

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

Adam Uher



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ZPRACOVÁNÍ DAT Z MIKROVLNNÝCH RADAROVÝCH SENZORŮ SE ZAMĚŘENÍM NA DETEKCI TRAJEKTORIE POHYBU OSOB V ZÁJMOVÝCH ZÓNÁCH

MICROWAVE RADAR SENSOR DATA PROCESSING FOCUSED ON DETECTING THE TRAJECTORY OF PEOPLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Uher

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soběslav Valach

BRNO 2022



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Adam Uher

ID: 211330

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Zpracování dat z mikrovlnných radarových senzorů se zaměřením na detekci trajektorie pohybu osob v zájmových zónách

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se a popište metody detekce osob v zájmových zónách
- 2) Navrhněte vhodnou metodu použitelnou v embedded zařízeních (např. procesor ARM, DSP)
- 3) Simulujte funkci na vhodných scénářích – pokladní zóna, fronta v prodejně
- 4) Zhodnoťte dosažené výsledky a porovnejte s existujícími systémy
- 5) Připravte podklady pro implementaci na cílovou platformu a ověřte funkci

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Webové stránky společností Texas Instruments, Infineon a NXP

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 23.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Soběslav Valach

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá detekcí osob a sledováním trajektorií pohybu v zájmových zónách. Jsou rozebrány jednotlivé metody, pomocí nichž lze detekce osob dosáhnout. Pro implementaci funkce detekce osob a detekce trajektorie pohybu je vybrán mikrovlnný radarový snímač IWR6843AoPEVM od společnosti Texas Instruments. Je popsán využitý hardware a software. Následně je provedena simulace funkce sledováním trajektorie osob ve frontě a zhodnoceny výsledky. Jsou srovnány výhody a nevýhody jednotlivých metod pro detekci osob. Nakonec je shrnut výběr možných implementací tohoto zařízení a vybrána cílová platforma, na které je ověřena funkce.

Klíčová slova

Radar, Lidar, Sonar, ToF, Počítačové vidění, Detekce osob, Zájmové zóny, Vestavěný systém, ROI, FMCW, CW, IWR, IWR6843AoP, IWR6843AoPEVM

Abstract

This bachelor 's thesis deals with a topic of people detection and tracking their movement in regions of interest. The individual methods that can achieve people detection are analyzed. To implement people detection and tracking their movement microwave radar sensor IWR6843AoPEVM from Texas Instruments is chosen for this task. This hardware and its software are described in detail. Then simulation is conducted to track people in a queue and its results are evaluated. Different advantages and disadvantages of individual methods are compared with each other. Finally, there's a summary of possible implementations for this device and target platform is chosen to verify its functionality.

Keywords

Radar, Lidar, Sonar, Computer vision, ToF, People detection, Region of interest, Embedded system, ROI, FMCW, CW, IWR, IWR6843AoP, IWR6843AoPEVM

Bibliografická citace

UHER, Adam. *Zpracování dat z mikrovlnných radarových senzorů se zaměřením na detekci trajektorie pohybu osob v zájmových zónách*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142635>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Ing. Soběslav Valach.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Adam Uher*

VUT ID studenta: *211330*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2021/22*

Téma závěrečné práce: *Zpracování dat z mikrovlnných radarových senzorů se zaměřením na detekci trajektorie pohybu osob v zájmových zónách*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis autora

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Soběslavu Valachovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych tímto chtěl poděkovat mé rodině, bez které bych tuto práci nemohl dokončit.

V Brně dne:

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. DETEKCE OSOB V ZÁJMOVÝCH ZÓNÁCH.....	11
1.1 ULTRAZVUKOVÉ SNÍMAČE	12
1.2 RADAROVÉ SNÍMAČE.....	13
1.2.1 CW radar	13
1.2.2 FMCW radar.....	15
1.3 POČÍTAČOVÉ VIDĚNÍ.....	17
1.3.1 Kamerové snímače.....	17
1.3.2 Barevné snímání obrazu.....	18
1.3.3 Speciální a multispektrální kamery.....	18
1.4 LiDAR.....	19
2. VYBRANÉ ŘEŠENÍ.....	20
2.1 IWR6843A0PEVM	20
2.2 SYSTEM INTERCONNECT	23
2.3 PROCESOROVÝ SUBSYSTÉM.....	24
2.4 RADAROVÝ SUBSYSTÉM.....	25
2.4.1 Hodinový subsystém.....	25
2.4.2 Vysílací subsystém	26
2.4.3 Přijímací subsystém	26
2.5 HARDWAROVÝ AKCELERÁTOR.....	27
3. SIMULACE	29
3.1 SOUHRN SOFTWAREVÝCH NÁSTROJŮ	29
3.2 PRVOTNÍ DEMONSTRACE FUNKCE.....	30
3.3 COUNTING PEOPLE.....	31
3.4 POPIS PARAMETRŮ KONFIGURAČNÍHO SOUBORU	32
3.4.1 Front-end parametry.....	33
3.4.2 Parametry desky.....	36
3.4.3 Detekční vrstva.....	36
3.4.4 Sledovací vrstva	37
3.5 SIMULACE FRONTY V PRODEJNĚ U POKLADNY	40
4. ZHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ S JINÝMI METODAMI.....	44
5. CÍLOVÁ PLATFORMA	47
5.1 CÍLOVÁ IMPLEMENTACE RADAROVÉHO MIKROVLNNÉHO SNÍMAČE	47
6. ZÁVĚR.....	52
LITERATURA.....	53
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	57
SEZNAM PŘÍLOH.....	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Vysílací a přijímací signál FMCW radaru [13]	15
1.2	Pole barevných filtrů [16]	18
2.1	IWR6843AoPEVM [22]	21
2.2	System Interconnect [24]	23
2.3	Blokové schéma procesorového subsystému [24]	24
2.4	Blokové schéma hodinového subsystému [21]	25
2.5	Blokové schéma vysílacího subsystému [21]	26
2.6	Blokové schéma přijímacího subsystému [21]	26
2.7	Blokové schéma hardwarového akcelerátoru [25]	27
3.1	Processing chain dema Counting People [27]	31
3.2	Blokové schéma vizualizace dema Counting People [29]	32
3.3	Chirp [29]	34
3.4	Geometrie systému [2]	38
3.5	Stavový diagram detekovaných osob [27]	39
3.6	Půdorys chodby a znázornění scénáře	41
3.7	Vizualizace detekce osob a trajektorie pohybu	42
5.1	Chodba a pozice mikrovlnného radarového snímače	48
5.2	Model držáku se snímačem v prostředí Solidworks	49
5.3	Vytištěné části držáku	49
5.4	IWR6843AoPEVM uvnitř držáku	50
5.5	Průchod osoby a vzniklé vibrace dovřením dveří	51

SEZNAM TABULEK

4.1	Porovnání metod detekce osob [21][22][23]	46
-----	---	----

ÚVOD

Práce se zabývá problematikou detekcí osob v zájmových zónách a zpracováním získaných dat radarem. Specificky se jedná o data získaná mikrovlnným radarovým snímačem mmWave od společnosti Texas Instruments. Zpracování radarových dat probíhá přímo v čipu IWR6843AoP, který obsahuje hlavní řídicí procesor zařízení, radarový procesor, digitální signálový procesor a hardwarový akcelerátor. Integrací těchto komponent lze zpracovat získaná radarová data, vyhodnotit aktuální polohu osoby a také její trajektorii pohybu přímo v zařízení. Následně jsou tyto zpracovaná data přeneseny do počítače, ve kterém jsou vizualizačním programem vyobrazeny.

První kapitulu lze považovat za teoretický úvod, neboť je v ní popsána podstata využívaných metod pro detekci osob v zájmových zónách. Popisuje využívané snímače pro detekci osob – radarové, lidarové, kamerové a ultrazvukové snímače. Blíže je popsán CW a FMCW radar, neboť řešení této práce navazuje na jejich principy funkce.

V druhé kapitole je popsáno řešení a vybrané zařízení pro detekci osob. Bylo vybráno zařízení IWR6843AOPEVM, které splňuje veškeré hardwarové a softwarové požadavky pro implementaci detekce osob v zájmových zónách jako vestavěný systém.

Třetí kapitola se zabývá simulací funkce detekce osob a jejich trajektorie na scénáři fronty u pokladny. Je popsán využitý software a jeho funkce je ověřena simulací scénáře. Součástí této kapitoly je popis scény a postup měření mikrovlnným radarovým snímačem.

Čtvrtá kapitola shrnuje výsledky simulace a její průběh. Obsahem je také porovnání existujících systémů pro detekci osob v zájmových zónách. Jsou zmíněny výhody a nevýhody jednotlivých metod.

Pátá kapitola definuje a rozebírá možné způsoby cílové implementace vybraného mikrovlnného radarového snímače a následně je provedeno ověření funkce na cílové platformě pro účel detekce osob a jejich trajektorie pohybu v zájmových zónách.

1. DETEKCE OSOB V ZÁJMOVÝCH ZÓNÁCH

Detekce osoby je získání informace o přítomnosti osoby ve snímaném prostoru. Důležitou součástí detekce osob bývá zájmová zóna, což je virtuální hranice dělicí prostor. Při detekci osob se zájmové zóny využívají pro určení části prostoru, která je pro určitou aplikaci snímání důležitá. Lze potom vyhodnocovat další užitečné informace ohledně sledovaného prostředí. Například kolik osob se v definovaném prostoru nachází, pohyb osob mezi zónami, rozpoznávání určitých lidí a určení přístupu osob v objektu.

Hlavním cílem detekce osob, jak už z pojmenování plyne, je detekovat osobu, a to ideálně v každém případě. Toho nelze dosáhnout vždy u člověka pomocí lidských smyslů, ani u řady snímačů. Zhoršené viditelné podmínky mohou člověku zhoršit schopnost vidět osoby. Stejně tak tomu může být u kamerového systému, který má za cíl detekovat osoby. Vznikají tedy stavy, ve kterých při pozorování prostoru osobu nedetekujeme, i přesto, že se tam skutečně vyskytuje [1].

Na druhé straně může dojít k chybné detekci. Může nastat při použití PIR snímače jako detektoru osob. Tento snímač funguje jako přijímač infračerveného záření, které odpovídá tělesné teplotě člověka. Jsou složeny z pyroelektrických desek v diferenčním zapojení, na kterých se měří změna napětí. Při pohybu teplého objektu vznikne na deskách náboj a podle měřeného elektrické napětí se vyhodnotí přítomnost osoby ve snímaném prostoru. Pokud použijeme tento princip, tak nemáme jistotu, že se skutečně jedná o člověka. Takový detektor může reagovat i na pohyb zvířete, či jiného teplého objektu. U jiných snímačů, například u radarových, může docházet k chybné detekci odrazy a rušením. Tato chybná detekce se nazývá ghosting [2].

V případě detekce osob se musí předem správně definovat co má snímač sledovat a podle čeho vyhodnocovat přítomnost osob. Pro detekci osob lze v dnešní době použít řadu způsobů a technologií. Každá metoda a technologie má své specifické uplatnění, a proto je potřeba porozumět jejich funkci pro využití ve správné aplikaci.

Nejčastěji využívané snímače, které jsou schopné detekovat osoby v zájmových zónách jsou kamery. Vychází se z podobnosti s lidským okem a využívá se znalostí optiky. Na snímací čip dopadá odražené světlo od objektů, které je nejdříve usměrněno soustavou čoček – neboli objektivem a případně vyfiltrováno na světlo v požadovaném spektru. Detekcí osob se zabývá obor počítačového vidění. Blokově lze řetězec detekce osob rozdělit na zachycení obrazu snímačem, předzpracování obrazu, segmentace, popis a klasifikace.

Lidar také funguje na optickém principu. Místo přijímání odraženého světla z prostředí využívá vyzařování laserového paprsku do prostoru. Prosvítí celý snímaný prostor a přijímá odražené paprsky. Zjednodušeně si lze představit Lidar jako laserový

skener prostředí. Na základě doby letu paprsku určí vzdálenost a vytvoří z odrazových bodů vzdálenostní mapu.

Sonary jsou ultrazvukové snímače, které pracují na vyšších frekvencích, než je slyšitelné pásmo a využívají přenosu signálu mechanickým rozkmitáním média. Podle doby šíření signálu lze určit vzdálenost od odraženého objektu. Oproti jiným způsobům detekce jsou méně přesné a praktické užití detekce osob je značně omezené [3]. Příklad užití jako detektoru osob je sledování pohybu potápěčů pod vodou.

Radary využívají pro přenos signálu elektromagnetickou vlnu. Pracují na vyšších frekvencích než ultrazvukové snímače. Některými materiály je rádiová vlna schopna projít skrz, a tedy jejich umístění může být skryto před zrakem pozorovatele [4].

U všech těchto metod je pro detekci osob nutné využívat algoritmů. Snímačem lze prostor pouze snímat, ale pro detekci osob je nutné implementovat potřebný hardware, který tyto snímaná data interpretuje. Tento hardware musí být dostatečně výkonný, aby dokázal zpracovat data samostatně jako vestavěný systém.

1.1 Ultrazvukové snímače

Ultrazvukové snímače jsou elektronická zařízení, která vysílají a přijímají zvukové vlny ve frekvencích vyšších, než je pásmo slyšitelnosti. Jedná se o frekvence vyšší než 20 kHz. Rychlost šíření zvuku je závislá na tlaku, teplotě a vlhkosti. Protože se jedná o mechanické vlnění, je jejich využití možné pouze v určitém médiu. Ve vakuu nejsou částice, které by šlo rozkmitat a vyvolat zvukovou vlnu. Rychlost šíření ultrazvukového signálu je omezena vybraným médiem. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu je okolo 300 m/s, ve skle a některých kovech se blíží rychlosti 5200 m/s [5].

Ultrazvuková zařízení využívají elektromechanických měničů, které rozkmitají membránu. Kmitáním membrány se rozkmitá médium (např. vzduch) a začne se šířit zvuková vlna prostorem. Tato vlna prostupuje médiem, dokud nenarazí na objekt, nebo dokud energie vlny není absorbována médiem.

Pokud odražená zvuková vlna od objektu dopadne na membránu přijímače, je membrána rozkmitána a vhodnou metodou se převede na elektrický signál.

Pro vyhodnocení vzdálenosti se používá metoda ToF (Time of Flight). Měří se doba mezi vysláním a přijetím signálu. Pokud známe médium a rychlost šíření v něm, lze tuto vzdálenost vypočítat.

Způsob detekce vzdálenosti ultrazvukem se nazývá SONAR (Sound Navigation and Ranging). Je využíván pro detekci objektů ve slané vodě, neboť zde u zvukových vln nedochází k tak velkému útlumu jako u rádiových vln [6].

1.2 Radarové snímače

Zkratka RADAR vyjadřuje Radio Detection and Ranging, neboli rádiové rozpoznávání a zaměřování. Radarové snímače jsou zařízení, která vysílají a přijímají odražené elektromagnetické vlny. Měří vzdálenost a pozici objektů, od nichž došlo k odrazu.

Pracují na frekvencích od desítek MHz až po stovky GHz. Nižší frekvence se u radarů využívají pro detekci na velmi velké vzdálenosti. Vyšší frekvence u sensoriky, například u autonomních vozidel. Poskytují lepší rozlišení, a tedy i přesnější informaci o okolním snímaném prostředí [7].

První zmínky o principu detekce radarem lze dohledat ke konci 19. století. Ve 30. letech 20. století byla tato technologie vyzkoušena pro detekci letadel ve Spojených státech, Spojeném Království a Francii. K urychlenému vývoji a praktickému nasazení došlo během 2. světové války, neboť detekce nepřátelských letadel přinesla jeho provozovateli taktickou výhodu a odstranila moment překvapení [8].

Prvním typem radaru se stal pulsní radar. Nejdříve pulsní radar vyšle vysílačem puls a poté čeká na příjem odraženého pulsu od objektu. Využívá pouze jednu anténu jako vysílač a zároveň jako přijímač. Po vyslání pulsu očekává echo (odražený signál) a anténa začne pracovat jako přijímač [9].

Index lomu vzduchu je asi 1,0002926 a tedy elektromagnetická vlna šířící se vzduchem dosahuje téměř rychlosti světla. Se známou rychlostí šíření signálu a určením doby mezi vysláním a přijetím pulsu lze určit vzdálenost od odraženého objektu.

1.2.1 CW radar

CW (Continuous Wave) radar neboli Dopplerův radar měří rychlost pohybujících se objektů na základě změny frekvence odraženého signálu podle Dopplerova jevu. Tato frekvence v závislosti na směru pohybu buď narůstá nebo klesá.

Obsahuje dvě antény, jednu vysílací a druhou přijímací. CW radar kontinuálně vysílá a přijímá rádiový signál.

CW radar vysílá signál o konstantní frekvenci a amplitudě anténou vysílače a následně přijímá odražený signál na anténě přijímače. Harmonický signál lze předepsat následujícím vztahem

$$f(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.1)$$

kde $f(t)$ představuje signál v časové oblasti, A je amplituda signálu, ω je úhlový kmitočet a φ je fázový posun signálu.

Z vysílací antény radaru se šíří prostorem elektromagnetická vlna. Při střetu s překážkou se odražený signál vrací zpět a je detekován přijímačem. Tento fázový posun platí pouze pro překážku, která se **nepohybuje** a lze předepsat následujícím vztahem

$$\varphi = -2\pi \cdot \frac{2d}{\lambda} \quad (1.2)$$

kde φ je fázový posun signálu, d je vzdálenost, λ je vlnová délka signálu. Vycházíme z poměru délky oběhu kruhu a vlnové délky. Vzdálenost je násobena dvěma, protože musíme počítat s tím, že vlna urazí nejdříve vzdálenost od vysílače k překážce a poté vzdálenost od překážky k přijímači. Tedy dvojnásobek vzdálenosti. Při odrazu dochází ke změně fáze o 180° , proto násobíme mínusovým znaménkem [10].

Měření vzdálenosti je možné pouze za předpokladu, že je měřený objekt ve vzdálenosti na jednu vlnovou délku signálu [11]. Větší vzdálenost nelze ze změny fáze přesně určit. **CW radary se používají především na měření rychlosti** pohybujících se objektů.

