



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ**

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**DETEKCE PARKOVACÍCH MÍST S POUŽITÍM RADARU**

PARKING SPOT DETECTION USING RADAR

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**KATEŘINA KUNORZOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. LUKÁŠ MARŠÍK**

BRNO 2021

## Zadání bakalářské práce



Studentka: **Kunorzová Kateřina**  
Program: Informační technologie  
Název: **Detekce parkovacích míst s použitím radaru**  
**Parking Spot Detection Using Radar**  
Kategorie: Zpracování signálů

### Zadání:

1. Nastudujte literaturu související se zpracováním radarového signálu a principy detekce blízkých objektů. Následně se seznamte s vhodným radar-on-chip řešením, jeho architekturou a principem programování.
2. Nasbírejte reálná data na zapůjčeném HW a vytvořte komplexní dataset včetně anotace a odpovídajícího video záznamu.
3. Po dohodě navrhnete či zvolte metodu která na základě extrahovaných informací z radarového signálu umožní detekci volných míst mezi zaparkovanými automobily z jedoucího vozu. Tuto ověřte např. v prostředí MATLAB na nasbíraných datech.
4. Implementujte ověřenou metodu na vhodném HW.
5. Proveďte důkladné vyhodnocení spolehlivosti metody nad nasbíranou datovou sadou. Následně proveďte sérii vhodných testů na zvoleném HW pro ověření funkčnosti a výkonnosti systému v reálném prostředí.
6. Diskutujte dosažené výsledky a navrhnete možné pokračování práce.

### Literatura:

- Dle pokynů vedoucího

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 až 3

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Maršík Lukáš, Ing.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2020

Datum odevzdání: 12. května 2021

Datum schválení: 30. října 2020

## Abstrakt

Cílem práce je detekovat volná parkovací místa a využít k tomu radarové zařízení. Radar vysílá signál a ten se následně odraží od objektů v okolí radaru a je zpět přijímán. Po zpracování je k dispozici 2D/3D point cloud (prostor kolem radaru). Propojením této informace s rychlostí vozu či GPS polohou je možné získat posun automobilu a vypočítat souřadnice bodů z okolí. Následně lze tyto body postupně ukládat a zpřesňovat tak prostor, kudy auto projíždí. Výsledkem je mapa bodů, ve které lze pomocí vhodných metod detekovat volná parkovací místa. Propojením místa s příslušným GPS záznamem je k dispozici přesná GPS poloha volného místa. Výsledkem práce je systém analyzující radarová data. Přínosný může být jako vstup pro celkový systém monitorování volných míst, jehož využívání by řidičům ušetřilo spoustu času.

## Abstract

The aim of this work is to detect free parking spaces by using radar equipment. The radar sends a signal which is reflected from objects around it and then is received back. After processing, a 2D/3D point cloud (space around the radar) is available. By merging this information with the information about car's speed or GPS position, it is possible to obtain the car's displacement and calculate the coordinates of points from the surroundings. By saving these points it is possible to specify the space the car passes. The result is a map of points, where using appropriate methods, free parking spaces can be detected. By linking the place to the corresponding GPS record, the exact GPS position of the free place is available. The result of this work is a system analysing radar data. It can be used as an input for overall free parking spaces monitoring system, which would save drivers a lot of time while using it.

## Klíčová slova

radar, FMCW radar, detekce parkovacích míst, zpracování signálu, 2D/3D mračno bodů, Texas Instruments, Python, GPS poloha

## Keywords

radar, FMCW radar, parking spot detection, signal processing, 2D/3D point cloud, Texas Instruments, Python, GPS location

## Citace

KUNORZOVÁ, Kateřina. *Detekce parkovacích míst s použitím radaru*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Lukáš Maršík

# Detekce parkovacích míst s použitím radaru

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením pana Ing. Lukáše Maršíka. Uvedla jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpala.

.....  
Kateřina Kunorzová  
11. května 2021

## Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce panu Ing. Lukášovi Maršíkovi za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi při tvorbě bakalářské práce věnoval. Děkuji také svému snoubenci Vojtěchovi Rafajovi za podporu a pomoc při tvorbě datové sady či demonstračního videa. V neposlední řadě patří poděkování kamarádce Pavle Ovčáčkové za pomoc při gramatické kontrole práce.



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Shrnutí dosavadního stavu</b>	<b>5</b>
2.1	Dostupné metody detekce parkovacích míst . . . . .	5
2.2	Polohový a souřadnicový systém . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Radarová technologie</b>	<b>10</b>
3.1	Historie . . . . .	10
3.2	Oblasti využití radarů . . . . .	11
3.3	Princip a základní komponenty radarů . . . . .	12
3.4	Informace dostupné z radaru . . . . .	14
3.5	Druhy radarů . . . . .	15
3.6	Modulované radary s kontinuálními vlnami (FMCW) . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Návrh a implementace</b>	<b>19</b>
4.1	Radarový modul AWR1843 . . . . .	19
4.2	Návrh . . . . .	20
4.3	Sběr dat . . . . .	21
4.4	Tvorba mapy prostředí . . . . .	24
4.5	Detekce a vizualizace volných míst . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Testování</b>	<b>31</b>
5.1	Úspěšnost detekce míst a přesnost určení GPS polohy . . . . .	31
5.2	Vyhodnocení testů . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>37</b>
	<b>Literatura</b>	<b>38</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého paměťového média</b>	<b>41</b>
<b>B</b>	<b>Plakát</b>	<b>42</b>

# Seznam obrázků

2.1	Detekce parkování pomocí kamer. [19]	6
2.2	Pozemní senzor. [22]	7
2.3	Indukční smyčky. [20]	7
3.1	Freya - radar včasné výstrahy provozovaný Německem během 2. sv. války. [23]	10
3.2	Radarová věž sloužící k monitorování všeobecného provozu kolem letišť. [3]	12
3.3	Starý radarový systém na bývalém vojenském letišti Gatow poblíž Berlína. [17]	12
3.4	Základní princip radarové technologie.	13
3.5	Slow-ramp princip.	17
3.6	Fast-ramp princip.	17
3.7	Architektura FMCW radaru.	18
4.1	Modul AWR 1843 od společnosti Texas Instruments.	19
4.2	Návrh systému.	21
4.3	Systém uchycení radaru na automobil.	22
4.4	Umístění radaru při prvním sběru dat.	22
4.5	Finální umístění radaru a kamery při sběru dat.	23
4.6	Ověření detekce a vykreslení dat v prostředí MATLAB.	24
4.7	Mapa prostředí před filtrací.	27
4.8	Filtrovaná mapa prostředí ( $z \geq -0.3$ a $z \leq 0.5$ ).	28
4.9	Filtrovaná mapa prostředí podle mediánu SNR.	28
4.10	Finální podoba vyfiltrované mapy prostředí.	29
4.11	Umístění hranice překážek odpovídající bodům na obrázku.	29
4.12	Ukázka vizualizace volných míst.	30
5.1	Detekce kolmých parkovacích míst.	32
5.2	Panorama s volnými místy odpovídajícími detekovaným.	32
5.3	Detekce podélných parkovacích míst ve dvou navzájem kolmých ulicích.	33
5.4	Detekce podélného parkovacího místa.	33
5.5	Detekce kolmých parkovacích míst ve dvou řadách - složitější prostředí.	34
5.6	Detekce kolmých parkovacích míst ve dvou řadách - testování při zatačení.	35
5.7	Procentuální zobrazení úspěšnosti detekce.	36
B.1	Plakát práce vzniklý za účelem účasti na konferenci Excel@FIT.	42

# Seznam tabulek

3.1	Využívaná frekvenční pásma s příklady použití v radarech. . . . .	14
4.1	Nastavené parametry radaru. . . . .	20
5.1	Výsledky detekce kolmých parkovacích míst. . . . .	32
5.2	Výsledky detekce podélných parkovacích míst ve dvou navzájem kolmých ulicích. . . . .	33
5.3	Výsledky detekce GPS poloh podélných parkovacích míst. . . . .	34
5.4	Výsledky detekce GPS poloh kolmých parkovacích míst ve dvou řadách - složitější prostředí. . . . .	34
5.5	Detekce kolmých parkovacích míst ve dvou řadách - testování při zatáčení. .	35
5.6	Vyhodnocení detekce míst. . . . .	36

# Kapitola 1

## Úvod

Žijeme ve 21. století a technologie jsou nám stále bližší. Umělá inteligence čím dál častěji nahrazuje práci lidí. Rychlému vývoji neunikl ani automobilový průmysl. Na počátku minulého století jsme ve světě mohli vidět první automobily. Ty však nemají příliš společného s těmi dnešními. Počet automobilů ve městech se stále zvyšuje a často se řeší problém s nedostatkem parkovacích míst. Lidé stráví spoustu času hledáním vhodného místa k parkování a mnohdy musí několikrát projet celou čtvrtí, než se jim to opravdu podaří. Na trhu nalezneme různá řešení tohoto problému. Parkoviště využívají technologií v podobě kamer, indukčních smyček či pozemních senzorů. Problémem je ale investice do velkého počtu jednotek k pokrytí všech parkovacích prostorů. Navíc přesnost těchto zařízení může být ovlivněna počasím či vizualizačními podmínkami. Radarová technologie je v těchto oblastech mnohem spolehlivější. Radar by byl součástí automobilů a nebylo by třeba dalších externích jednotek ke sběru dat. Dokonce by bylo možné sdílet senzor z jiných systémů/asistentů, který už mají automobily zabudovaný. V dnešní době spolu auta dokážou čím dál více komunikovat a do budoucna by tak mohlo docházet k výměně informací – především sdílením prostoru kolem vozu.

V této práci se nejprve zaměřuji na stav současného řešení detekce parkovacích míst. V kapitole 2 je popsán dosavadní stav. Teoretická část se zabývá základním principem fungování radaru. Cílem kapitoly 3 je krátce popsat historii radarů, jejich základní komponenty a typy. Věnovat se bude také popisu fyzikálních vlastností radaru a tomu, jaké informace je možné díky radaru získat. Pro řešení této práce je využit radarový modul AWR1843, proto úvod kapitoly 4 patří stručnému popisu tohoto modulu. Dále se zaměřuje na návrh samotného systému a implementaci. V neposlední řadě je popsáno také testování - konkrétně v kapitole 5. Výsledky práce mohou být přínosem pro všechny řidiče. Cílem je poskytnout informaci o možném parkování. Řidič automobilu rychle nalezne volné parkovací místo a ušetří si spoustu času, který by jinak strávil hledáním.

## Kapitola 2

# Shrnutí dosavadního stavu

### 2.1 Dostupné metody detekce parkovacích míst

Aktuálně na trhu nalezneme různé možnosti detekce parkování. Většinou se však všechny varianty zabývají spíše monitorováním parkovacích míst na větších parkovištích. Jedná se především o řešení využívající kamery, radary, různé senzory či indukční smyčky umístěné přímo na parkovišti. Ale pro detekci parkování na menším prostoru či podélně v ulicích nejsou tato řešení ekonomicky příliš výhodná. Pokud by se neparkovalo na velké ploše, kterou jsme schopni sledovat jako celek, museli bychom použít opravdu velký počet jednotek. Často se monitorovací zařízení také umísťují do země a detekují automobil ve chvíli, kdy najede nad dané zařízení. Řešení však vyžaduje opět obrovské množství pořízených jednotek a mnohdy také zásah do vozovky. U všech těchto variant se počítá s ukazatelem obsazenosti přímo na parkovišti - řidič tedy nemůže zjistit stav dříve, než na parkoviště dojede. Případně by data těchto zařízení musela být odeslána a zpracována nějakou aplikací, která poskytne informace o volných parkovacích místech řidičům. V dalších podkapitolách se budu věnovat jednotlivým aktuálním řešením.

S přibývajícím počtem automobilů, které obsahují senzor například kvůli parkovacímu asistentu se nabízí využití této technologie. Detekce parkování by probíhala pouze díky sběru dat samotných automobilů a nebylo by potřeba již dalších zařízení. Řidičům by byly vizualizovány stavy parkovacích míst ještě předtím, než by na nějaké parkoviště dojeli. V současné době není tato varianta příliš prozkoumána.

#### Kamera

Existuje obrovské množství různých řešení s využitím videokamer pro monitorování obsazenosti. Většina těchto přístupů však spoléhá na techniky uzpůsobené přímo danému prostředí. Řešení nejsou dostatečně obecná k použití na různých parkovištích. Navíc může dojít k vizualizačním problémům. Detekce nemusí být přesná vlivem stínu či špatného počasí (deště, sněhu). Kamery jsou často umístěny pouze na jednom statickém místě parkoviště (technické provedení lze vidět na obrázku 2.1). Pokud kamera monitoruje pouze vjezd/-výjezd parkoviště, může se stát, že velký automobil zakryje menší automobil, který jede ihned za ním. Stejný problém může nastat i v případě monitorování celého parkoviště, kdy velké automobily mohou zastínit ty menší. Plusem může být to, že kamera dokáže rozpoznat registrační značku automobilu. To se dá poté uplatnit třeba při rezervaci konkrétního parkovacího místa nebo k detekci nepovoleného parkování. Řešení s využitím kamer není

příliš finančně náročné, zároveň však neposkytuje dostatečně velkou spolehlivost a přesnost detekce.

