	12
2.1.3 Ultrazvukové detektory	13
2.1.4 Duální detektory	13
2.1.5 Obrazová detekce	13
2.1.6 Termovizní systémy	13
2.2 Základní metody zpracování obrazu	15
2.2.1 Konvoluce	15
2.2.2 Rozdílová metoda	16
2.2.3 Prahování	16
2.3 IQRF technologie	17
2.3.1 IQRF OS	17
2.3.2 DPA	18
2.3.3 Komunikace skrze DPA	18
2.3.4 IQMESH	19
2.3.5 TR moduly	19
3 Návrh měřicího systému	21
3.1 IoT stavebnice HARDWARIO	21
3.1.1 Core modul	21
3.1.2 Battery modul	22
3.1.3 Infra grid modul	22
3.2 Maticový snímač AMG8833	23
3.3 IQRF modul	25
3.4 Komunikační brána	25
3.4.1 GW Daemon	25
3.4.2 MQTT broker	25
3.4.3 Node-RED	26

4	Analýza výstupu senzoru	27
4.1	Program pro analýzu dat	27
4.2	Program pro posílání dat	28
4.3	Analýza dat a ověření parametrů	29
5	Realizace IQRF modulu	31
5.1	Modul TR-76D	31
5.2	Komunikace s řídicím MCU	32
5.3	Paměť FRAM	32
5.4	Obvod pro párování a probouzení	33
5.5	Resetovací obvod	34
5.6	Programovací rozhraní	34
5.7	Realizovaný modul	35
6	Návrh algoritmů	38
6.1	Funkce detektoru	38
6.2	Porovnání a volba metod	39
6.3	Zvolená metoda pro detekci pohybu a klasifikaci	41
6.4	IQRF modul	44
7	Kompletace a vizualizace	46
7.1	Hardware	46
7.2	Zpracování dat	47
7.3	Vizualizace	49
	7.3.1 Testovací rozhraní	49
	7.3.2 Ukázková aplikace	49
8	Zhodnocení výsledků	51
9	Závěr	53
	Literatura	54
	Seznam příloh	54

Seznam použitých zkratek a symbolů

λ	– Vlnová délka (jednotka: m)
CCTV	– Closed Circuit Television (uzavřený televizní okruh - kamerový systém)
d	– Délka (jednotka: m)
DNP	– Do not populate (neosazovat)
DPA	– Direct Peripheral Access
DPS	– Deska plošných spojů
EAGLE	– Easily Applicable Graphical Layout Editor (CAD pro návrh DPS)
f	– Frekvence (jednotka: Hz)
FRAM	– Ferroelectric Random-Access Memory (feroelektrická RAM)
HW	– Hardware (fyzické vybavení)
I ² C	– Inter-Integrated Circuit (sběrnice pro komunikaci na DPS)
IBM	– International Business Machines Corporation
IO	– Input/Output (vstup/výstup)
IoT	– Internet of Things (internet věcí)
IQRF	– Intelligent Radio Frequency (patentovaný název)
IR	– Infrared (infračervené záření)
LCD	– Liquid Crystal Display (displej s tekutými krystaly)
LDO	– Low-Dropout (s malým úbytkem napětí)
LED	– Light Emitting Diode (světlo emitující dioda)
M2M	– Machine-to-Machine (komunikace mezi zařízeními)
MCU	– Microcontroller Unit (mikrokontrolér)
MQ	– Message queue (komunikační protokol)
MQTT	– Message Queuing Telemetry Transport (komunikační protokol)
MW	– Microwave (mikrovlnný)
OS	– Operating System (operační systém)
PIR	– Passive infrared (pasivní infračervený)
RAM	– Random-Access Memory (paměť s náhodným přístupem)
SDK	– Software development kit
SMT	– Surface-Mount technology
SPI	– Serial Peripheral Interface
SW	– Software (programové vybavení)
T	– Teplota (jednotka: °C)
TR modul	– Transceiver modul (modul vysílač/přijímač)
U	– Napětí (jednotka: V)

- UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Univerzální asynchronní přijímač/vysílač - komunikační rozhraní)
- UDP – User Datagram Protocol (komunikační protokol)
- USB – Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)

Seznam obrázků

1	Porovnání kamery a termovize [2]	14
2	Vizualizace operace konvoluce [3]	15
3	Technika prahování [5]	16
4	Struktura IQRF OS [6]	17
5	Příklad DPA požadavku	18
6	Mesh topologie [8]	19
7	Značení TR modulů [9]	19
8	Blokové schéma návrhu systému	21
9	Core modul stavby HWARIO [10]	22
10	Mini battery modul [10]	22
11	IR grid modul [10]	23
12	Značení série AMG88xx [11]	23
13	Katalogové parametry snímače AMG8833	23
14	Zapojení snímače na IR grid modulu [12]	24
15	Raspberry Pi s KON-RASP-01 a TR-72	25
16	Diagram uspořádání prvků v MQTT [13]	26
17	Ukázka programování v Node-RED	26
18	Vytvořený program	27
19	Ukázka čtení dat z maticového snímače	28
20	Vývojový diagram programu pro posílání dat pro analýzu	29
21	Snímky bez kalibrace	29
22	Snímky po kalibraci	30
23	Modul TR-76D [14]	31
24	I ² C multimaster	32
25	Blokový diagram vnitřní struktury FM24CL16 [16]	33
26	Obvod pro bonding	33
27	Obvod pro reset	34
28	Osazený IQRF modul	35
29	Blokové schéma realizovaného IQRF modulu	36
30	Diagram rozložení pinů a zapojení IQRF modulu	37
31	Stavový diagram	38
32	Diagram algoritmu subtrakce pozadí [4]	40
33	Vizualizace průběhu algoritmu pro detekci pohybu	41
34	Příklady vlivu prahové hodnoty na prahování	42
35	Vizualizace výpočtu středu	43
36	Vývojový diagram pro hlavní program	44
37	Vizualizace provedení asynchronní komunikace	44

38	Vývojový diagram pro obsluhu IQRF	45
39	3D model krabičky	46
40	Fotografie detektory ve vytisknuté krabičce	47
41	Program Node-RED pro příjem dat	47
42	Vizualizace pro testování detektoru pohybu	49
43	Ukázková aplikace v Node-RED	50
44	Konečný výrobek	51
45	Návrh umístění detektoru v reálné aplikaci - půdorys	52

Seznam tabulek

1	Rozdíly mezi technologiemi	12
2	Spotřeba provozních režimů	20
3	Zjednodušená přehledová tabulka registrů snímače	24
4	Nastavení komunikace	28
5	Použité a doporučené zjištěné rozsahy pro konstanty	43
6	Ukázka přijatého a zpracovaného asynchronního paketu	48
7	Informace o pohybu	48

1 Úvod

Cílem této práce je realizace detektoru pohybu na bázi maticového infračerveného snímače a jeho následná integrace do systému IoT pomocí bezdrátové technologie IQRF. Podobné aplikace založené na tomto principu zpravidla využívají jednodeskového počítače s operačním systémem, na němž běží image processing, většinou tedy s využitím knihovny OpenCV. Jednou z hlavních myšlenek a výzev tedy bylo využití mikrokontroléru a maticového snímače s nízkým rozlišením.

Samotná práce lze označit za multioborovou. To především z důvodu pokrytí vícero témat z pohledu teoretické části jako přehled prvků zabezpečovací techniky, náhledu do hlavních uvažovaných metod digitálního zpracování obrazu a shrnutí technologie IQRF. Teoretická práce se poté zabývá několika oblastmi od návrhu celého systému, volby HW, návrhu vlastního HW, analýzy dat maticového snímače, návrhů algoritmů, realizace a testování.

V oblasti návrhu měřicího systému byl vybrán již existující HW a navrhuto jeho rozšíření pro splnění vytyčeného cíle a návrh komunikační brány a její programové části. Podstatnou částí této kapitoly je také přehled a rozbor použitého maticového infračerveného snímače AMG8833.

V kapitole analýza výstupu senzoru jsou rozebrána výstupní data ze zvoleného maticového snímače. Zároveň jsou v této kapitole popsány postupy a řešení použité pro získání těchto dat.

V následující kapitole je probrán návrh a realizace IQRF modulu, který tvoří podstatnou část této práce z pohledu své důležitosti a přínosů. Jsou zde popsány jednotlivé obvody sloužící pro funkci TR modulu a umožňující jeho funkci jako celek v kombinaci se zbytkem jednotky detektoru pohybu. Následně je popsán IQRF modul jako celek a jeho použití.

Pro zpracování dat získaných z maticového snímače je třeba tyto data zpracovat pomocí navržených algoritmů. Jsou popsány vlastnosti vybraných metod zpracování digitálního obrazu a popis navrženého vyhodnocovacího algoritmu a samotné funkce detektoru pohybu. V jedné z posledních kapitol je popsáno zpracování dat na komunikační bráně a následná vizualizace pomocí nástroje Node-RED. V prostředí Node-RED byla také realizována ukázková aplikace pro možné využití realizovaného detektoru pohybu. Na toto navazuje samotné zhodnocení výsledků, kde jsou i přes jistá omezení realizovaného řešení navrhuta možná použití a uvedeny možnosti dalších zlepšení.

2 Teoretický rozbor

2.1 Možnosti detekce pohybu

K detekci člověka v prostoru a jeho pohybu, slouží prostorové detektory, které lze dále dělit na hraniční a objemové. Vzhledem k zaměření této práce jsou níže rozebrány právě detektory objemové. Objemové detektory detekují pohyb osob, přičemž jimi zabírány prostor je 3D útvar. V praxi jsou nejčastější infračervené detektory (PIR), mikrovlnné detektory (MW) a duální detektory (PIR-MW). Zároveň v dnešní době dochází k rozšíření kamerových systémů o algoritmy pro rozpoznávání pohybu. [1]

2.1.1 PIR - Pasivní infračervený detektor

Infračervená čidla jsou nejčastěji používanými senzory v prostorové ochraně. Fungují na základě tepla vyzařovaného z osob, což umožňuje jejich instalaci v případech, kde se oblasti jejich záběrů vzájemně kryjí. Pasivní infračervené detektory detekují osoby na základě jejich tepelného záření. Pomocí Wienova posunovacího zákona, lze zjistit, že pro objekty o teplotě lidského těla platí, že nejintenzivněji vyzařují na vlnové délce kolem 10 μm . Podle toho se také volí vhodný filtr kolem této hodnoty. [1]

Ačkoliv jsou PIR detektory na první pohled svým principem podobné právě maticovým infračerveným snímačům, tak mezi těmito technologiemi je velký rozdíl. PIR detektor dokáže detekovat samotný pohyb, zatímco maticový snímač dokáže kontinuálně zpracovávat infračervené záření z okolí. Z toho vyplývají velké rozdíly, právě v možnosti získávání informací z těchto druhů senzorů. Tyto rozdíly v možnosti získaných informací, lze vidět v tabulce 1.

Tabulka 1: Rozdíly mezi technologiemi

Informace \ Typ	Pohybující objekt	Statický objekt	Směr pohybu	Měření teploty	Infračervený snímek
Pyroelektrický	✓	✗	✗	✗	✗
Thermopile (jeden bod)	✓	✗	✗	✓	✗
Maticový (Grid-EYE)	✓	✓	✓	✓	✓

2.1.2 Mikrovlnný detektor

Jedná se o reflexní detektory, využívající Dopplerova jevu (stejně jako ultrazvukové) v mikrovlnném pásmu (300 MHz až 300 GHz), nejčastěji s frekvencí 2,5 GHz, 10 GHz nebo 24 GHz. Dopplerův jev spočívá v tom, že pokud se zdroj vlnění a pozorovatel navzájem pohybují, tak kmitočet f vlnění, které je generováno zdrojem, je odlišný oproti kmitočtu F , který u tohoto vlnění změří pozorovatel. [1]

2.1.3 Ultrazvukové detektory

Tyto využívají zvukových vln na frekvencích vyšších, než jsou lidé schopni slyšet, obvykle v rozsahu 30 kHz až 10 MHz. Detektory zahrnují dvojici zařízení, jedno je vysílač a druhé je přijímač. Na dané frekvenci je vyslán zvukový impuls, který se odrazí od předmětů v jeho dráze a je odražen a zachycen přijímačem. V prázdné místnosti budou odrazy vycházet z opačné stěny a čas potřebný k přijetí odrazu bude úměrný vzdálenosti mezi snímačem a stěnou. Když člověk vstoupí do místnosti, pak se od něj budou odrážet pulzy, a protože jsou blíže než zeď, doba potřebná k přijetí odrazů bude kratší. [1]

2.1.4 Duální detektory

Jedná se o některou z kombinací předchozích typů detektorů. Duální detektory tedy kombinují jejich přednosti a eliminují jejich slabiny a nejistoty detekce. Jako příklad je kombinace PIR a mikrovlnného detektoru. Velkou výhodou PIR detektorů je vysoká citlivost pro tangenciální pohyb (osoba se pohybuje kolmo k detektoru, jakoby po kružnici kolem detektoru). Naopak se vyznačují nižší citlivostí pro radiální pohyb (k nebo od detektoru). Toto je v případě duálních detektorů kompenzováno právě kombinací s mikrovlnným detektorem, jež má citlivost pro detekci osob při tangenciálním a radiálním pohybu právě obráceně. Při této kombinaci je buďto možnost součtové logiky (logický OR), kdy detektor hlásí poplach, kdykoliv jej vyhlásí alespoň jeden dílčí detektor nebo logiky součinnové (logický AND), jež spočívá v eliminaci nejistoty a musí v takovém případě vyhlásit poplach oba dílčí detektory. [1]

2.1.5 Obrazová detekce

V dnešní době je široce rozšířená detekce a klasifikace pomocí metod počítačového vidění. Abychom mohli dění ve sledovaném prostoru vyhodnocovat, musíme záření ve viditelné oblasti zpracovat pomocí kamerových snímačů. Metody počítačového vidění lze zprovoznit na většině kvalitnějších, již provozovaných kamerových dohledových systémech, avšak jejich nasazení dnes stále převládá pouze ve formě prostých kamer s obsluhou.

2.1.6 Termovizní systémy

Termovizní kamery bezproblémově spolupracují s analýzou videa. Jednou z výhod termovizních kamer je, že vždy vytvářejí vysoce kontrastní obraz. Nejen v noci. Také v obtížných světelných podmínkách, kde CCTV kamery neposkytují téměř žádný kontrast. Termovizní kamery generují méně nežádoucích alarmů než CCTV kamery. Díky tomu je termální zobrazování perfektní pro spolupráci s analýzou videa.



Normal vision

Thermal vision

Obrázek 1: Porovnání kamery a termovize [2]

Infračervené záření leží mezi viditelnou a mikrovlnnou částí elektromagnetického spektra. Primárním zdrojem infračerveného záření je teplo nebo tepelné záření. Jakýkoli objekt, který má teplotu nad absolutní nulou ($-273,15^{\circ}\text{C}$), vyzařuje záření v infračervené oblasti.

Infračervená energie vycházející z objektu je zaměřena optikou na infračervený detektor. Detektor odesílá informace do elektroniky senzoru pro zpracování obrazu. Elektronika překládá data přicházející z detektoru do obrazu, který lze zobrazit v hledáčku nebo na LCD obrazovce. [2]

2.2 Základní metody zpracování obrazu

Pro vypracování této práce je nutné pochopit základy digitálního zpracování obrazu a některé jeho metody. V této kapitole jsou dále rozebrány nejčastěji používané metody digitálního zpracování obrazu, jež byly zároveň zváženy k použití v této práci.