Pokud se překážka **pohybuje**, dochází ke změně vzdálenosti překážky od radaru, a tedy i změny fázového posunu v čase, což je předepsáno následujícím vztahem

$$\varphi(t) = -2\pi \cdot \frac{2d(t)}{\lambda} \quad (1.3)$$

kde $\varphi(t)$ je změna fáze v čase, $d(t)$ je změna vzdálenosti v čase, λ je vlnová délka signálu. Tato změna fáze v čase je dána změnou dvou sinusových průběhů a má také sinusový průběh. Dopplerova frekvence je dána následujícím vztahem

$$|f_D| = \frac{2v}{\lambda_T} = \frac{2v \cdot f_T}{v_c} \quad (1.4)$$

kde f_D je Dopplerova frekvence, f_T je frekvence vyslaného signálu, λ_T je vlnová délka vyslaného signálu, v_c je rychlost světla a v je rychlost pohybu objektu, od něhož došlo k odrazu. Z tohoto vztahu lze vyvodit rychlost pohybujícího se objektu.

Výsledná frekvence na přijímači se vlivem Dopplerova jevu bude měnit v závislosti na směru pohybu objektu. Pokud se bude objekt vzdalovat, bude frekvence klesat. Pokud se bude objekt přibližovat k radaru, frekvence bude narůstat.

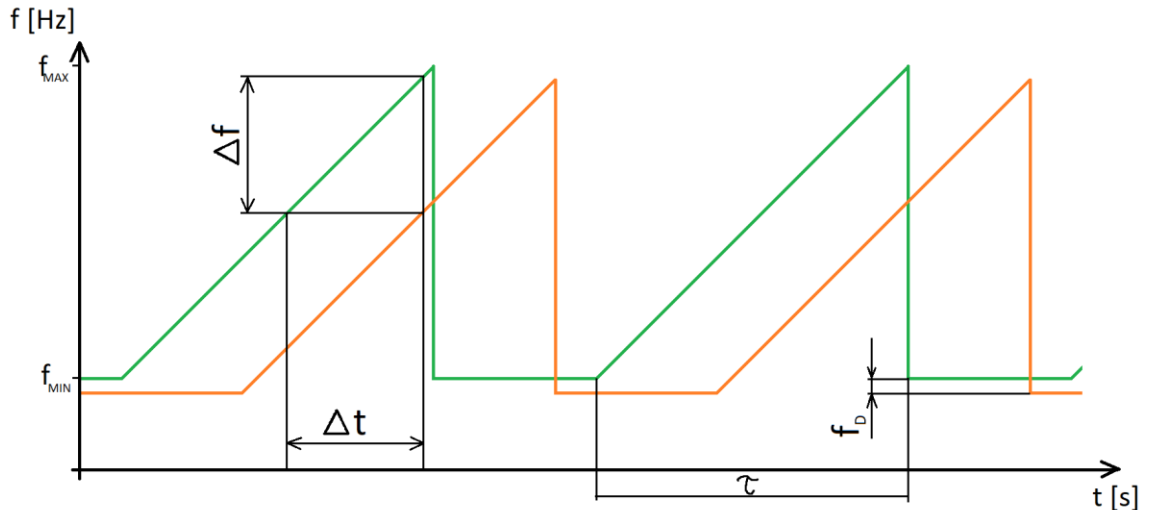
Využití CW radarů

- Měření rychlosti pohybujících se objektů
- Měření malých vzdáleností do jedné vlnové délky signálu

1.2.2 FMCW radar

FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radar měří vzdálenost a rychlost objektů. Přidáním více antén lze odhadnout i úhel, ze kterého se echo (odražený signál) vrátilo do přijímače. Tento úhel se nazývá Angle of Arrival (AoA), neboli příchozí úhel. Zapojení s vícero anténami je označováno jako MIMO (Multiple Input Multiple Output).

FMCW radar je modifikace CW radaru s frekvenční modulací. Využívá lineární změny frekvence v čase, která je uvedena na obrázku 1.1 [12].



Obrázek 1.1 Vysílací a přijímací signál FMCW radaru [13]

Zeleně je vyobrazen vysílaný signál a oranžově je zobrazen signál na anténě přijímače. Radar vysílá signál, jehož frekvence narůstá postupně v čase od f_{MIN} až po f_{MAX} . Tuto časovou oblast nazveme chirp a bude označena τ . Časový rozdíl mezi vyslaným signálem a ozvěnou je označen jako doba Δt . Vysílaný signál figuruje jako referenční frekvence pro výpočet rozdílu frekvence Δf . Ve stejném čase je mezi signálem na přijímací anténě a referenčním signálem tento rozdíl frekvence Δf .

Na obrázku 1.1 je znázorněna Dopplerova frekvence f_D . Pokud se snímaný objekt pohybuje, dochází zde ke změně frekvence na přijímači podle Dopplerova jevu. Rozdíl frekvence Δf se bude měnit o hodnotu Dopplerovy frekvence f_D v závislosti na směru pohybu objektu.

Funkce je následující. Syntetizér generuje signál s narůstající frekvencí v čase od minimálního kmitočtu f_{min} po maximální kmitočet f_{max} . Tento signál (chirp) vyzařuje z vysílací antény a šíří se prostorem. Při střetu s objektem se elektromagnetická vlna odrazí. Tento odražený signál je po určité době Δt přijat na přijímací anténě radaru. Mixer vytvoří z vysílacího signálu a přijatého signálu mezifrekvenční signál, který má frekvenci rozdílu frekvencí těchto dvou signálů. Jeho fázový posun je také rozdílem fázových posunů obou signálů.

Pokud se detekovaný objekt nepohybuje, bude frekvence mezifrekvenčního signálu konstantní v časovém okně, kdy je vyslán chirp a přijímán odražený signál. Tedy pokud je vyslán signál vysílací anténou a zároveň dochází k příjmu odraženého signálu na přijímací anténě.

Při detekci více objektů získáme více signálů, které se odrazili od vícero objektů. Fourierovou Transformací (FT) provedeme dekompozici mezifrekvenčního signálu a získáme patřičné peaky. Každý peak odpovídá harmonickému signálu s určitou frekvencí a každá frekvence náleží objektu v určité vzdálenosti.

Zjišťování rychlosti pohybujícího se objektu FMCW radarem se provádí vysláním dvou chirpů. Porovnává se pak změna fáze u těchto chirpů. Známe dobu trvání mezi vysláním prvního a druhého chirpu. Rychlost pohybujícího se objektu se vypočítá následujícím vzorcem

$$v = \frac{\lambda \Delta \varphi}{4\pi T_c} \quad (1.5)$$

kde λ je vlnová délka signálu, $\Delta \varphi$ je rozdíl fáze signálů, T_c je doba mezi vysláním prvního a druhého chirpu.

Angle of Arrival (AoA) lze získat se zapojením vícero přijímacích antén. Protože máme více přijímacích antén, které jsou od sebe v určité vzdálenosti, bude vzdálenost odraženého signálu od odraženého objektu k anténě 1 jiná než k anténě 2. Signály přijaté anténou 1 a 2 budou mít rozdílnou fázi a z této fáze lze určit AoA.

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \Delta \varphi}{2\pi l} \right) \quad (1.6)$$

kde θ je příchozí úhel (AoA), λ je vlnová délka signálu, $\Delta \varphi$ je rozdíl fáze signálů, l je vzdálenost mezi dvěma anténami. Tato vzdálenost mezi dvěma anténami je dána konstrukcí antény.

Využití MIMO FMCW radarů

- Měření rychlosti pohybujících se objektů
- Měření vzdálenosti
- Odhad příchozího úhlu od odraženého objektu

1.3 Počítačové vidění

Systemy počítačového vidění zachycují obraz snímaného prostředí, který automaticky zpracují a podle využitých algoritmů z něj vyhodnocují hledanou informaci.

Obrazová informace je dvourozměrnou reprezentací snímaného prostředí. Je získávána z transformace světelného záření na elektrickou veličinu a posléze do elektronického formátu [14].

Pro zpracování dat je nutné světelné záření převést do formy, s kterou mohou pracovat dnešní procesory, a proto musí být provedena digitalizace obrazu. Každému snímanému bodu jsou dány hodnoty jasu podle intenzity dopadajícího světla. Celkový obraz je převeden do formátu o požadované struktuře. Tím může být například matice jasových hodnot. Následně obraz projde předzpracováním, což zahrnuje zvýraznění rysů, potlačení šumu a zkreslení. Segmentace obrazu oddělí hledaný objekt od okolí. Objekty jsou popsány dle určených znaků a poté klasifikovány a zařazeny do tříd.

Využití systémů počítačového vidění bývá často uplatňováno pro vizuální kontrolu jako je rozpoznávání objektů, počítání objektů, hledání defektů. Při snímání se musí hledět na řádné osvětlení objektu, aby byla vizuální informace o tvaru, popřípadě o barvě správně zachycena snímačem.

1.3.1 Kamerové snímače

Pro zachycení informace o obrazu se využívají kamery. Ty mohou být řádkové nebo plošné. Kamery snímají světelné záření prostředí. Jejich účelem je zachytit obraz snímaného prostředí a převést ho na elektronické data v určitém formátu.

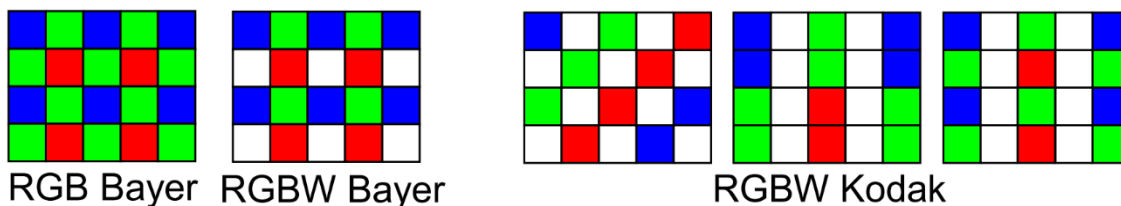
Princip zachycení obrazu scény je následující: Kamera disponuje objektivem, který je tvořen čočkou nebo soustavou čoček. Slouží k soustředění světelného záření na obrazový snímač. Mezi objektivem a obrazovým snímačem může být clona, infračervený (IR) a ultrafialový (UV) filtr. Clona slouží k regulaci, jaké množství světla projde a filtry zabraňují IR a UV záření prostoupit až na obrazový snímač. Filtry potlačují barevné zkreslení tím, že propustí pouze záření ve viditelném spektru. Obrazový snímač převádí světelné záření na elektrický signál.

Dnešní kamery využívají CCD (Charge Coupled Device) nebo CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) polovodičovou architekturu. Intenzita světla odpovídá velikosti náboje. Dopadající fotony na fotocitlivý prvek vytvoří náboj a tento náboj je nábojovým zesilovačem převeden na napětí [15].

Následuje blok zpracování obrazu, který řídí clonu a IR filtr pro správnou expozici snímku. Zpracuje zjištěná data z jednotlivých pixelů a pomocí komunikačního rozhraní je převede do formátu, s kterým lze nadále pracovat.

1.3.2 Barevné snímání obrazu

Způsobem uvedeným v 1.3.1, bychom získali pouze šedotónový obraz udávající intenzitu světelného záření. Pro zachycení informace o barvách se k obrazovému snímači přidává barevný filtr, který propustí světelné záření určité barvy. Záleží na použitém barevném modelu pro snímač obrazu. Tato barevná mozaika je označována jako Color Filter Array (CLA), neboli pole barevných filtrů. Nejznámější je RGB Bayer pro červenou (R), zelenou (G) a modrou (B). Využívá se také jeho modifikace RGBW Bayer, nebo různé varianty RGBW Kodak [16].



Obrázek 1.2 Pole barevných filtrů [16]

Při použití těchto CLA je zřejmé, že každý pixel snímacího čipu odpovídá pouze jedné barvě. Získáme tím oddělené barevné složky snímku. Pro složení barevného snímku se používá tzv. demosaicing. Jedná se o algoritmus, který tyto jednotlivé barevné složky skládá do barevného obrazu. Musí přitom doplnit „prázdné“ pixely jednotlivých barevných složek. Například u RGB Bayer snímá každý 2. pixel informaci o zelené a demosaicing se postará o interpolaci pixelů, pro které chybí informace o zelené, neboť tento pixel snímá jinou barvu.

Existují také kamerové čipy, které toto doplňování barevných pixelů řešit nemusí. Používají totiž několika čipů pro každou barevnou složku, nebo i jiných konstrukcí, které využívají fyzikálních vlastností o propustnosti určitých vlnových délek křemíku jako je Foveon X3.

1.3.3 Speciální a multispektrální kamery

Kamery nemusí vždy snímat prostředí ve viditelném spektru. Veškeré existující objekty ve Vesmíru, které mají teplotu vyšší než 0 Kelvin jsou zdrojem záření.

Termovizní kamery snímají prostředí v infračerveném spektru. Obsahují obvody zpracování signálu pro vytvoření barevného obrazu odpovídajícího teplotě snímaných objektů.

Multispektrální kamery snímají pomocí speciálních filtrů i v několika vlnových délkách. Následně lze pohlížet na snímek ve všech různých spektrech, kterými multispektrální kamera disponuje. Snímáním a pohledem z jiných vlnových délek lze sledovat a extrahovat informace, které nejsou ve viditelném spektru patrné. Využití se nachází ve vojenské technice, satelitních snímcích.

Inteligentní kamery disponují výkonným hardwarem pro uskutečnění detekce

pomocí strojového vidění. Jedná se již o systém s veškerým potřebným hardwarem pro detekci osob a jiných způsobů detekce.

PC systémy strojového vidění mohou využívat většího výkonu a zapojení více kamer. Oproti již uvedeným metodám jsou PC systémy více modulární.

1.4 LiDAR

Zkratka LiDAR označuje Light Detection And Ranging, neboli detekce a měření vzdálenosti světlem. LiDAR detekuje objekty využitím laseru. Laser je zdroj světla, který emituje fotony v koherentním paprsku. Koherentní paprsek světla je forma vlnění, která má stejnou frekvenci, fázi a směr kmitání. Využívají světla v ultrafialovém, viditelném nebo infračerveném spektru.

Vzdálenost je měřena metodou ToF (Time of Flight), neboli doba letu. Měří se doba od vyslání paprsku po přijetí jeho odrazu od objektu. Ze známé rychlosti světla se pak stanoví vzdálenost od odraženého objektu.

LiDAR jako zařízení může pracovat buď jako snímač linie nebo prostorově jako skener. Zpracováním dat o vzdálenosti od odražených objektů lze vytvořit prostorovou interpretaci snímané scény. Někdy se LiDAR také označuje jako 3D Laserové skenování [17].

Konstrukci lze rozdělit na tzv. Solid State LiDAR nebo na mechanické LiDAR. Mechanické využívají otočné konstrukce. Ta jim umožňuje se zcela otočit dokola a pokrýt celý snímaný prostor, tedy jejich zorné pole je 360°.

Solid State LiDAR nevyužívá otočné konstrukce, a proto je jeho zorné pole menší. V praxi se proto využívá fúze několika snímačů pokrývajících vícero směrů, čímž se docílí obdobného zorného pole jako u mechanických otočných konstrukcí. Cena samotného Solid State LiDARu je násobně menší než u mechanických a pohybuje se mezi 250 až 500 dolary [18][19][20]. Tato cena se již blíží ceně radarových snímačů a pokud bude nadále v budoucnosti klesat mohla by být důležitým kritériem v širším užití těchto snímačů pro detekci osob a jiných způsobů detekce. Zatím jsou stále cenově násobně dražší než radarové snímače.

Snímaní prostoru je s nimi mnohem přesnější než u radarových snímačů. Například FMCW radar s šířkou pásma 4 GHz dosahuje rozlišovací vzdálenosti dvou bodů asi 4 mm. Oproti tomu LiDAR dokáže natáčet laserový paprsek asi o 0,1° a tím získat mnohem detailnější scénu.

Využití je nejen pro měření vzdáleností, mapování prostoru a v automobilovém průmyslu, ale i v řadě jiných oborů jako je topografie, meteorologie a astronomie.

2. VYBRANÉ ŘEŠENÍ

Detekci osob v zájmových zónách lze uskutečnit pouze se zařízením, které je schopné ve snímaném prostoru zjistit informaci o přítomnosti osoby ze získaných dat. Pro praktické využití jako snímače pro detekci osob a trajektorie jejich pohybu musí být této detekce dosaženo v reálném čase. Takové zařízení musí disponovat dostatečně výkonným hardwarem pro další zpracování snímaných dat samostatně jako vestavěný systém.

Nejvhodnějším typem snímače pro detekci osob a jejich trajektorie pohybu je mikrovlnný radarový snímač. Je vhodným kandidátem z důvodu nízké ceny a adekvátní schopností snímat prostor a detekovat osoby. Cena lidarových zařízení je násobně dražší. LiDAR dokáže detailněji snímat prostor, ale pro zjištění informace o přítomnosti osoby není zapotřebí takové přesnosti. Pro detekci osoby stačí přibližná velikost objektu, která odpovídá člověku, a ne každý její detail.

Ultrazvukové snímače se na detekci osob téměř nevyužívají, kromě specifických případů uvedených v kapitole 1. Nejsou tak přesné a používají se na detekci větších objektů.

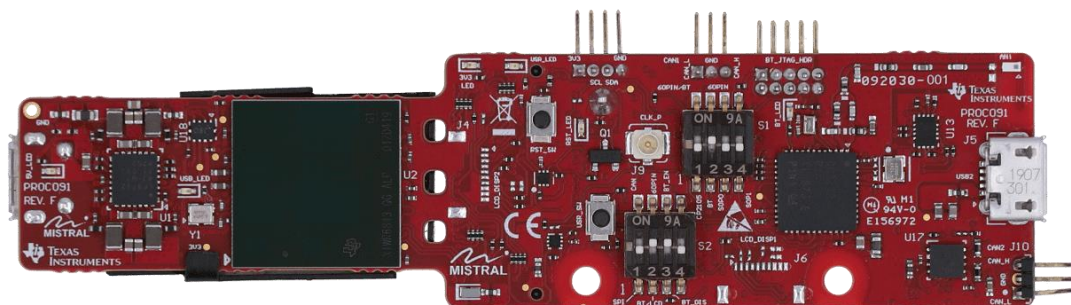
Kamerové systémy jsou dobrým konkurentem z hlediska ceny a jednoduchosti, ale je nutné k nim přidat navíc blok zpracování dat pro detekci osob. To značně zvyšuje jejich výslednou cenu, pokud chceme realizovat detekci přímo na místě bez přenášení dat do jiného zařízení. Snímanou scénu je nutné u kamer správně osvětlit [1].