Jedním z nejnovějších řešení je využití konvoluční neuronové sítě. Řešení má běžet na chytrých kamerách vybavených výpočetními schopnostmi. Tyto kamery by mohly být využity nejen na detekci parkování, ale například také k rozpoznávání tváří. [1]



Obrázek 2.1: Detekce parkování pomocí kamer. [19]

### **Pozemní senzory**

Senzory jsou umístěny v zemi, v místě parkovacího místa, jak je možné vidět na obrázku 2.2. Existují různé typy a technologie. Princip je nejčastěji založen na měření geomagnetického pole země, které je ovlivňováno různými kovy. Díky tomu může nějaké další zařízení uchovávat data o obsazenosti parkoviště a poskytovat je řidičům formou informační tabule. V současné době existují také aplikace, které ukazují volný počet míst v určité zóně. Přes tuto aplikaci je pak možné platit za parkování. Nevýhodou je složitá instalace a především údržba senzorů na každém parkovacím místě. Zejména na parkovištích s obrovským počtem míst je tato varianta finančně nevýhodná.

### **Indukční smyčky**

Technologie indukčních smyček je dnes už docela známá. Výhodou je vysoká spolehlivost a odolnost vůči počasí. Tato technologie téměř bez chyb snímá přítomnost vozidla. Nevýhodou je instalace. Zavedení indukčních smyček poruší vozovku (viz 2.3). Tato technologie se využívá především na větších parkovištích. Je umístěna u vjezdu a výjezdu z parkoviště. Snímá, kolik aut na parkoviště vjelo a kolik z něj vyjelo. Díky tomu tedy dokážeme spo-

lehlivě zjistit stav parkoviště. Řidičům je ukazováno, kolik míst je na parkovišti volných. U některých větších parkovišť mohou být indukční smyčky zavedeny také na konkrétní parkovací místo. To pak umožňuje již u vjezdu do parkoviště řidiči zobrazit konkrétní identifikátor (například číslo) volného parkovacího slotu. Pokud je na daném slotu zaparkováno auto, jeho číslo se u vjezdu nezobrazí. [10]

Řešení indukčních smyček je vhodné pouze pro parkoviště, kde máme určený vjezd a výjezd. Jedná se především o velká parkoviště se závorou, často placená. Pro detekci parkovacích míst, kde není jednotný vjezd ani výjezd, či detekci podélného parkování tato technologie není řešením. Museli bychom mít zavedenou smyčku na každé parkovací místo a navíc bychom řešili problémy se zobrazením o stavu parkování pro řidiče.



Obrázek 2.2: Pozemní senzor. [22]



Obrázek 2.3: Indukční smyčky. [20]

## Radary

Obrovskou výhodou radarů oproti ultrazvukovým a optickým přístupům je odolnost vůči teplotním vlivům nebo měnícím se světelným podmínkám. Existuje spousta vědeckých článků o detekci parkovacích míst s využitím radaru. Jeden ze způsobů je například umístění radarů na pouliční lampy. Systém poté vysílá vlny do prostoru a překážky odrazí vlny zpět, kde je radar zase zachytí. Algoritmus pak počítá, kde je umístěn objekt, který vlny odrazil. Zjišťuje velikost objektu a volný prostor kolem něj. Výsledky jsou předávány do centrálního systému, který pak může vizualizovat volná parkovací místa v navigacích či jiných aplikacích. Detekce může být vcelku přesná, ale řešení přináší jednu nevýhodu a tou je obrovské množství namontovaných radarů. Na pokrytí jednoho města bychom potřebovali několik desítek, možná stovek kusů zařízení a to je finančně velmi nevýhodné.

Druhým přístupem je sběr dat přímo z vozidel, která mají radar či jiný senzor již zabudovaný. Takle varianta ovšem zatím není ještě příliš zaběhlá. Existuje pár článků s popisem algoritmů řešící tento problém. Algoritmy jsou docela přesné, výpočetně nenáročné. Většinou však řeší spíše vyhodnocování parkovacích míst přímo za jízdy. Data se nikam neodesílají a řidič si nemůže předem zjistit, kde by se dalo parkovat. Ve své práci bych chtěla rozšířit i tuto oblast, sbírat data pohybujících se automobilů a společně se záznamem GPS detekovat pozici volných parkovacích míst.

## 2.2 Polohový a souřadnicový systém

### Systém GPS

GPS (angl. Global Positioning System) je satelitní navigační systém, jenž byl vyvinut na začátku 70. let americkým ministerstvem obrany. Původní myšlenkou bylo využít tento systém pro vojenské účely. Později byl zpřístupněn i civilním osobám. Dnes je hojně využíván v různých oblastech. GPS nepřetržitě poskytuje informace o poloze a čase. Celý systém je aktuálně složen z více funkčních satelitů. Přístroje využívající tento systém jsou schopny určit polohu uživatele právě na základě dat ze satelitů. Systém je složen ze 3 segmentů: [4]

- vesmírný (družice)
- řídicí (kontrolní střediska na Zemi)
- uživatelský (GPS přístroje jednotlivých uživatelů)

K určení polohy na Zemi je potřeba znát vzdálenosti od bodu k alespoň třem satelitům. Pokud je možné zachytit signál z více satelitů, lze určit také nadmořskou výšku nebo hodnoty zpřesňovat. Každý satelit neustále vysílá mikrovlnný rádiový signál. Pokud je GPS přijímač aktivní, je schopen přijmout signál. Jakmile jej získá, pomocí zabudovaného softwaru je signál zpracován. [4]

Uživateli je v konečné fázi poskytnuta informace týkající se daného bodu na planetě Zemi. Pro tuto práci je důležité znát hodnoty zeměpisné šířky, zeměpisné délky, času a rychlosti. Reprezentace zeměpisné šířky a délky má například tuto podobu: 49.21581601296731N, 16.573100204989245E. Poledníky označují zeměpisnou délku (východní, západní) a rovnoběžky naopak zeměpisnou šířku (severní a jižní). Písmeno pak znamená, v jaké polokouli se bod nachází.

### Kalmanův filtr

Kalmanův filtr se využívá kdekoli, kde máme nejisté informace o dynamickém systému. Byl navržen R. E. Kalmanem v roce 1960 a byl hojně využíván pro výpočet oběžné dráhy, sledování cíle či navigaci. Umožňuje matematicky zjistit hodnoty, které jsou přímým měřením těžko dosažitelné - například vlivem šumu nebo jiného rušení. To znamená, že díky znalosti předchozího stavu jsme schopni dopočítat stav následující. Kalmanovy filtry jsou ideálním řešením pro systémy, které se neustále mění. [2, 8, 18] Kalmanův filtr je použit pro zpřesnění GPS pozice. Pokud bychom totiž pozici automobilu odhadovali pouze z rychlosti vozu, mohlo by docházet k odchýlkám, které by postupně narůstaly.

### Rotace bodu

Nezbytnou součástí práce je také přepočítání souřadnic bodů vlivem rotace. Podle směru pohybu bude totiž potřeba různě vykreslovat. K tomuto výpočtu stačí znát pouze souřadnice bodu a úhel, o který bod rotuje. Zde je uveden vzorec pro určení nových souřadnic:

$$x' = x \cos \phi - y \sin \phi \quad (2.1)$$

$$y' = y \cos \phi + x \sin \phi \quad (2.2)$$

Nové souřadnice jsou označeny  $x', y'$ , původní  $x, y$  a  $\phi$  značí úhel. Úhel je určen směrem pohybu vozu, což je podrobněji popsáno na další straně.



## Směr pohybu

Pokud je trajektorie pohybu zaznamenána a uložena do GPS záznamu, je zpětně možné z tohoto záznamu zjistit směr pohybu mezi jednotlivými body. Směrem pohybu je zde myšleno, jaký je úhel mezi jednotlivými body. Pro výpočet<sup>1</sup> stačí znát zeměpisnou šířku a délku. Postup pro určení směru pohybu je následující:

$$a = \operatorname{atan2}(\sin \Delta\lambda \times \cos \phi_2, \cos \phi_1 \times \sin \phi_2 - \sin \phi_1 \times \cos \phi_2 \times \cos \Delta\lambda) \quad (2.3)$$

Platí, že  $\phi_1, \lambda_1$  je zeměpisná šířka + délka počátečního bodu,  $\phi_2, \lambda_2$  je zeměpisná šířka + délka koncového bodu a  $\Delta\lambda$  je rozdíl zeměpisných délek obou bodů. Výsledek  $a$  je třeba převést na stupně. Vyjde číslo v intervalu  $\langle 0^\circ, 360^\circ \rangle$ . Výsledek koresponduje s rozdělením světových stran - pokud by vyšlo  $0^\circ$ , trajektorie pohybu směřuje na sever,  $90^\circ$  na východ,  $180^\circ$  na jih a  $270^\circ$  na západ.

## Haversinův vzorec

Pro výpočet vzdálenosti mezi dvěma GPS souřadnicemi lze využít tzv. Haversinův vzorec<sup>1</sup>. Předpokladem výpočtu je, že Země má tvar koule. Tvar Země se ale od koule pravděpodobně trochu liší, proto je potřeba počítat s možnou nepřesností.

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos \phi_1 \times \cos \phi_2 \times \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (2.4)$$

$$c = 2 \times \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (2.5)$$

$$d = R \times c \quad (2.6)$$

kde  $\phi$  je zeměpisná šířka,  $\lambda$  je zeměpisná délka,  $R$  je zemský poloměr (střední poloměr = 6371 km<sup>2</sup>). Výslednou vzdálenost mezi dvěma body udává hodnota  $d$ .

---

<sup>1</sup><https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>

<sup>2</sup><https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>

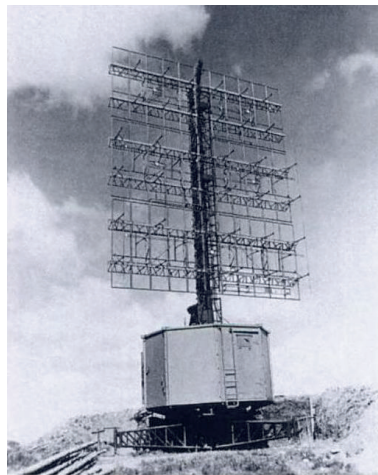
## Kapitola 3

# Radarová technologie

Radar je elektromagnetický systém pro detekci a lokalizaci objektů jako jsou především letadla, lodě, kosmické lodě, vozidla, lidé a přírodní prostředí. Funguje na principu vyzařování energie do prostoru a přijímání signálu odraženého od objektů. Odrážená energie, která se vrací do radaru nejen indikuje přítomnost cíle, ale také porovnáním přijatého signálu s tím, co byl vyslán, lze určit polohu a další informace týkající se cílového objektu. Radar může fungovat na dlouhé či krátké vzdálenosti. Dokáže pracovat ve tmě, v mlze, dešti, sněhu či oparu. Vysoká přesnost radaru za každého počasí je jedna z jeho předností. [15]

### 3.1 Historie

Slovo radar bylo původně zkratkou RADAR pro rádiovou detekci a rozsah. Dnes je tohle slovo docela běžné, mnoho lidí má s radary zkušenosti - nejčastěji při měření rychlosti v oblasti dopravy. [14]



Obrázek 3.1: Freya - radar včasné výstrahy provozovaný Německem během 2. sv. války. [23]

Roku 1886 němec Heinrich Hertz demonstroval odraz rádiových vln. Za svou práci získal uznání, neusiloval však o její praktické aplikace. V roce 1900 Nikola Tesla popsal koncept pro elektromagnetickou detekci a měření rychlosti. Na počátku 20. století sestrojil Christian Hülsmeier přístroj, který by byl dnes známý jako jednoplošný pulzní radar. Zařízení detekovalo lodě pomocí odrazu rádiových vln. Přístroj byl nabízen německému námořnictvu a

dalším přepravním společností. Zájem o zařízení nebyl ale takový, jak se předpokládalo, a proto radar musel být ještě několikrát znovu objeven, než se začal plně používat. Později tuto myšlenku znovu prosazoval Guglielmo Marconi, pozoroval na svých pokusech rádiovou detekci cílů. V roce 1930 Lawrence Hyland poprvé detekoval letadla, což vedlo k důkladnějším zkoumáním. Vývoj radaru se zrychlil a nejvíce se projevoval ve Spojených státech, Velké Británii, Francii, Německu, Rusku, Itálii a Japonsku. Radary byly hojně využívány během druhé světové války, jak vypadaly je zobrazeno na obrázku 3.1. V polovině 20. století si začali Velká Británie a Spojené státy vyměňovat informace o vývoji radaru. Do té doby většina radarů fungovala na velmi vysokých frekvencích vlnových délek. Díky spolupráci Velké Británie se Spojenými státy byly položeny základy pro vývoj radaru na mikrovlnných frekvencích, které převládají dodnes. [15]

Radary byly využívány především v armádní oblasti, ale v dnešní době už tomu tak není. Nyní se radary používají v dopravě (měření rychlosti vozidel), sportu (rychlost míčku v baseballu nebo tenise), meteorologii (monitorování předpovědi počasí), letectví a v mnoha dalších oblastech. [14]

## 3.2 Oblasti využití radarů

Radary se hojně využívají k detekci cílu na zemi, na moři, ve vzduchu, ve vesmíru či pod zemí. Hlavní oblasti použití jsou uvedeny níže. [7, 15]

### Vojenský průmysl

Již první radary našly své využití v této oblasti. Mohou sloužit pro vyhledávání letadel, lodí i pozemních cílů. V rámci protivzdušné obrany zajišťují včasnou výstrahu i na několik stovek kilometrů.