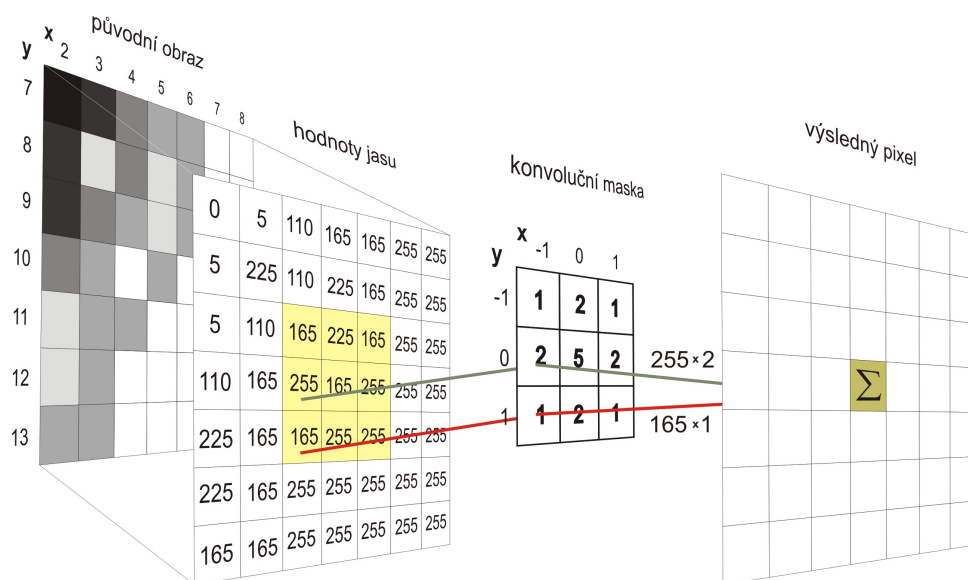
Při těchto základních metodách se člověk také často setká s pojmem segmentace obrazu. Jedná se o rozdělení obrazu na plochy se stejnými nebo podobnými vlastnostmi. Segmentací se obraz rozdělí do definovaných oblastí, často rozděleny právě do dvou kategorií a to popředí a pozadí. Princip segmentace lze pochopit níže na prahování.

2.2.1 Konvoluce

Konvoluce je matematický nástroj používaný při úpravách velkého záběru signálů. Konvoluční filtry jsou aplikovány na zvukové přenosy nebo nahrávky za účelem odstranění šumu, na fotografie a v mnoha dalších oblastech. V případě digitálního zpracování obrazu se pracuje s diskretní 2D konvolucí a používají se běžně různé konvoluční masky pro jednotlivé typy operací jako rozostření, zaostření nebo rozmazání. [3]

Základní matematický popis diskretní 2D konvoluce je následující:

$$f(x, y) * h(x, y) = \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k f(x-i, y-j) \cdot h(i, j) \quad (1)$$



Obrázek 2: Vizualizace operace konvoluce [3]

2.2.2 Rozdílová metoda

Rozdílová metoda je technika, při které počítač kontroluje rozdíl mezi dvěma snímky. Algoritmus prochází jednotlivé pixely obrazu a pokud mezi pixely aktuálního a referenčního snímku došlo k rozdílu, zjevně se něco v obraze změnilo (například pohyb). Většina technik pracuje s určitým rozostřením a prahovou hodnotou, aby oddělila skutečný pohyb od hluku. To je z důvodu náchylnosti metody ke změně světelných podmínek a vygenerování falešného rozdílu. Častým rozšířením této metody je použití pro subtrakci pozadí, kdy je na místo referenčního snímku použit snímek pozadí ve výchozím stavu, oproti kterému se hledá rozdílem těchto dvou snímků jejich difference. [4]

2.2.3 Prahování

Jedná se o nejzákladnější metodu segmentace obrazu a všeobecně digitálního zpracování obrazu. Často je používána pro oddělení popředí a pozadí snímku. Základním krokem v prahování je volba prahové hodnoty T , jež bude rozdělovat hodnoty jednotlivých pixelů snímku. Algoritmus prochází jednotlivé pixely obrázku f a při překročení prahové hodnoty T zapíše do výstupu na obrázku g hodnotu 1. V opačném případě zapíše na příslušné místo hodnotu 0. Prahování může být globální a lokální. U globálního prahování je jedna prahová hodnota pro celý snímek, zatímco u lokálního je prahová hodnota uzpůsobovaná jednotlivým oblastem. Toto se používá hlavně pro kompenzaci světelných podmínek. [5]

$$\begin{aligned} g(x, y) &= 1 \text{ pokud } f(x, y) \geq T \\ g(x, y) &= 0 \text{ pokud } f(x, y) < T \end{aligned} \quad (2)$$



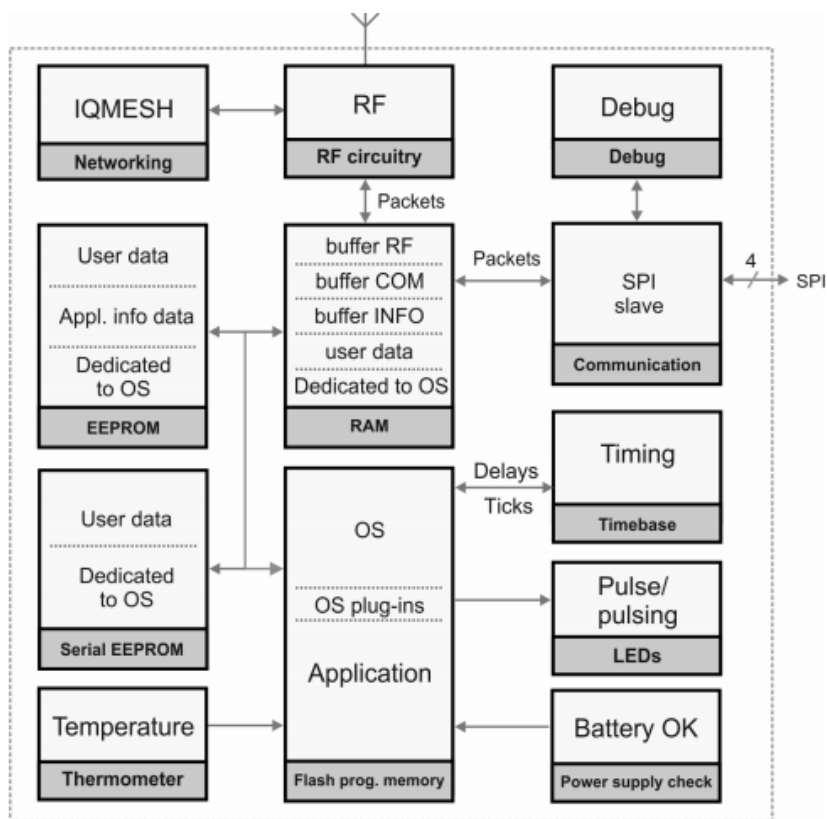
Obrázek 3: Technika prahování [5]

2.3 IQRF technologie

IQRF je bezdrátovou technologií přenosu dat, patentovanou českou firmou Microrisc s.r.o. Mimoto se jedná o ucelený ekosystém pokrývající celou škálu IoT aplikací. Hlavním cílem je jednoduchá implementace všech jejich částí a interoperabilita v rámci této technologie, napříč jednotlivými dodavateli řešení s touto technologií. Microrisc s.r.o. nabízí transceiver moduly ve tvaru SIM karty, které se dají zasunout do patice nebo přímo zapájet na plošný spoj (SMT). Tyto TR moduly obsahují nahraný operační systém a jsou programovatelné v jazyce C s možností funkcí tohoto OS. Pro usnadnění vytváření bezdrátových sítí obsahují také DPA framework, který usnadňuje tvorbu síťových aplikací a umožňuje snadnou tvorbu mesh sítí.

2.3.1 IQRF OS

Operační systém běžící na TR modulech spravuje na pozadí veškerou komunikaci s okolním prostředím, ať už přes některé z rozhraní (interface) jako slave režim nebo samotnou rádiovou komunikaci. Při tvorbě uživatelské aplikace v jazyce C, tak není třeba se těmito procesy zabývat a lze se tak věnovat pouze samotné aplikaci.



Obrázek 4: Struktura IQRF OS [6]

2.3.2 DPA

Direct Peripheral Access je vyšší komunikační vrstva postavená nad operačním systémem IQRF. Jedná se o komunikační protokol umožňující kontrolu periférií požadovaného modulu pomocí vyslání paketu s předem definovaným tvarem a obsahem. Kromě možnosti implementace vlastních uživatelských periférií, lze použít základních, již předpřipravených příkazů jako uspání MCU nebo světelná indikace. Vlastní uživatelské periferie je již třeba naprogramovat do tzv. DPA handleru, jež se dá svou strukturou a funkcí přirovnat ke stavovému automatu.

2.3.3 Komunikace skrze DPA

Paket s příkazem se po TR modulu pošle pomocí SPI nebo UART, případně lze softwarově takovýto paket nafalšovat v programu a TR modul si následně myslí, že dostal příkaz z venčí. Tento postup je v dokumentaci popsán jako asynchronní volání.

DPA paket lze přirovnat ke strukturovanému pokynu nesoucím cílovou adresu, označení periferie a požadovaný příkaz. Tato pevná struktura umožňuje po vyplnění paketu a jeho odeslání očekávat odezvu v daném tvaru. Konkrétněji struktura paketu vypadá takto:

- NADR - Adresa zařízení v síti
- PNUM - Požadována periferie
- PCMD - Upřesňující příkaz
- HWPID - HW profil
- PDATA - Nesená dodatečná data

Níže je uveden příklad požadavku na TR modul pomocí DPA paketu. Uvedené hodnoty jsou zpracovány ve formátu malé endianity. Z příkladu tedy můžeme vyčíst, že uzel sítě s adresou pět dostal požadavek na periférii LED (PNUM *0x06*) s příkazem kontinuálního blikání (PCMD *0x04*). Konkrétně LED periferie je rozdělena pro zelenou LED (*0x06*) a červenou LED (*0x07*). Po úspěšném přijetí tedy uzel s adresou pět začne blikat zelenou LED. [7]

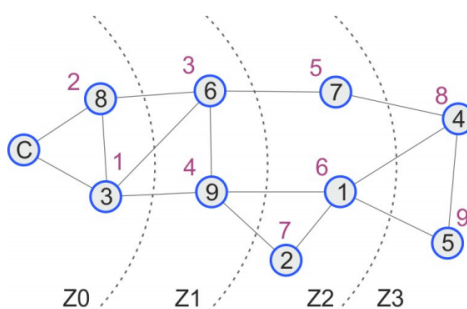
NADR (2B)	PNUM (1B)	PCMD (1B)	HWPID (2B)	PDATA (0 - 56B)
0x0005	0x06	0x04	0xFFFF	-

Obrázek 5: Příklad DPA požadavku

Parametr pro HW profil (HWPID) dále umožňuje upřesnit konkrétněji zařízení, kdy pouze zařízení se stejným profilem zareaguje na požadavek. HW profil s hodnotou *0xFFFF* specifikuje, že zareaguje každé zařízení bez ohledu na přiřazený profil. PDATA zůstal nevyplněn a běžně obsahuje konkrétnější nastavení jako např. konfigurace spánku u příkazu sleep nebo odeslaná data u odpovědi.

2.3.4 IQMESH

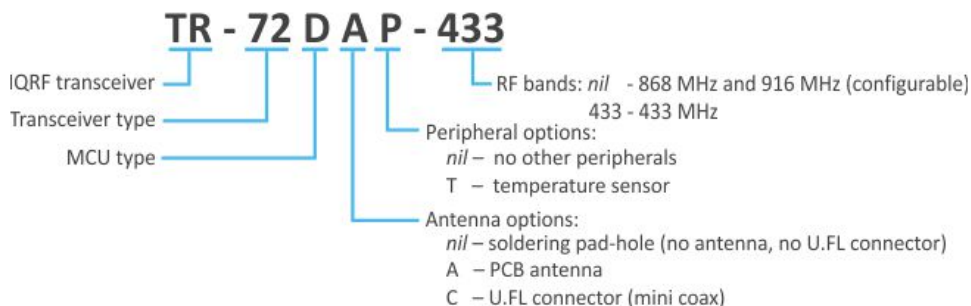
Jedná se o patentovanou technologii společnosti Microrisc s.r.o. s topologií typu mesh, kde každý prvek může komunikovat s prvkem jiným. Sít se skládá ze dvou pevně daných neměnných prvků: uzlu (node) a koordinátora (coordinator), kde právě koordinátor se v dané síti nachází pouze jeden. Jelikož se jedná o síť s topologií mesh nemusí koordinátor být v přímém kontaktu s každým prvkem sítě, avšak je nutné aby každý prvek byl v kontaktu s alespoň s jedním dalším prvkem a zároveň aby tato vazba dosáhla až ke koordinátorovi. Každý prvek musí mít danou adresu a být do této sítě přihlášen. Adresa má 8 bitů, kdy adresa 0 je určena pro koordinátora. Sít IQMESH může obsahovat až 240 prvků. Zbytek adres je rezervován a adresa poslední (*0xFF*) slouží k funkci broadcast.



Obrázek 6: Mesh topologie [8]

2.3.5 TR moduly

Transceiver IQRF (TR) je kompaktní modul osazený elektronickými obvody potřebnými pro implementaci bezdrátového připojení na rádiových kmitočtech krátkého dosahu. Jedná se o základní komunikační komponentu platformy IQRF, používanou také ve všech IQRF bránách, opakovačích atd. TR moduly jsou vyráběny v několika provedeních a jejich konfiguracích.



Obrázek 7: Značení TR modulů [9]

Díky své velice nízké energetické náročnosti, optimalizované spotřebě a několika druhům jak provozních režimů, tak sleep režimů jsou vhodným kandidátem do low power aplikací založených na napájení z baterií nebo energy harvesting. Níže v tabulce jsou uvedeny orientační teoretické

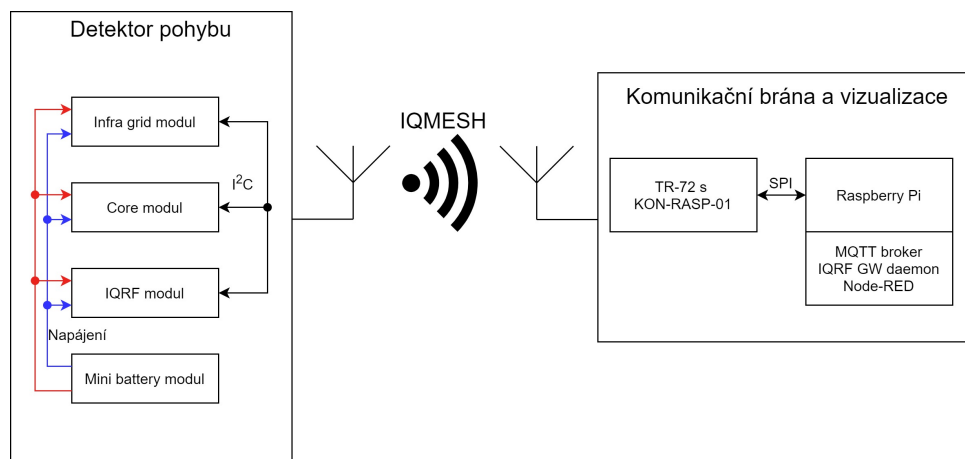
spotřeby jednotlivých provozních režimů TR modulů. Hodnoty jsou aktuální pro současnou sérii transceiverů s výjimkou TR-72D. Tato verze dosahuje z důvodů na desce osazeného teplotního snímače a LDO regulátoru vyšší spotřeby. [9]

Tabulka 2: Spotřeba provozních režimů

Spánek		Běžný provoz		Příjem			Vysílání
Deep sleep	Sleep	RF sleep	RF ready	STD	LP	XLP	TX mode
< 100 nA	< 1 μ A	1,6 mA	3,0 mA	11,8 mA	250 μ A	16,3 μ A	8,3 - 25 mA

3 Návrh měřicího systému

Řešení v rámci IoT vyžaduje komplexní infrastrukturu systému. Tato kapitola se zabývá právě výběrem vhodných prostředků od samotného hardwaru měřicího uzlu, přes komunikační bránu a návrhu řešení pro použitou komunikační technologii až po zpracování dat a jejich vizualizaci.