Vedoucím práce byl vybrán mmWave radarový snímač IWR6843AoPEVM od společnosti Texas Instruments.

2.1 IWR6843AoPEVM

Jedná se o inteligentní radarový snímač, který integruje několik klíčových funkcí pro detekci osob do jednoho čipu IWR6843AoP [21].

S pomocí tohoto zařízení lze snímat okolí, radarová data zpracovat a vyhodnotit. Toho je dosaženo integrací FMCW radaru, digitálního signálového procesoru C674x (DSP) a procesoru ARM Cortex R4F. Díky této integraci komponent do jednoho celku může detekce osob fungovat samostatně bez dalších externích systémů.



Obrázek 2.1 IWR6843AoPEVM [22]

Na obrázku 2.1 je vyobrazeno zařízení IWR6843AoPEVM ze snímací strany. Velký tmavý čtverec vlevo je čip IWR6843AoP. Obsahuje vestavěné vysílací a přijímací antény, již zmíněné procesory a radarový subsystém. Z druhé strany je přimontovaný chladič. Pro představu o velikosti jsou rozměry čipu IWR6843AoP 15x15 mm.

Vpravo je část desky, která slouží jako rozhraní pro zapojení jiných desek a dalších výstupů dat. Důležité jsou také přepínače pro přenastavení módů funkce. Toho lze využít při rozšíření s jinými deskami jako je například MMWAVEICBOOST nebo DCA1000EVM pro sběr dat.

Po nahrání programu plní požadovanou funkci lze pravou stranu odstranit a tím významně zmenšit velikost zařízení. Toto místo pro rozdělení je napravo od čipu IWR6843AoP vyznačené třemi dírami skrz desku.

Označení zařízení IWR6843AoPEVM

IWR (Industrial mmWave Radar) je průmyslový milimetrový radar.

6843 je označení konkrétního typu čipu.

AoP (Antena on Package) je označení pro integrované antény na čipu.

EVM (Evaluation Module) neboli vyhodnocovací modul.

Čip IWR6843AoP je rozdělen na tři subsystémy.

Main Sub-System (**MSS**)

DSP Sub-System (**DSS**)

RF/analog Sub-System (**RSS**) - radarový subsystém

Maximální vzdálenost detekce závisí na konfiguraci, pro velký objekt typu automobil je to asi 100 metrů. Radarový subsystém operuje na frekvencích 60 GHz až 64 GHz. Maximální rozlišení radaru je 3,75 cm, čehož lze dosáhnout při šířce pásma 4 GHz. Zorný úhel radaru je 130°.

Komunikační rozhraní EVM:

2x SPI

2x UART

6 ADC kanálů

1x CAN-FD

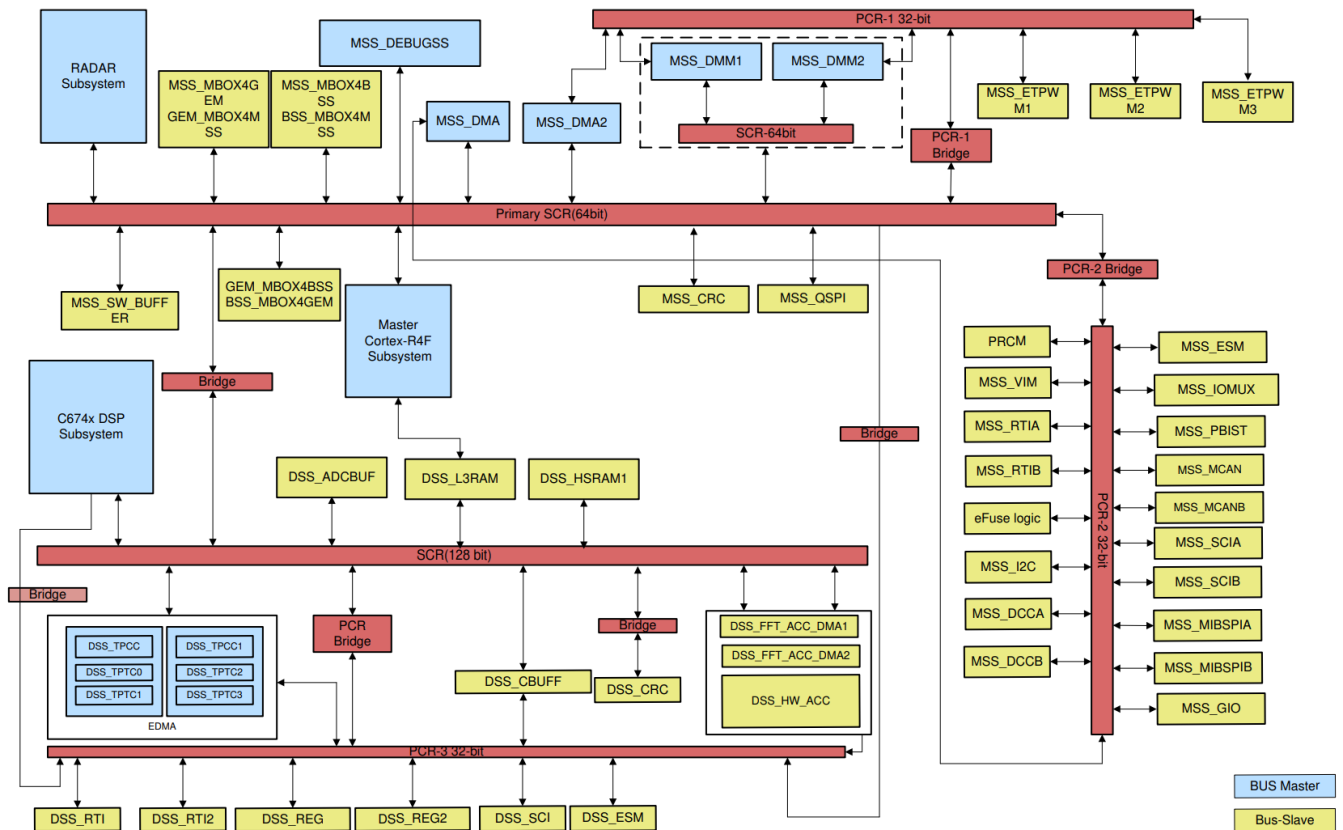
1x I²C

2lane LVDS pro raw data z radarového subsystému

+GPIO (48x)

2.2 System Interconnect

Klíčovou sběrnici, která zprostředkovává komunikaci mezi všemi subsystémy zařízení je System Interconnect. Ta je popsána protokoly VBUSP a VBUSM od společnosti Texas Instruments. Pro propojení určitého systému je využito škálovatelnosti sběrnice pomocí těchto protokolů [23].



Obrázek 2.2 System Interconnect [24]

SCR (Switch Central Resources) definuje šířku sběrnice, frekvenci, připojený počet zařízení typu Master a Slave a také používaný protokol.

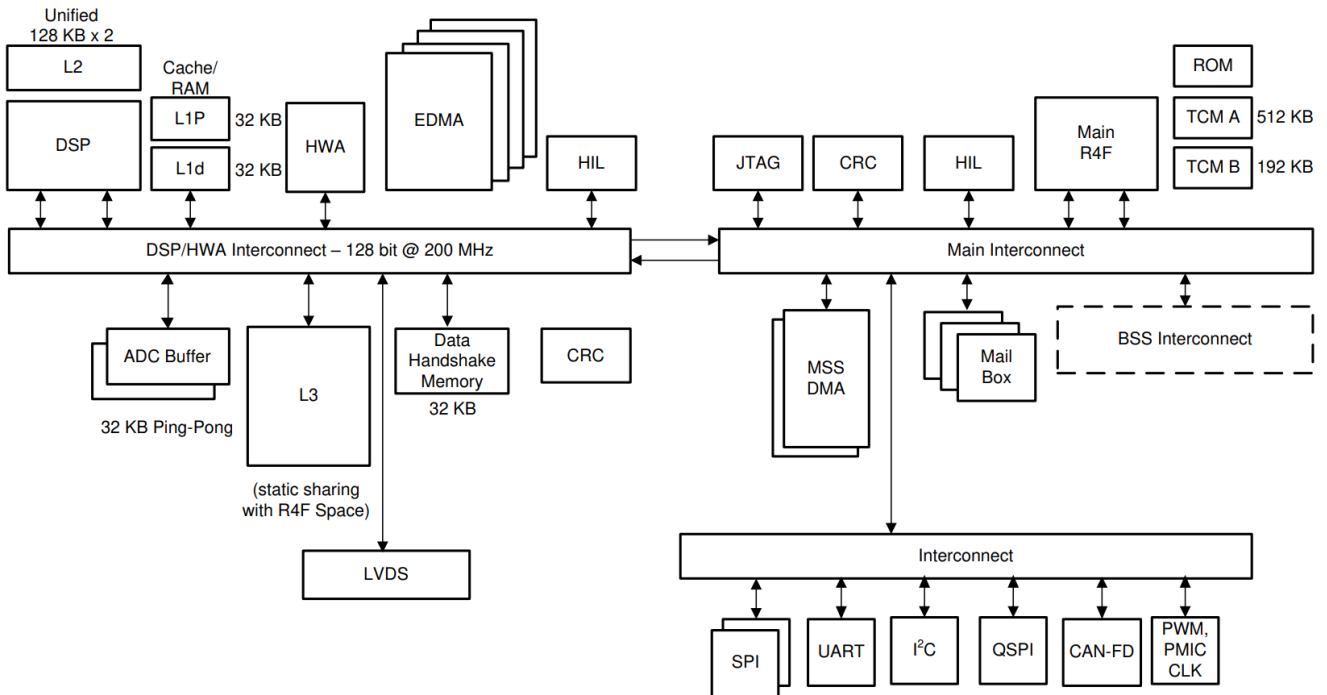
Mosty zajišťují spojení SCR pro různé frekvence, různé šířky a také mezi různými protokoly (VBUSP, VBUSM).

VBUSP stanovuje základní pravidla komunikace po sběrnici. Protokol je označován jako Point-to-point, pended interface protocol. Dovoluje provádět pouze jeden požadavek v jednom čase.

VBUSM je nadstavbou VBUSP a dovoluje provádět pipelining více požadavků po sběrnici. Tím lze docílit rychlejšího přenosu a zpracování dat a vyššího výkonu celkového systému na úkor větší složitosti architektury.

2.3 Procesorový subsystém

Procesorový subsystém je tvořen MSS a DSS. Obrázek 2.3 zobrazuje blokové propojení jednotlivých komponent Procesorového subsystému přes sběrnici Interconnect. Nalevo je vyobrazen DSS a napravo MSS. Oba tyto subsystémy lze naprogramovat uživatelem.



Obrázek 2.3 Blokové schéma procesorového subsystému [24]

DSS obsahuje DSP označované jako C674x DSP, což je označení pro modul TMS320C674x a dalších bloků pamětí RAM L1P, L1d a L2. DSS je tvořeno čtyřmi Enhanced-DMA pro rychlý přenos dat, LVDS rozhraním pro výstup měřených dat. ADC Buffer slouží k získávání uložených dat z Radarového subsystému. CRC pro detekci chyb při přenosu dat. Handshake paměť pro stanovené parametry komunikace po sběrnici.

Paměť L3 je sdílená mezi procesory ARM a DSP. Oba subsystémy lze připojit na HIL (Hardware in the Loop) a získávat simulovaná radarová data bez účasti Radarového subsystému.

HIL se používá pro otestování funkce vestavných systémů. Emulují se vstupní data a na nich se zkouší, zda je výstup správný. Výhodou může být otestování chování systému pro data, která nelze při reálném testování získat, a tak se zbavit chybných stavů.

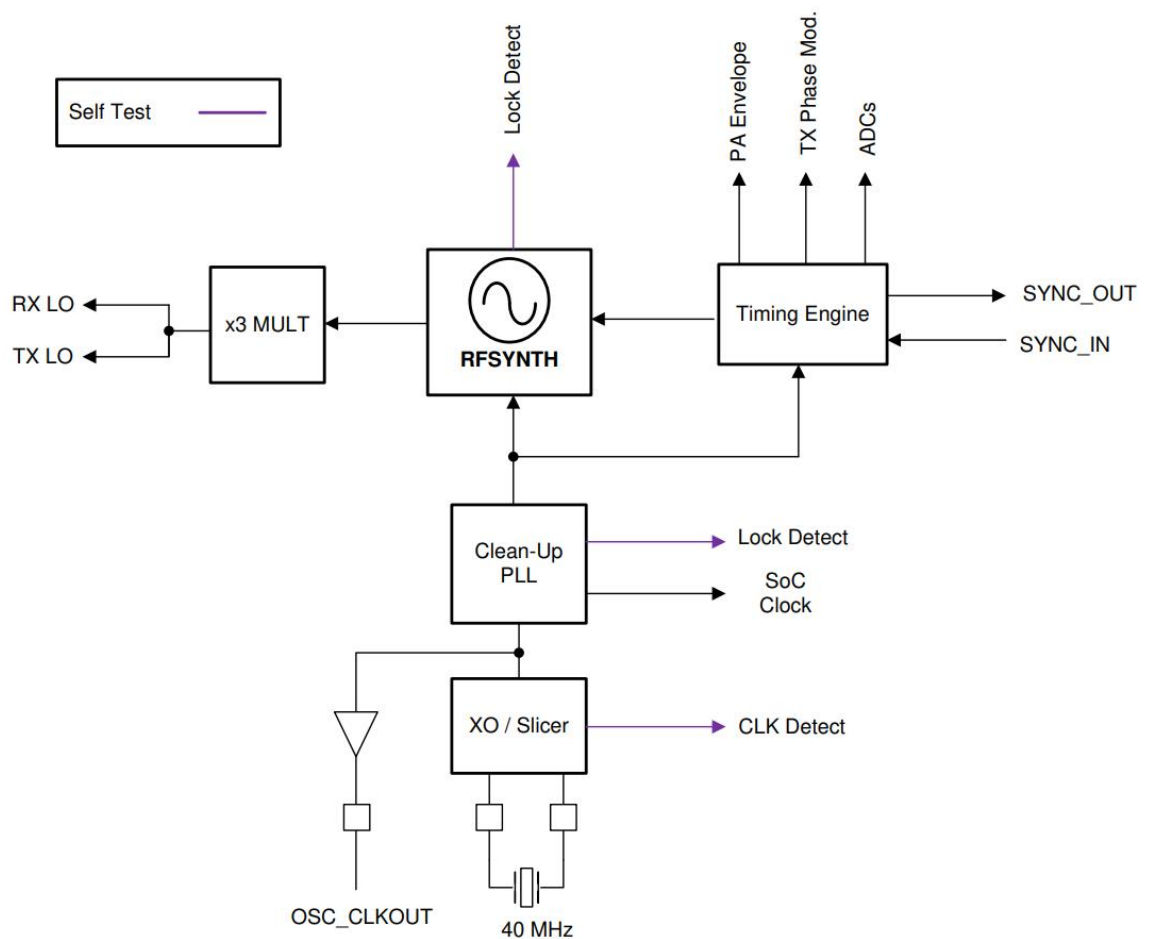
MSS je hlavní subsystém a řídí zařízení a příslušné rutiny. MSS obsahuje procesor ARM Cortex R4F, příslušné paměti RAM TCM A, TCM B a ROM, připojení periférií zařízení, CRC, DMA, Mail Box modul pro mezi procesorovou komunikaci. Část paměti programu R4F je vyhrazena pro řízení RSS.

2.4 Radarový subsystém

RSS je rozdělen na Hodinový subsystém, Přijímací subsystém a Vysílací subsystém.

2.4.1 Hodinový subsystém

Hodinový subsystém provozuje generování signálu o frekvenci 60-64 GHz. Krystal rezonuje s frekvencí 40 MHz. Tato frekvence je násobena obvodem PLL, který je připojen do syntetizéru. PLL také poskytuje referenční hodinový signál pro hlavní procesor po probuzení. Timing Engine slouží k modulaci signálu pro vytvoření potřebného průběhu. Výstup ze syntetizéru je následně vynásoben násobičem frekvence.

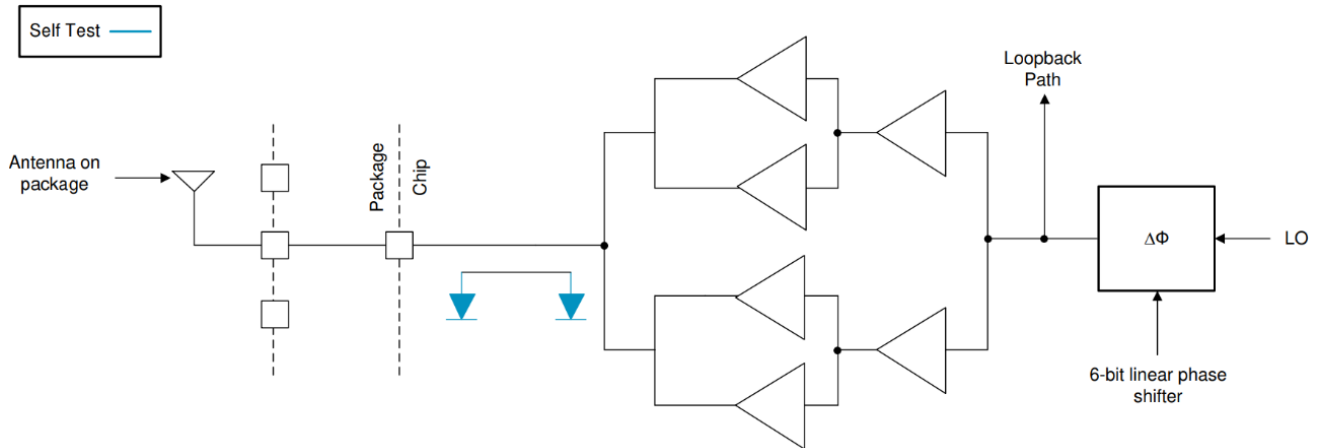


Obrázek 2.4 Blokové schéma hodinového subsystému [21]

2.4.2 Vysílací subsystém

Vysílací subsystém je tvořen třemi vysílacími kanály. Antény jsou součástí čipu. Každý vysílací kanál má vlastní řídicí obvod fáze a amplitudy signálu.