### Meteorologie

V České republice jsou aktuálně v provozu dva velké radary umožňující předpověď počasí. Princip je založen na zpracování signálů odražených od mraků s dešťovými kapkami či sněhovými vločkami. Část signálu je mrakem pohlcena a část odražena zase zpět k radaru, kde je zachycena a zpracována. Na základě tohoto signálu lze podrobně zjistit o jaký typ mraku se jedná.

### Měření rychlosti

Asi nejnámější oblast využití radaru. Policie díky těmto zařízením dokáže snímat rychlost projíždějících vozidel. Dalším příkladem je monitorování dopravy - například ovládání světelných semaforů podle hustoty provozu.

### Vesmír a astronomie

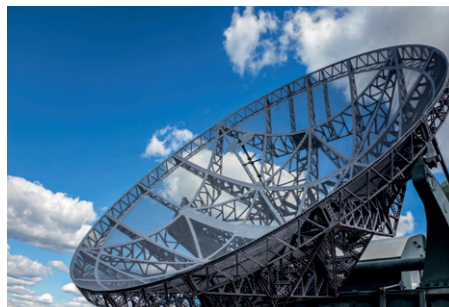
Velké pozemní radary se používají pro sledování satelitů a dalších vesmírných objektů. Dále se radary využívají k navigaci vesmírných sond a družic, které například snímají naši planetu. Vesmírná vozidla využívala radary pro přistání na Měsíci.

## Letecká a lodní doprava

V oblasti letecké dopravy jsou radary využívány k bezpečnému řízení letového provozu jak na letištích, tak ve vzduchu. Ukázky těchto zařízení lze vidět na obrázcích 3.2 a 3.3. Radary se dají využít také k mapování oblastí deště tak, aby se kolem nich dalo bezpečně proletět. V blízkosti letišť jsou umístěny radary určené k pozorování počasí. Důležité jsou také radary na lodích. Zabraňují kolizím, zejména při špatné viditelnosti. Pobřežní radary se využívají pro monitorování přístavů a říční dopravy.



Obrázek 3.2: Radarová věž sloužící k monitorování všeobecného provozu kolem letišť. [3]



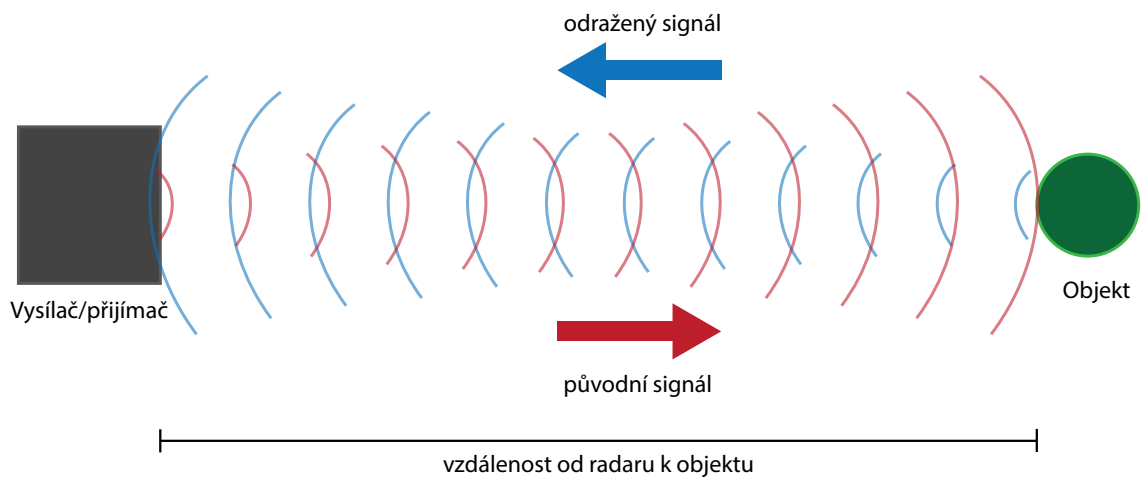
Obrázek 3.3: Starý radarový systém na bývalém vojenském letišti Gatow poblíž Berlína. [17]

## 3.3 Princip a základní komponenty radarů

Základní princip radaru je zobrazen na obrázku 3.4. Vysílač generuje elektromagnetický signál, který je vyzařován do prostoru. Podle rozmístění objektů v prostoru se odraží signál zase zpět a je zachycen přijímačem. Poté je zpracován a použit k detekci cíle. Vzdálenost od radaru k cíli se zjistí pomocí změřeného času, který je zapotřebí na cestu signálu od vysílače k objektu a zase zpět k přijímači. Úhel umístění cíle lze zjistit podle směru, kam ukazuje úzký paprsek antény při přijetí signálu s maximální amplitudou. Pokud je objekt v pohybu, dochází k posunu frekvence přijatého signálu důsledkem Dopplerova jevu. Tento jev je v radaru využíván k rozlišení požadovaných pohybujících se cílů od statických (nežádoucích) signálů odražejících se od přírodního prostředí jako je například země, moře nebo déšť. Radar také poskytuje informace o povaze sledovaného objektu. [15]. V následujících řádcích stručně popíši základní elementy radaru. [15, 16]

- **Vysílač** je velmi důležitou součástí radaru, generuje a vysílá signál v požadované vlnové délce. Může mít malý průměrný výkon v řádech miliwattů nebo velký v megawattch. Většina radarů používá krátký pulzní průběh, takže může být použita jedna sdílená anténa pro vysílač i přijímač.
- **Duplexor** umožňuje použití jedné sdílené antény. Jeho funkcí je chránit přijímač před vyhořením, zatímco je vysílač zapnutý, a nasměrovat přijatý signál do přijímače, nikoli vysílače. U FMCW radarů s oddělenými vysílacími a přijímacími anténami se tato komponenta nenachází.
- **Anténa** je zařízení, které umožňuje šíření energie do prostoru a následné sbírání energie zpět k přijímači.

- **Přijímač** je další významnou komponentou radaru. Zesiluje přijímaný signál tak, aby jej bylo možné detekovat. Je důležité, aby přijímač neprodukoval vlastní šum, který by mohl ovlivnit výsledek. V rámci zpracování signálu se pak často odděluje požadovaný signál od nežádoucího. Ke zpracování signálu bývá využit nějaký filtr (např. Dopplerův). Zpracované informace se následně mohou zobrazit nebo jakkoli jinak využít.
- **Směšovač** je součástka, která kombinací dvou signálů vytváří jeden nový signál. Zde se používá pro složení vyslaného a přijatého signálu dohromady.



Obrázek 3.4: Základní princip radarové technologie.

### Radarová rovnice

Radarová rovnice umožňuje nejen určit odhad dosahu radaru, ale také může být užitečná pro konstrukci radarového systému. Radarovou rovnici můžeme najít zapsanou v různých tvarech. Většina radarů využívá pro přijímání i vysílání jednu anténu, nejběžnější rovnice pro tyto radary má tvar:

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{min}} \quad (3.1)$$

kde  $R_{max}$  je maximální dosah radaru,  $P_t$  vyjadřuje výkon signálu, který radar vyzařuje.  $G_t$  je zisk antény. Hodnota  $A_e$  je efektivní plocha přijímače,  $\sigma$  značí radarový průřez cílového objektu.  $S_{min}$  udává hodnotu minimálního detekovatelného signálu radaru. [16]

### Dopplerův jev

Podstatu tohoto jevu objevil v roce 1842 rakouský fyzik Christian Doppler. Jeho myšlenky byly však přijaty různě a až roku 1845 byl Dopplerův jev prokázán v akustice. Obecně jde o to, že pokud se pozorovatel a cíl pohybují, tak při vzájemném přiblížení je frekvence vlnění vyšší. To je způsobeno tím, že přijímač zachytává větší počet vln za sekundu a interpretuje větší počet vln jako vyšší frekvenci. Naopak při oddalování přijímač přijme menší počet

vln, a proto bude frekvence zase nižší. Příkladem může být příjezd sanitky. Čím víc se k nám přibližuje, tím se nám zvuk houkání zdá vyšší a rychlejší. Nejčastěji je Dopplerův jev pozorovatelný právě u zvuku, ale vzniká i u elektromagnetického vlnění. Tohoto jevu se hojně využívá i v radarových systémech. Nejčastěji se Dopplerův jev uplatňuje na měření rychlosti. Radary využívající Dopplerův jev se nazývají Dopplerovské radary. Tyto radary vysílají vlny o určité frekvenci, narazí na automobil a rychlost automobilu změni frekvenci. Přijímač radaru zachytí signál zpět, vypočítá rozdíl frekvence a z toho rychlost vozidla. [15, 16]

### Frekvence radaru

Konvenční radary pracují v tzv. mikrovlnné oblasti. Můžeme říct, že schopnosti a vlastnosti radaru závisí na frekvenci, se kterou operuje. Během druhé světové války byly k označení pásem, ve kterých byl vyvíjen mikrovlnný radar, používány kódy jako S, X a L. Účelem bylo zachování vojenského tajemství. Označení písmeny však zůstalo i po válce jako snadné značení spektra, ve kterém radar pracuje. V tabulce 3.1 je uveden výčet využívaných frekvenčních pásem. [16]

Označení pásma	Rozsah frekvence	Příklad použití
HF	3-30 MHz	detekce letadel, lodí
VHF	30-300 MHz	letové navigační systémy
UHF	300-1000 MHz	detekce pohybujících se vzdušných cílů
L	1-2 GHz	dohled nad vzdušným prostorem
S	2-4 GHz	řízení letového provozu
C	4-8 GHz	meteorologické radarové systémy
X	8-12 GHz	detekce rychlosti vozidla
K <sub>u</sub> , K, K <sub>a</sub>	12-40 GHz	radary nevyžadující detekci na delší vzdál.
V	40-75 GHz	komunikace mezi satelity
W	75-110 GHz	automobilový tempomatový radar
mm	110-300 GHz	senzory v automobilovém průmyslu

Tabulka 3.1: Využívaná frekvenční pásma s příklady použití v radarech.

## 3.4 Informace dostupné z radaru

Detekce cíle má malou hodnotu, pokud spolu s ní nezískáme i další informace o cílovém objektu. Stejně tak tyto informace bez detekce cíle nemají hodnotu. V následujících řádcích si popíšeme ty nejdůležitější informace, které je možné díky radaru získat. Vycházím ze zdrojů [15] a [16].

### Vzdálenost k cíli

Pravděpodobně nejběžnější schopnost radaru. Díky měření času potřebného k šíření radarového signálu k cíli a zase zpět jsme schopni zjistit vzdálenost od radaru k cíli. Radar se

řadí mezi nejpřesnější senzory co se týče měření vzdálenosti. Aby však bylo možné vzdálenost určit, doba letu se převádí na frekvenci a tu jsme schopni měřit. Základním měřítkem přesnosti je šířka pásma radarového signálu. Čím je pásmo širší, tím větší je přesnost. Vzdálenost  $R$  se dá spočítat následujícím vzorečkem:

$$R = \frac{cT_R}{2} \quad (3.2)$$

kde  $T_R$  je čas, který radar potřebuje na cestu k cíli a zpět. Energie se ve volném prostoru pohybuje rychlostí světla, proto  $c = 3 \times 10^8$  m/s.

### Radiální rychlost

Radiální rychlost cíle lze získat jako hodnotu změny rozsahu za určitý čas nebo měřením Dopplerova frekvenčního posunu. Základním parametrem kvality měření je čas, protože přesné měření radiální rychlosti vyžaduje čas. Rychlost pohybujícího se cíle a jeho směr trajektorie lze zjistit z jeho dráhy. Dráha se určuje radarovým měřením polohy cíle za určitou dobu.