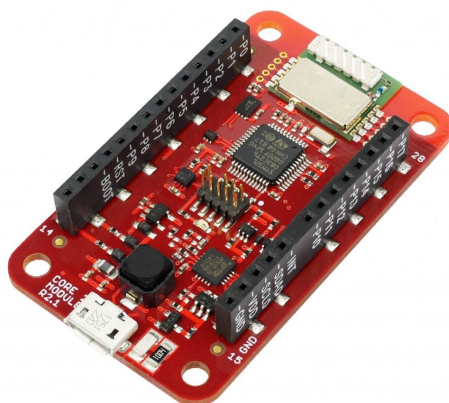
Obrázek 8: Blokové schéma návrhu systému

3.1 IoT stavebnice HARDWARIO

Průmyslová IoT stavebnice TOWER od české firmy HARDWARIO s.r.o. původně pod názvem BigClown je vytvořena s cílem uplatnění v pilotech průmyslu 4.0 a integrací do projektů světa IoT. Stavebnice je koncipována jako open-source a kromě modulů umožňujících využití LoRaWAN a Sigfox, podporuje také integraci do systémů s populárními platformami jako Microsoft Azure, AWS, Ubidots, Node-Red nebo třeba Amazon Alexa a mnoho jiných. Za zmínku stojí také jejich SDK, jež kromě knihoven sloužících pro práci s jejich moduly, integruje taktéž takzvaný *scheduler*, který do jisté míry emuluje operační systém reálného času a usnadňuje stavbu aplikací na asynchronní bázi.

3.1.1 Core modul

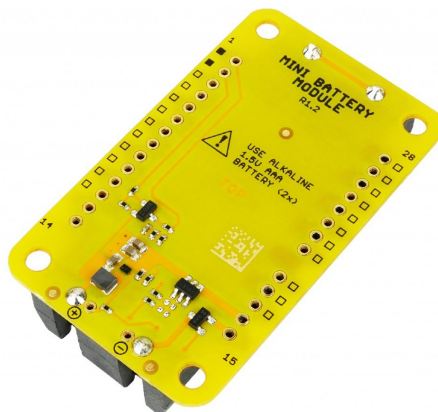
Core modul je základním stavebním kamenem měřicího uzlu postaveného pomocí této průmyslové stavebnice. Uživatelský program běží na 32 bitovém ARM mikrokontroleru STM32L083CZ s 192 kB paměti flash a 20 kB paměti RAM. Na desce se nachází několik součástek nesouvisejících se samotným MCU, jež dále rozšiřují funkce a využití samotného modulu. Mezi tyto patří například radiový modul založený na čipu SPIRIT1, který umožňuje již v základu využití bezdrátových přenosových tchnologií, digitální snímač teploty TMP112 nebo tříosý akcelerometr LIS2DH12.



Obrázek 9: Core modul stavebnice HARDWARIO [10]

3.1.2 Battery modul

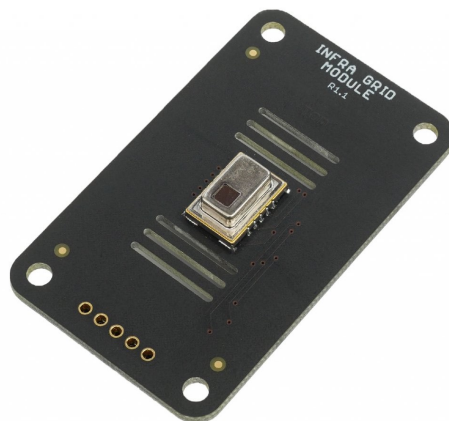
Bateriový modul ve verzi mini slouží jako zdroj elektrické energie pro systém bez externího napájení. Na desce se nachází zvyšující měnič založený na obvodu TPS61099, který operuje pomocí napájení z dvou alkalických baterií. Napětí článků může být měřeno pomocí analogového vstupu MCU, díky přivedení na standardizovaný header. Deska také samozřejmě obsahuje obvod pro odpojení zátěže v případě, že je přítomný externí zdroj napájení jako například zdroj s konektorem USB.



Obrázek 10: Mini battery modul [10]

3.1.3 Infra grid modul

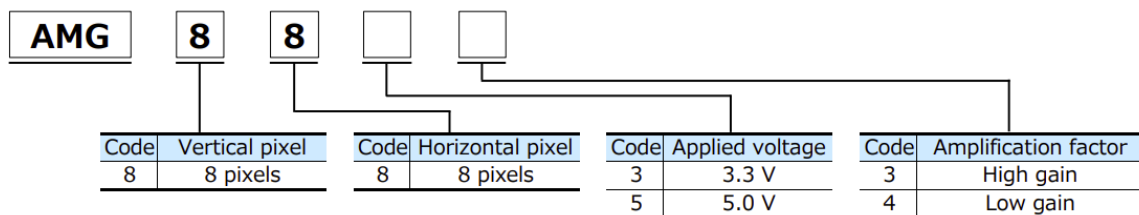
Infra grid nebo také IR grid modul je osazen maticovým infračerveným snímačem AMG8833, která se skládá z 64 pasivních infračervených snímačů teploty umístěných v mřížce. Modul jako takový v této práci slouží pro získání dat pro vyhodnocení pohybu, avšak zamýšlený účel pro tento modul byl primárně pro prediktivní údržbu a měření teploty povrchů. [10]



Obrázek 11: IR grid modul [10]

3.2 Maticový snímač AMG8833

Tato podkapitola podrobněji pojednává o maticovém snímači AMG8833 použitém na IR grid modulu. Snímač spadá do série AMG88xx maticových infračervených snímačů s rozlišením 8x8. Z obrázku 12 lze vyčíst, že se jedná o verzi s jmenovitým napájecím napětím 3,3 V a vysokým ziskem pro integrovaný zesilovač ve vnitřním měřicím obvodu.



Obrázek 12: Značení série AMG88xx [11]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	3,3 V ± 0,3 V
Měřicí rozsah	0 °C - 80 °C
Přesnost	2,5 °C
Rozlišení	0,25 °C
Záběrný úhel	60 °
Spotřeba proudu	4,5 mA (normal)
	0,2 mA (sleep)
Rozsah termistoru	-20 °C - 80 °C
Rozlišení termistoru	0,0625 °C

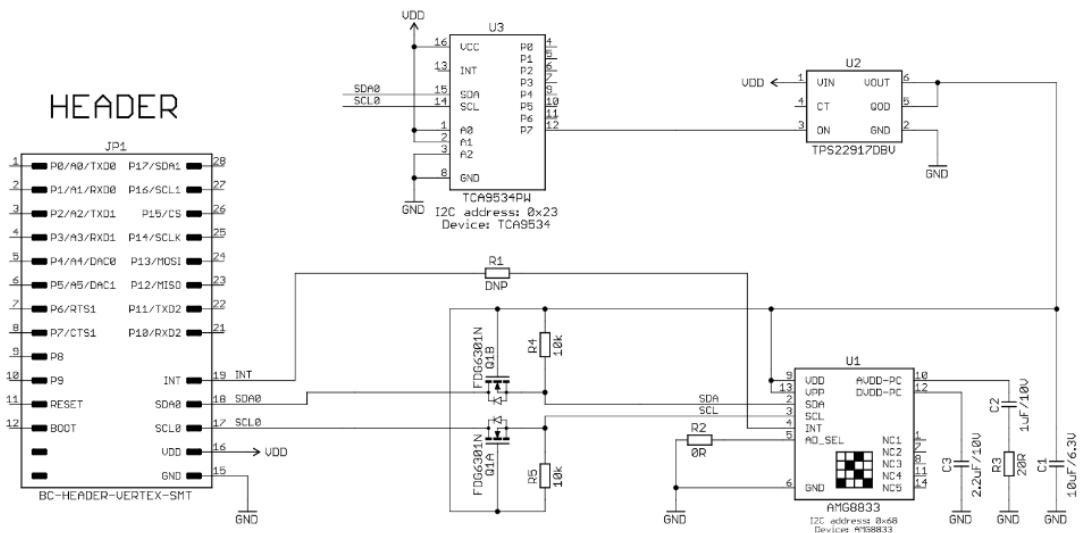
Obrázek 13: Katalogové parametry snímače AMG8833

V tabulce 3 je popsán stručný přehled registrů snímače. Narozdíl od většiny běžných snímačů s menším množstvím registrů, byl vypsán pouze jejich přehled z důvodu jejich velkého množství. Konkrétně se jedná o asi 150 registrů z 256 možných při použití 8 bitové adresy.

Tabulka 3: Zjednodušená přehledová tabulka registrů snímače

Adresa	Název registru	R/W	Popis
0x00	Power control	R/W	Nastavit operační režim
0x01	Reset	W	Programový reset
0x02	Frame rate	R/W	Počet snímků
0x03	INT control	R/W	Nastavení přerušení
0x04	Status	R	Příznak přerušení
0x05	Status clear	W	Vymazání příznaku přerušení
0x07	Average	R	Výstup průměrované hodnoty
0x08 - 0x0D	INT level	R/W	Nastavení hodnot přerušení
0x0E - 0x0F	Thermistor	R	Teplota z termistoru
0x10 - 0x17	INT	R	Příznaky přerušení po řádcích
0x80 - 0xFF	Pixel output	R	Hodnoty konkrétních pixelů (64 * 2B)

Níže je uvedeno zapojení snímače na dříve popisovaném IR grid modulu. Snímač sám o sobě nepotřebuje pro svou funkci žádné dodatečné obvody, avšak na níže uvedeném schématu je přidán obvod pro odpojení sběrnice I²C a napájení. Tento obvod je ovládán pomocí IO expandéru komunikujícím po I²C, který zapne napájení snímače při inicializaci modulu v kódu.



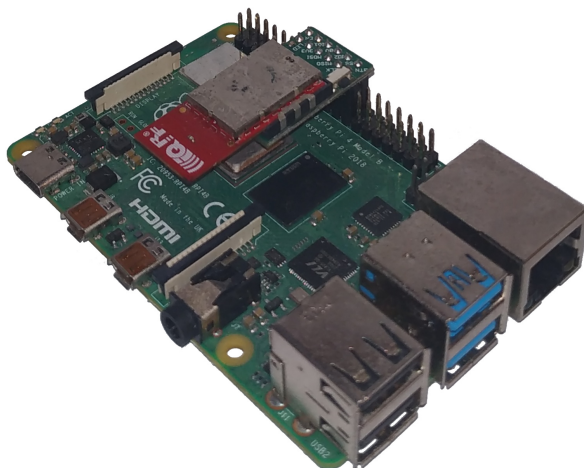
Obrázek 14: Zapojení snímače na IR grid modulu [12]

3.3 IQRF modul

Jelikož se v sortimentu Společnosti Hardwario s.r.o. nenachází komunikační modul pro technologii IQRF, bylo třeba realizovat řešení pro připojení samotné jednotky detektoru pohybu pomocí této technologie do bezdrátové sítě. Konkrétně se jedná o modul kompatibilní s jejich formátem HARDWARIO TOWER. Toto je následně podrobně popsáno dále v kapitole 5.

3.4 Komunikační brána

Pro propojení výsledného zařízení do struktury IoT je třeba komunikační brány (tzv. gateway), jež bude sloužit také pro hostování dalších navazujících služeb a aplikací. Pro tento účel je použit jednodeskový počítač Raspberry Pi 4 Model B. Tato gateway je po HW stránce doplněna konektorem KON-RASP-01 pro připojení IQRF TR modulů, a je kompatibilní s GPIO headerem Raspberry Pi.



Obrázek 15: Raspberry Pi s KON-RASP-01 a TR-72

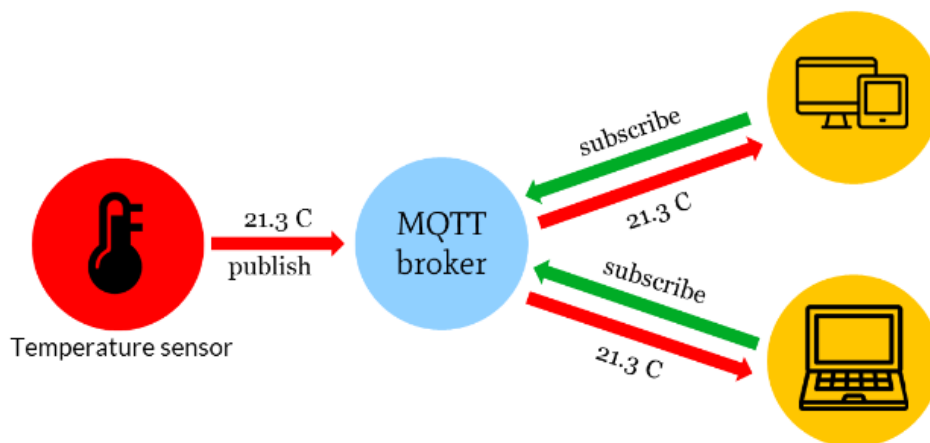
3.4.1 GW Daemon

IQRF Gateway Daemon je SW balíček umožňující tvorbu komunikační brány pro IQRF síť a umožňující připojení ke cloudu. Je navrhnut s funkcí s jednodeskovým počítačem připojeným k IQRF TR modulu pomocí SPI, UART nebo USB CDC. Takto připojený TR modul s nahreným DPA handlerem ve funkci koordinátora poté umožňuje řízení sítě. Daemon umožňuje komunikaci s protokoly UDP, WebSocket, MQTT a MQ. Tato komunikace spolu s dalším nastavením může být spravována pomocí webové aplikace.