Normální režim využívá současně pouze dvou kanálů. Souběžné vysílání ze všech tří antén je možné pouze ve speciálním režimu, pokud je proveden bypass LDO a sníženo napájecí napětí na 1 V.

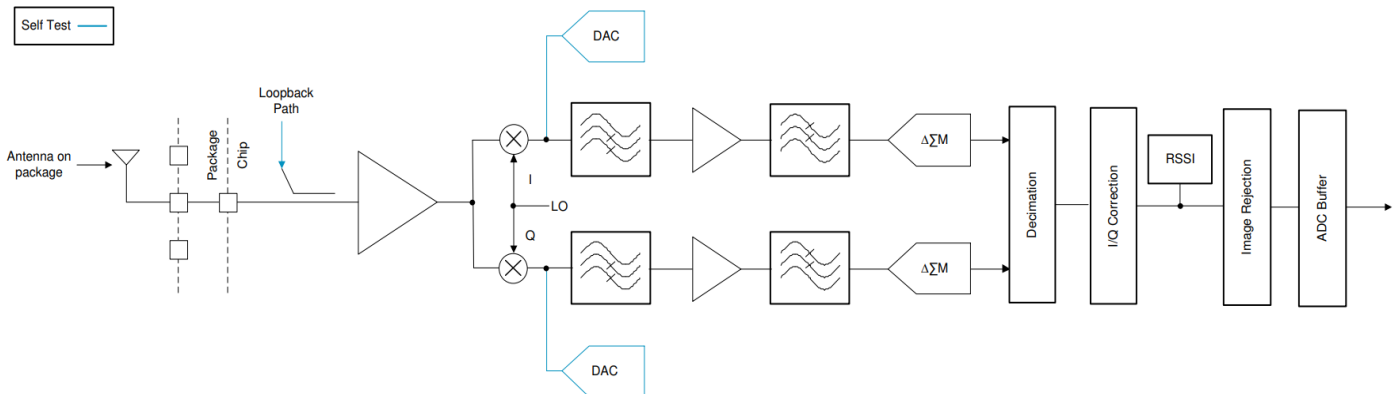


Obrázek 2.5 Blokové schéma vysílacího subsystému [21].

2.4.3 Přijímací subsystém

Přijímací subsystém je tvořen čtyřmi přijímacími kanály. Každý kanál je složen ze zesilovače s nízkým šumem (LNA), mixéru, filtru mezi-frekvence/mezifrekvenční filtr (IF filter), decimace signálu a A/D převodníku, I/Q korekce.

Decimací signálu se snižuje vzorkovací frekvence, čímž se zvětší frekvenční rozlišení při dekompozici signálu. I/Q korekční blok minimalizuje zkreslení fáze a amplitudy z důvodu nedokonalosti antén, kapacity obvodu. Normální režim využívá všech přijímacích kanálů, popřípadě lze jednotlivé kanály vypnout.



Obrázek 2.6 Blokové schéma přijímacího subsystému [21]

2.5 Hardwarový akcelerátor

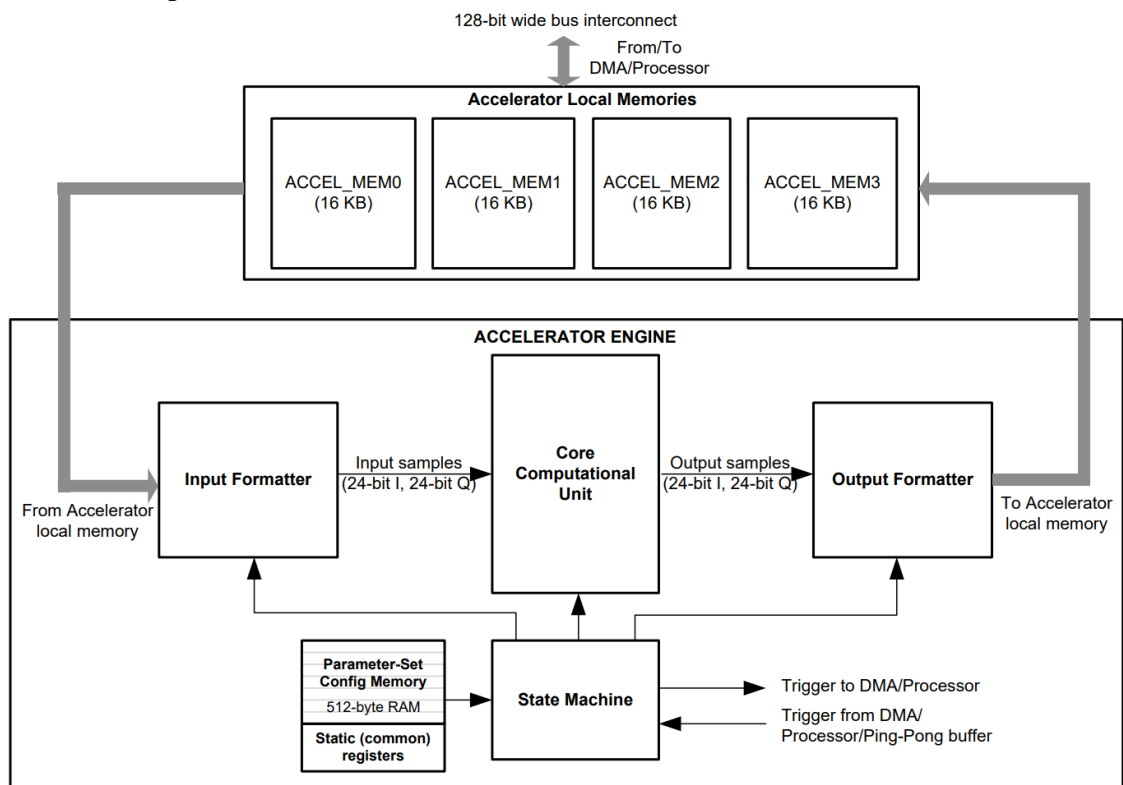
Radarový hardwarový akcelerátor provádí řadu často užívaných výpočetních operací zpracování signálu mimo hlavní procesor a tím odlehčuje jeho zatížení [25].

Na obrázku 2.6 je vyznačen obsah a blokové propojení hardwarového akcelerátoru.

Je složen ze čtyř lokálních pamětí. Pokud není nutné data předzpracovat DSP lze dedikovat dvě paměti pro sdílení s ADC vyrovnávací pamětí. Potom jsou data přenesena přímo z radarového subsystému bez řízení přenosu dat DMA.

Paměti jsou rozčleněny na vícero bloků, aby šlo provádět ping-pong mechanismus zápisu a čtení. Při hodinovém signálu se provede zápis do paměti 1 a čtení paměti 2. Při dalším cyklu se čte z paměti 1 a zapisuje do paměti 2 [26].

Konečný automat (State Machine) řídí činnost urychlovacího motoru (Accelerator Engine). Konkrétně začátek a konec operace, cyklení, handshake mezi akcelerátorem, DMA a hlavním procesorem.



Obrázek 2.7 Blokové schéma hardwarového akcelerátoru [25]

Vstupní formátovač (Input Formatter) řídí čtení vstupních vzorků vždy z jedné z lokálních pamětí. Provádí převod 16/32-bit vzorků na 24-bit komplexní vzorky dat.

Jádro výpočetní jednotky (Core Computational Unit) obsahuje výpočetní obvody pro provedení algoritmů FFT, CFAR-CA, binárního logaritmu, windowing. CFAR-CA (Constant False Alarm Rate – Cell Averaging) je algoritmus pro detekci objektu při působení šumu a rušení.

Výstupní formátovač (Output Formatter) řídí zápis výstupních vzorků z jádra výpočetní jednotky do lokální paměti. Provádí příslušné operace manipulace a převodu dat.

Paměť konfiguračních parametrů (Parameter-set configuration memory) je paměť RAM o velikosti 512 bytů. Slouží k přednastavení parametrů pro sekvenční operace konečného automatu, aby nemusel hlavní procesor často zasahovat.

3. SIMULACE

mmWave snímače od Texas Instruments mají širokou nabídku možných aplikací. Uživatel má možnost si vyvinout pro aplikaci vlastní řešení nebo vybrat již hotové řešení, pokud této aplikaci vyhovuje. Tyto demonstrace funkce senzoru se nazývají demo.

Pro vytvoření vlastního programu je v podstatě nutností použít desku MMWAVEICBOOST, neboť umožňuje debugging a rozšiřuje možnosti programování v Code Composer Studio. V této práci rozšiřující vývojová deska nebyla použita.

Byly použity výrobcem poskytnutá demo a u nich došlo k modifikaci konfiguračních souborů. Demo již byla vytvořena zkušenými pracovníky zabývajícími se detekcí pomocí radarů. Tento postup byl zvolen z důvodu jednodušší implementace pro zadanou aplikaci.

3.1 Souhrn softwarových nástrojů

mmWave SDK je soubor softwarových nástrojů, které mmWave sensory využívají. Dělí se na mmWave Suite a mmWave demo.

Suite obsahuje ovladače zařízení, rozdělení do abstraktních vrstev a provádění kódu pomocí API, definuje architekturu a komunikaci mezi subsystemy, firmware pro radarový subsystem, knihovny pro zajištění základní funkcionality a algoritmů.

Demo obsahuje již zmíněné demonstrace funkce senzoru, které jsou na Suite závislé.

mmWave Sensing Estimator je softwarový nástroj pro nastavení parametrů mmWave senzoru. Tímto nástrojem lze definovat zesílení na vysílacích a přijímacích anténách, šířku frekvenčního pásma, výkon vysílače, parametry scény jako je teplota, typ objektu, rozlišení, maximální rychlosti, útlum signálů, poměr signál-šum.

Zadáním těchto parametrů lze vygenerovat .cfg soubor, který definuje nastavení pro zařízení.

Na stránkách TI je volně dostupný ve webové verzi. Pro správnou funkcionality je potřeba přidat rozšíření do webového prohlížeče. Doporučuje se chrome-based prohlížeč.

mmWave Visualizer je softwarový nástroj pro vizualizaci měřených radarových dat.

V konfiguračním okně lze přenastavit některé parametry. Pomocí konzole je možné posílat do zařízení konfigurační parametry a číst výstupy.

V grafickém okně lze sledovat měřená radarová data pomocí grafů jako je Range-FFT pro detekci vzdálenosti objektů, Doppler-FFT pro detekci rychlosti objektů, zatížení procesorů, trojrozměrná detekce pohyblivých bodů. Je zde také konzole pro posílání příkazů při běhu zařízení a možnost nahrát konfigurační .cfg soubor.

Dostupný je ve webové verzi, popřípadě jako program ke stažení k práci bez online přístupu.

TI Resource Explorer je vyhledávač dokumentace, návodů a kódu.

IWR6843AoPEVM lze spojit s PC přes USB. Součástí EVM je most SICP2015, který zajišťuje převod USB/UART. Pro spojení a správnou detekci zařízení počítačem je nutné nainstalovat driver SICP2105. Zařízení využívá pro komunikaci dvou UART, proto se zobrazí na dvou COM portech jako Enhanced COM port a Standard COM port. Jeden UART figuruje jako oboustranný komunikační kanál, například pro přenos konfigurace z PC do čipu a druhý UART provádí výpis měřených radarových dat.

Celá EVM deska obsahuje dva konektory Micro-USB-B. První USB port slouží pro napájení desky. Druhým USB portem lze komunikovat s čipem IWR6843AoP a zároveň také slouží jako napájení desky.

3.2 Prvotní demonstrace funkce

Prvotní demo se používá pro ověření funkčnosti mmWave snímače IWR6843AoPEVM. Při nahrání prvotního dema poprvé do zařízení se aktualizují drivery čipu. Tímto demem lze vyzkoušet funkčnost, nastavení parametrů a vizualizaci získaných dat ze snímače.

Binární soubor (demo) pro nahrání do zařízení je totožný s řadou xWR64xx a lze ho najít po nainstalování mmWave-SDK ve složce packages/ti/demo/xwr64xx.

Po připojení k PC pomocí USB se demo nahraje do zařízení programem UNIFLASH. Tento program lze stáhnout na oficiálních stránkách Texas Instruments. Lze jej nainstalovat nebo je možné využít webové verze.

Zařízení musí mít správně nastavené SOP (Sense on power) pomocí přepínačů nebo pinů na desce. SOP přepínají režimy zařízení mezi flash a demonstration. Je nutné před nahráním souboru přepnout do režimu flash a provést reset čipu.

UNIFLASH se nastaví pro čip IWR6843AOP a vybere se COM port pro nahrání binárního souboru. Vybraný COM port musí odpovídat Enhanced COM portu pro správný flashing zařízení.

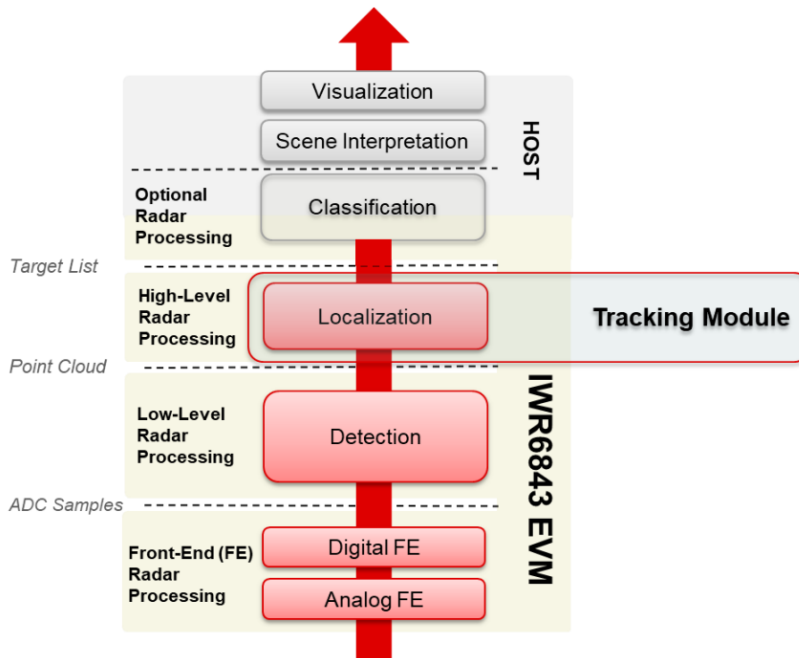
Při přepnutí mezi režimy se musí vždy provést reset. Toho lze docílit stisknutím spínače nrst nebo vypojením napájení a následným zapojením. Před nahráním souboru se doporučuje vždy provést reset, aby bylo zařízení ve správném režimu.

Po úspěšném nahrání souboru dema se zařízení musí přepnout do režimu demonstration pro spuštění funkce.

Po spuštění prvotního dema je doporučeno provést kalibraci snímače. Kompenzaci nepřesností amplitudy a fáze signálů u přijímacích kanálů je provedena nahráním konfiguračního souboru. Následovně se z konzole vyčtou kompenzační koeficienty, které se používají v dalších konfiguračních souborech pro korekci získaných dat.

3.3 Counting People

Pro vyzkoušení funkce bylo využito demo Counting People. Obsahuje řešení pro dvě možné umístění v prostoru. Senzor může být umístěn na stěně nebo na stropě. Pro definované scénáře simulace bylo vybráno umístění na stropě přímo nad oblastí kde se může nacházet fronta u pokladny.

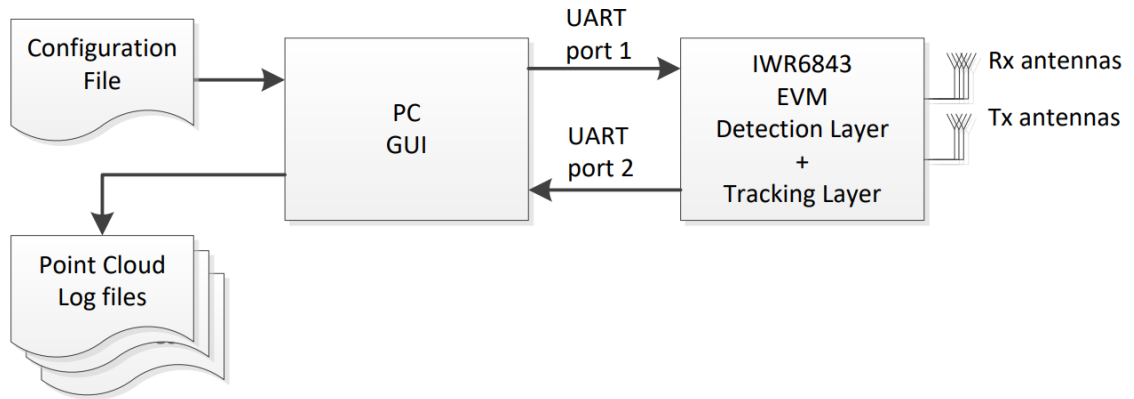


Obrázek 3.1 Processing chain dema Counting People [27]

Demo Counting People implementuje detekci osob a sledování trajektorie pohybu. Radarem jsou získávána data o snímaném okolí. Detekční vrstva tyto data zpracuje. Vyhodnocuje vzdálenost pohyblivých bodů, úhly elevace θ_n , azimutu φ_n a poměr signál-šum (SNR). Pomocí těchto hodnot lze popsat polohu jednotlivých detekovaných bodů. Sledovací vrstva tyto detekované body dále zpracovává. Pokud se nachází v zájmové zóně, lokalizuje z nich pohyblivou osobu, interpretuje ji jako objekt a sleduje její trajektorii pohybu.