### Azimut/elevace

Stanovení úhlu, kde je velikost přijatého signálu z antény na maximum, je jednou z metod určení směru k cíli. Tohle většinou vyžaduje anténu s úzkou šířkou paprsku. Úhel k cíli v jedné úhlové dimenzi lze také určit pomocí dvou paprků antény mírně posunutých v úhlu a porovnáním přijatého signálu v každém paprsku.

## 3.5 Druhy radarů

Radarová zařízení mají různé vlastnosti. Rozdělit je podle jednoho kritéria je tedy prakticky nemožné. V následujících řádcích uvedu základní dělení, které vychází ze zdrojů [16] a [24]. Radary lze z hlediska využití rozdělit do dvou kategorií - **obrazové** a **neobrazové**. Obrazové radary se snaží z přijatých informací vytvářet mapové obrazy podobné mapě. Využití této kategorie je například při předpovědi počasí nebo ve vojenském či leteckém průmyslu. Neobrazové radary poskytují výsledek pouze v podobě číselných hodnot.

Další dělení je na **primární** a **sekundární** radary. Primární vysílají vysokofrekvenční signály, které se odrážejí od cílů. Odrazy jsou následně přijaty a vyhodnoceny. Rozdíl od sekundárních je tedy v tom, že primární radar přijímá signál, který sám vyslal. Součástí sekundárních radarů musí být zařízení zvané transpondér. Vysílač pošle signál a čeká až daný cíl zareaguje - může přidat navíc informace o své poloze, nadmořské výšce a podobně. Využívá se v letectví. Dále radary dělíme ještě konkrétněji.

### Pulzní radary

Nedokáží současně přijímat a vysílat signál. Pro svůj chod potřebují jedinou anténu společnou pro přijímač i vysílač. Radar má tedy dva režimy. Nejdříve vyzařuje vysokofrekvenční signál ve tvaru pulzu. Poté následuje pauza, při které lze přijímat ozvěny. Radar je vhodný na měření vzdáleností mezi anténou a objektem, využijeme času od vyslání pulzu k jeho opětovnému přijetí.



## Radary s kontinuálními vlnami (CW)

Na rozdíl od pulzních radarů potřebují více než jednu anténu. Signál je totiž vyslán i přijímán nepřetržitě nezávisle na sobě. S tímto typem proto není jednoduché měřit vzdálenost objektu. Využívají Dopplerův jev k detekci pohybujících se objektů či měření rychlosti.

### Nemodulované radary s kontinuálními vlnami

Těmito radary nelze vyhodnotit vzdálenost objektu. Specializují se pouze na měření rychlosti. Využití je především u policie při měření rychlosti provozu nebo u soutěžních sportů (tenis, baseball, golf).

#### Podle typu antény:

- **Bistatické** - obsahují dvě a více antén odděleně pro přijímač a vysílač. Antény jsou obvykle od sebe ve větší vzdálenosti.
- **Monostatické** - mají pouze jednu anténu společnou pro přijímač i vysílač.

## 3.6 Modulované radary s kontinuálními vlnami (FMCW)

Jelikož do této kategorie radarů patří i modul využitý v mé práci, zaměřím se na tuto sekci trochu důkladněji. Radarové systémy FMCW se v posledních letech hojně začaly využívat v automobilových aplikacích jako je detekce mrtvého úhlu, asistence při změně pruhu, inteligentní tempomat nebo parkovací asistent. [25] Zpracování dat FMCW radarů je založeno především na rychlé Fourierově transformaci. Výhodami těchto radarů v porovnání s pulzními radary je krátká doba měření, nižší náklady, jednodušší hardware a architektura. V bezpečnostních aplikacích pro automobily se vyžaduje v krátkém čase aktualizace informací o dosahu a rychlosti cílů. Využitím výhod radaru FMCW dosáhneme generování a zpracování signálů v reálném čase. Na základě principu fungování radaru lze získat informaci o vzdálenosti a relativní rychlosti pohybu z frekvence přijatého signálu, která odpovídá době letu a Dopplerově posunu. Jedná se tedy o typ CW radaru, který využívá frekvenční modulaci s kontinuální vlnou, což umožňuje měřit vzdálenost objektu. Srdcem radaru je signál zvaný chirp. Jedná se o signál, jehož frekvence se periodicky lineárně mění. Je to tedy v podstatě spojitá vlna s lineárně modulovanou frekvencí. [9]

### Generování mračna bodů

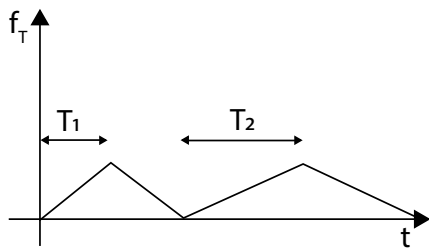
Pomocí tradičního zpracování radarového signálu je možné získat polohu a Dopplerovské informace týkající se odražených bodů ze scény. Výsledná reprezentace v 3D prostoru se označuje jako mračno bodů (point cloud) - odvozeno z podobné terminologie používané pro mračna bodů v oblasti LIDARŮ. Mračno bodů představuje bodová klasifikace tak, že je každý bod odrazu specifikován do konkrétní třídy. Tradiční radary nabízejí omezené rozlišení v rozsahu úhlu, což vede k řídkému zobrazení objektu z pohledu radaru a modelování je velmi obtížné. Radarová zařízení s frekvenčně modulovanou kontinuální vlnou (FMCW) a milimetrovými vlnami (mmWave) poskytují relativně dobré úhlové rozlišení ve srovnání s tradičními staršími typy radarů. Díky těmto radarům s vyšším rozlišením lze získat poměrně bohatou reprezentaci mračna bodů, a to zejména v blízkém dosahu (do 30 metrů). [5]



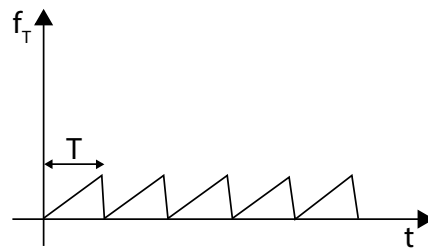
Každý bod v point cloudu je reprezentován jeho 3D umístěním (rozsah, hloubka a výška). Měřením rozdílů okamžitých frekvencí mezi přijatým a vyslaným signálem lze získat čas letu mezi radarem a odrazovým bodem. Čas letu se poté promítne do určení vzdálenosti [12]. Díky Fourierově transformaci je možné rozeznat i více objektů v zákrytu. V přijímaném signálu bude v tomto případě zastoupeno více složek frekvencí, které Fourierova transformace dokáže separovat. K výpočtu úhlu jsou potřeba dvě přijímací antény. K jedné z antén přijde signál později, takže přijímané signály budou mít odlišnou fázi, která lze zjistit opět díky Fourierově transformaci. Úhel je pak možné zjistit právě na základě rozdílu vzdálenosti dvou antén. Za účelem zjištění rychlosti objektu je potřeba vyslat rychle po sobě dva chirpy se shodnou frekvencí. V případě, že je objekt v pohybu, bude mít přijímaný signál jinou fázi a z této změny lze zjistit rychlost pohybu objektu. Určení změny fáze signálu je opět možné díky Fourierově transformaci. [13]

### Princip fast-ramp/slow-ramp řešení

Tento typ radarů lze dělit dle jejich lineární křivky na pomalé (slow-ramp) a rychlé (fast-ramp). V aplikacích využívající automobilové senzory je zpravidla výhodnější použití fast-ramp radarů. Slow-ramp řešení je využíváno v mnoha aplikacích kvůli své nižší složitosti v porovnání s fast-ramp. Tyto křivky se vyznačují poměrně krátkým časem na rampě, což umožňuje mít delší čas na chirpu. V porovnání s křivkami s rychlým náběhem je tohle řešení sice méně výpočetně náročné, ale může docházet k nejednoznačnosti rozsahu a rychlosti v prostředí s více cíli. Naopak fast-ramp princip bude v prostředí s více cíli daleko přesnější, ale vyžaduje velmi velkou výpočetní paměť. [6]. Názorné porovnání obou popsaných řešení lze vidět na obrázcích 3.5 a 3.6. Pro tuto práci byl zvolen fast-ramp FMCW radar (konkrétní modul je popsán v sekci 4.1).



Obrázek 3.5: Slow-ramp princip.



Obrázek 3.6: Fast-ramp princip.

### Základní funkce FMCW radaru [24]

- schopnost měřit velmi malé vzdálenosti k cíli
- schopnost měřit současně vzdálenost k cíli a jeho relativní rychlost
- velmi vysoká přesnost měření vzdálenosti
- zpracování signálu se provádí v nízkofrekvenčním rozsahu, což zjednodušuje realizaci obvodů

## Architektura FMCW radaru

FMCW systém je zobrazen na obrázku 3.7. Skládá se z přijímače, vysílače, směšovače a A/D převodníku. FMCW generátor generuje chirp a ten je poté vysílací anténou vysílán. Odráží se od objektu a odražený signál je přijat zpět přijímací anténou. Přijatý a vyslaný signál jsou smíchány ve směšovači. Směšovač má dva vstupy - sinusovky, výstupem je tedy jedna sinusovka s dvěmi důležitými vlastnostmi:

1. okamžitá frekvence výstupu se rovná rozdílu okamžitých frekvencí dvou vstupních sinusovek
2. počáteční fáze výstupní sinusovky se rovná rozdílu počátečních fází dvou vstupních sinusovek

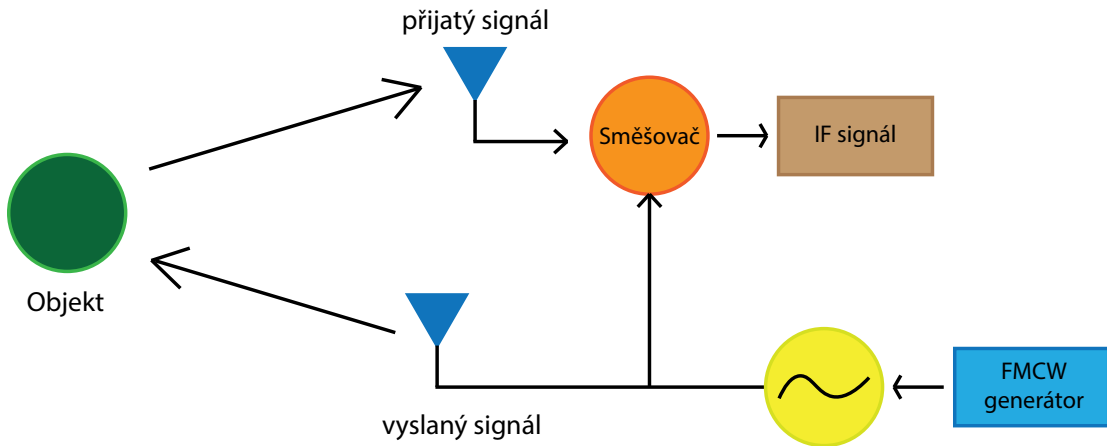
Tyto dvě vlastnosti jsou vyjádřeny v následujících rovnicích:

$$x_1 = \sin[\omega_1 t + \phi_1] \quad (3.3)$$

$$x_2 = \sin[\omega_2 t + \phi_2] \quad (3.4)$$

$$x_{out} = \sin[(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (3.5)$$

Kde  $x_1$  a  $x_2$  jsou vstupy,  $x_{out}$  je výstup,  $\omega$  je frekvence a  $\phi$  počáteční fáze. Jeden objekt před radarem produkuje tzv. IF signál s konstantní frekvencí  $S^2d/c$ , kde  $S$  je sklon,  $d$  vzdálenost objektu a  $c$  rychlost světla.



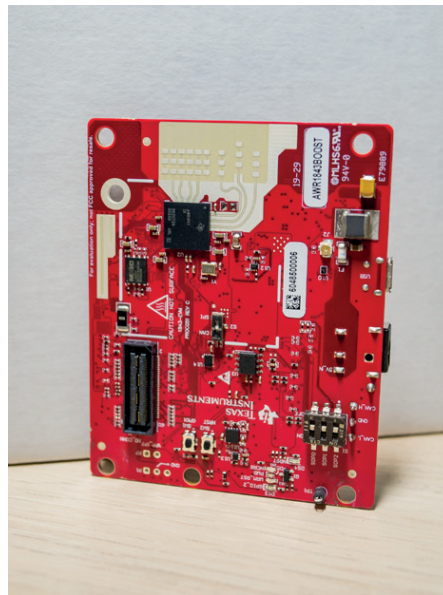
Obrázek 3.7: Architektura FMCW radaru.