3.4.2 MQTT broker

MQTT je M2M (machine-to-machine) komunikační protokol určený pro IoT. Komunikace je řízená pomocí centrálního prvku, jímž je MQTT Broker. Síť kromě brokera obsahuje klienty, kteří

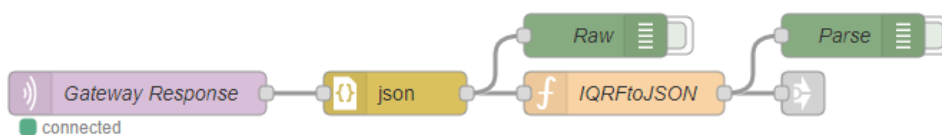
mohou fungovat ve dvou rolích: publisher a subscriber. Každá zpráva má zpravidla přidělený topic zapadávající do předem navrhnuté struktury. Publisher pošle serveru zprávu s daným topicem, jež si může následně subscriber převzít, za předpokladu, že je k danému topicu přihlášen. Tyto role nejsou nikterak fixní a každý subscriber může být zároveň publisherem a naopak. Pro použití byl zvolen broker Eclipse Mosquitto, jež je open source broker součástí Eclipse foundation.



Obrázek 16: Diagram uspořádání prvků v MQTT [13]

3.4.3 Node-RED

Node-RED je open source projekt původně vyvinutý společností IBM. Jedná se o prostředí primárně určené k tvorbě automatizace postavené na Node.js, umožňující grafické programování pomocí jazyka JavaScript. Program vytvořený v prostředí Node-RED na pohled připomíná propojování jednotlivých uzlů. Kromě uzlů (node) s pevně definovanou funkcí lze využít možnosti programování vlastních funkcí právě v jazyce JavaScript. Tyto uzly lze následně rozdělit do jednotlivých toků (flow) pro zpřehlednění a rozdělení na jednotlivé projekty nebo části projektu většího. Pro rozšíření funkcí prostředí Node-RED lze využít stažitelných knihoven, tzv. palet. Mezi tyto palety patří také paleta Dashboard, která umožňuje mimo jiné rychlé vytvoření vizualizace.

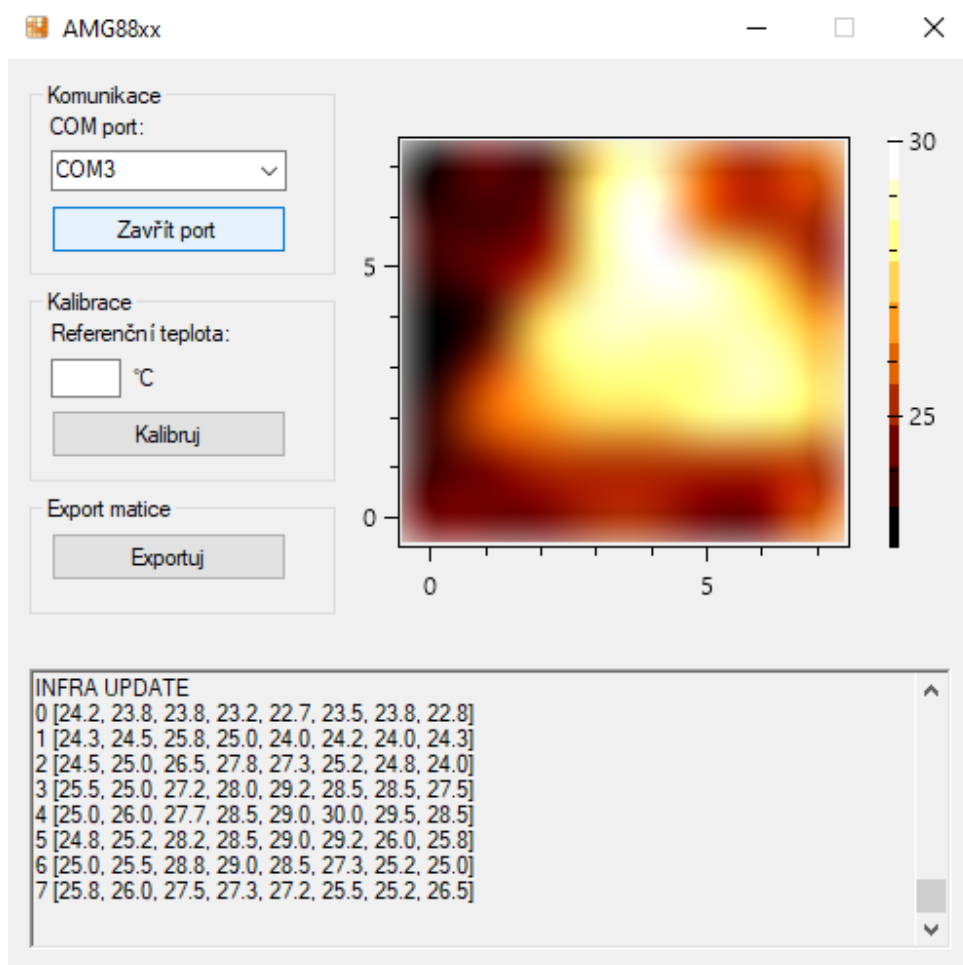


Obrázek 17: Ukázka programování v Node-RED

4 Analýza výstupu senzoru

4.1 Program pro analýzu dat

Pro účely vyhodnocení dat byla vytvořena jednoduchá aplikace pro čtení sériové linky, vizualizaci pro okamžité vyhodnocení a textovým polem pro zkopírování pro lepší vyhodnocení v kompatibilním formátu, kdy lze přesně zachytit konkrétní snímek a v reálném čase získat jeho náhled. Tento požadavek vznikl po prvních pokusech o získání teplotních hodnot po sériové lince pomocí programu terminálu pro komunikaci po sériové lince. Pro detailnější analýzu a základní pokusy se zpracováním matic byl zvolen jazyk Python. Výstup se dá poté upravit i pro formát pro jazyk C pro ověření implementovaných funkcí pro MCU.



Obrázek 18: Vytvořený program

Tento program byl vytvořený pomocí nástroje Visual studio a byl naprogramován v jazyce C# pomocí frameworku .NET verze 4.7.2 a grafické knihovny Windows forms. Program má pevně nastavené parametry komunikačního protokolu, tak aby byl v základu kompatibilní se stavebnicí

HARDWARIO a jejich základním nastavením pro komunikaci se sériovou linkou. Jako jediná volitelná možnost je nastavení komunikačního portu, k němuž je MCU s moduly připojen. V pravé části okna je vidět náhled aktuálního snímku, který je interpolován (dopočtení hodnot pro vyšší rozlišení) pro lepší interpretaci informací člověkem. Následně nám zůstává tlačítko pro export, kdy je naformátovaný textový řetězec s maticí uložen do dočasné paměti. Zbývá oddíl pro kalibraci a část s výpisem přijatých hodnot.

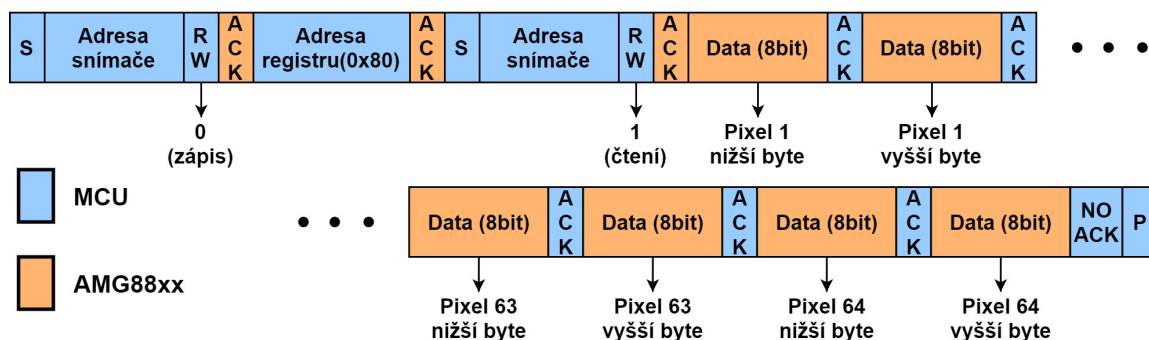
4.2 Program pro posílání dat

Pro získání dat pro výše popsanou aplikaci byl vytvořen také firmware, který periodicky čte a zasílá data z maticového snímače po sériové lince do PC. Pro komunikaci jsou použito výchozí nastavení komunikace popsané v tabulce 4.

Tabulka 4: Nastavení komunikace

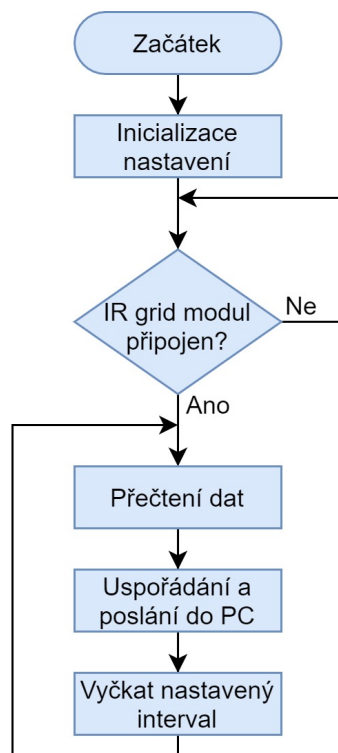
Parametr	Hodnota
Rychlost	115 200
Počet bitů	8
Parita	žádná
Stop bity	1

Algoritmus běží v jednoduché smyčce, kdy při startu MCU dojde k inicializaci periférií a kontrole připojení IR grid modulu. V případě správného připojení modulu dochází periodicky k zaslání požadavku na maticový snímač AMG8833 a přijetí odpovědi s daty. Tvar tohoto paketu je popsán na obrázku 19.



Obrázek 19: Ukázka čtení dat z maticového snímače

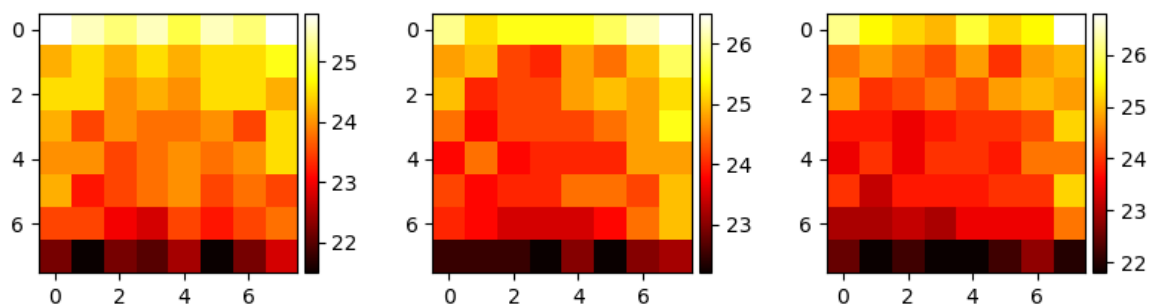
Po přijetí dat dojde k jejich úpravě a očíslování řádků matice pro snadnější zpracování při přijetí na PC. Následně tedy dojde k poslání dat po sériové lince skrze *UART0*. Po tomto programu vyčká přednastavený čas a smyčka se opakuje.



Obrázek 20: Vývojový diagram programu pro posílání dat pro analýzu

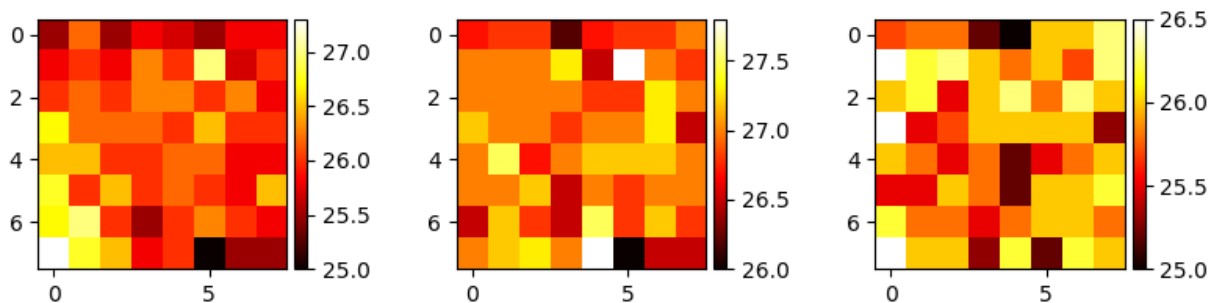
4.3 Analýza dat a ověření parametrů

Při seznamování s maticovým teplotním snímačem byly ověřeny technické katalogové parametry, avšak byla objevena skutečnost, že jedna strana senzoru dává rozdíl oproti druhé straně asi o 4 °C. Toto lze dobře pozorovat na datech z různých povrchů, které by měly mít v celém záběru stejnou nebo podobnou teplotu. Tento jev se projevoval nezávisle na podmínkách jako jiné prostředí, natočení senzoru i doba jeho provozu.



Obrázek 21: Snímky bez kalibrace

Jelikož ale pro vyhodnocování není nutné znát přesnou teplotu, nemusí být snímač zkalibrován v laboratoři, ale jednotlivé hodnoty pro offset budou stačit určit z odečtu průměrné teploty všech snímacích bodů a jimi aktuálně snímané teploty. Pro zjednodušení této činnosti byla k tomu určená funkce přidána do programu pro čtení dat po sériové lince.



Obrázek 22: Snímky po kalibraci

Bylo také provedeno testování s Fresnelovou čočkou z běžného PIR detektoru. Ačkoliv výsledky nebyly úplně vhodné k jakékoliv analýze potvrdilo to předpoklad, že Fresnelova čočka nebude vhodná k použití s maticovým snímačem. Čočka totiž pohltila část infračerveného záření, kdy nezbylo mnoho rezervy mezi teplotou pozadí a popředí, z důvodu vyšší odchylky snímače a došlo k ohybu, kdy nadále nebylo možné provést analýzu z důvodu zkreslení tvaru objektu. Tomuto faktu přispělo také, že maticový snímač má větší snímací úhel než pyroelement používaný v PIR detektorech.

Pro demonstraci výsledků tohoto měření byla ruka umístěna na vzdálenost 20-30 cm od snímače. Obrys ruky nebylo možno vůbec zachytit a malý pohyb jak ruky, tak čočky měl velký vliv na snímaný ruch. Při větší vzdálenosti již nebylo možno z výstupu nic vyčíst.

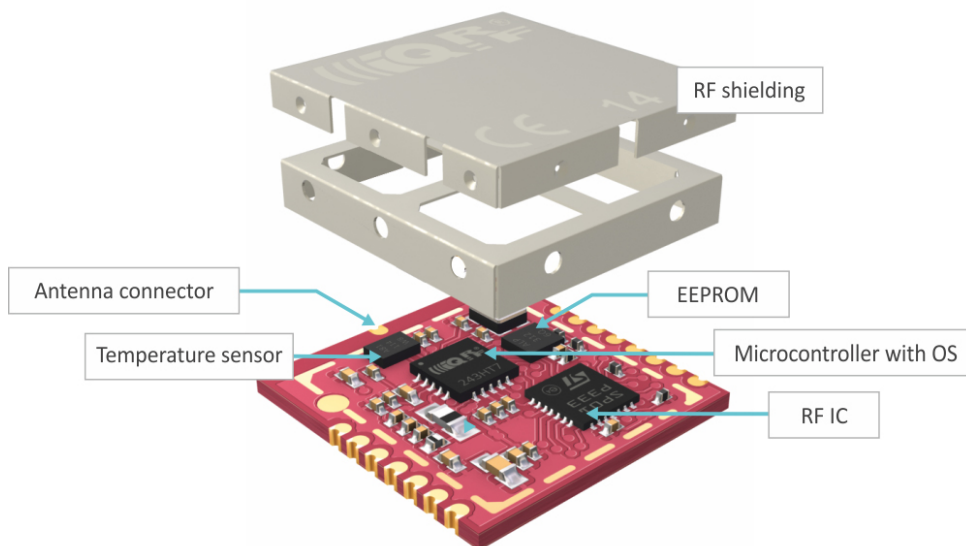
5 Realizace IQRF modulu

Jak již bylo v návrhu řešení avizováno, bylo třeba navrhnout a realizovat modul pro implementaci komunikační části práce pomocí bezdrátové technologie IQRF. Jelikož společnost Hardwario s.r.o. nabízí technologii IQRF pouze u zakázkového vývoje a výroby řešení na míru a nikoliv ve svém sortimentu průmyslových stavebnic, bylo třeba navrhnout IQRF modul kompatibilní s jejich formátem nyní označovaným jako HARDWARIO TOWER.