Veškerá detekce osob a sledování jejich trajektorie pohybu je zpracována na čipu IWR6843AoP. Tyto data jsou následně posílána přes sběrnici UART do PC, kde jsou vizuálně interpretována v grafickém uživatelském rozhraní (GUI). Po nahrání dema do zařízení a připojení k PC přes USB je možné spustit GUI buď jako spustitelný soubor

.exe nebo jako .m přes Matlab. GUI vizualizovaná data po ukončení měření uloží do .mat souborů. Každý .mat soubor obsahuje maximálně 1000 snímků.



Obrázek 3.2 Blokové schéma vizualizace dema Counting People [28]

3.4 Popis parametrů konfiguračního souboru

Pro představu, jak vypadá konfigurační soubor je uveden následující příklad:

```

sensorStop
flushCfg
dfeDataOutputMode 1
channelCfg 15 7 0
adcCfg 2 1
adcbufCfg -1 0 1 1 1
lowPower 0 0
profileCfg 0 61.2 60.00 17.00 50 328965 0 55.27 1 64 2000.00 2 1 36
chirpCfg 0 0 0 0 0 0 0 1
chirpCfg 1 1 0 0 0 0 0 2
chirpCfg 2 2 0 0 0 0 0 4
frameCfg 0 2 224 0 120.00 1 0
dynamicRACfarCfg -1 10 1 1 1 8 8 6 4 4.00 6.00 0.50 1 1
staticRACfarCfg -1 4 4 2 2 8 16 4 6 6.00 13.00 0.50 0 0
dynamicRangeAngleCfg -1 7.000 0.0010 2 0
dynamic2DAngleCfg -1 5 1 1 1.00 15.00 2
staticRangeAngleCfg -1 0 1 1
%classifierCfg 1 1 1 500 0.6 1.0 0.95 10
antGeometry0 -1 -1 0 0 -3 -3 -2 -2 -1 -1 0 0
antGeometry1 -1 0 -1 0 -3 -2 -3 -2 -3 -2 -3 -2
antPhaseRot -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1
fovCfg -1 64.0 64.0
compRangeBiasAndRxChanPhase 0.0804430 -0.91882 0.05420 0.64032 0.40207
-0.79590 0.02979 0.79681 0.57565 -0.59879 0.60577 0.83841 -0.14880 -
0.59790 0.42813 0.97104 -0.23889 -0.42667 0.53165 0.70526 -0.56085 -
0.53552 0.40353 0.63208 -0.38467
staticBoundingBox -3.4 1.8 -2.0 2.0 -0.5 2.6
boundaryBox -4.6 2.0 -3.2 3.2 -0.5 2.6
sensorPosition 2.58 0 90
gatingParam 3.5 1.75 1.75 3 3
stateParam 3 3 6 200 3 6000
allocationParam 20 20 0.05 18 1.5 3.7
  
```

```
maxAcceleration 0.75 0.1 0.75
trackingCfg 1 4 800 10 37 33 120 1
presenceBoundaryBox -4.6 2.0 -3.2 3.2 -0.5 2.6
sensorStart
```

Konfigurační parametry lze rozdělit do 4 skupin.

- Front-end parametry (nastavení rádiového subsystému)
- Parametry desky (jsou dané konstrukcí antén)
- Parametry detekční vrstvy
- Parametry sledovací vrstvy

Dále jsou součástí souboru pomocné instrukce pro zajištění správného sledu volání parametrů. První instrukce *sensorStop* zastaví chod programu. Následně se vymaže minulé nastavená konfigurace zařízení pomocí instrukce *flushCfg*. Poté už lze číst nové parametry, které mají být nastaveny. Na konci souboru konfiguračních parametrů je zavolána instrukce *sensorStart*, která spustí přenastavený radarový subsystém snímače.

3.4.1 Front-end parametry

Mezi tyto parametry patří *dfeDataOutputMode*, *channelCfg*, *adcCfg*, *adcbufCfg*, *lowPower*. Všechny parametry **jsou pro Counting People demo pevně dané a nelze je měnit** [2][30]. Dále jsou součástí chirp parametry definující podobu chirp signálů, které vysílá radar do okolí.

dfeDataOutputMode <modeType>

dfeDataOutputMode nastaví podobu chirpů. Rámec je množina několika chirpů. Pro hodnotu 1 jsou chirpy v určitém rámci a je definovaný jejich počet v tomto rámci. Pro hodnotu 2 jsou chirpy kontinuálně vysílány z antény bez definovaného rámce. Pro hodnotu 3 lze využít pokročilého nastavení.

channelCfg <rxChannelEn> <txChannelEn> <Cascading>

channelCfg nastaví využití antény a kaskádování.

První parametr se vztahuje k přijímacím anténám, Druhý parametr se vztahuje k vysílacím anténám a třetí parametr stanovuje kaskádování. Kaskádováním je myšleno zapojení s využitím více radarových čipů. Propojením více radarů získáme více antén, a tedy lze lépe odhadovat úhel dopadu (AoA) a zvětšíme tím maximální dosah radaru. Kaskádování není pro toto demo podporováno a je vždy nastaveno na hodnotu 0. Hodnota 15 znamená všechny 4 přijímací antény budou využity a hodnota 7 znamená všechny vysílací antény budou využity.

adcCfg <numADCBits> <adcOutputFmt>

adcCfg nastavuje bity AD převodníků radarového subsystému a tvar výstupních dat.

První parametr lze nastavit bity AD převodníku. 0 pro 12-bitové nastavení, 1 pro 14-bitové nastavení. Je podporováno pouze 16-bitové nastavení stanovené hodnotou 2.

Druhý parametr stanovuje tvar výstupních dat. Pouze complex 1x je podporován.

adcbufCfg

<subFrameIdx><adcOutputFmt><sampleSwap><chanInterleave><chirpThreshold>

adcbufCfg nastavuje podobu uložených dat ve vyrovnávací paměti.

První parametr se vztahuje k nastavení *dfeDataOutputMode*. V základu se nastavuje na -1 pro celý rámeček. Pro pokročilé nastavení (3) lze definovat, pro které jednotlivé podrámečky (části rámečku) se bude nastavení vztahovat.

Druhý parametr stanovuje formát dat ve vyrovnávací paměti. 0 je pro komplexní, 1 je pro reálné.

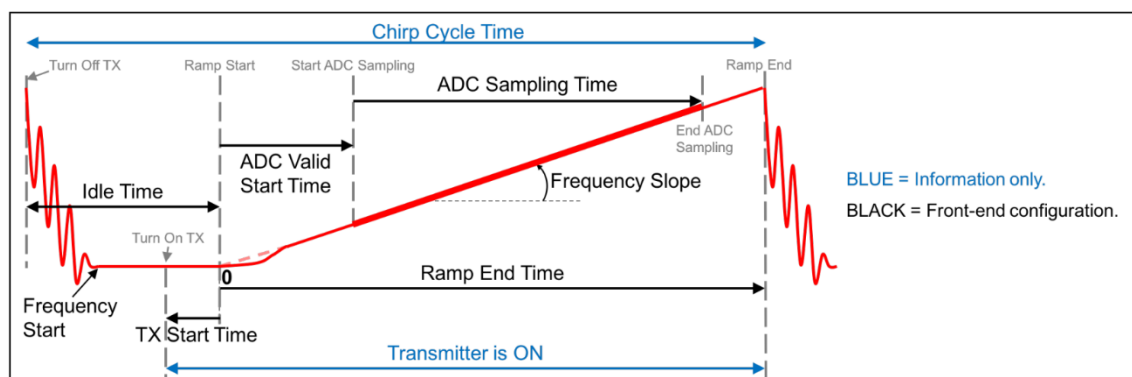
Třetí parametr stanovuje pořadí, ve kterých se I a Q složky zapisují. 0 je pro I složku jako LSB a Q jako MSB. 1 je pro I složku jako MSB a Q jako LSB. Pouze nastavení 1 je podporováno.

Čtvrtý parametr není podporován, lze nastavit pouze na hodnotu 1.

Pátý parametr stanovuje počet chirpů pro předávání dat s vyrovnávací paměti. Lze použít pouze hodnotu 1. Značí to, že není využíván DSP a tyto data jsou posílány přímo na vyrovnávací paměť hardwarového akcelerátoru pro zpracování 1D FFT.

lowPower nastavuje mód AD převodníků. První parametr je nevyužit. Druhý parametr stanovuje power mode ADC. Není podporován pro IWR6843AoP, proto 0.

Nastavení chirp parametrů [programming chirp parameters swra553a]



Obrázek 3.3 Chirp [29]

Tento parametr definuje tvar chirp signálu.

profileCfg <profileId> <startFreq> <idleTime> <adcStartTime> <rampEndTime>
<txOutPower> <txPhaseShifter> <freqSlope> <txStartTime> <numAdcSamples>
<digOutSampleRate> <hpfCornerFreq1> <hpfCornerFreq2> <rxGain>

<*profileId*> je identifikační číslo chirp profilu.
<*startFreq*> je počáteční frekvence.
<*idleTime*> je doba mezi jednotlivými chirpy.
<*adcStartTime*> je doba, od které začne AD převodník vzorkovat.
<*rampEndTime*> je doba, do které se zvyšuje frekvence, poté dochází k resetu frekvence na počáteční a startu nového chirpu.
<*txOutPower*> je zakódovaný zápis vyzařovaného výkonu jednotlivých vysílacích antén.
<*txPhaseShifter*> je fázový posun vysílacích antén.
<*freqSlope*> je sklon (směrnice přímky) narůstající frekvence.
<*txStartTime*> je počáteční čas a start vysílání z antény.
<*numAdcSamples*> je počet vzorků AD převodníku.
<*digOutSampleRate*> je vzorkovací frekvence AD převodníku v tisíci vzorcích na sekundu.
<*hpfCornerFreq1*>
<*hpfCornerFreq2*> jsou horní propusti pro mezifrekvenční signál.
<*rxGain*> je zisk přijímacích antén v dB.

chirpCfg

<*ChirpStartIdx*><*ChirpEndIdx*><*profileIdx*><*startFreqVar*><*freqSlopeVar*>
<*idleTimeVar*><*adcStartTimeVar*><*txEnableMask*>

chirpCfg je zavolán třikrát. Každé jednotlivé zavolání koresponduje s jednou z vysílacích antén. První a druhý parametr jsou identifikátory chirpu jednotlivé antény. Tedy 0 pro T0, 1 pro T1 a 2 pro T2.

Třetí parametr je identifikační číslo profilu (*profileCfg*). Poslední parametr je pro T0 1, T1 2 a T2 4. Ostatní parametry je doporučeno vynulovat a nechat jejich výběr na *profileCfg*, ve kterém jsou již nastaveny.

frameCfg

<*ChirpStartIdx*><*ChirpEndIdx*><*numLoops*><*numFrames*><*framePeriodicity*>
<*triggerSelect*><*frameTriggerDelay*>

První a druhý parametr značí rozsah využitých vysílacích antén, tedy 0 (T0) až 2 (T2).

Třetí parametr určuje počet cyklů mezi chirpy antén T0->T1->T2. Stanovuje počet vyslaných chirpů z každé antény v jednom rámci.

Čtvrtý parametr je počet rámců. 0 pro kontinuální vysílání.

Pátý parametr je perioda, s jakou se bude vysílání rámců opakovat. Hodnota je v milisekundách.

Šestý parametr *triggerSelect* je 1, podporuje pouze software trigger.

Poslední parametr stanovuje zpoždění pro *triggerSelect*.

3.4.2 Parametry desky

Mezi tyto parametry patří *antGeometry0*, *antGeometry1*, *antPhaseRot*, *fovCfg* a *compRangeBiasandRxChanPhase*.

antGeometry0 a *antGeometry1* definují virtuální pozici antén využitého souřadnicového systému dle obrázku 3.2.

antPhaseRot definují natočení antén. Některé antény jsou natočené o 180° a parametrem -1 je lze přetočit.

fovCfg je nastavení zorného pole snímače. Pro umístění na stropě je to 60° . Data pod větším úhlem nejsou zpracovány.

compRangeBiasandRxChanPhase je kompenzace antén pomocí koeficientů, které lze získat při kalibraci snímače.

3.4.3 Detekční vrstva

V parametrech pro detekční vrstvu je nastavení několika detekčních algoritmů *dynamicRACfarCfg*, *staticRACfarCfg*, *dynamicRangeAngleCfg* a *dynamic2DAngleCfg*.

Naprostou většinu parametrů algoritmů není dle dokumentace doporučeno měnit, neboť jsou již nastaveny pro co nejpřesnější možnou detekci osob s ohledem na výchozí nastavení chirp signálu [2].

Protože vždy bude přijímací anténa přijímat nejenom vyslané signály radarem, ale také jiné rušivé signály z okolí, používá se CFAR (Constant False Alarm Rate) algoritmus. Ze spektra vzdálenosti získané Rychlou Fourierovou Transformací se stanoví úroveň šumu. Stanovení této šumové hranice záleží na použité metodě. Demo Counting People využívá CASO-CFAR, neboli Cell Averaging Smallest of CFAR. Podle stanovených prahových hodnot vyhodnocuje, jestli se objekt v určité vzdálenosti nachází nad úrovní šumu. Pokud ano, vyhodnotí jej jako detekovaný bod [30].

Detekční vrstva používá dvouprůchodový CFAR algoritmus. To znamená, že nejdříve porovnává získané body dle vzdálenosti. Pokud jsou nad úrovní šumu, použije na tento objekt další CFAR algoritmus dle elevačního úhlu a provádí stejné vyhodnocení. Pakliže je i pro tento druhý průchod nad úrovní šumu, je získán detekovaný bod.

Rozdíl mezi statickým a dynamickým CFAR algoritmem je v nastavení. Statický je nastaven záměrně pro detekování bodů, u kterých dochází k silnému odrazu. Navíc je u

detekovaného bodu provedena interpolace hodnot azimutu a elevace. Je tím získán přesnější odhad úhlů.

Pro odhad úhlu se využívají algoritmy *dynamicRangeAngleCfg* a *dynamic2DAngleCfg*. Je zde použit Capon Beamforming algoritmus.

Beamforming využívá fázového posunu signálů z přijímacích antén k odhadu úhlu. Toho lze docílit s dvěma a více anténami.

Přestavme si, že máme několik antén ve stejné rovině s určitou vzdáleností od sebe. Ze vzdáleného bodu se k těmto anténám začne šířit signál ve formě elektromagnetické vlny. Prostorem bude tento signál postupovat jako vlnoplochy. Na jednotlivé antény dopadne ve stejnou chvíli s rozdílnou fází.

Máme obdobný scénář se dvěma anténami, ale zdroj signálu byl umístěn tak, aby rozdíl fáze těchto dvou antén byl přesně 180° . Přidáním zpožďovacího prvku na jednu z antén posuneme fázi signálu o 180° a oba signály potom připojíme k obvodu, který bude sčítat amplitudy signálů. Získáme tím signál s dvojnásobnou amplitudou. Víme tedy u určitém úhlu, pro který dostaneme dvojnásobný signál. Tento úhel odpovídá zdroji signálu, na který míří virtuální paprsek z antén. Pro zdroje signálu umístěné na jiné pozici lze posouváním fáze zpožďovacích prvků jednotlivých antén tento virtuální paprsek natáčet v prostoru.

Pokud vyzařovaný výkon budeme považovat za neměnný, tak čím více antén zapojíme, tím užší tento paprsek bude. Okolo hlavního paprsku budou po stranách vznikat další menší paprsky.

Capon Beamforming je algoritmus, který se skládá ze dvou částí. Využívá prostorové kovarianční matice a heat mapy vzdáleností-elevace pro odhad úhlů.

U stropního umístění je minimální možné natočení paprsku o 7° , neboť funkce zařízení je omezena nedostatečně velkou pamětí pro takové množství dat.

3.4.4 Sledovací vrstva

Parametry sledovací vrstvy definují zájmové zóny, ve kterých lze sledovat trajektorii pohybu osob, nastavení gating funkce a dalších alokačních parametrů pro výběr kandidáta z detekovaných bodů. Gating funkce definuje fyzické rozměry detekované osoby [27].

Součástí sledovací vrstvy je také stavový diagram, který se stará o přidělení nové detekované osoby a její zánik. Mohou existovat ve třech stavech. ACTIVE, DETECT a FREE.

Následující tři parametry nastavují zájmové zóny:

boundaryBox <X-min> <X-max> <Y-min> <Y-max> <Z-min> <Z-max>

boundaryBox nastavuje oblast pro získané body detekční vrstvou, které budou použity sledovací vrstvou. Každý bod nese informace o vzdálenosti, úhlu elevace, úhlu azimutu, rychlosti a poměru signál-šum (SNR).