## Kapitola 4

# Návrh a implementace

### 4.1 Radarový modul AWR1843

Pro tuto práci byl vybrán radarový modul od společnosti Texas Instruments AWR1843 - zobrazen na obrázku 4.1. Konkrétně jde o integrovaný jednočipový snímač schopný provozu v rozmezí 76 GHz až 81 GHz. Radar obsahuje čtyři přijímací a tři vysílací antény. Zařízení má nízkoenergetický procesor RFCMOS 45 nm od společnosti Texas Instruments. Modul AWR1843 je ideálním řešením pro nízkoenergetické a velmi přesné radarové systémy v automobilovém odvětví. [21]



Obrázek 4.1: Modul AWR 1843 od společnosti Texas Instruments.

Společnost Texas Instruments vyrábí dvě skupiny senzorů - automobilové (angl. automotive) a průmyslové (angl. industrial). Modul AWR1843 řadíme do skupiny automobilových senzorů. Tyto senzory se vyznačují vysokou přesností, všestrannou inteligencí a malou velikostí.

## 4.2 Návrh

Celá práce byla vytvořena v programovacím jazyce Python<sup>1</sup>. Kód programu je ve srovnání s jinými jazyky krátký a velmi dobře čitelný. Nejprve bylo potřeba správně nakonfigurovat radarové zařízení. Některé parametry jsou přímo dané konkrétním radarovým modulem, jiné bylo nutné správně nastavit. Po několika testovacích pokusech byly zvoleny parametry obsažené v tabulce 4.1.

Frekvence	77 GHz
Perioda	100 ms
Šířka pásma	4 GHz
Maximální dosah	8.64 m
Strmost rampy	100 MHz/ $\mu$ s
Přijímací antény	4
Vysílací antény	3
Paměť na čipu	2 MB

Tabulka 4.1: Nastavené parametry radaru.

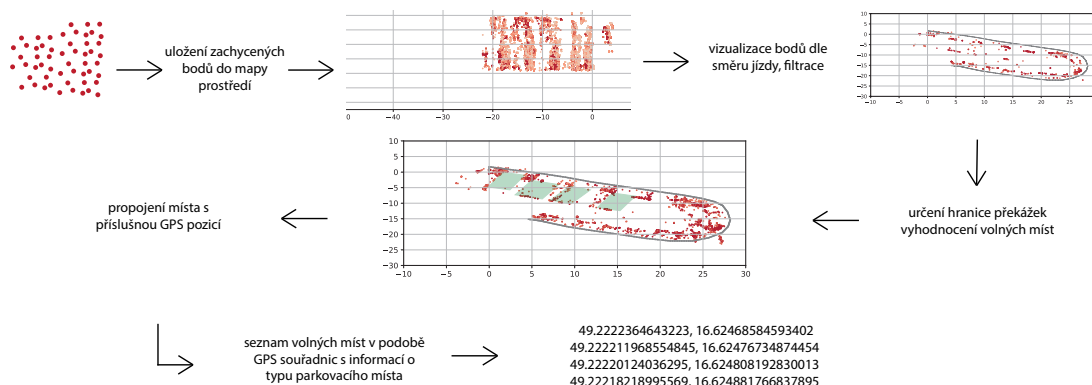
Smyslem práce nebylo zpracovat signál z radaru, ale s přijatým point cloudem dále pracovat. Pan Ing. Lukáš Maršík poskytl aplikaci, která point cloud přijímá a vizualizuje. Radar vysílá signál, který se odrazí od objektů v okolí jedoucího automobilu. Odražený signál je radarem opět znovu přijímán a zpracován. Díky tomu lze získat pozici bodů, které jsou v blízkosti automobilu. Body jsou ve sférických souřadnicích a jsou zpracovány. Jako základ pro další práci jsou přepočítané body v kartézských souřadnicích. Dostupná je tedy poloha bodu v podobě souřadnic  $x$ ,  $y$  a  $z$ . Dále bod obsahuje informaci o Dopplerově posunu, šumu a SNR (odstupu signálu k šumu). Radarová měření jsou dodávána v časových intervalech, které záleží na nastavení periody při konfiguraci radaru. V tomto případě se jedná o periodu 100 ms, radar tedy měří každou desetinu sekundy.

Jádrem celého programu je každou desetinu vteřiny uložit body do pole, které představuje mapu prostředí (mapu bodů). Výhodou je pohyb vozidla a slepování bodů k sobě. Mapa se tak postupně zahušťuje a zpřesňuje. Souřadnice bodů je ale potřeba přepočítávat. Rychlost vozidla je dostupná z příslušného GPS záznamu. Záznam je pořízen stejně jako radarové měření a poskytuje informaci o rychlosti vozidla a poloze v konkrétním čase. Cílem není detekovat místa ihned za jízdy. Pokud řidič projíždí kolem parkoviště, volné parkovací místo vidí. Myšlenkou celého projektu je zjistit tuto informaci o možném parkování dříve, ještě než řidič začne parkovací místo hledat. Proto nemusí probíhat zpracování mapy prostředí každým okamžikem. Jakmile je v mapě prostředí dostatečný počet bodů pro následující analýzu, lze přejít k vyhodnocení mapy. Nejprve je vypočítána tzv. hranice překážek, která určuje průměrnou vzdálenost bodů od automobilu. Díky tomu je pak možné určit, do jaké vzdálenosti od automobilu má smysl prostor vyhodnocovat. Jakmile máme určenou přibližnou vzdálenost objektů od vozidla, je možné zahájit samotnou detekci míst. Standardní rozměr kolmého parkovacího místa je 5 m  $\times$  2,5 m. Pro podélné místo to je 6 m  $\times$  2 m.

Vlivem šumu se v mapě prostředí většinou objeví bodů víc, než je pro správnou detekci třeba. Navíc některé jsou odrazeny špatně a detekci narušují. Proto je potřeba provést filtrování. Díky tomu zůstanou pouze body odražené od skutečných objektů a nejsou jen důsledek

<sup>1</sup><https://www.python.org/>

šumu. Nejprve je určeno, zda je místo dostatečně dlouhé. Požadovaná délka parkovacího místa se sečte se vzdáleností k hranici překážek. Výsledkem je vzdálenost od automobilu, ve které se nesmí nacházet žádný bod, abychom mohli místo označit za detekované co se týče délky. Body nad touto vzdáleností se mohou odfiltrovat, protože ty jsou pro detekci nepodstatné. Šířka místa se určí tak, že jsou hledány dva po sobě jdoucí body s rozdílem jejich souřadnice  $x$  alespoň požadované šířce místa. Pokud nalezneme body odpovídající tomuto kritériu, prostor mezi nimi značí nalezené parkovací místo. Nyní už zbývá jen detekovaný prostor spojit s GPS polohou. Popsaný návrh je znázorněn na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Návrh systému.

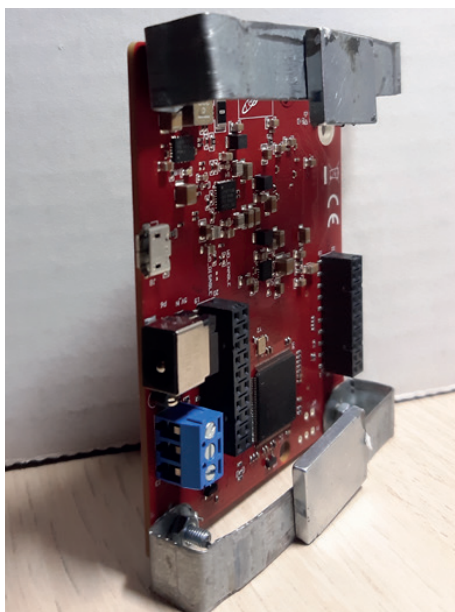
### 4.3 Sběr dat

Protože celá implementace je založena na práci s reálnými daty, bylo nutné nejdříve vytvořit dostatečnou datovou sadu, což nebylo technicky vůbec jednoduché. Potřebný byl automobil s řidičem, powerbanka pro napájení radaru, počítač a v neposlední řadě samotný radar. Nejprve bylo potřeba vymyslet, jak radar na automobil uchytit. Po konzultaci jsem na radar připevnila kovové nožky (viz 4.3). S využitím extrémně silného magnetu pak skrze tyto nožky držel na autě. Dalším problémem bylo ale počasí. V době sběru dat bylo venku stále mokro a mohlo tak dojít k poškození radaru. Radar jsem tedy zabalila do igelitového sáčku a následně otestovala, zda sáček nemění výsledky měření. Vše bylo v pořádku. Umístění radaru na automobil lze vidět na obrázku 4.4. Přešla jsem k samotnému sběru dat. K radarovým záznamům jsem pořídila ještě odpovídající videozáznam, aby bylo později možné ověřit, zda je detekce správná. Vytvořila jsem si dostatečně velkou a různorodou testovací sadu. Musela jsem vyladit radarové záznamy s videem tak, aby byly časově stoprocentně synchronní. S datovou sadou se však dalo pěkně pracovat a na první pokusy byla dostačující.

Postupem času jsem však zjistila, že některé informace chybí. Radar nebyl správně nakonfigurován a ze záznamu nebylo možné zjistit souřadnici  $z$ . Také jsem začala přemýšlet, jak propojit konkrétní místo s GPS polohou. K tomu jsem se rozhodla použít GPS záznamy. Ty k dispozici k dané datové sadě nebyly. Proto bylo potřeba vytvořit novou. Nakonfigurovali jsme radar a přidali souřadnici  $z$ . Připravila jsem si mobilní aplikaci GPS Logger<sup>2</sup>, která dokáže vytvořit GPS záznam. Opět jsem vyrazila do terénu. Vytvořila jsem radarový a GPS záznam, vše zaznamenala i na video. Datová sada se zdála být kompletní. Později

<sup>2</sup><https://play.google.com/store/apps/details?id=com.peterhohsy.gpsloggerlite&hl=cs&gl=US>

jsme ovšem došli ke zjištění, že videozáznam je nedostačující. Kamera nebyla napevno uchy- cena k autu, ale pouze držena v ruce, a tudíž se při jízdě dosti pohybovala. Na rozpoznání, zda se detekované místo nachází opravdu tam, kde jej systém vyhodnotí, to stačilo, ale pro případnou vizualizaci byly tyto záznamy špatné. Sběr dat probíhal pouze ve dvou směrech, a tím pádem nebylo s danou datovou sadou možné testovat správné rozpoznání směru jízdy.



Obrázek 4.3: Systém uchycení ra- daru na automobil.



Obrázek 4.4: Umístění radaru při prvním sběru dat.

### Finální datová sada

Při dalším sběru dat jsem využila předchozích zkušeností a snažila se dávat pozor, aby bylo vše přesné a dostačující. I přesto bylo složité finální a opravdu dobrou datovou sadu připravit. Pro pěknou vizualizaci jízdy ve více směrech se nabízelo data nasbírat na velkém parkovišti například před obchodním centrem. Tomu však moc nepřála dnešní doba a to, že spousta obchodů je stále zavřených. Finálním sběrem dat se tak stalo ještě několik dalších. Cílem bylo získat různorodá data - v jednom či více směrech jízdy, kolmá a podélná parko- vání. Datová sada nebyla ve výsledku tak obsáhlá, jak jsem si představovala, ale pro účely testování je dostačující. Při sběru dat je důležité myslet na synchronizaci radarových nahrá- vek s GPS záznamy tak, aby ke každému radarovému měření opravdu existoval odpovídající GPS záznam. Pro lepší testování je také vhodné pořídit i videozáznam s odpovídajícím ča- sovým razítkem (to však ne všechna zařízení poskytují, jak jsem při použití GoPro kamery později zjistila). Výhodou při sběru poslední datové sady bylo počasí - slunečno a sucho, tudíž nebyl třeba igelitový sáček pro ochranu radaru. Finální umístění radaru i s kamerou lze vidět na obrázku 4.5. Tvorba opravdu kvalitního datasetu byl velmi komplikovaný a zdoluhavý proces. Bylo totiž potřeba najít vhodné prostředí, kde nebude volný prostor jen tak navíc. I tak se občas stalo, že datová sada obsahuje záznamy, ve kterých je detekován například vjezd k domu, který jako parkovací místo neslouží.





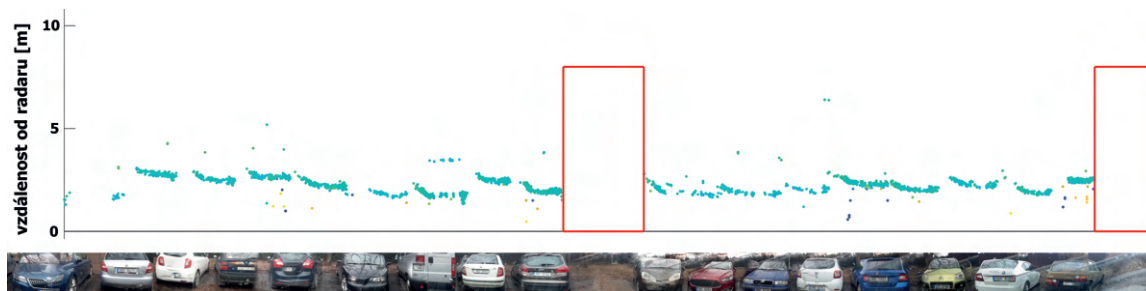
Obrázek 4.5: Finální umístění radaru a kamery při sběru dat.