Modul byl navrhnout pomocí jednotlivých obvodů popsanych dále v této kapitole. Schéma zapojení modulu bylo nakresleno a následně byla DPS navrhnutá pomocí programu EAGLE. Následně byl návrh po kontrole a schválení zadán k výrobě v počtu dvou kusů. Po doručení navrhnutých prototypů IQRF modulu byly tyto desky zkontrolovány, osazeny a oživeny s využitím pracoviště v laboratoři EB305.

5.1 Modul TR-76D

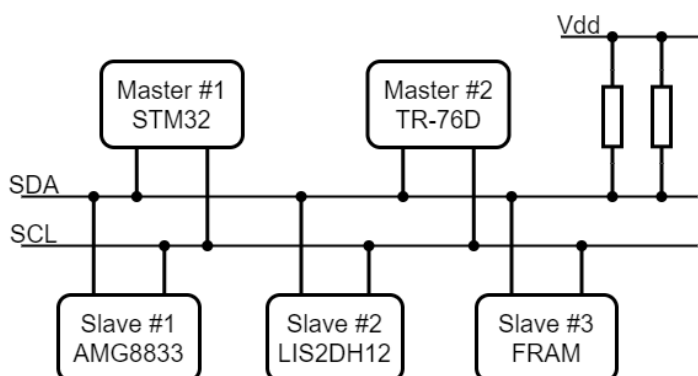
TR-76D je z aktuální generace rodiny IQRF tranaceiverů. Jedná se o modul, který v sobě integruje řídicí mikrokontrolér PIC16LF1938, který má na starosti komunikaci s okolím modulu pomocí vlastních periférií na něm umístěný IQRF OS, jež se stará o organizaci komunikace s zpracování požadavků sítě skrze DPA pakety s napojením na rádiový čip SPIRIT1. Řešení tohoto modulu je velice kompaktní a pro svou samotnou funkci prakticky nevyžaduje žádné doplňující komponenty.



Obrázek 23: Modul TR-76D [14]

5.2 Komunikace s řídicím MCU

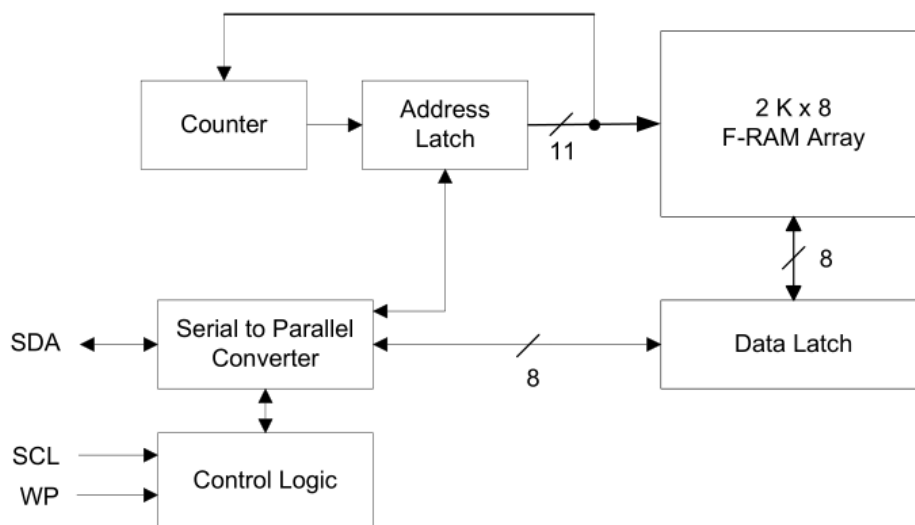
Existuje několik možností jak komunikovat s modulem TR-76D. IQRF OS umožňuje využití periférií SPI a UART jako tzv. interface. Avšak vznikl požadavek využití I²C sběrnice z důvodů její rozšířenosti a praktičnosti. Jelikož jako hlavní MCU byl určen STM32 na Core modulu a I²C není implementován v IQRF OS jako interface, vznikl problém integrace komunikace bez náročných zásahů do nastavení obou mikrokontrolérů. Jako vhodné řešení se hodí vložit jako mezičlánek do komunikace pomocí I²C paměť typu FRAM a funkci obou MCU jako master. Jelikož I²C sběrnice umožňuje zapojení typu multimaster byla zvolena právě tato možnost. [15]



Obrázek 24: I²C multimaster

5.3 Paměť FRAM

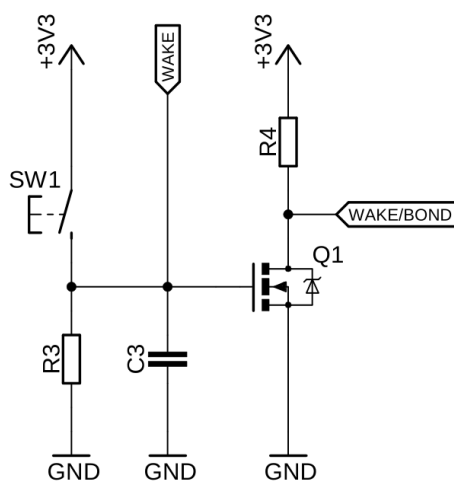
FM24CL16 je feroelektrická nevolatilní RAM. Paměť má kapacitu 16 kb a je organizována do 8 sekcí po 2048 bitech, kdy je každá sekce uspořádána do 126 řádků po jednom bajtu. Obvod po zápisu do místa v paměti inkrementuje aktuální adresu v latchi o jedna, díky čemuž není nutné po zápisu každého bajtu programově měnit adresu. Komunikace s pamětí je zajištěna přes sběrnici I²C, k níž má přístup jak mikrokontrolér STM32, tak modul TR-76D. [16]



Obrázek 25: Blokový diagram vnitřní struktury FM24CL16 [16]

5.4 Obvod pro párování a probouzení

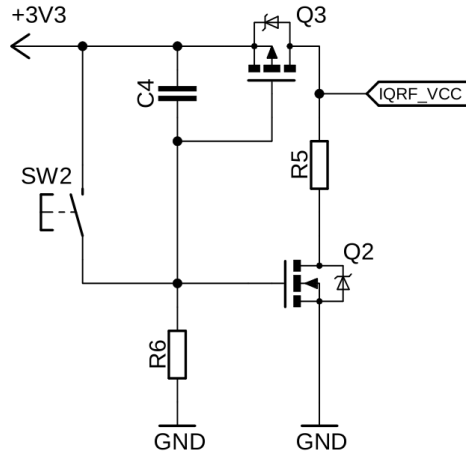
Pro přihlášení zařízení do sítě je třeba provést tzv. bondování, což je třeba provést hardwarově. To je zajištěno přivedením logické 0 na pin $Q12$ TR modulu. Při stisku tlačítka $SW1$ dojde k otevření tranzistoru $Q1$ a změně logické 1 na logickou 0 právě na přivedeném pinu $Q12$. Tranzistor je také ošetřen proti zákmitům tlačítka pomocí kondenzátoru $C3$ a rezistoru $R3$. Tento obvod slouží také k vyvolání externího přerušování, a díky tomu získal MCU STM32 možnost vyvolat externí přerušování na TR modulu. To umožňuje TR modul probudit ze spánku, či vyslat synchronizační signál.



Obrázek 26: Obvod pro bonding

5.5 Resetovací obvod

V případě nutného restartu TR modulu nebo při procesu bondování/odbondování je využit resetovací obvod. Tranzistor $Q3$ je normálně otevřen, zatímco $Q2$ je uzavřen. Při stisku tlačítka $SW2$ dojde k jejich přepnutí a tak ke krátkodobému odpojení TR modulu od napájení.



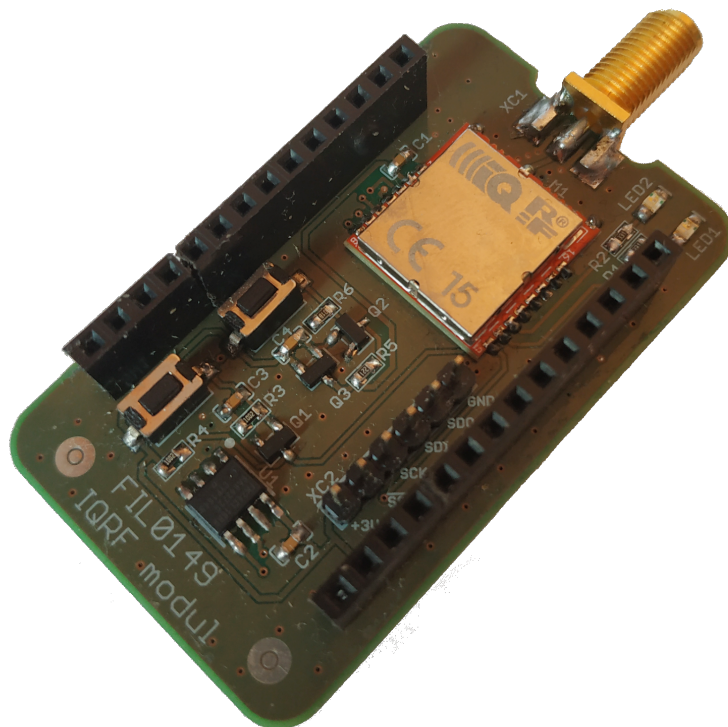
Obrázek 27: Obvod pro reset

5.6 Programovací rozhraní

K programování TR modulu slouží čtyřvodičová SPI sběrnice, kdy je spolu s vodiči sběrnice přivedeno také napájení a zem. Jelikož TR-76D má I²C a SPI vyvedeny na stejných pinech, jsou částečně vodiče těchto sběrnic sdíleny a nelze je tedy provozovat současně. Zároveň je nutno modul při programování odpojit od napájení, jelikož to je poskytováno skrze programovací konektor programátoru.

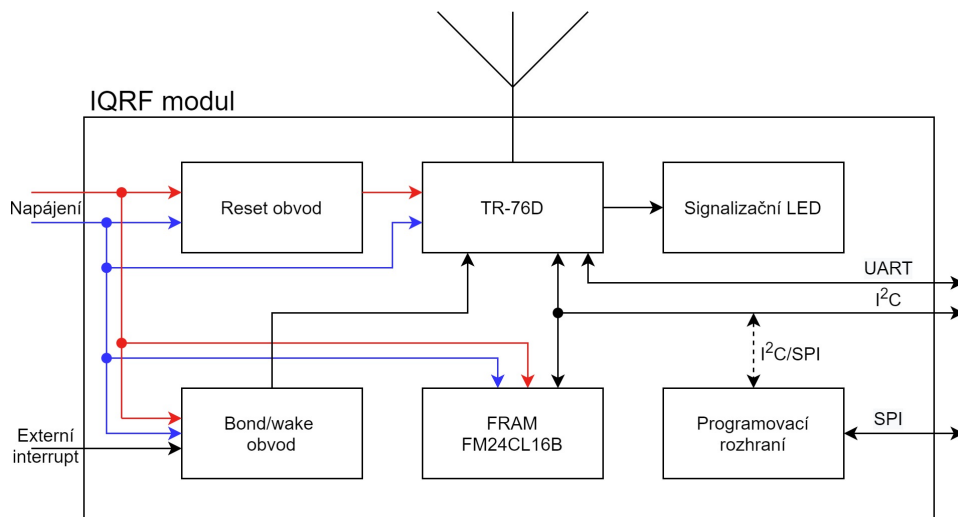
5.7 Realizovaný modul

Realizovaný IQRF modul lze rozdělit do několika částí. Tyto části jsou reprezentovány v blokovém schématu níže. Těmito částmi jsou resetovací obvod, obvod pro bondování, paměť FRAM, modul TR-76D, signalizační LED a konektor pro programování.



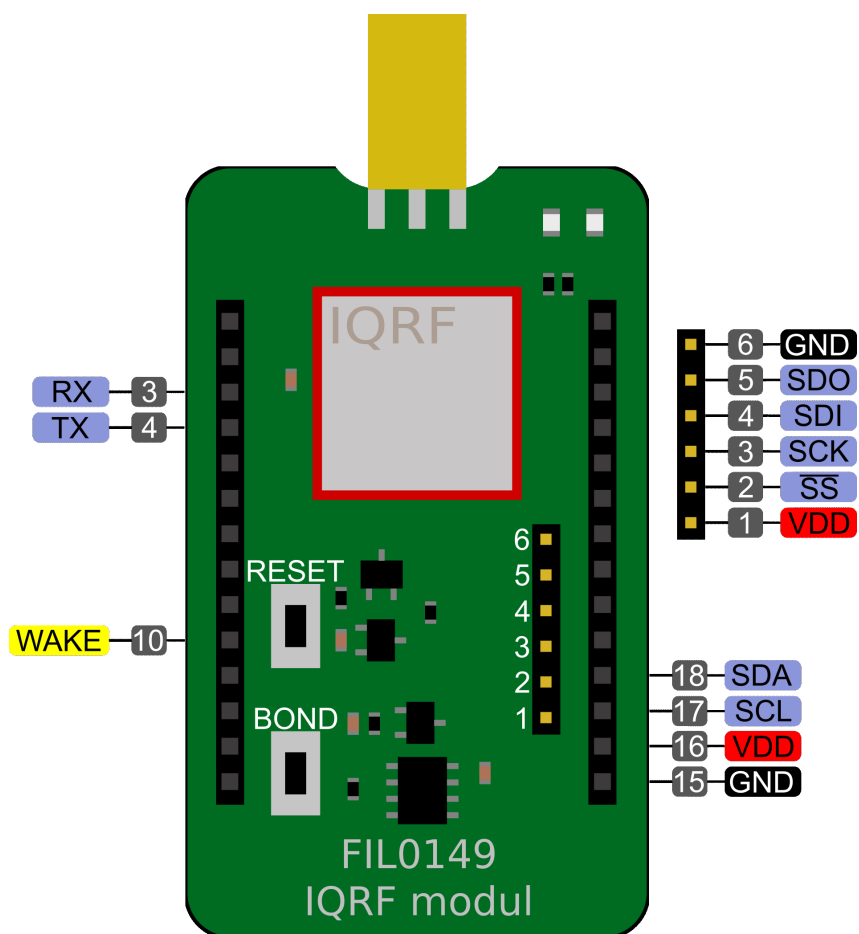
Obrázek 28: Osazený IQRF modul

Jako primární komunikaci pro tento modul s řídicím MCU byla tedy zvolena sběrnice I²C. Na modulu byla také realizovaná sběrnice UART jako alternativa pro použití s DPA protokolem. K tomuto účelu byla zvolena sběrnice UART s označením *UART1* na Core modulu. Tato sběrnice je jinak použita pro komunikaci s moduly pro LoRa a Sigfox. Z toho vyplývá, že UART pro IQRF modul nelze použít při kombinaci s jedním z těchto modulů a je tedy nutno použít primární metody komunikace po I²C. Tato kombinace by byla vhodná například při použití jako brány LoRa-IQRF.