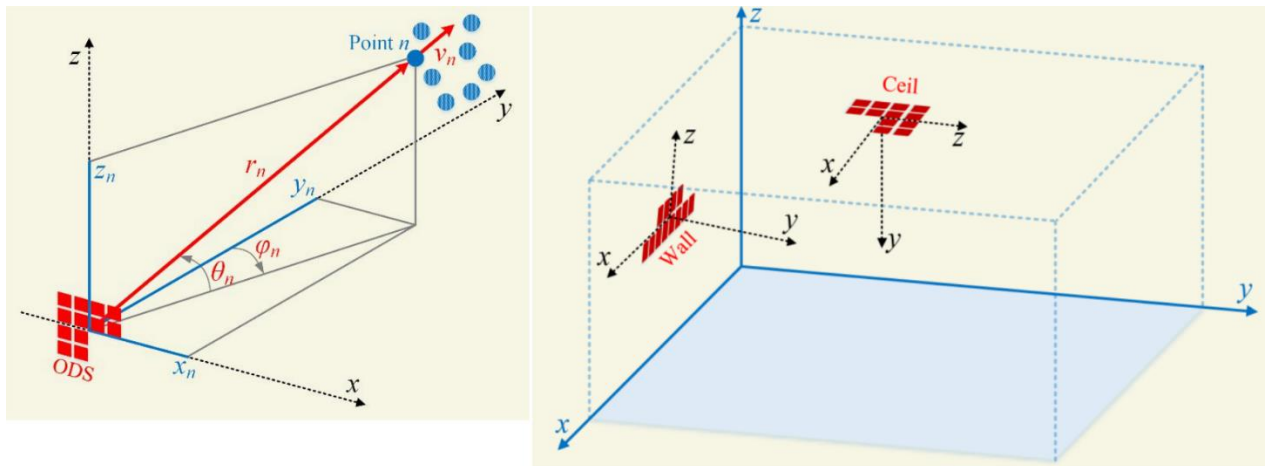
staticBoundaryBox <X-min> <X-max> <Y-min> <Y-max> <Z-min> <Z-max>
staticBoundaryBox nastavuje oblast, ve které detekované osoby mohou zůstat nepohyblivé.

presenceBoundaryBox <X-min> <X-max> <Y-min> <Y-max> <Z-min> <Z-max>
presenceBoundaryBox nastavuje oblast, ve které mohou existovat detekované osoby a jejich trajektorie pohybu. Hlídá, pokud jsou uvnitř stanovených limitů jako je například velikost objektu, maximální rychlost a na základě nich přechází mezi stavy stavového automatu.

sensorPosition <sensorHeight> <azimTilt> <elevTilt>

Stanovuje pozici snímače. První parametr je jeho výška (Z osa). Druhý parametr je úhel natočení azimutu. Tento parametr není podporován a lze použít pouze hodnotu 0.

elevTilt je elevační úhel, který je pro stropní umístění roven hodnotě 90°.



Obrázek 3.4 Geometrie systému [2]

gatingParam <Gain> <Limit-Width> <Limit-Depth> <Limit-Height> <Limit-Velocity>

Stanovuje vytvořenou hranici okolo předpokládaného těžiště sledované osoby. Tyto limity by měli brát v potaz fyzikální rozměry detekovaného objektu, jeho očekávaný pohyb, chyby a nepřesnosti detekční a sledovací vrstvy.

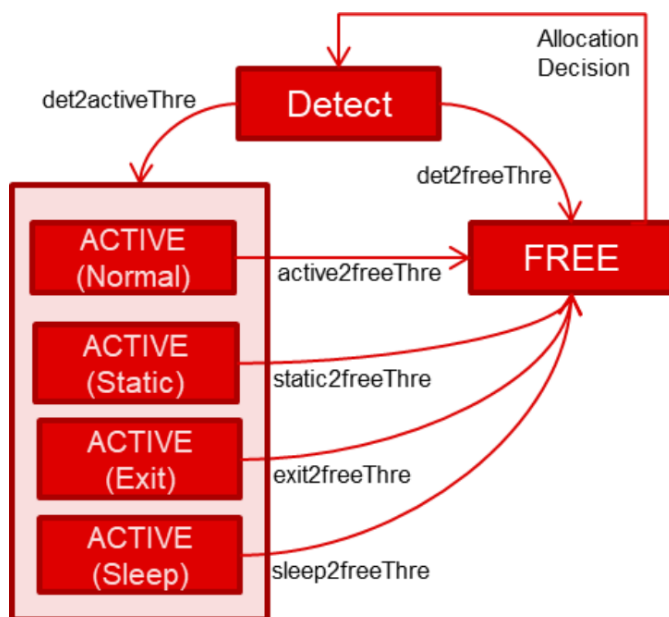
allocationParam <*snrThre*> <*snrThreObscured*> <*velocityThre*> <*pointsThre*>
 <*maxDistanceThre*> <*maxVelThre*>

Alokační parametry stanovují podmínky pro shlukování detekovaných bodů do alokační množiny. Tato alokační množina je následně využita při porovnání jiných limitů v bloku Presence obrázku 3.4.

snrThre definuje minimální SNR. Druhý parametr stanovuje minimální SNR pro body, které jsou zakryté za jinou detekovanou osobou. Třetí parametr stanovuje minimální rychlost pohybu a čtvrtý parametr minimální počet bodů pro začlenění do alokační množiny.

maxDistanceThre stanovuje maximální vzdálenost od těžiště po nový bod, který má být do této množiny začleněn. *maxVelThre* stanovuje maximální změnu rychlosti pro tento nový bod.

stateParam <*det2actThre*> <*det2freeThre*> <*active2freeThre*> <*static2freeThre*>
 <*exit2freeThre*> <*sleep2freeThre*>



Obrázek 3.5 Stavový diagram detekovaných osob [27]

Veškeré parametry pro přechody do jiných stavů jsou uvedeny v počtu rámců. Pro každý vyslaný rámeček se vyhodnocuje, zda se jedná o HIT or MISS event. HIT znamená, že detekované body jsou přiděleny k alokační množině a splňují všechny limity. MISS znamená, že tyto podmínky nesplňují.

det2actThre stanovuje počet HIT rámců pro přechod z Detect do Active stavu.

det2freeThre stanovuje počet MISS rámců pro přechod z Detect do Free stavu.

active2freeThre stanovuje počet MISS rámců pro přechod z Active do Free stavu.

static2freeThre stanovuje počet MISS rámců pro přechod z Active do Free stavu v zájmové zóně typu *staticBoundaryBox*.

exit2freeThre stanovuje počet MISS rámců pro přechod z Active do Free stavu mimo *staticBoundaryBox*.

sleep2freeThre stanovuje maximální počet rámců uvnitř *staticBoundaryBox*. Určuje dobu, po kterou může ve statické zájmové zóně setrvávat osoba bez pohybu. Poté zanikne přechodem do Free stavu.

3.5 Simulace fronty v prodejně u pokladny

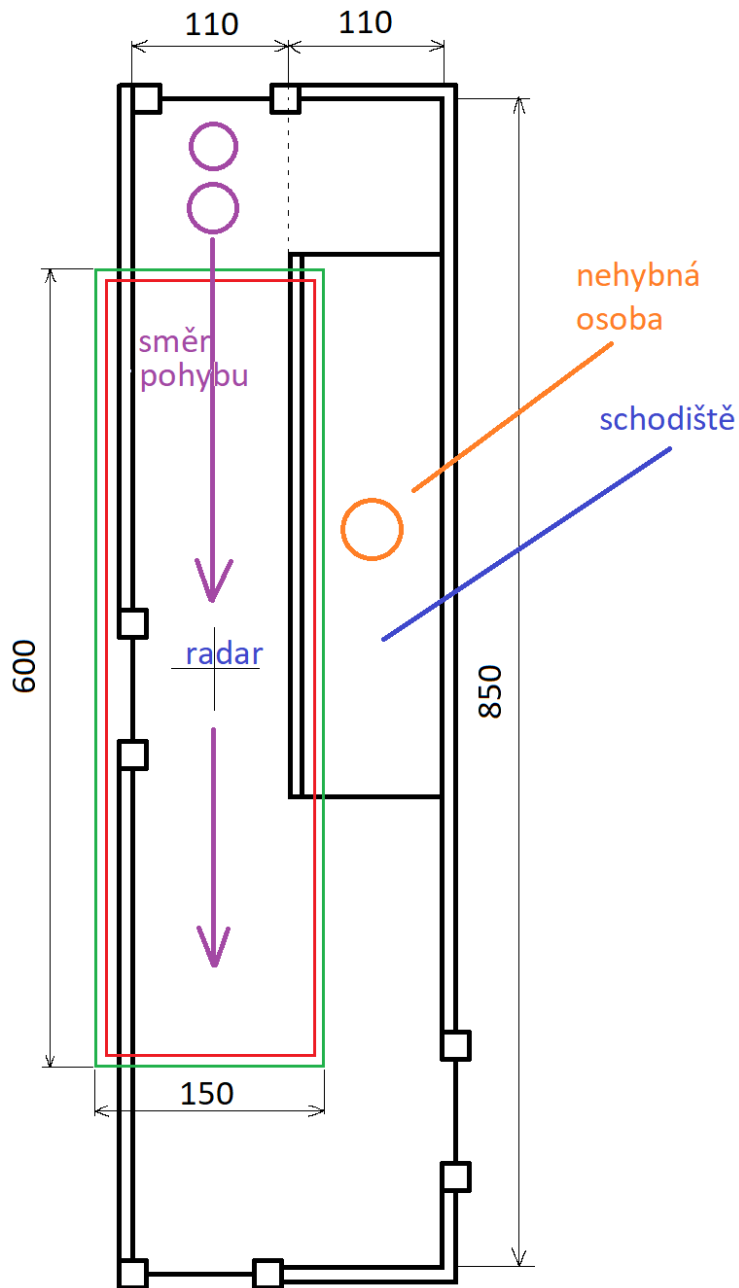
Scénář má za cíl simulovat frontu na prodejně u kasy. Požadavkem detekovat osoby a sledování trajektorie pohybu těchto osob.

Většina pokladen s obsluhou je tvořena posuvným pásem, na který se vykládá zboží. Podél pásu se tvoří fronta zákazníků. Tento prostor je často úzce vymezen zábranami, aby se lidé řadili za sebe. Proto byl vybrán prostor scénáře, který je shodný se zúženým prostorem.

Pro napodobení scénáře byla vybrána místnost, která odpovídá stanoveným požadavkům. Tato chodba je znázorněna na obrázku 3.6. Radarový snímač je umístěn na stropě místnosti ve výšce 2,9 metru. Jeho poloha je znázorněna křížem a popiskem radar.

Zelená zóna znázorňuje prostor, ve kterém mohou existovat detekované osoby a jejich vykreslené trajektorie. Červená zóna je prostor, ve kterém detekované osoby a jejich trajektorie zůstanou statické. Tím je možné detekovat stojící osoby ve frontě, aniž by po krátké době zmizeli.

Na následující stránce je znázorněn scénář na chodbě.



Obrázek 3.6 Půdorys chodby a znázornění scénáře

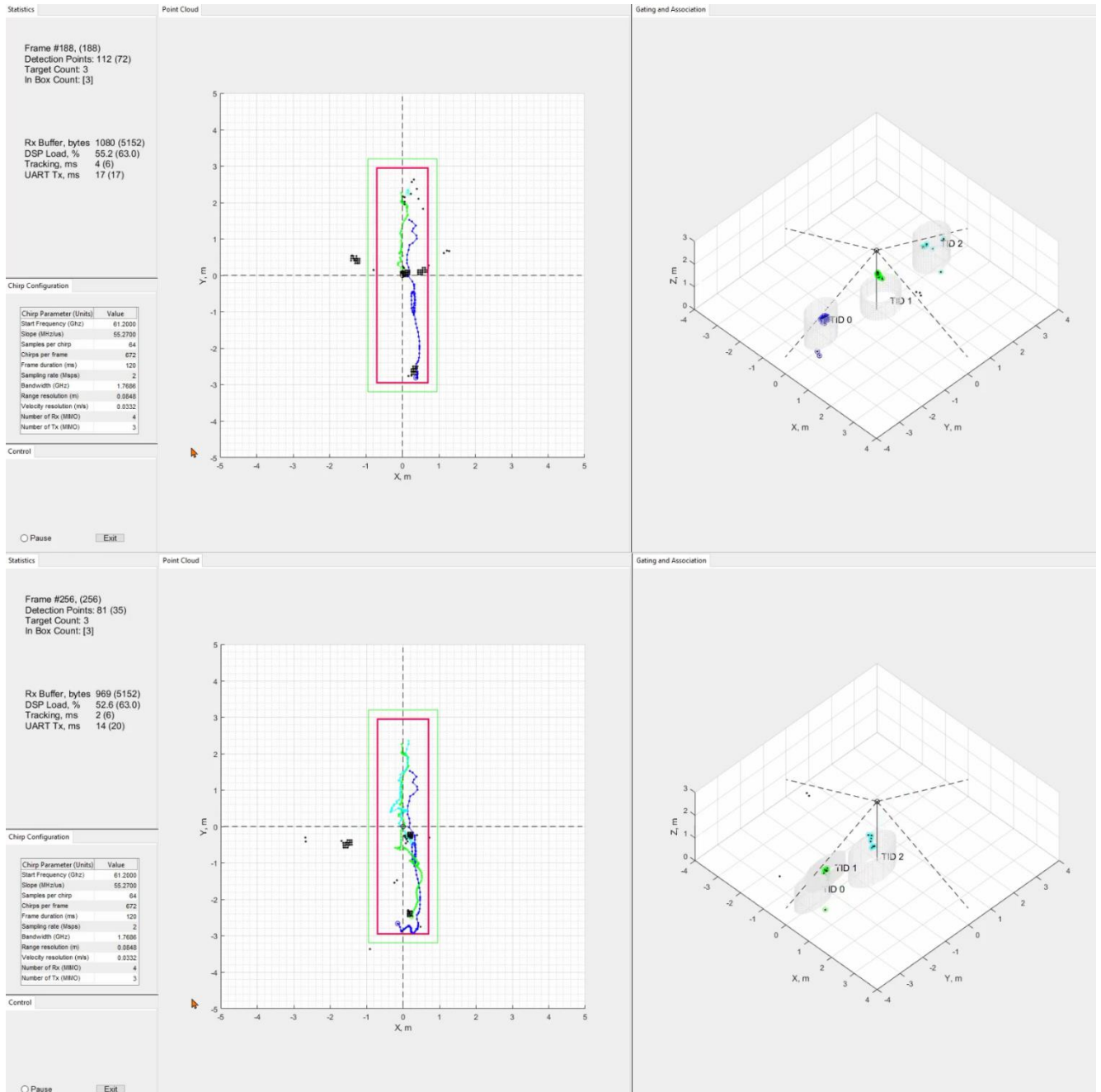
Nastavení zón v konfiguračním souboru

```
staticBoundaryBox -0.7 0.7 -2.95 2.95 -0.5 3
boundaryBox -0.95 0.95 -3.2 3.2 -0.5 3
presenceBoundaryBox -0.95 0.95 -3.2 3.2 0.5 2.5
sensorPosition 2.9 0 90
```

Byla zvolena vizualizace přes Matlab. Před spuštěním kódu byly pozměněny parametry graficky znázorňující zóny. Uživatelské grafické rozhraní musí být přenastaveno odděleně, aby odpovídalo parametrům v konfiguračním souboru.

Znázornění zón

```
scene.boundingBox(1,:) = [-0.95 -3.2 -0.5 1.9 6.4 3.5];
scene.targetBox(1,:) = [-0.7 -2.95 -0.5 1.4 5.9 3.5];
```



Obrázek 3.7 Vizualizace detekce osob a trajektorie pohybu

Na scéně se nacházejí čtyři osoby. Jedna z nich sedí v oblasti schodiště. Její pozice je mimo zájmové zóny přibližně na souřadnicích $x = 1$ a $y = 1$. Zařízení by ji nemělo vyhodnotit jako pohyblivý objekt.

Zbylé tři osoby jdou za sebou a imitují postupný pohyb ve frontě. Každá osoba jde po vymezené zóně, aby mohla být sledována její trajektorie. Začátek je na souřadnicích $x = 0$ a $y = 3$. Od tohoto počátku se osoba rozejde, a nakonec se zastaví na souřadnicích $x = 0$ a $y = -3$. Toto platí pro všechny osoby, které se účastnili simulace.

Na obrázku 3.6 lze vidět vpravo pohled na počet detekovaných osob. Každá osoba je označena TID a následujícím číslem. V prostoru lze vidět barevně zakreslené detekované body, které náleží dané osobě a přibližnou polohu této osoby.

Nalevo od tohoto pohledu je zobrazena trajektorie pohybu těchto osob příslušnou barvou.

Úplně vlevo lze číst nastavené konfigurační parametry, které byly v zařízení nastaveny. Je zde vyobrazen údaj o počtu detekovaných osob, počet získaných rámců (frame), zatížení DSP.

4. ZHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ S JINÝMI METODAMI

Zařízení IWR6843AoPEVM bylo schopné detekovat pohyb, ve vymezené zóně detekovat osobu a sledovat trajektorii pohybu.

Osoby byly postupně detekovány radarem, když vstoupily do zájmové zóny BoundaryBox, která definuje prostor pro sledovací vrstvu. Uvnitř této zájmové zóny byla nastavena statická zóna, aby tu mohli po delší dobu setrvat detekované osoby a nedošlo k jejich vymazání. Při postupném pohybu osob imitující frontu byla zaznamenána jejich trajektorie pohybu. Pro tři osoby byly zaznamenány tři detekované objekty. Čtvrtá osoba, která se nacházela mimo nastavené zájmové zóny nebyla detekována. Tímto bylo ověřeno, že funkce dema Counting People skutečně detekuje pouze osoby, které se naskytly v zájmových zónách.

Osoba na schodišti byla v průběhu měření detekována jako pohyblivé body, ale protože zůstala mimo zóny, nebyla vyhodnocena sledovací vrstvou. I nepatrný pohyb sedící osoby je radarový snímač schopný zaznamenat.

U vybrané místnosti pro simulaci se ukázalo, že u úzkých prostor dochází k odrazům od stěn, které zařízení vyobrazilo mimo měřené prostory. Protože zóny byly nastaveny pouze pro úzkou uličku, kde přesně má být fronta, tak tyto detekované body od odrazů neměli vliv na celkovou detekci osob a trajektorie pohybu. Lze je vidět na obrázku 3.6 vlevo od zelené zóny, která značí BoundaryBox. V Horní části obrázku na souřadnicích $x = -1,25$ a $y = 0,5$ nebo v dolní části obrázku na souřadnicích $x = -1,5$ a $y = -0,5$.

Správným nastavením zájmových zón lze zamezit vzniku ghostingu. To je fenomén, při kterém dochází k detekci osoby, aniž by se tam skutečně vyskytovala. To může nastat detekováním odrazů, které způsobí rušení.

RADAR

Výhodou radaru je jeho relativní funkčnost v prašných podmínkách, v dešti, v mlze. Dokáže pronikat nekovovými překážkami a může být ukryt za deskou ze sádkkartonu, aniž by o něm někdo věděl. Toho lze využít pro sledování prostor, aniž bychom sbírali data o identitě člověka. Využitý mikrovlnný radarový snímač v této práci je oproti ostatním metodám detekce osob velmi cenově dostupný. Samotná deska typu Evaluation Module je mnohem dražší než samotný čip IWR6843AoP. Texas Instruments tuto desku nabízí ke dni 19.5.2022 za cenu \$125 (2943 Kč). Samotný čip lze koupit za \$20 (470 Kč). Je třeba mít na paměti, že tento čip již obsahuje veškerý hardware, který je požadavkem pro detekci osob a sledování trajektorie pohybu.