### **Tvorba datasetu**

Jakmile byla nasbírána reálná data, bylo potřeba vytvořit komplexní dataset. Při tvorbě bylo nutné myslet na to, aby s daty dokázal pohodlně pracovat i jiný uživatel, který detekované prostředí neviděl. Dataset se skládá ze tří hlavních částí: GPS záznam, radarová nahrávka a videozáznam. Vybrané radarové nahrávky bylo nejprve potřeba sesynchronizovat s GPS záznamem. Na základě toho se upravil také videozáznam. Ke každému radarovému měření byl vytvořen ještě navíc GPX soubor s podrobným popisem, kolik volných míst by se v daném měření mělo vyskytovat. GPX soubor obsahuje informaci o lokalitě, kde byla data nasbírána a o jaký typ parkování se v dané datové sadě jedná. Součástí jsou také všeobecné informace o synchronizaci záznamů, potřeby k přednastavení systému pro konkrétní sadu, případně další doplňující instrukce. V druhé části souboru se nachází seznam očekávaných výsledků (reálné polohy parkovacích míst) v podobě GPS souřadnice s údajem odpovídající časovému výskytu daného místa ve videozáznamu a GPS záznamu.

### **Ověření detekce dat v prostředí MATLAB**

Jak již bylo zmíněno, systém je vytvořen v programovacím jazyce Python. Nejprve však proběhlo testování s nasbíranými daty v prostředí MATLAB, které umožňuje přehledně a rychle pracovat s různými grafy. Cílem bylo ověřit navrženou metodu detekce a zjistit, jestli je dostatečně funkční před samotnou implementací. V MATLABu jsem pouze načítala radarová data a vykreslovala je do grafu. Postupně jsem si zde mohla vyzkoušet filtrování dat a díky tomu bylo zjištěno, že k dobré filtraci bude zapotřebí u každého bodu také hodnota souřadnice  $z$ , kterou první datová sada neobsahovala. Ukázkou vykreslení a detekce dat v MATLABu lze vidět na obrázku 4.6. Pod grafem je vykreslena také odpovídající panorama. Již v tuto chvíli se podařilo volná místa správně detekovat, což bylo dobrým základním pilířem pro následující implementaci.



Obrázek 4.6: Ověření detekce a vykreslení dat v prostředí MATLAB.

## 4.4 Tvorba mapy prostředí

Mapa prostředí, neboli mapa bodů, je základní a velmi důležitou komponentou celého systému. Co se týče struktury, jedná se o jednorozměrné pole. Na každém indexu je uložen právě jeden bod v podobě datové třídy obsahující všechny parametry (souřadnice, SNR, apod.). Mapa obsahuje zpracované body, díky nimž můžeme snadno detekovat volná místa. Mapu prostředí lze různě filtrovat - například podle rozmezí souřadnic či SNR hodnot. V této kapitole popíšeme, jak přesně je mapa vytvořena. Důležité je zmínit to, že existují dvě mapy prostředí - jedna slouží čistě k detekci a druhá pouze pro vizualizaci. Do obou map jsou ukládány totožné body. Rozdíl je pouze v tom, že vizualizační mapa obsahuje orotované body dle směru pohybu.

Jak již bylo zmíněno, vstupem jsou radarová měření poskytující body v kartézských souřadnicích. Vozidlo jede ve směru souřadnice  $x$ , vzdálenost bodu od automobilu udává souřadnice  $y$ . Předpokládáme, že souřadnice  $z$  odpovídá vzdálenosti od roviny radaru. Pokud známe výšku, ve které je radar umístěn nad zemí, snadno dopočítáme vzdálenost bodů od země.

### GPS záznam

Součástí systému je také příslušný GPS záznam obsahující informace o jízdě vozidla. Pro tyto účely je důležitá poloha (zeměpisná šířka, zeměpisná délka) a rychlost. Možností jak takový záznam vytvořit existuje celá řada. Stačí využít jakékoli zařízení obsahující GPS lokátor. V dnešní době tuto funkcionalitu poskytuje většina mobilních telefonů. Pro účely této práce byla využita mobilní aplikace GPS Logger<sup>3</sup>. Aplikace celkem spolehlivě vytvoří záznamy různých typů. Zde je využit formát CSV. Každá sekunda je na novém řádku. Informace jsou odděleny tabulátorem, takže není problém je jednoduše oddělit a pracovat s nimi zvlášť.

### Kalmanův filtr

Kalmanův filtr je podrobněji popsán v sekci 2.2. Implementace se uskutečňuje ve funkci `kalman_filter()`. Nejprve se načte příslušný GPS záznam - v této fázi jsou potřebné pouze hodnoty zeměpisné šířky a zeměpisné délky. Jakmile máme k dispozici tyto hodnoty, lze přejít k implementaci samotného Kalmanova filtru. Využila jsem knihovny Pykalman<sup>4</sup>. Na začátku je vždy třeba nastavit počáteční stav matice. Obdobná problematika byla disku-

<sup>3</sup><https://play.google.com/store/apps/details?id=com.peterhohsy.gpsloggerlite&hl=cs&gl=US>

<sup>4</sup><https://pykalman.github.io/>



tována na portále Stack Overflow<sup>5</sup>. Řešení se zdálo být funkční, proto jsem matice nastavila dle doporučení. Funkce vrací vyhlazené GPS pozice, se kterými je možné pracovat. V rámci funkce je proveden výpočet tzv. klouzavého okna. Podle průměrné rychlosti dané nahrávky se zde vypočítá doba, kterou automobil potřebuje k uražení vzdálenosti 3 metrů. Získaná hodnota je potřebná k určení četnosti detekce tak, aby se omezilo detekování stejného prostoru vícekrát na minimum.

## Propojení bodu s GPS polohou

Pro finální vyhodnocení volného místa je potřeba propojit GPS polohu s body v mapě prostředí. Python nabízí datový typ zvaný slovník. Na rozdíl od seznamu, kde jsou všechny prvky uspořádány do jedné sekvence, slovník obsahuje dva druhy prvků - klíč a hodnotu. Každému klíči pak přiřazujeme hodnotu. To je také důvod, proč jsem se rozhodla použít slovník a ne seznam. Slovník umožní propojení GPS polohy s časovým razítkem každého bodu. Tvorba slovníku probíhá ihned po uhlazení souřadnic prostřednictvím Kalmanova filtru, a to ve funkci `make_dictionary()`. Parametrem jsou vyhlazené GPS pozice. Ke každému časovému razítku v GPS záznamu je přiřazena odpovídající GPS poloha zpřesněná Kalmanovým filtrem.

Mám tedy vytvořený slovník, kde jsou klíče ve formě časových razítek. Ke každému klíči je přiřazena odpovídající GPS poloha. Díky tomu při určování GPS polohy stačí porovnat časové razítko bodů v mapě prostředí a najít nejbližší časové razítko (klíč) ve slovníku. Hodnota příslušející tomuto klíči představuje GPS polohu volného parkovacího místa.

## Ukládání bodů do mapy prostředí

Každou desetinu sekundy jsou k dispozici souřadnice bodů, které se ukládají do pole. Tohle představuje mapu prostředí - mapu bodů viz 4.4. Do pole jsou uloženy pouze body z předem definovaného výseku - v tomto případě 0°-90°. Důvodem je, aby se při detekci nestalo, že bude prostor analyzován vícekrát nebo nebude obsahovat v aktuální moment veškerá data. Výhodou je pohyb vozidla a sledování bodů k sobě. Občas se může stát, že vlivem pohybu auta radar zachytí stejný bod několikrát. Díky tomu lze mapu bodů postupně zpřesňovat a zahušťovat. Jinak by byla mnohem řidší. Souřadnice bodů je ale potřeba přepočítávat, aby odpovídaly posunu způsobenému pohybem automobilu. K tomu je využito právě GPS polohy a rychlosti vozu.

Pro výpočet posunu je s každým radarovým měřením také volána funkce `get_shift()`. Parametry představují vyhlazené GPS souřadnice a ukazatel na body daného měření. Na počátku této funkce proběhne synchronizace radarových měření s GPS záznamem. Poté je nutné zjistit, jestli pro daný okamžik existuje příslušný GPS záznam. Radar totiž měří každou desetinu sekundy, kdežto GPS záznam je dostupný pouze každou sekundu. Dále je třeba konkrétní měření radaru propojit s odpovídajícím řádkem GPS záznamu. Z tohoto záznamu je uložena rychlost, kterou lze využít při dalším radarovém měření (v případě, že pro danou desetinu neexistuje GPS záznam). Pokud je GPS záznam dostupný, pro výpočet posunu využijeme GPS polohy a je zavolána funkce `haversin()`. Jako parametry jsou předány hodnoty aktuální a předchozí souřadnice. Na výpočet vzdálenosti mezi dvěma GPS souřadnicemi je použit Haversinův vzorec (2.2). Díky tomuto vzorci je možné vypočítat vzdálenost mezi dvěma body na zeměkouli za předpokladu, že je známá zeměpisná šířka a

---

<sup>5</sup><https://stackoverflow.com/questions/43377626/how-to-use-kalman-filter-in-python-for-location-data>

zeměpisná délka. Souřadnice vyhlazené GPS filtrem jsou nejprve převedeny ze stupňů na radiány, pak už je jen pomocí vzorce vypočítána vzdálenost.

V případě, že v daný časový okamžik GPS záznam neexistuje, pro výpočet posunu je využita rychlost vozidla. Posun lze určit pomocí klasického vzorce pro výpočet vzdálenosti,  $t$  představuje jednotku času a  $v$  rychlost automobilu:  $s = v \times t$ . Rychlost je známá z posledního GPS záznamu. Stačí ji převést z  $km/h$  na  $m/s$ . Čas je konstantní ( $0.1 s$ ), protože radar měří každou desetinu sekundy a nás zajímá posun od posledního měření.

Výsledek posunu je připočítán k již předchozí hodnotě. Nyní už zbývá pouze poslední operace, kterou je potřeba provést. S každým radarovým měření, každou desetinu sekundy, se porovnává aktuální směr se směrem předchozího měření. Pokud dojde k velkému nárůstu, lze předpokládat, že automobil zatačí. V tomto případě by prostor mohl být vyhodnocen jako volné místo téměř vždy. Pokud dojde k pravděpodobné změně směru vlivem zatačení, bodům daného měření je snížena hodnota SNR což ovlivní pozdější filtrování a prostor při zatačení není označen za volné místo. V tuto chvíli je již možné přejít k ukládání bodů do mapy prostředí, jenž probíhá ve funkci `map_of_point()`. Parametrem je pouze ukazatel na body daného měření. Při prvním měření jsou uloženy souřadnice bodů tak, jak jsou, a s každým dalším měřením je k souřadnici  $x$  připočítán ještě posun vozu (ať už určený rychlostí či GPS polohou). Po přepočtu souřadnice jsou body uloženy do pole a tím se mapa prostředí postupně zpřesňuje a rozšiřuje. Společně se souřadnicemi jsou ukládány také další informace, které radar o daném bodě poskytuje, a jsou potřebné pro další postup - například SNR (odstup signálu k šumu) nebo časové razítko bodu. Po uložení všech bodů daného měření je tedy vytvořena mapa prostředí určená k detekci. Současně je každý bod ukládán také do vizualizační mapy. V tomto případě je však potřeba souřadnice bodů ještě upravit, což je popsáno níže.