Obrázek 29: Blokové schéma realizovaného IQRF modulu

Modul IQRF není sám o sobě samostatně použitelný. Byl navržen tak, aby spoléhal na externí napájení z regulátoru napětí a pull-up rezistory pro sběrnici I²C. U použití se stavebnici HARDWARIO je toto umístěno na Core modulu a podobně jako jejich ostatní moduly je závislý právě na této kombinaci modulů. Samozřejmě jelikož jsou TR moduly vybaveny mikrokontrolérem a jsou použitelný samostatně, je i tento modul použitelný samostatně a to při doplnění těchto dvou funkcí regulátoru napětí a pull-up rezistorů. Při tomto použití by však mohlo dojít k omezení ohledně dostupných vyvedených pinů a tak by při tomto použití byl uživatel omezen na sběrnice I²C a UART. K tomuto však navržený modul nebyl zamýšlen a je tedy určen jako doplnění portfolia stavebnice HARDWARIO TOWER.



Obrázek 30: Diagram rozložení pinů a zapojení IQRF modulu

Jak je na diagramu výše vidět modul přejímá uspořádání tlačítek pro reset a bondování podle vývojového kitu IQRF s výjimkou umístění na opačnou stranu podle svislé osy. Toto uspořádání bylo záměrně zachováno pro uživatelskou přívětivost.

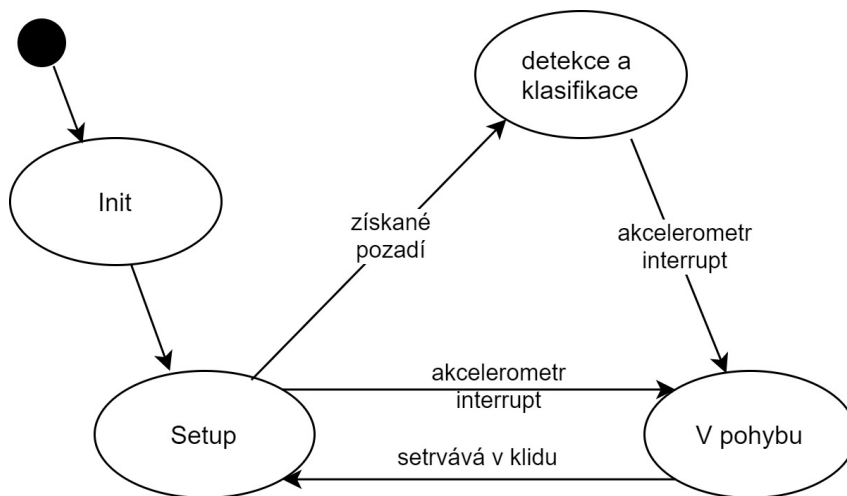
6 Návrh algoritmů

Pro realizaci práce je třeba navrhnout a realizovat několik algoritmů. Jedná se od návrhů hlavní struktury pro řídicí MCU, přes vyhodnocovací logiku, firmware pro TR modul a zpracování hodnot na komunikační bráně.

6.1 Funkce detektoru

Jako první musela být promyšlena a navržena samotná funkce a koncepce detektoru pohybu. Jednotlivé jeho stavy jsou vyobrazeny na stavovém diagramu. Kromě hlavního samozřejmého stavu označeného jako detekce a klasifikace, kdy dochází k vyhodnocování z jednotlivých snímků z maticového snímače, musely být doplněny další stavy.

Po startu samotného zařízení dojde k inicializaci nutných funkcí a periférií jako GPIO, komunikační sběrnice, vytvoření jednotlivých úkolů plánovače a deklarace a inicializace proměnných pro kontrolní účely. Po ukončení inicializace je naplánován opožděný přechod do stavu setup, kde dojde k pořízení infračerveného snímku pozadí. Uživatel musí zajistit, že během pořízení tohoto snímku nebude v záběrném úhlu přítomna žádná osoba nebo nějaký nepředpokládaný stav. Po získání pozadí přejde detektor do hlavního stavu detekce a klasifikace, kde dochází k vyhodnocování a jež je podrobněji popsán dále v této práci.



Obrázek 31: Stavový diagram

Při návrhu funkce detektoru byl také využit tříosý akcelerometr umístěn na Core modulu. Akcelerometr má v rámci inicializace nastaveny parametry pro vyvolání alarmu a vyvolání přerušení na Core modulu. K tomu dojde při pohybu samotného zařízení a dojde k přerušení jakéhokoliv předchozího stavu a přejde do režimu v pohybu. V tomto režimu započne odpočet, kdy v případě, že je detektor v klidu, tak dojde k naplánování opětovného setupu pro získání nového aktuálního pozadí. V případě, že během tohoto intervalu dojde k vyvolání dalšího přerušení od akcelerometru, pak započne odpočet znovu.

Nevýhodou je možnost obejít toto opatření při opatrné rotaci senzorem způsobem, kdy nedojde k jeho překlopení a změně gravitačního zrychlení.

$$u = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

Pro ověření je zároveň vypočítáván výsledný vektor u . Vektory x , y a z představují již akcelerometrem vypočtené vektory gravitačního zrychlení v jednotlivých osách. Předpokladem pro velikost vektoru u je, že při jakémkoli natočení detektoru se vektor bude pohybovat okolo jedničky. Pro detektor je tedy jeho natočení irelevantní. Jediné co je zajištěno je aktualizace pozadí po návratu do nehybného stavu.

6.2 Porovnání a volba metod

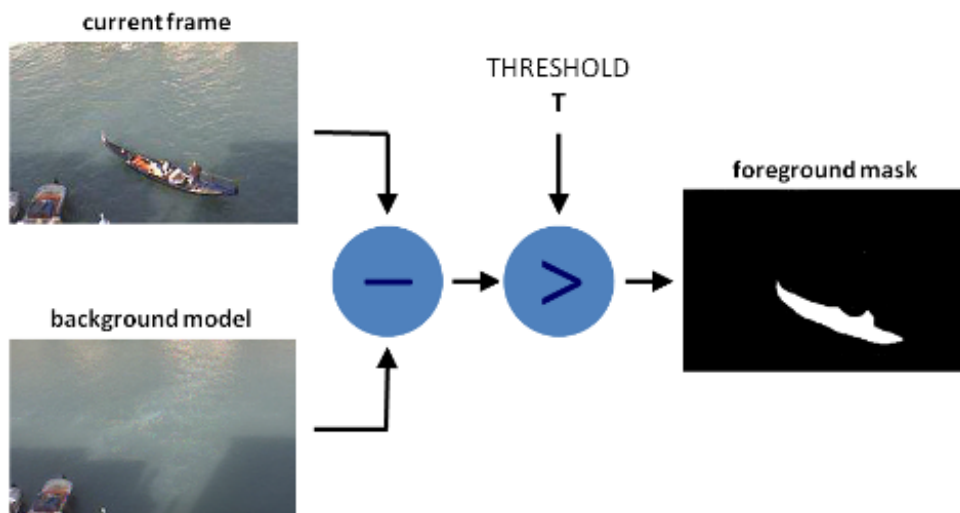
Pro návrh vhodného vyhodnocovacího algoritmu je třeba zhodnotit několik potenciálních metod pro zpracování digitálního obrazu. Výhodou u infračerveného snímku je, že nemusíme jako v případě běžného zpracování obrazu provádět převod z barevného prostoru na odstíny šedi. Samozřejmě pro návrh komplexnějšího algoritmu bude použito kombinace metod. Také je nutno tento úkol rozdělit na detekci pohybu a přítomnosti a na následující klasifikaci.

Panasonic, výrobce teplotního maticového snímače AMG8833, použitého v této práci, publikoval dokument diskutující dva konkrétní návrhy pro získání informací z infračerveného snímku. Tyto možnosti budou také zváženy a podrobeny rozboru. [11]

Níže seznam zvažovaných metod:

- Konvoluce - detekce hran
- Rozdílová metoda
- Rozdílová metoda se subtrakcí pozadí
- Prahování
- Výpočet středu objektu

Tyto metody jsou běžně využívány v oboru digitálního zpracování obrazu. Tyto metody zpravidla nejsou využívány samostatně, ale v jejich kombinaci. Běžnou kombinací metod popsanou v mnoha pracích i dokumentaci knihovny OpenCV je rozdílová metoda se subtrakcí pozadí s následným prahováním pro vytvoření binární masky. [4]



Obrázek 32: Diagram algoritmu subtrakce pozadí [4]

Tato metoda je také podrobně rozebrána a navrhuta v již zmíněném dokumentu od Panasonicu [11]. Mimo tento algoritmus byl navržen také výpočet středu objektu v záběru a následné porovnání, zdali nedošlo k jeho pohybu. Tímto způsobem rozlišují od pohybujícího člověka a člověka stojícího na místě nebo nehybného objektu vyzařujícího teplo. Nevýhoda tohoto postupu v použití v této práci spočívá ve faktu, že na MCU nelze snadno rozlišit jednotlivé objekty a tedy mít více středů. Při tomto postupu, tedy může dojít k tomu, že dva zdroje infračerveného záření vytvoří jeden společný střed uprostřed prázdného prostoru.

Za uvážení stojí také diskrétní 2D konvoluce. Tato metoda byla původně považována jako nejlepší cesta, avšak po pokusech s reálnými daty byla vyřazena. Konvoluce byla testována v konfiguraci s konvoluční maskou pro detekci hran. Hlavním problémem se ukázalo, že je nízké rozlišení maticového snímače a náročnost navazujícího vyhodnocení na MCU, díky čemuž toto řešení pro použití v této práci není vhodné, avšak zaslouží si podrobnější rozebrání.

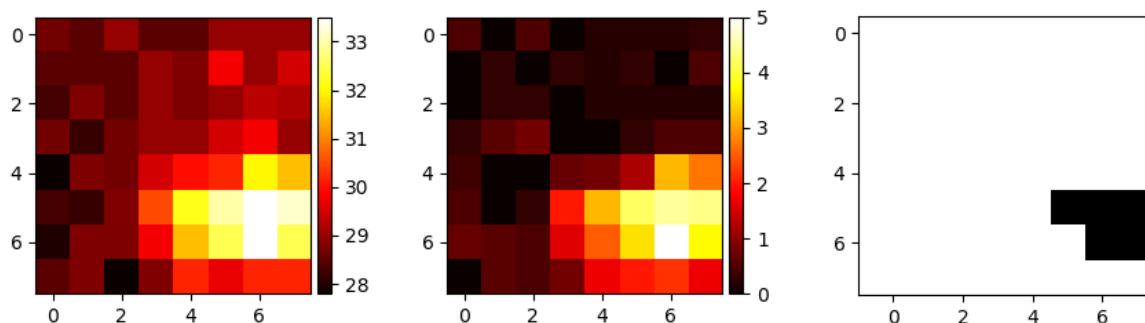
Problém s touto metodou začíná u faktu, že u konvoluce dochází ke zkreslení u krajních pixelů obrazu, tedy ze snímku 8x8 by byl použitelný jen výřez 6x6 pixelů, čímž se snímač dostává na téměř poloviční počet využitelných pixelů. Dalším problémem je taktéž nízké rozlišení, kdy by došlo k vytvoření velmi hrubé hrany detekovaného objektu v záběru a zároveň vzhledem k nepřesnosti měření se zvyšuje pravděpodobnost této nepřesnosti. Posledním problémem by bylo následné vyhodnocení, kdy by muselo dojít k vyplnění vzniklého objektu podél jeho hran, pomocí některého ze záplavových algoritmů (flooding algorithm). Tímto by vznikla binární maska, jež by musela být dále zpracována pomocí dříve zmíněných postupů, avšak došlo k ní výrazně pomalejší a náročnější cestou z pohledu množství nutných instrukcí.

6.3 Zvolená metoda pro detekci pohybu a klasifikaci

Při návrhu vyhodnocovacího algoritmu musel být tento úkol rozdělen na dvě části: detekci pohybu, případně přítomnosti a klasifikaci dalších parametrů patřících k tomuto pohybu.

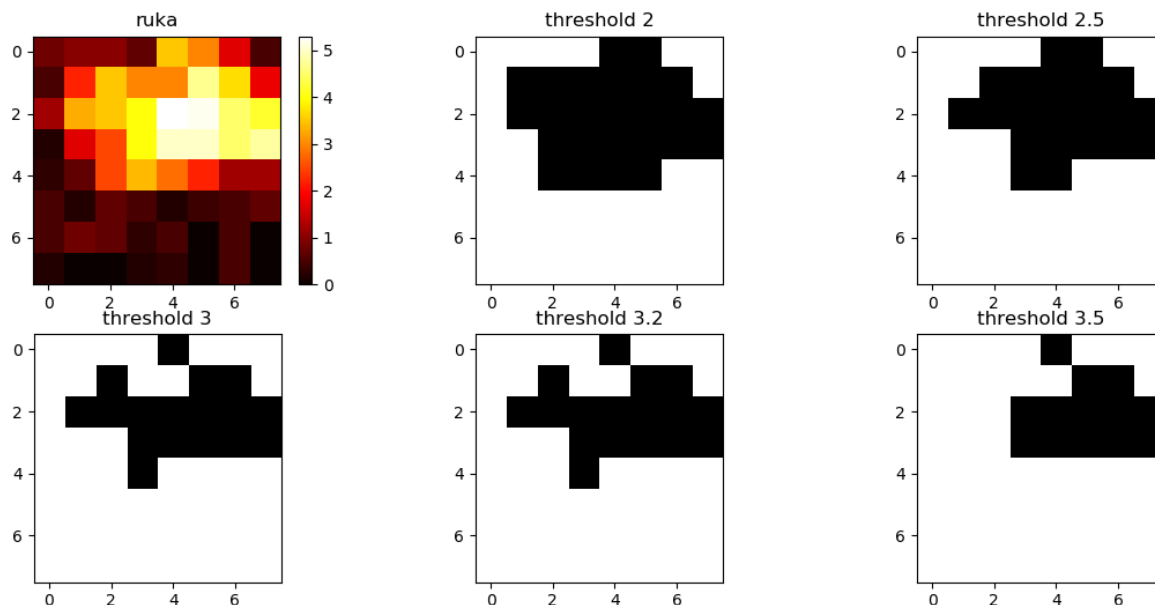
Pro detekci pohybu byla zvolena jedna ze standardně používaných metod a to rozdílová metoda se subtrakcí pozadí objasněna dříve na obrázku 32. Pro klasifikaci dalších vlastností zachyceného pohybu, přichází v úvahu pouze směr pohybu. Toto je realizováno pomocí výpočtu středu pro binární masky vyhodnocené jako snímek s přítomností objektu v popředí. Takovýto snímek je následně porovnáván s předchozím. Toto je omezeno na osu x z důvodu zamezení falešných vyhodnocení a tedy výsledkem může být: pohyb doleva, pohyb doprava nebo setrvání na místě.