RADAR vs PIR

Detekci osob radarem lze porovnat s několika existujícími systémy. Speciální metodou detekce osob je za pomoci PIR snímačů. PIR snímače jsou jedním z nejvyužívanějších prvků pro detekci osob. Problém nastává u aplikací, ve kterých je

nutné přesně lokalizovat osoby a sledovat trajektorii pohybu. Možným řešením lokalizace je vytvoření soustavy pyroelektrických snímačů s Fresnelovými čočkami, které jsou rozmístěny po místnosti. Překryvem oblastí snímačů se lokalizačním algoritmem s Kalmanovým filtrem odhaduje trajektorie pohybu [31][32][33].

Výhodou PIR je nízká spotřeba energie a jejich levná cena.

RADAR vs SONAR

Radarové a ultrazvukové snímače využívají obdobnou metodu detekce. Vyslání signálu a přijetí jeho odrazu [34]. Liší se typem signálu. Radar vysílá elektromagnetické vlny a sonar využívá mechanického vlnění.

Rozdíl je v použitém médiu. Sonar se převážně používá pro detekci ve vodě, například pro detekci trajektorie potápěčů [35][36].

Detekce radarem může dosahovat mnohem vyšší přesnosti a rychlosti.

RADAR vs LiDAR

LiDAR dosahuje mnohem větší přesnosti a může být využit pro vytvoření detailní 3D mapy okolního prostoru. Nevýhodou je jeho cena, neschopnost detekovat průhlednou překážku nebo špatná funkčnost v prašném prostředí, mlze a dešti [37].

Jejich cena je oproti radaru vysoká. V nejlepším případě desetinásobná [18][19][20].

RADAR vs kamera

Výhodou kamerového systému může být podobnost s lidským okem. Pro správné snímání kamery je nutné mít dobré viditelné podmínky. Nevýhodou je ovlivnění funkčnosti v prašném prostředí, mlze, dešti. Strojové vidění sebou nese požadavky na dostatečně výkonný hardware, a to zvyšuje pořizovací cenu.

Každá metoda detekce má své výhody a nevýhody. Správným výběrem metod můžeme vytvořit fúzi snímačů, které se budou mezi sebou doplňovat.

Radar je pro detekci osob a sledování trajektorie pohybu vhodnou metodou zejména z hlediska nízké ceny. Pokud nepotřebujeme detailně zmapovaný prostor anebo znát vzhled osob, tak jeho rozlišitelnost detekovaných bodů je dostačující. U použitého radaru se jedná o schopnost detekovat body 3,75 cm od sebe pro nejvyšší využitou šířku pásma 4 GHz. V simulaci byla využita šířka pásma 1,76 GHz, což odpovídá vzdálenosti bodů 8,5 cm od sebe.

Tabulka 4.1 Porovnání metod detekce osob [38][39][40]

Typ snímače	*RADAR	SONAR	LIDAR	KAMERA
Rozlišení	dobré	dostatečné	nejlepší	dobré
max. vzdálenost	daleká	***krátká	velice daleká	střední
Průhledný povrch	detekuje	detekuje	nedetekuje	nedetekuje
Pěna	částečně pohlcen	většinově pohlcen	detekuje OK	detekuje OK
Prašné prostředí	detekuje	detekuje	detekuje špatně	detekuje špatně
Děšť	detekuje	detekuje	detekuje špatně	detekuje špatně
Kouř	detekuje	detekuje	detekuje špatně	detekuje špatně
Cena	nízká	střední	vysoká	střední/vysoká

**RADAR je myšleno zařízení od TI typu mmWave sensor*

***PIR není uvedeno, protože výše uvedený příklad soustavy snímačů PIR je pouze experimentální a nelze dostatečně posoudit všechny parametry*

****pro detekci osob na souši, ve vzduchu.*

5. CÍLOVÁ PLATFORMA

Možné využití mmWave sensoru IWR6843AoPEVM nachází ve zdokonalení snímání stávajících automatických systémů. Automatické otevírání dveří je možné řídit na základě směru pohybu osob a tím předejít zbytečnému otevírání dveří, u osob, které pouze prochází okolo a nemají úmysl dveřmi projít.

Zjišťování počtu osob a jejich polohy lze využít u ventilace a klimatizovaných místností. Podle počtu osob a na základě jejich polohy je možné pustit ventilaci nebo klimatizaci pouze v místě kde se nachází lidé. Lze tím ušetřit náklady na klimatizaci prostor, ve kterých se nikdo nevyskytuje.

V případě detekce osob a jejich trajektorie pohybu pro scénář fronty u pokladny existuje možnost využití informace o počtu osob v zájmové zóně. Pokud je větší množství lidí u jedné pokladny, může snímač poslat indikaci pro přivolání dalšího zaměstnance, aby otevřel další pokladnu.

Novodobým trendem u obchodních řetězců je snaha nabídnout zákazníkům samoobslužné pokladny, což redukuje počet zaměstnaných prodavačů. Pokud se zájem o ně bude zvětšovat, mohli by v budoucnosti být v supermarketech pouze samoobslužné pokladny. Mohl by upozornit obsluhu, u které pokladny se nachází lidé. Také by mohl mmWave sensor plnit roli zabezpečovacího systému. Kontroloval by trajektorii pohybu osob a upozornil ostrahu na podezřelý pohyb s úmyslem utéct a odcizit zboží.

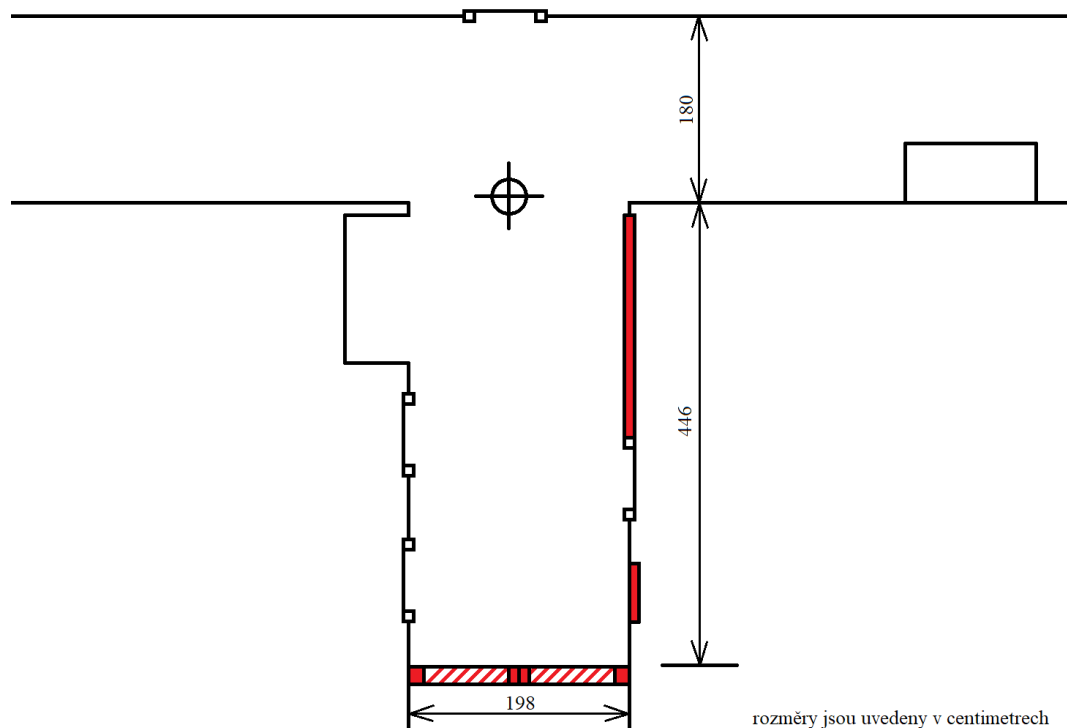
Sběrem dat o detekci osob je možné analyzovat informace o vytíženosti prodejny a vytypovat určité hodiny, kdy je potřeba zajistit více personálu.

5.1 Cílová implementace radarového mikrovlnného snímače

Pro vyzkoušení funkce detekce osob a sledování jejich trajektorie pohybu byla vybrána chodba budovy FEKT VUT. Konkrétní místo se nachází na adrese Technická 12 v budově E ve druhém podlaží na Ústavu automatizace a měřicí techniky. Místo bylo vybráno ze dvou důvodů.

Prvním je tvar chodby. Do tohoto patra lze vstoupit a odejít pouze jedním místem, za předpokladu, že budeme považovat únikový východ na požární schodiště za nepřístupný. Vstupem jsou dveře kovové konstrukce s průhlednými deskami a za nimi je chodba asi 6 metrů dlouhá, 2 metry široká. Následně se rozděluje vlevo a vpravo. Při umístění snímače v místě chodby, kde se větví do dvou směrů, lze pak pokrýt větší oblast a sledovat pohyb osob až ve třech směrech.

Druhým je skutečnost, že se zde nachází místnost vedoucího práce. Pro vyzkoušení funkce bylo zařízení připojeno na počítač v místnosti T12/SE 2.143. V softwaru Matlab byl spuštěn vizualizační program a pomocí něj byla sledována detekce osob a jejich trajektorie pohybu.



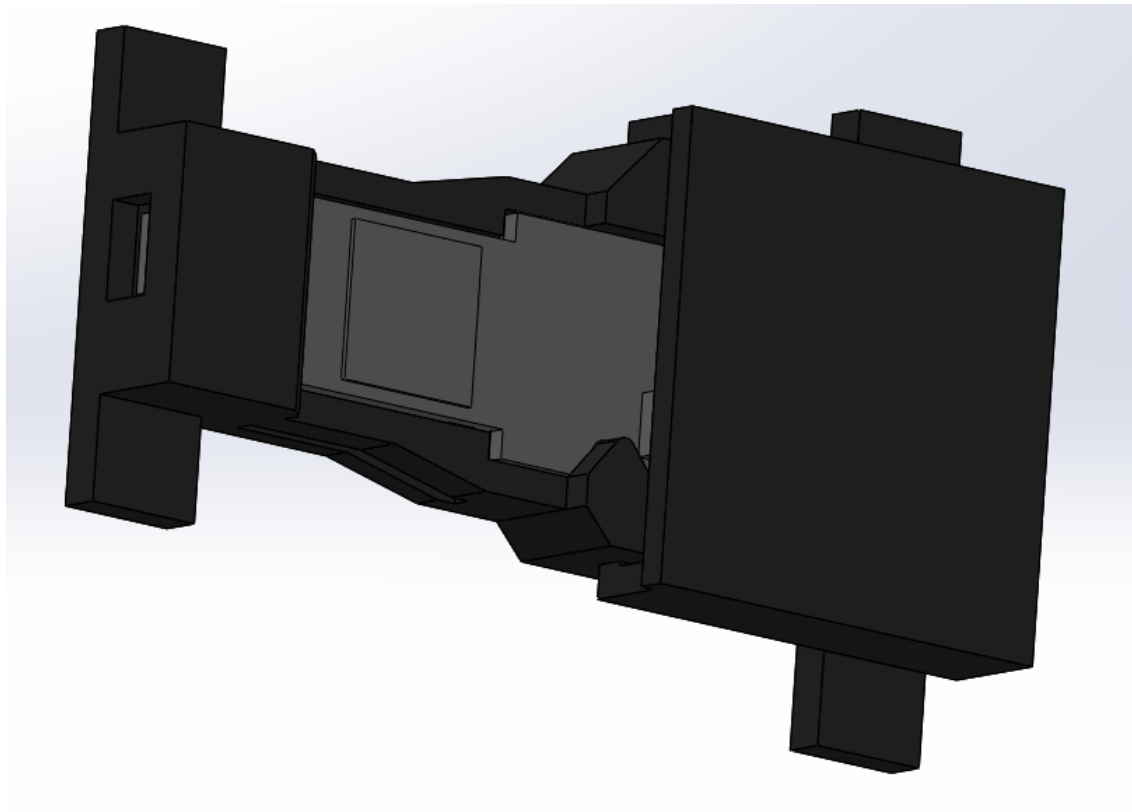
Obrázek 5.1 Chodba a pozice mikrovlnného radarového snímače

Na obrázku 5.1 je zvýrazněna pozice mikrovlnného radarového snímače překříženým kruhem. Červeně jsou vyznačeny oblasti, kde se nachází kovové prvky. Patří mezi ně vstupní dveře a kovové krabice ve stěně po pravé straně.

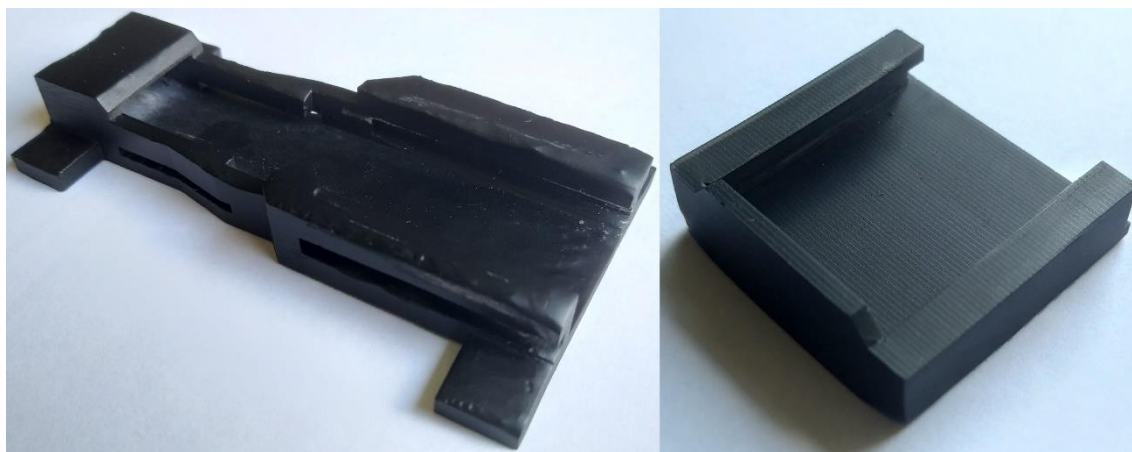
Pro ověření funkce se využilo demo Counting People. U stropního umístění se považují za přesná data ty, která jsou získána pod úhlem 45° . Tento úhel je stanoven výrobcem zřejmě z vyzařovací charakteristiky antény. Z těchto charakteristik přijímacích antén je patrné, že u úhlu 45° dochází k útlumu signálu o 3 dB [21]. Při výšce stropu 3 metrů to odpovídá vzdálenosti 3 metrů od zařízení. Mikrovlnný radarový snímač dokáže získávat data o pohybu i pod vyšším úhlem, a tedy i pro větší vzdálenosti. Maximální vzdálenost je dána především vyzařovaným výkonem a počtem vysílacích antén. V detekční vrstvě je definován maximální úhel pro správná data jako 60° [2].

Pro zařízení IWR6843AoPEVM byl namodelován v softwaru Solidworks držák. Tato komponenta byla navržena, aby byl snímač umístěn rovnoběžně s podlahou. Držák byl vytisknut na 3D tiskárně Anycubic Proton S. Jedná se o 3D tiskárnu typu SLA, neboli využívající metody stereolitografie. Tekutý materiál nazývaný resin je vytvrzován působením ultrafialového světla vrstvu po vrstvě.

Byl použit Anycubic Eco Grey resin a tloušťka vrstvy nastavena na 100 μm . Tento resin je značně křehký a není pevný jako ABS nebo PLA filamenty, ale pro účel a funkci jako držáku DPS je postačující.

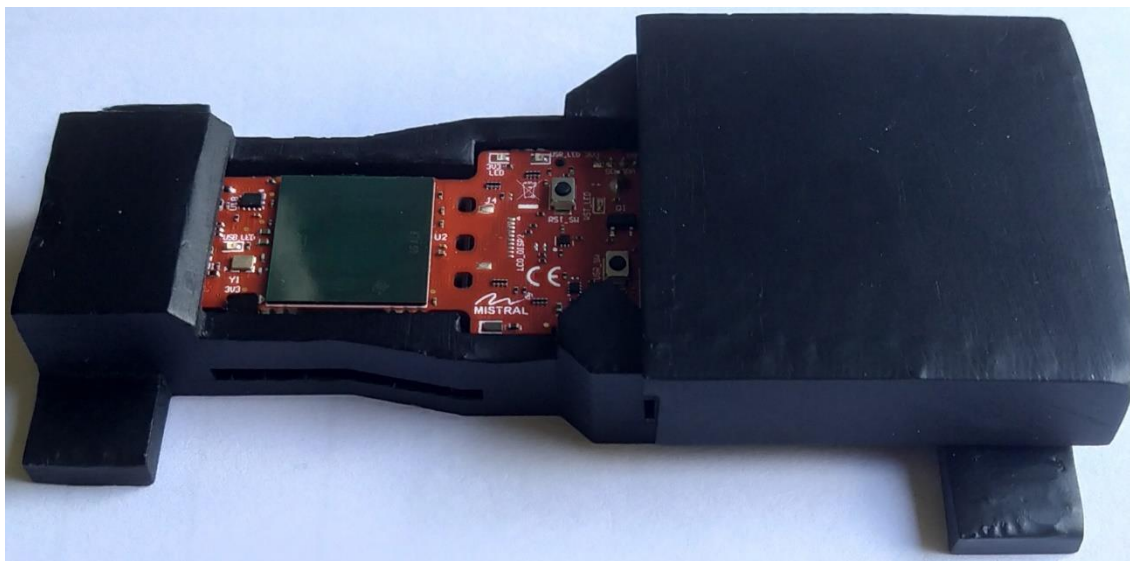


Obrázek 5.2 Model držáku se snímačem v prostředí Solidworks



Obrázek 5.3 Vytištěné části držáku

Obě části byly po natištění nabarveny černým lakem.