## Vizualizační mapa

Pokud by body byly vykreslovány přesně jako mapa prostředí určená k detekci, nezáleželo by na tom, jakým směrem se automobil pohybuje a vykreslování by bylo stále v jednom stejném směru. Směr pohybu lze vypočítat ze dvou GPS souřadnic. Při každém zpracování radarového měření se nejprve určí, zda se nejedná o novou GPS souřadnici. Ve slovníku je vyhledána aktuální GPS souřadnice příslušející časovému razítku bodu. Pokud je tato souřadnice odlišná od souřadnice předchozího bodu, dojde ke zjišťování směru - volá se funkce `get_bearing()` s parametry současné a předchozí GPS polohy. Funkce vrací aktuální směr jízdy vozidla. Podrobnější popis výpočtu je v sekci 2.2. Jakmile je určen směr jízdy, pro každé radarové měření je třeba určit aktuální polohu vozidla ve vizualizační mapě. Tato poloha závisí na předchozím stavu, uražené vzdálenosti a změně úhlu od předchozího stavu. Vzdálenost je dostupná díky průběžnému počítání posunu vozidla a úhel lze dopočítat ze směru pohybu. Hodnoty stačí doplnit do vzorce, kde  $x', y'$  značí novou polohu vozidla,  $x, y$  jsou souřadnice předchozí polohy,  $d$  uražená vzdálenost a  $\phi$  úhel posunu v radiánech.

$$x' = x + d \times \cos(\phi) \quad (4.1)$$

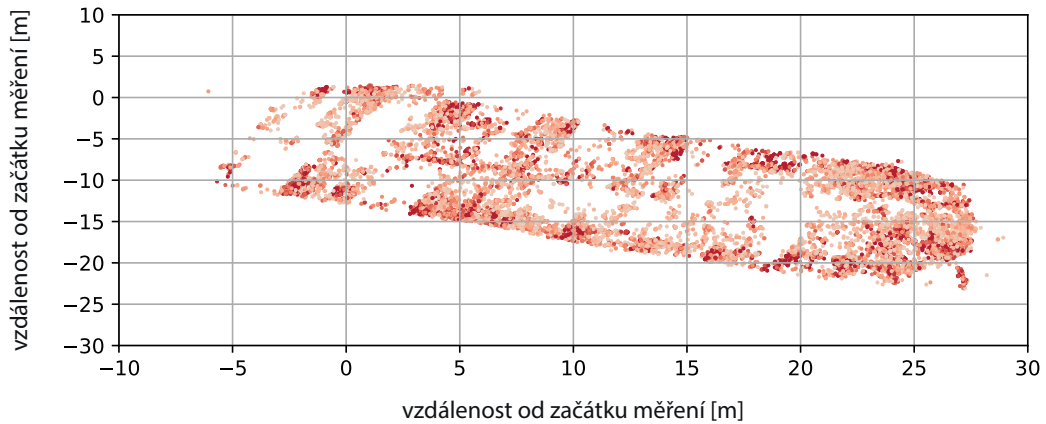
$$y' = y + d \times \sin(\phi) \quad (4.2)$$

Po zjištění aktuální polohy vozu lze přepočítat souřadnice jednotlivých bodů daného měření. Nejprve proběhne rotace bodu, opět dosazením aktuálních hodnot souřadnic a úhlu rotace v radiánech do vzorce:

$$x' = x \times \cos(\phi) - y \times \sin(\phi) \quad (4.3)$$

$$y' = y \times \cos(\phi) + x \times \sin(\phi) \quad (4.4)$$

V této chvíli má bod souřadnici stále vztaženou k pozici radaru, ale již orotovanou a pro výsledné hodnoty stačí pouze přičíst aktuální polohu vozidla v mapě. Upravené body jsou uloženy do vizualizační mapy.



Obrázek 4.7: Mapa prostředí před filtrací.

Vizualizační mapa neslouží k detekci, ale pouze pro ilustraci a představení si umístění volného místa. Vlivem rotace bodů se mapa vždy mění a dle situace jsou body také orientovány vzhledem ke světovým stranám. Mapa je v kladném směru osy  $x$  vždy orientována na sever. Osy představují vzdálenost uraženou vozidlem od počátku měření (v metrech) - vždy se odvíjí dle směru jízdy automobilu. Na obrázku 4.7 je ukázka vizualizační mapy prostředí. Pouhým okem jde přibližně odhadnout, kde se nachází volná místa, ale mapa je příliš hustá a automatická detekce by v tomto případě nebyla možná. Body nejsou nijak filtrovány, ani skrze souřadnici  $z$ , ani skrze hodnotu SNR. Proto jsou vidět místy body, které se mohly odrazit například důsledkem šumu. Právě proto je nezbytná filtrace, kterou popíšete v další sekci.

## 4.5 Detekce a vizualizace volných míst

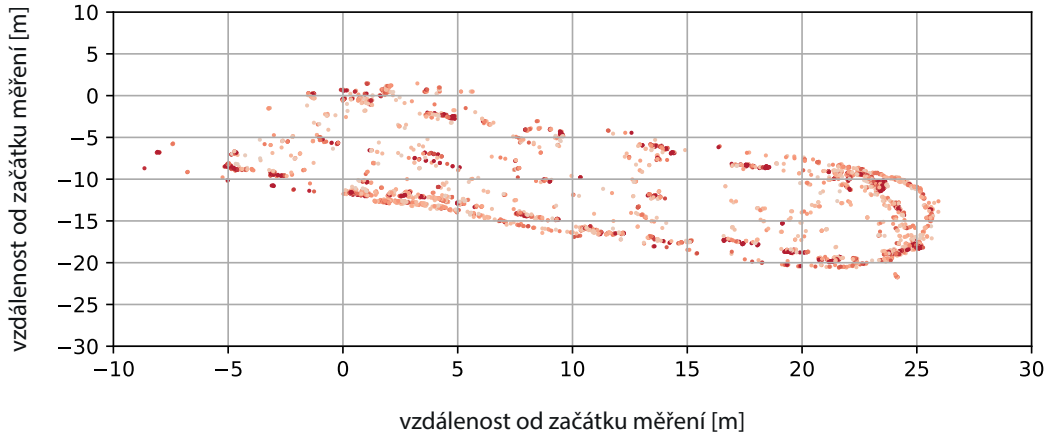
Jakmile je připravena mapa prostředí, lze přejít přímo k detekci volných parkovacích míst. Detekce probíhá po určitých časových intervalech. Délka intervalu je určena na základě rychlosti vozidla ihned při prvním načtení GPS záznamu obsahující rychlost v rámci funkce implementující Kalmanův filtr.

### Filtrace mapy prostředí

Filtrace se provádí ve funkci `map_processing()`. Jediným předávaným parametrem je mapa bodů. Možností filtrování bodů existuje vícero, ne všechny však byly účinné. Proto bylo třeba vybrat kombinaci nejlepších a nejspolehlivějších z nich. Nejprve bylo nutné se zamyslet, co body vlastně reprezentují a jak se v mapě objevily. Jedná se o body odražené od různých objektů. Častokrát se v mapě může vyskytovat i šum, který je nežádoucí a omezuje správnou detekci. Od těchto myšlenek a poznatků se dále odvíjí možnosti filtrování.

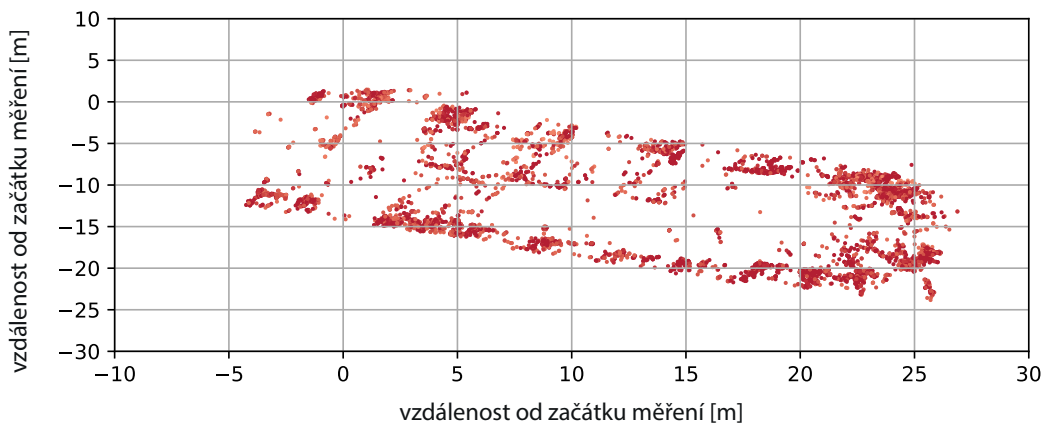
Prvotní návrh byl filtrovat body podle hodnoty souřadnice  $z$ . Pokud předpokládáme, že souřadnice  $z$  odpovídá vzdálenosti od roviny radaru a známe výšku umístění radaru nad zemí, lze dopočítat vzdálenost bodů od země. pro účely této práce byl radar umístěn přibližně ve výšce 0.8 metru nad zemí. Pokud potřebujeme detekovat překážku bránící

k zaparkování, stačí analyzovat prostor ve výšce 0.5-1.3 metru nad zemí. Tento úsek zaručí detekci automobilu či motocyklu v případě, že je parkovací místo obsazeno. Po přepočtu s výškou umístění radaru vyjde filtrační kritérium pro souřadnici  $z$  :  $z \geq -0.3$  a  $z \leq 0.5$ . Výsledek filtrace lze vidět na obrázku 4.8.

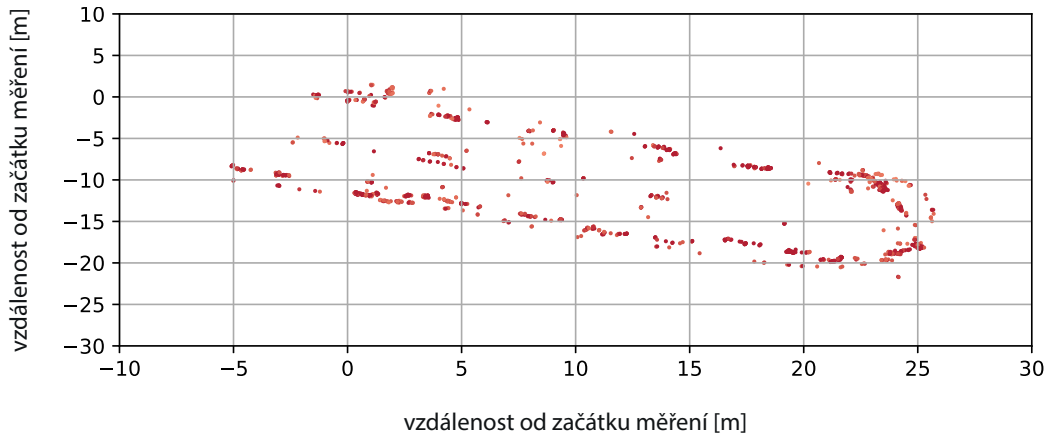


Obrázek 4.8: Filtrovaná mapa prostředí ( $z \geq -0.3$  a  $z \leq 0.5$ ).

Mapa se patrně pročistila, ale pořád to není dostačující, protože obsahuje pravděpodobně stále mnoho bodů vzniklých šumem. Dalším krokem je proto filtrování pomocí hodnoty SNR. Ta totiž udává odstup signálu k šumu a díky tomu je možné odfiltrovat body, které představují právě jen šum. Problém je, jak určit hodnotu prahu. Po několika pokusech bylo zřejmé, kde by se hodnota prahu mohla pohybovat. Vhodná hodnota souřadnice  $z$  byla totožná pro všechny typy radarových záznamů. S filtrací podle SNR to ale bylo složitější. Zde nešlo ponechat konstantní hodnotu na různá prostředí. Občas bylo třeba filtrovat více, jindy zase méně. Proto bylo nutné stanovit nějaký adaptivní práh. Každou desetinu sekundy je vypočítán medián hodnoty SNR bodů, které se doposud v mapě prostředí nachází. Dle tohoto výpočtu je mapa filtrována. Jakmile proběhne detekce, medián je počítán jen z bodů, které jsou nové a nebyly součástí poslední detekce míst. Filtrace pomocí mediánu hodnoty SNR lze vidět na obrázku 4.9, finální filtraci, jenž je provedena propojením obou předchozích metod, ukazuje obrázek 4.10.



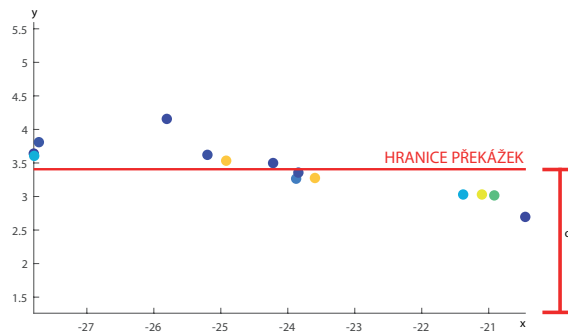
Obrázek 4.9: Filtrovaná mapa prostředí podle mediánu SNR.



Obrázek 4.10: Finální podoba vyfiltrované mapy prostředí.

### Detekce místa

Jakmile proběhne filtrace mapy prostředí, probíhá detekce volného místa. Mapa bodů je analyzována zvlášť pro kolmá a zvlášť pro podélná parkovací místa - dle zvoleného přepínače. Analýza probíhá ve stejné funkci - `detect_place()`. Pouze hodnoty parametrů ovlivní podobu hledaného místa. Předávanými parametry tedy jsou vyfiltrovaná mapa bodů, minimální šířka místa, požadovaná délka místa a typ místa.