Vizualizace procesu pro vyhodnocování pohybu, či přítomnosti lze vidět na obrázku 33. Na prvním snímku je nejnovější pořízený infračervený snímek. Na druhém snímku, lze vidět absolutní rozdíl tohoto snímku a uloženého infračerveného snímku pozadí. Z tohoto snímku je následně metodou prahování vytvořena tzv. binární maska. Na binární masce je objekt v popředí charakterizován prostřednictvím hodnoty 1 a pozadí hodnotou 0. Binární maska tedy slouží k jednoduššímu popisu popředí a podle počtu pixelů s popředím, lze určit přítomnost zachyceného objektu. Následně je opět proveden absolutní rozdíl nejnovější a předchozí binární masky a podle počtu rozdílných pixelů je vyhodnocen pohyb, při překročení prahové hodnoty pro detekci. Princip této prahové hodnoty a její volba jsou popsány níže.



Obrázek 33: Vizualizace průběhu algoritmu pro detekci pohybu

Pro realizaci vyhodnocovacího algoritmu bylo třeba mimo jeho samotného návrhu odzkoušet a určit několik prahových hodnot použitých pro vyhodnocení. Níže na obrázku 34 je znázorněno testování vlivu rozdílných prahových hodnot, při převodu popředí na jeho binární masku. Pro aplikaci realizovaného detektoru pohybu byla konkrétně zvolena hodnota 2,7 a při jejím dosažení nebo převýšení na snímku popředí, dojde v konkrétním bodě k zapsání logické 1.



Obrázek 34: Příklady vlivu prahové hodnoty na prahování

Pro samotné nastavení vyhodnocování byly tedy definována makra pro tři konstanty. Nastavení těchto konstant ovlivňují samotné výsledky vyhodnocování, konkrétně se jedná o prahové hodnoty pro operaci prahování. Jejich popis je popsán níže a doporučené hodnoty zjištěné testováním jsou uvedeny v tabulce 5.

TEMP_THRESHOLD - Teplotní prahová hodnota je konstanta použitá pro vytvoření binární masky ze snímku popředí. Při výpočtu rozdílu snímku pozadí a snímku aktuálního, dojde zároveň u každého pixelu k porovnání, zda je teplota popředí vyšší nebo rovna této prahové hodnotě. Při splnění této podmínky je do binární masky na příslušném místě zapsaná hodnota 1, při nesplnění je na toto místo zapsaná hodnota 0. Tato operace tedy slouží k jasnému vyhranění, který pixel obsahuje popředí.

ENTITY_THRESHOLD - Při výše zmíněné operaci (tvorbě binární masky) dochází také k porovnání výsledného počtu pixelů s popředím. Pokud je tento součet vyšší nebo roven této konstantě, je vyhodnoceno, že na tomto snímku je přítomen objekt, jenž je součástí popředí.

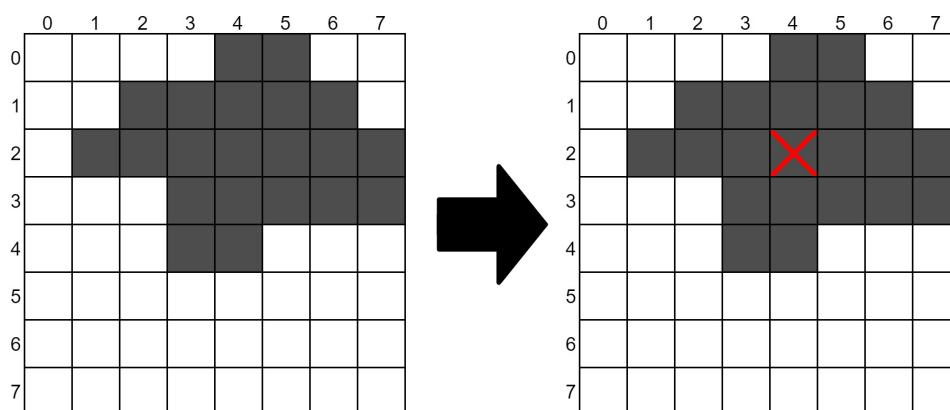
DIFF_THRESHOLD - Tato konstanta je použita při odečtu aktuální a předešlé binární masky. Jestliže je počet pixelů s rozdílnou hodnotou větší nebo roven této prahové hodnotě, dojde k vyhodnocení změně situace v záběru detektoru pohybu a toto je vyhodnoceno jako pohyb.

Tabulka 5: Použité a doporučené zjištěné rozsahy pro konstanty

Konstanta nastavení	Zvolená hodnota	Dolní limit	Horní limit
TEMP_THRESHOLD	2,7	2,5	3,2
DIFF_THRESHOLD	3	1	5
ENTITY_THRESHOLD	1	1	-*

* Horní doporučený limit nelze určit. Důležité aby hodnota dávala smysl, tak musí být zvolená hodnota stejná nebo menší než DIFF_THRESHOLD

Samotná klasifikace směru pohybu je tedy provedena ve formě výpočtu středu z binární masky a jejich porovnávání. Směr pohybu byl zvolen právě z důvodu proveditelnosti. Velikost a rychlost objektu jsou totiž silně závislé na jejich vzdálenosti od maticového snímače. Proces je vizualizován na obrázku 35. Porovnávání je však provedeno pouze na ose x, pro vyloučení chybových výsledků, způsobených právě nižším rozlišením snímače.

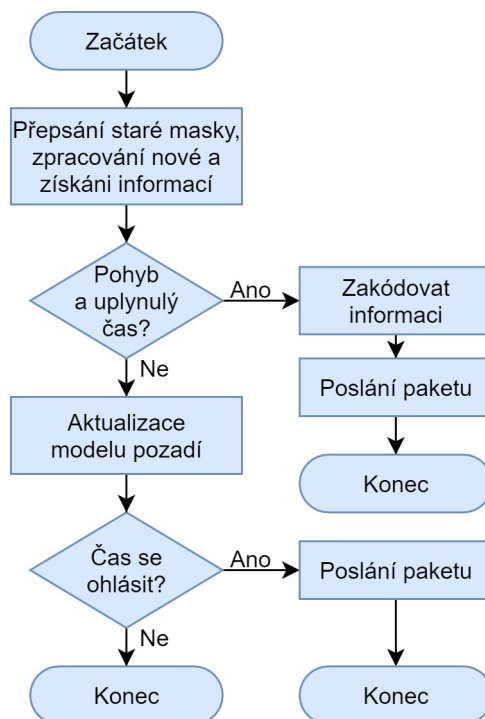


Obrázek 35: Vizualizace výpočtu středu

Poslední samotnou částí, jež bylo nutno vyřešit je aktualizace modelu pozadí. Ideálním řešením se jevil klouzavý průměr pro všechny jednotlivé pixely, avšak toto řešení není nejjednodušší z pohledu implementace, z důvodů počítání klouzavého průměru pro každý bod jednotlivě a úschovy každé této hodnoty. Jako kompromis byl tedy použit vážený průměr s větší vahou určenou původnímu snímku.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

V následující části je zobrazen vývojový diagram zjednodušeně popisující samotné vyhodnocování jako celek:

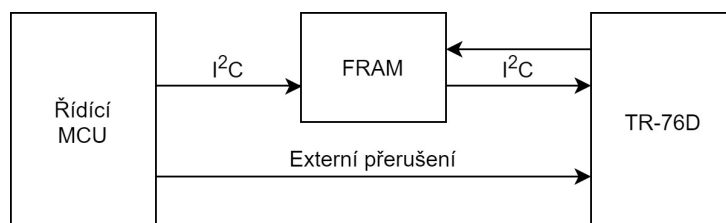


Obrázek 36: Vývojový diagram pro hlavní program

Jak již bylo avizováno v kapitole 6.1 ,samotný detektor pohybu má několik funkčních stavů, přičemž na obrázku 36 je vyobrazena právě hlavní vyhodnocovací funkce. Konkrétněji se jedná o zjednodušený popis z důvodu početného větvení programu pomocí podmínek a kontrolních proměnných popisujících stav a ošetřujících správnou funkci detektoru pohybu.

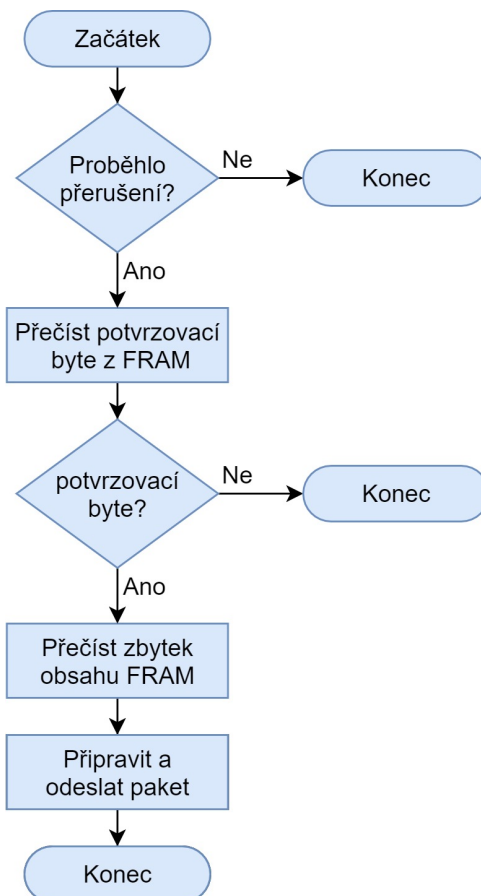
6.4 IQRF modul

V této aplikaci nám IQRF modul slouží pouze k zajištění komunikace, zatímco veškeré vyhodnocování a zpracování dat probíhá na hlavním MCU, umístěném na core modulu. Komunikace je zajištěna pomocí sběrnice I²C, jež není přímo implementována v IQRF OS. Z tohoto důvodu byl použit jednoduchý princip, kdy hlavní MCU запиše data na FRAM a vyvolá externí přerušení modulu TR-76D, pomocí změny stavu na pinu *P9* na logickou hodnotu jedna, který je napojen na obvod pro bondování.



Obrázek 37: Vizualizace provedení asynchronní komunikace

Po vyvolání externího přerušení zkontroluje TR-76D potvrzovací byte z FRAM. V případě splnění předpokladu, že potvrzovací byte má hodnota *0xFF*, dojde k přečtení zbytku nutných informací z FRAM, přípravě paketu a jeho odeslání. Veškeré informace o vyhodnocení mají velikost pouze 1 byte. Tato varianta byla zvolena z důvodu metody komunikace pomocí asynchronního paketu, jelikož IQMESH je primárně navržen pro řízení komunikace v síti koordinátorem, tedy tzv. synchronní metody.



Obrázek 38: Vývojový diagram pro obsluhu IQRF

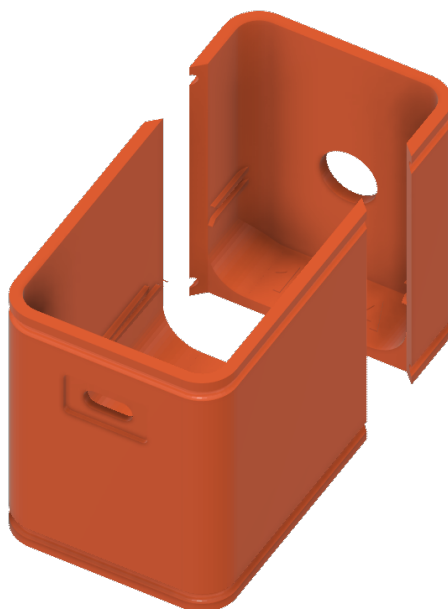
Synchronní metoda je také realizována pro demonstraci kombinace těchto dvou typů provedení komunikace. Koordinátor se tedy dokáže jednotky detektoru pohybu ve stejné síti dotázat na dvě realizované informace. Jedná se o dotaz na poslední vyhodnocenou a odeslanou informaci o pohybu a hodnotu napětí baterií. Napětí je měřeno periodicky každých 5 minut a upraveno podle vzorce, pro zmenšení hodnoty pro rozsah jeden byte. Tento vzorec je dále popsán v kapitole 7.2.

7 Kompletace a vizualizace

V této kapitole jsou popsány kompletační práce a realizace vizualizačního rozhraní a aplikace v prostředí Node-RED.

7.1 Hardware

Realizovaný IQRF modul byl otestován jako celek a nebyl shledán důvod jeho úprav. Pro kompletaci hardwarové části práce zbylo tedy pouze jednotlivé moduly umístit do krabičky. Jelikož realizovaný IQRF modul byl navrhnut jako kompatibilní se zbytkem použitých modulů, bylo možno použít oficiálních návrhů krabiček. Vybraná kompatibilní krabička byla vytisknuta na 3D tiskárně a osazena spojenými moduly detektoru pohybu.



Obrázek 39: 3D model krabičky

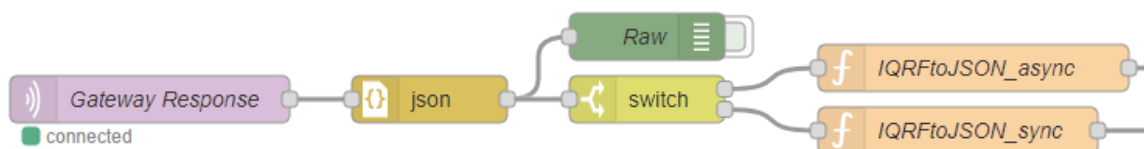
Krabička je koncipována tak, že jako celek drží pomocí dvou pevných gumiček. Výsledný výrobek má kompaktní rozměry 46 mm, 37 mm a 68 mm včetně SMA konektoru bez antény. Výrobek s osazenou anténou má na výšku 148 mm místo 68 mm.



Obrázek 40: Fotografie detektory ve vytisknuté krabičce

7.2 Zpracování dat

Po přijetí paketu TR modulem připojeným ke komunikační bráně pomocí sběrnice SPI, dojde k přenosu paketu ve formátu json pomocí MQTT protokolu. Ten je získán z topicu pro IQRF odpovědi a transformován z formátu json na JavaScript objekt.



Obrázek 41: Program Node-RED pro příjem dat

Následně dojde k roztřídění podle typu komunikace a v příslušné funkci je paket rozdělen na jednotlivé položky. V tabulce 6 je uveden příklad přijatého asynchronního paketu přijatého z detektoru pohybu.

Tabulka 6: Ukázka přijatého a zpracovaného asynchronního paketu

Položka paketu		Obsah položky
type		"iqrRaw"
id		"async"
response	nadr	1
	pnum	32
	pcmd	0
	hwpid	65535
	errn	0
	dpa	31
	pdata	192
status		""
time		"2021-04-18T13:57:55.029Z"

Samotný payload paketu z detektoru obsahuje při komunikaci zahájené z jeho strany pouze 1 byte. Na řídicím MCU je během vyhodnocování vygenerován právě tento byte s nesenou informací. Pro využití v návaznosti na další automatizaci, záznam nebo vizualizaci je však nutno tyto informace převést do člověkem snadněji interpretovatelného formátu. Tyto kombinace nesených dat jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Informace o pohybu

Adresa	Význam bajtu - "registru"
0x00	Žádný pohyb ani přítomnost osoby
0x14	Přítomnost osoby vlevo
0x28	Přítomnost osoby vpravo
0x40	Chybový stav (střed entity mimo matici)
0x80	Pohyb doleva
0xC0	Pohyb doprava

V této aplikaci jsou zabudovány také dva příkazy pro uživatelskou periférii *0x20*, při použití synchronní metody komunikace zprostředkované ze strany koordinátora. Při dotazu s příkazem *0x02* dojde k poslání posledního poslaného stavu o vyhodnocení pohybu. Při příkazu *0x01*, jež je koordinátorem volán automaticky jednou za hodinu, dojde k přijetí informace o hodnotě napětí na bateriích jednotky detektoru pohybu. Tato hodnota byla upravena, aby měla při přenosu velikost pouze 1 byte. Je tedy nutné tuto hodnotu označenou jako *data* upravit podle níže uvedeného vzorce pro získání hodnoty napětí *U*.