Obrázek 5.4 IWR6843AoPEVM uvnitř držáku

Po zkompletování dílů bylo zařízení nainstalováno v prostoru chodby na strop vyznačené pozice radaru podle obrázku 5.1 a připojeno na počítač v místnosti 2.143.

Na obrázku 5.4 vpravo je patrné, že došlo k deformaci materiálu na vnější straně. To však nijak neovlivnilo funkci držáku a obě části do sebe pasovaly. Tato deformace je zapříčiněna tím, že v oblasti tisku nebyla po celou dobu tisku stálá teplota. Pro Anycubic Eco Grey resin je uvedena pracovní teplota 25-30 °C. Pro nižší teploty je potřeba nastavit delší dobu expozice ultrafialovým světlem, aby došlo k správnému vytvrzení resinu.

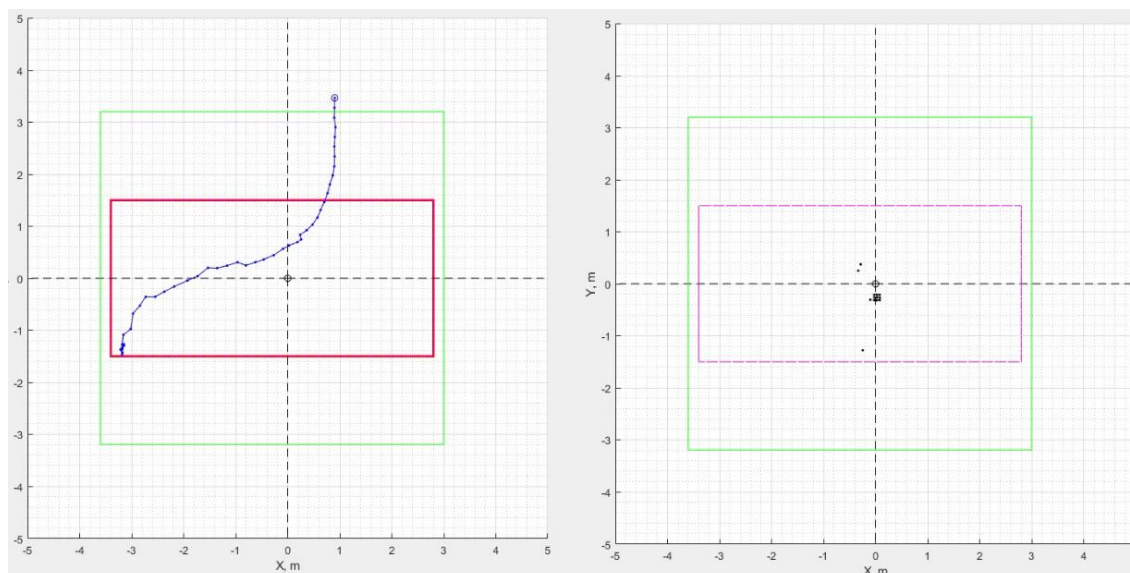
Při ověřování správné funkce detekce osob a sledování jejich trajektorie pohybu se ukázalo, že kovové prvky vyznačené na obrázku 5.1 mají velký vliv na získávaná data radarem. Velká kovová skříň způsobovala největší problém s detekcí osob. Mikrovlny se od kovových objektů odráží [41]. IWR6843AoP dokáže vypočítat vzdálenost a příchozí směr tohoto signálu, ale neumí přesně určit jejich trajektorii. Zařízení pak získává nepřesná data, která se jeví jako rušení v blízkosti pohybujících se osob a kovových objektů. Z tohoto důvodu byl zvětšen Gain gating funkce, aby i v blízkosti velké kovové skříně došlo k detekci osoby. Je to však na úkor rozlišitelnosti osob, které jsou blízko sebe. Zvětšením Gain gating funkce dojde k zvětšení prostoru, který lze považovat za pohybující se osobu. Když jsou dvě osoby blízko sebe může dojít k detekci pouze jedné osoby.

Zároveň bylo nutné zamezit ghostingu osob. To znamená falešné detekci osoby. V některých případech může docházet k vytvoření informace o více osobách, než jich skutečně je. Například pokud jsou nastaveny limity nebo Gain gating funkce příliš malé, tak u osoby s nataženými rukami může dojít k detekci vícero osob. Například tělo je považováno za jednu osobu a roztažené ruce daleko od těla se detekují jako další osoba.

Parametry gating funkce se povedlo nastavit optimálně, aby byl snímač schopen rozlišit více osob vedle sebe a zároveň, aby detekoval osoby v místě s rušením od kovových objektů.

Při ověřování funkce bylo vyzorováno, že při dovření vstupních dveří docházelo ke chvění zařízení. To je z důvodu umístění zařízení na rám mezi stropními deskami. Ty nelze považovat za pevnou konstrukci. Při dovření se totiž vždy blízko u pozice umístěného radaru objevily detekované body. Pokud není zařízení pevně upevněno může kvůli vibracím docházet k takovým jevům.

Získaná data z IWR6843AoPEVM jsou velmi náchylné na úhel, pod kterým jsou snímány. Pokud by nebyl snímač upevněn v rovnoběžné pozici s podlahou, dojde k natočení souřadnicového systému zařízení. Získaná data potom budou obsahovat zkreslení.



Obrázek 5.5 Průchod osoby a vzniklé vibrace dovřením dveří

6. ZÁVĚR

Hlavním cílem bylo pochopení způsobů detekce osob, sledování trajektorie pohybu a významu zájmových zón při zpracování dat. Práce se zabývá mikrovlnnými radarovými snímači. Konkrétně se jedná o technologii mmWave radar sensor od společnosti Texas Instruments. Klíčové bylo pochopení funkce jednotlivých hardwarových subsystémů, které jsou součástí čipu IWR6843AoP a také softwarové implementace algoritmů zajišťujících detekci osob.

Dokumentace poskytovaná TI je více než dostatečně obsáhlá, obzvlášť ze stránky popisu kódu a jeho implementace.

Pro implementaci funkce detekce osob a trajektorie pohybu bylo využito demo Counting People a zpracovaná data byla vizualizována v grafickém rozhraní (GUI). Jediné, s čím byl u GUI problém bylo ukládání dat po ukončení snímání. Pro více než tisíc snímků se stávalo, že ukládání dat do souboru .mat nebylo úplné. Soubor se při přehrávání jevil jako poškozený a část dat chyběla. Proto nebyly tyto soubory ukládány a nejsou součástí příloh, neboť je nelze zpětně přehrát.

Byl přenastaven konfigurační soubor dle navržených rozměrů zón a provedena simulace scénáře. Simulace fronty se účastnily čtyři osoby. Tři z nich imitovali pohyb ve frontě a čtvrtá osoba byla mimo zájmové zóny. Všechny tři osoby, které procházeli zájmovou zónou byly detekovány a byla sledována jejich trajektorie pohybu. Čtvrtá osoba nebyla detekována, neboť se vyskytovala mimo zájmovou zónu a sledovací vrstva nezpracovávala její detekované body.

Následně bylo provedeno zhodnocení jednotlivých metod detekce osob. Z porovnání různých systémů plyne, že se detekce osob radarem jeví cenově jako nejvhodnější možností. Fúze s kamerovým systémem nebo LiDARem by mohla zajistit přesnější snímání okolí.

Jako poslední byly rozebrány možné využití radarového snímače a poté vybráno místo, kde bylo provedeno ověření funkce na cílové platformě. U velkých kovových částí vznikly rušivé odrazy, a proto musely být upraveny parametry gating funkce. Byly přenastaveny konfigurační parametry pro optimální detekci osob a sledování trajektorie pohybu.

LITERATURA

- [1] MARTIN, Daryl. Lighting for Machine Vision. *Http://www.advancedillumination.com/* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.visiononline.org/userAssets/aiaUploads/file/CVP_Beginning-Lighting-for-Machine-Vision_Daryl-Martin.pdf
- [2] Detection Layer. In: *Ti.com* [online]. Dallas, Texas, 2021 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/1023/3D_5F00_people_5F00_counting_5F00_detection_5F00_layer_5F00_tuning_5F00_guide.pdf
- [3] TISCHLER, Greg. 80 GHz radar vs. ultrasonic. *Vega.com* [online]. 2019 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.vega.com/en-us/company/blog/2019/80-ghz-radar-vs-ultrasonic>
- [4] BARETT, Dennis a Adrian ALVAREZ. MmWave radar sensors in robotics applications. *Ti.com* [online]. 2017 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/pdf/spry311>
- [5] TOA, Mubina a Akeem WHITEHEAD. Ultrasonic Sensing Basics. *Ti.com* [online]. 2021 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slaa907d/slaa907d.pdf>
- [6] KHYE, Teo, Neo SIM a Solomon YOU. Comparative Analysis of Radar and Sonar Principles [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.dsta.gov.sg/docs/default-source/dsta-about/comparative-analysis-of-radar-and-sonar-principles.pdf?sfvrsn=2>
- [7] DANIEL, Liam, Dominic PHIPPEN, Edward HOARE, Mike CHERNIAKOV a Marina GASHINOVA. Image Segmentation in Real Aperture Low-THz Radar Images. In: 2019 20th International Radar Symposium (IRS) [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 1-8 [cit. 2022-01-03]. ISBN 978-3-7369-9860-5. Dostupné z: doi:10.23919/IRS.2019.8768106
- [8] History of RADAR. *Training.weather.gov* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://training.weather.gov/nwstc/NEXRAD/RADAR/Section1-1.html>
- [9] Pulse radar. *Radartutorial.eu* [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Pulse%20Radar.en.html>
- [10] CW radar. *Radartutorial.eu* [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Continuous%20Wave%20Radar.en.html#tr>
x
- [11] AN, Sining, Zhongxia Simon HE, Jianguo LI, Jianping AN a Herbert ZIRATH. Micrometer Accuracy Phase Modulated Radar for Distance Measurement and Monitoring. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2020, 20(6), 2919-2927 [cit. 2021-12-19]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2019.2955746

- [12] FMCW radar. Radartutorial.eu [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: https://www.radartutorial.eu/02.basics/pic/fmcw_prinzip.png
- [13] Chirp – FMCW princip. Radartutorial.eu [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: https://www.radartutorial.eu/02.basics/pic/fmcw_prinzip.png
- [14] HAVLE, Otto. Automa [online časopis]. 2008, (1), 42-45 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/36550.pdf
- [15] *Thinklucid.com* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://thinklucid.com/tech-briefs/understanding-digital-image-sensors/#:~:text=The%20solid-state%20image%20sensor,the%20back%20of%20the%20sensor.>
- [16] PETYOVSÝ, Petr. *Barevné modely* [online]. 2021 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: http://vision.uamt.feec.vutbr.cz/ZVS/lectures/12_Barevne_modely.pdf
- [17] KHADER, Motaz a Samir CHERIAN. Introduction to LIDAR. Ti.com [online]. 2020 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/wp/slyy150a/slyy150a.pdf>
- [18] *Quanergy's solid state lidar* [online]. 2021 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.geoweekevents.com/news/quanergy-s-solid-state-lidar-range-expands-to-130-meters#:~:text=The%20S3%20Series%20provides%20over,%24500%20for%20mass-market%20production>
- [19] *Velodyne LIDAR* [online]. 2020 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://velodynelidar.com/press-release/velodyne-lidar-unveils-breakthrough-solid-state-lidar-sensor/>
- [20] *Quanergy LIDAR* [online]. 2016 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/quanergy-solid-state-lidar>
- [21] IWR6843AOP [online-dokumentace]. 2021 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iwr6843aop.pdf?ts=1640550768110&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FIWR6843AOP
- [22] IWR6843AOPEVM foto. In: *Ti.com* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/content/dam/ticom/images/products/ic/processors/evm-boards/iwr6843aopevm-top.png:large>
- [23] Common Bus Architecture Throughput [online-dokumentace]. Texas, 2007 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/spraan7/spraan7.pdf?ts=1640716293512&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [24] Technical Reference Manual. Ti.com [online]. Texas, 2020 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/swru520e/swru520e.pdf?ts=1640635334768HWA.1.1>
- [25] Radar Hardware Accelerator. Ti.com [online]. Texas, 2020 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/swru526b/swru526b.pdf?ts=1640636220515>

- [26] SEERY, James. A memory operated in a modified ping-pong mode. [online] Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CA2287034A1/en>
- [27] Tracker layer. *Ti.com* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/1023/3D_5F00_people_5F00_counting_5F00_tracker_5F00_layer_5F00_tuning_5F00_guide.pdf
- [28] 3D Counting People Demo Implementation Guide. *Ti.com* [online]. Texas, 2020 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwin-u21_pT1AhXh8LsIHxzDBhUQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fe2e.ti.com%2Fcfs-file%2F__key%2Fcommunityserver-discussions-components-files%2F1023%2F3D_5F00_people_5F00_counting_5F00_demo_5F00_implementation_5F00_guide.pdf&usg=AOvVaw1t4jyjgrvrJrXfE3K6hUGZ
- [29] Mmwave SDK guide. In: *Ti.com* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/1023/7801.mmwave_5F00_sdk_5F00_user_5F00_guide.pdf
- [30] CFAR. In: *Radartutorial.eu* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/False%20Alarm%20Rate.en.html>
- [31] LUO, Xiaomu, Baihua SHEN, Xuemei GUO, Guocai LUO a Guoli WANG. Human tracking using ceiling pyroelectric infrared sensors. In: 2009 IEEE International Conference on Control and Automation [online]. IEEE, 2009, 2009, s. 1716-1721 [cit. 2022-01-03]. ISBN 978-1-4244-4706-0. Dostupné z: doi:10.1109/ICCA.2009.5410239
- [32] LUO, Xiaomu, TONG LIU, Baihua SHEN, QINQUN, LIWEN GAO a Xiaoyan LUO. Human indoor localization based on ceiling mounted PIR sensor nodes. In: 2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC) [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 868-874 [cit. 2022-01-03]. ISBN 978-1-4673-9292-1. Dostupné z: doi:10.1109/CCNC.2016.7444903
- [33] *Kalman filtr* [online]. UAMT FEKT VUT, Brno, 2008 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.uamt.fekt.vut.cz/~richter/vyuka/0910_mpov/tmp/kalman_filter.html
- [34] KHYE, Teo, Neo SIM a Solomon YOU. Comparative Analysis of Radar and Sonar Principles [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.dsta.gov.sg/docs/default-source/dsta-about/comparative-analysis-of-radar-and-sonar-principles.pdf?sfvrsn=2>
- [35] XINKE, Liu a Xiong ZHENGXIANG. Underwater Small Target Tracking Algorithm Based on Diver Detection Sonar Image Sequences. In: 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering [online]. IEEE, 2012, 2012, s. 727-730 [cit. 2022-01-03]. ISBN 978-1-4673-1450-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICICEE.2012.195

- [36] KVASIC, Igor, Nikola MISKOVIC a Zoran VUKIC. Convolutional Neural Network Architectures for Sonar-Based Diver Detection and Tracking. In: OCEANS 2019 - Marseille [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 1-6 [cit. 2022-01-03]. ISBN 978-1-7281-1450-7. Dostupné z: doi:10.1109/OCEANSE.2019.8867461
- [37] Lidar vs Radar. Fierceelectronics.com [online]. 2018 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://www.fierceelectronics.com/components/lidar-vs-radar>
- [38] TI's proximity sensing technology. Ti.com [online-dokumentace]. Texas, 2019 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/slyu054/slyu054.pdf?ts=1641188114149&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [39] GARCIA, Keegan. Bringing Intelligent Autonomy. Ti.com [online-dokumentace]. Texas, 2018 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/wp/spry320a/spry320a.pdf?ts=1641188033174&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FIWR6843%253FkeyMatch%253DIWR6843%2526tsearch%253Dsearch-everything%2526usecase%253DGPN
- [40] BARRETT, Denis a Adrian ALVAREZ. MmWave radar sensors in robotics applications. Ti.com [online-dokumentace]. Texas, 2020 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/wp/spry311a/spry311a.pdf?ts=1641106285335&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com.eg%252F
- [41] ULLOA, Rafael Zamorano a Guadalupe Hernandez SANTIAGO. *The Interaction of Microwaves with Materials of Different Properties* [online]. 2019 [cit. 2022-05-19]. Rafael Zamorano Ulloa, Ma. Guadalupe Hernandez Santiago and Veronica L. Villegas Rueda. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.83675

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
PIR	Passive Infrared Sensor
ToF	Time of Flight
SONAR	Sound Navigation and Ranging
CW	Continuous Wave
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FFT	Fast Fourier Transformation
3D	trojdimenzionální
LiDAR	Light Detection and Ranging
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
IR	Infra-Red
RGB	Red-Green-Blue
PC	Personal Computer
RTOS	Real Time Operating System
TI	Texas Instruments
GUI	Graphical User Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
CFAR	Constant False Alarm Rate
RADAR	Radio Detection and Ranging
AoA	Angle of Arrival
SPI	Serial Peripheral Interface
GPIO	General Purpose Input Output
I ² C	Inter Integrated Circuit
CAN-FD	Controller Area Network Flexible Data Rate
LDO	Low-dropout regulator
DSP	Digital Signal Processor
DPS	Deska plošného spoje
SOP	Sense on Power
API	Application Programming Interface
ROI	Region of Interest
SNR	Signal to Noise Ratio
CASO-CFAR	Cell Averaging Smallest of Constant False Alarm Rate
MSB	Most Significant Bit
LSB	Least Significant Bit

Symbols:

A	amplitude signal	(-)
ω	angular frequency	(s^{-1})
φ	phase shift	(rad)
$d(t)$	change of distance over time	(m)
λ	wavelength	(m)
f_D	Doppler frequency	(Hz)
v_c	speed of light	(m/s)
v	speed	(m)
θ	Angle of Arrival	(Hz)
T_c	time between chirps	(s)
l	distance between two antennas	(m)
Δf	frequency difference	(Hz)
$\Delta\varphi$	phase difference	(rad)

SEZNAM PŘÍLOH

drzak_part1_vykres.pdf

drzak_part2_vykres.pdf

konfigurace.cfg

overhead_demo_visualizer.m

configDialog.m

pouzite_obrazky.zip