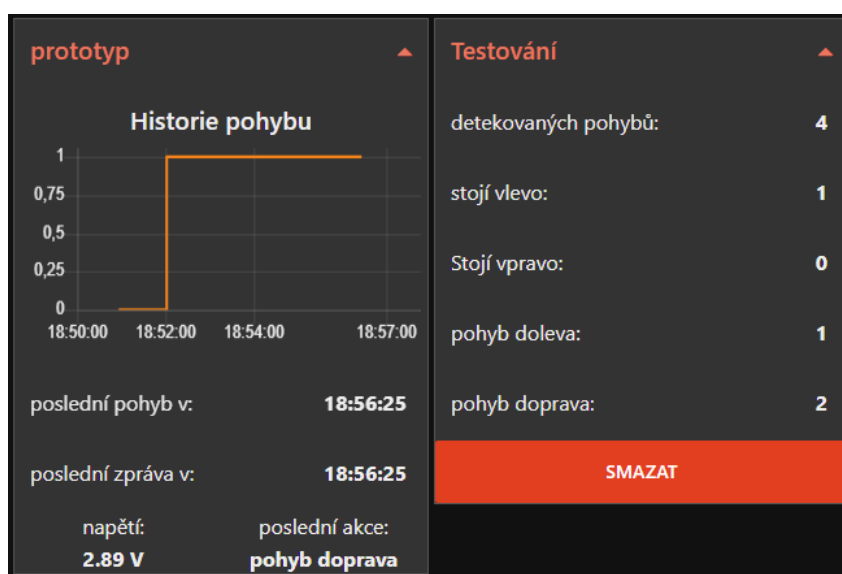
$$U = \frac{data + 100}{100} \quad (5)$$

7.3 Vizualizace

Samotná vizualizace byla navržena a vytvořena v prostředí Node-RED pomocí pluginu dashboard. Tento plugin umožňuje vytvoření jednotlivých skupin grafů (dashboardů) pomocí jednotlivých bloků.

7.3.1 Testovací rozhraní

První verze testovacího rozhraní vznikla z důvodů výpisu informací z detektoru jako textového řetězce a vizualizaci změn na výstupu, včetně sledování jejich času. Tato vizualizace následně sloužila pro zhodnocení funkčnosti a spolehlivosti celého řešení. Z tohoto důvodu také přibylo počítadlo pro jednotlivé přijaté výsledky.

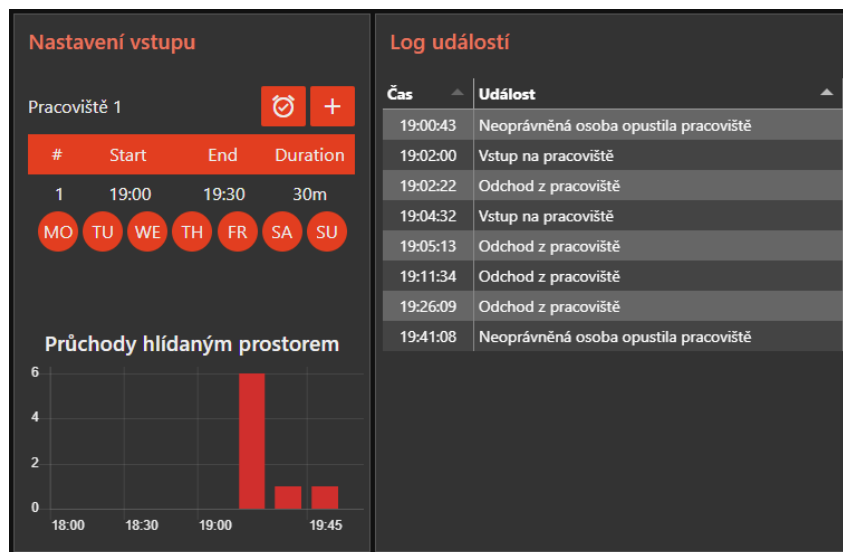


Obrázek 42: Vizualizace pro testování detektoru pohybu

7.3.2 Ukázková aplikace

Jako jedna z posledních částí práce vznikla ukázková aplikace pro možné využití. Vizualizace byla provedena podobně jako v kapitole 7.3.1 a logika aplikace byla naprogramována pomocí kombinace předpřipravených funkcí a vlastního JavaScript kódu.

Ukázková aplikace byla pojmenována jako „Dohled vstupu na pracoviště“. Slouží k monitorování vstupu a odchodu z pracoviště s hlídáním neoprávněného přístupu mimo nastavenou dobu. Tato doba lze nastavit pro různé dny a lze kombinovat více nastavení dohromady. Po vytvoření časového nastavení, dojde k jeho uložení do externího souboru, jež je při startu systému načten a tato uložená nastavení obnovena a znovu zavedena do aplikace.



Obrázek 43: Ukázková aplikace v Node-RED

Aplikace zároveň monitoruje počet průchodů v určených intervalech s paměti na dvě hodiny po patnáctiminutových intervalech. V pravé části je také umístěn záznam jednotlivých událostí s jejich časem, v němž se odehrály.

8 Zhodnocení výsledků

V neposlední řadě bylo třeba celý systém jako celek podrobit rozboru a testování. V rámci komunikační brány nešlo o žádný nový koncept nebo zajímavou, hromadně nepoužívanou SW kombinaci nástrojů a služeb. Vzniklý IQRF modul přejímající formát ostatních modulů HARDWARE TOWER, má potenciál pro použití v jiných projektech. Zároveň se jedná o zajímavé provedení díky realizaci komunikace po sběrnici I²C.

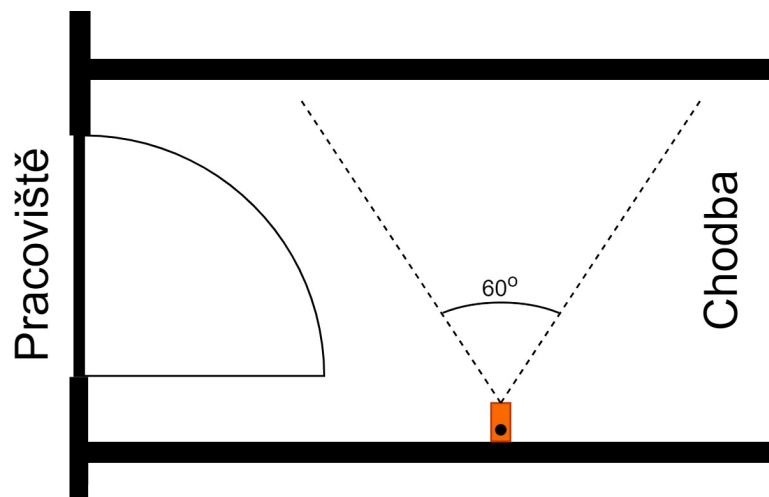


Obrázek 44: Konečný výrobek

Detektor pohybu jako takový dosahuje uspokojivých výsledků, avšak s několika omezeními vzniklými převážně použitým snímačem. Právě jeho nízké rozlišení omezuje možnosti lepšího a podrobnějšího vyhodnocování. Dalším důležitějším zjištěním bylo omezení efektivní funkční vzdálenosti pro snímání. Z tohoto bylo ustanoveno držet vzdálenost pozadí od snímače pod dva metry.

Samotná detekce pohybu a přítomnosti funguje velmi spolehlivě, při zachování podmínky vzdálenosti pozadí od snímače. Naopak prostor pro zlepšení se nabízí právě u navazující části a to klasifikace dalších informací o pohybu. Konkrétně použité určení směru pohybu funguje spolehlivě pouze při ideálních podmínkách. Těmito podmínkami se rozumí kromě již zmíněné vzdálenosti, také zachování jasného směru pohybu člověka. Tedy při zmateném pohybu jako otočení, zahnutí nebo zastavení a znovu rozejití se.

Tento problém by se dal vyřešit například delším časem sbírání středů binárních masek a jejich porovnávání ve větším časovém úseku. Kratší časový úsek byl zvolen právě za účelem menší latence. Případně by stálo za úvahu jiné vhodnější provedení s kontinuálním vyhodnocováním.



Obrázek 45: Návrh umístění detektoru v reálné aplikaci - půdorys

Z těchto závěrů k samotnému detektoru pohybu byly určeny možné aplikace tohoto řešení. Právě z důvodu požadavků na menší vzdálenost od protější plochy a jasný směr pohybu, bylo navrženo použití v prostorech jako jsou průchody a užší chodby. V tomto ohledu se nabízí právě monitorování vstupů do konkrétních místností, či sekcí budov. Nákres jednoho z možných návrhů lze vidět na obrázku 45. Jako vhodná výška pro umístění v této situaci se jeví úroveň lidského torza, tedy asi 110 až 140 cm od země.

9 Závěr

Cílem této práce bylo v první řadě navrhnout a realizovat detektor pohybu s maticovým snímačem, komunikující pomocí technologie IQRF. Při rešerši prací zabývajících se podobnými tématy, byly vytyčeny konkrétní cíle. Hlavním cílem byla především implementace metod digitálního zpracování obrazu pro možnosti detekce a klasifikace dat z pohybu. Tyto algoritmy jsou realizovány přímo v jednotce detektoru pohybu na hlavním MCU STM32, umístěném na core modulu.

V úvodních částech je pojednáváno o použitých technologiích, uvažovaných metodách digitálního zpracování obrazu, používaných prvků zabezpečovacích systémů a přehled navrhnutého řešení. Návrh řešení pojednává o návrhu samotné jednotky detektoru pohybu a navazující infrastruktury pro připojení do IQRF sítě a vizualizace získaných informací.

Pro samotný návrh algoritmů bylo potřeba analyzovat data získávána z vybraného maticového snímače AMG8833. Během tohoto vyvstal problém s rychlou a četnou vizualizací dat z tohoto snímače. Tento problém byl vyřešen pomocí vytvořeného programu popsáno v kapitole 4. Tento program byl navrhnut jako jednoúčelový, avšak jeho možnosti využití jsou i pro kalibraci jednotlivých maticových snímačů, či jako učební pomůcka pro nastínění funkčních principů termokamer.

Podstatnou částí samotné práce bylo navrhnout a realizovat IQRF modul, který doplnil použitý hardware. Tento komunikační modul byl navrhnut jako kompatibilní s použitou průmyslovou stavebnicí HARDWARIO TOWER. Jako hlavní způsob komunikace s řídicím MCU byla zvolena sběrnice I²C. Samotný popis realizovaného modulu včetně zapojení jednotlivých obvodů je dále popsán v samotné kapitole 5.

V kapitole 6 jsou analyzovány možné metody digitálního zpracování obrazu, návrh celkové funkce detektoru pohybu a vybrány metody pro samotnou realizaci vyhodnocovacího algoritmu. Pro vyhodnocování byla zvolena detekce pohybu, přítomnost osoby v záběru snímače a směr pohybu. Pro realizaci byla zvolena rozdílová metoda se subtrakcí pozadí a výpočet středu s následným porovnáním s předchozími snímky. Podrobnější popis je v samotné kapitole.

Výsledný detektor pohybu byl posléze zkompletován a otestován, spolu s realizací vizualizace. Vizualizace byla vytvořena pomocí prostředí Node-RED. Byla zároveň pomocí tohoto prostředí ukázková aplikace prezentující možnosti nasazení tohoto detektoru pohybu.

Samotné výsledky jsou podrobně rozebrány v kapitole 8. Detektor jako takový dosáhl v rámci technických omezení uspokojivých výsledků a to převážně co se týče detekce pohybu a přítomnosti osob v záběru. Prostor pro zlepšení spočívá jak po SW, tak po HW stránce. V oblasti HW se jedná především o výběr maticového snímače s vyšším rozlišením. V SW stránce věci se naskytuje prostor pro zlepšení ve zdokonalení klasifikace směru pohybu. Toto lze docílit úpravou funkce detektoru pro delší časy nebo zvolením vyšších sofistikovanějších metod, kde by však došlo na omezení co se týče implementace na mikrokontroléru.

Literatura

1. BURDA, Karel. *Základy elektronických zabezpečovacích systémů*. 1. vyd. Akademické nakladatelství CERM, 2017. ISBN 978-80-7204-967-7.
2. *Thermal imaging for Security & Surveillance* [online] [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: http://www.flirmedia.com/MMC/CSV/Comm_sec/SS_0032_EN.pdf.
3. *Diskrétní konvoluce* [online] [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <http://vision.uamt.feec.vutbr.cz/?course=ZVS&type=ex&page=ex7>.
4. *How to Use Background Subtraction Methods* [online] [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/3.4/d1/dc5/tutorial_background_subtraction.html.
5. M., Thanki Rohit. *Digital image processing using SCILAB*. Springer, 2019. ISBN 978-3-319-89533-8.
6. MICRORISC S.R.O. *IQRF OS Operating System Version 4.04D for TR-7xD User's Guide*. Dostupné také z: <https://static.iqrf.org/>.
7. MICRORISC S.R.O. *IQRF DPA Framework Technical Guide Version v4.15 IQRF OS v4.04D*. Dostupné také z: <https://static.iqrf.org/>.
8. MICRORISC S.R.O. *IQMESH Network Deployment for IQRF OS v4.04D and DPA v4.15 Technical Guide*. Dostupné také z: <https://static.iqrf.org/>.
9. MICRORISC S.R.O. *IQRF Technology* [online] [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/technology>.
10. *HARDWARIO TOWER - Industrial IoT Kit Developer Documentation* [online] [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://tower.hardwario.com/en/latest/>.
11. PANASONIC. *Grid-Eye Characteristics* [online] [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://industry.panasonic.eu/products/components/sensors/grid-eye>.
12. HARDWARIO S.R.O. *HARDWARIO Hardware* [online] [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://github.com/hardwario/bc-hardware>.
13. *MQTT Broadcasting* [online] [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: http://istsos.org/en/trunk/doc/ws_mqtt.html.
14. *TR-76D* [online] [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: www.iqrf.org/product-detail/tr-76d.
15. *I2C bus* [online] [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.i2c-bus.org/>.
16. CYPRESS SEMICONDUCTOR. *16-Kbit (2K × 8) Serial (I2C) F-RAM*. 2019-04. Č. 001-84456. Dostupné také z: <https://www.cypress.com/file/136491/download>.

Seznam příloh

- A. EAGLE soubory IQRF modulu
- B. Výkresy a podklady k IQRF modulu
- C. Kód pro detektor pohybu
- D. Kód pro posílání hodnot maticového snímače
- E. Program pro vyhodnocování
- F. Firmware pro IQRF modul
- G. Node-RED kód
- H. Matice ze snímače použité pro analýzu