Obrázek 4.11: Umístění hranice překážek odpovídající bodům na obrázku.

V první fázi je třeba zjistit, do jaké hloubky je nutné prostor analyzovat. Sice dobře známe potřebnou délku (kolmé parkování) nebo šířku (podélné parkování) místa, nevíme ovšem, v jaké vzdálenosti se radar potažmo automobil nacházel. Zde je využito myšlenky získané při studiu různých výzkumů v této oblasti [11]. Je potřeba vypočítat vzdálenost bodů od jedoucího automobilu. Tato hodnota vytvoří linii souběžnou s osou  $x$  - tzv. hranici překážek (4.11). Vzdálenost hranice překážek od automobilu lze vypočítat z následujícího vzorce:

$$o = \frac{1}{n} \times \sum_{y_i=1}^n y_i \quad (4.5)$$

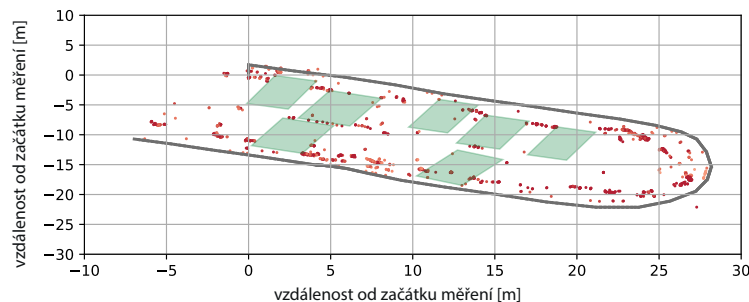
kde  $n$  je počet bodů, pro které hranici překážek počítáme a  $y$  udává vzdálenost jednotlivých bodů od automobilu.

Tuto hranici počítám pouze z hodnot  $y$  bodů, které se nachází maximálně 1.5 metru od automobilu. Většinou se řidič při projíždění vedle parkovacích míst ve větší vzdálenosti nenachází, a pokud by se hodnota počítala ze všech bodů, nebude korespondující s nejbližšími body od automobilu. Podle požadované hloubky místa sečtené s hranicí překážek se odfiltrují z detekované mapy body nacházející se nad touto hodnotou. Ty nejsou pro detekci podstatné, jelikož se nachází až za vyžadovanou délkou místa.

Hranice překážek vyjadřuje průměrnou vzdálenost bodů od vozu. Tuto hodnotu je potřeba k určení nezbytné vzdálenosti pro správně detekované parkovací místo. Mapa prostředí je seřazená od největších hodnot souřadnice  $x$  k nejmenším. Přes body procházím smyčkou. Vždy je porovnán aktuální bod s předchozím. Pokud jsou od sebe vzdáleny na požadovanou šířku parkovacího stání, je prostor považován za volné místo. V tento okamžik přichází na řadu již dříve sestavený slovník. Ten totiž umožní propojit konkrétní bod s příslušnou GPS polohou. Ve slovníku je vyhledáván klíč, který je nejbližší hodnotě časového razítka bodu, a k němu odpovídající hodnota (GPS souřadnice). Jakmile je známá GPS poloha právě detekovaného místa, probíhá kontrola, zda stejné místo nebylo už detekováno. V případě, že se jedná o první detekci daného místa, je uložena GPS pozice místa spolu s časovým razítkem do pole představující detekovaná místa. Při detekci je potřeba myslet na to, že filtrace mapy nemusí být stoprocentně dokonalá. Proto lze považovat za volné místo i prostor, kde se mezi odpovídající šířkou nachází několik osamocených bodů. Tyto body totiž mohly být odrazeny vlivem šumu či jiného nedostatku. Po sérii testů byla určena tolerance, konkrétně pět bodů. Jakmile je místo označeno za detekované, další zpracování probíhá ve funkci `visualize_place`. Předávané parametry jsou pozice krajních bodů detekovaného místa, časové razítko, GPS souřadnice a typ parkovacího místa.

## Vizualizace

Vizualizace probíhá prostřednictvím aplikace poskytnuté panem Ing. Lukášem Maršíkem. Každou desetinu sekundy jsou přefiltrované body z vizualizační mapy prostředí postupně vykreslovány pomocí knihovny `Matplotlib`<sup>6</sup> v Pythonu. S každým radarovým měřením je také vykreslena aktuální pozice vozu prostřednictvím symbolu automobilu a je aktualizována trajektorie pohybu. Pokud je nalezeno volné místo, volá se funkce `visualize_place()`, která vykreslí dané místo do vizualizované mapy prostředí. Je potřeba vyhledat detekované souřadnici příslušející orotovanou souřadnici, aby bylo místo správně umístěno. Při tvorbě mapy prostředí se ukládají původní a orotované souřadnice, tudíž je možné tuto informaci dohledat. V mapě se objeví barevně vyznačené parkovací místo. Ukázka vizualizace je vidět na obrázku 4.12.



Obrázek 4.12: Ukázka vizualizace volných míst.

<sup>6</sup><https://matplotlib.org/>

## Kapitola 5

# Testování

Cílem testování bylo ověřit úspěšnost použitých metod na nasbíraných datech. Během běhu systému lze průběžně výsledky sledovat ve vizualizační mapě. Tato mapa je však spíše ilustrujícím a dokreslujícím příkladem, nelze ji ovšem vyhodnocovat z hlediska naprosté přesnosti a totožnosti oproti skutečnosti. Testování jsem hodnotila ve dvou oblastech. Za prvé úspěšnost detekce počtu volných míst vůbec a za druhé přesnost GPS pozice odpovídající volnému místu. U vyhodnocení počtu míst nebyla brána v potaz GPS poloha, ale jen přibližná pozice vzhledem k zaparkovaným automobilům. Občas se stalo, že radarová nahrávka obsahovala i kus zeleně, na které se nic nenacházelo, a tak mohla být považována za parkovací stání. V následujících řádcích je u každé vyhodnocené mapy prostředí popsáno, kolik míst bylo nalezeno a kolik se jich v reálném prostředí opravdu nacházelo. Na testovacích obrázcích tečky červené a oranžové barvy ilustrují překážky, zeleně je vyznačeno volné parkovací místo a šedě je vykreslena trajektorie pohybu automobilu.

V druhé části testování už šlo o to, aby byla opravdu vyhodnocena přesnost polohy nalezeného místa. Reálné hodnoty GPS souřadnic volných míst byly určeny přesně podle mapy - konkrétně prostřednictvím webové aplikace Mapy Google<sup>1</sup>. Tato očekávaná poloha pak byla porovnána s detekovanou. Testování proběhlo opět pro stejné radarové záznamy jako v předchozím případě. Souřadnice byly v průběhu detekce vyhlazené Kalmanovým filtrem, proto je třeba očekávat drobnou odchylku od souřadnic určených dle mapy, nebudou naprosto totožné. Přesnost určení GPS polohy je vždy shrnuta v tabulce - první sloupec obsahuje předpokládané souřadnice GPS polohy a druhý mnou detekované. Třetí sloupeček představuje odchylku souřadnic v metrech. Bohužel, vyhodnocení přesnosti GPS polohy nemusí být naprosto bezchybné. Předpokládaná poloha je určena pouze prostřednictvím přibližného nalezení příslušného místa v mapě. Proto je třeba u porovnávání GPS polohy počítat s možnou odchylkou. Pokud je však odchylka v rámci jednotek či pár desítek metrů, výsledek se dá považovat za uspokojivý, protože i přesto by řidič místo nejspíš našel.

### 5.1 Úspěšnost detekce míst a přesnost určení GPS polohy

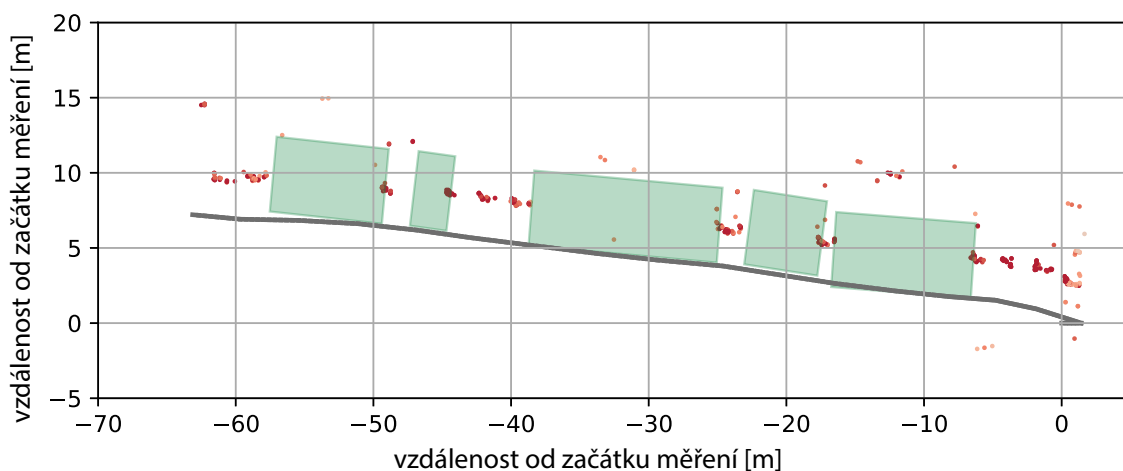
#### Kolmá parkovací místa - Brno-Bohunice

V tomto případě je testována detekce kolmých parkovacích míst. Nachází se jich dokonce více vedle sebe. Detekovaný úsek obsahoval 15 volných míst. Všech 15 míst bylo detekováno. Vizualizační mapa (obrázek 5.1) vykresluje místa vedle sebe dohromady. Pro upřesnění

<sup>1</sup><https://www.google.cz/maps/>



popíši počty míst na vybarvených úsecích. Zprava: 4 místa, 2 místa, 5 míst, 1 místo a 3 místa. Co se týče určení GPS polohy, pokud se místa nachází vedle sebe, je určena pouze jedna společná GPS poloha. Proto se zde mohou vyskytovat i vyšší odchylky. V tabulce 5.1 je vypsáno porovnání přesnosti poloh pro jednotlivé úseky. Na obrázku 5.2 je ukázka porovnání reálného prostředí s detekovanými místy.



Obrázek 5.1: Detekce kolmých parkovacích míst.



Obrázek 5.2: Panorama s volnými místy odpovídajícími detekovaným.

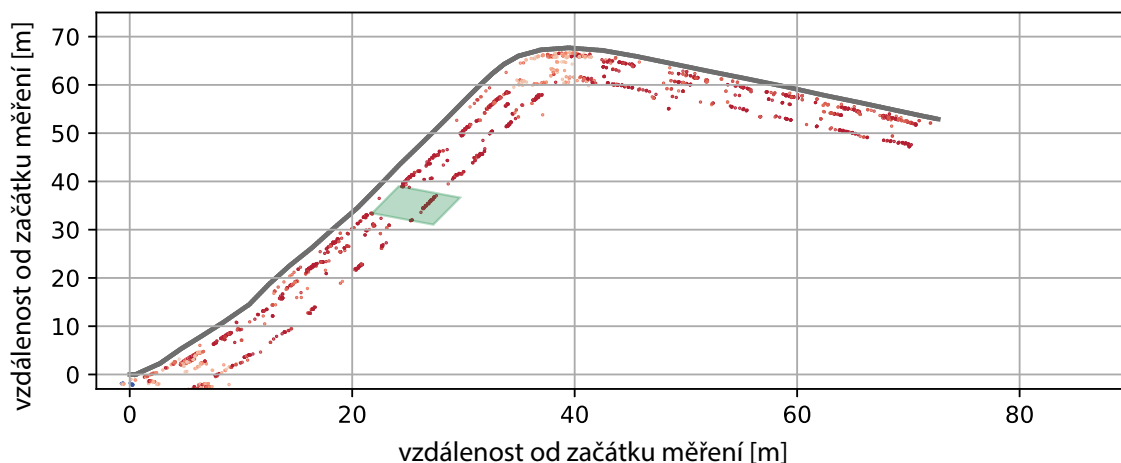
	Reálná GPS poloha	Detekovaná GPS poloha	Odchylka [m]
1	49.176176, 16.564176	49.176144, 16.564190	3.701
2	49.176050, 16.564154	49.176070, 16.564177	2.782
3	49.176008, 16.564156	49.175947, 16.564157	6.783
4	49.175833, 16.564136	49.175872, 16.564144	4.375
5	49.175788, 16.564131	49.175795, 16.564139	9.716

Tabulka 5.1: Výsledky detekce kolmých parkovacích míst.

### Podélné parkování - Brno-Husovice I.

Na tomto úseku je ukázána detekce parkovacích míst ve dvou navzájem na sebe kolmých ulicích (Třebízského a Vranovská). Tento záznam je velmi přesný a ani při zatáčení automobilu nedošlo k nesprávné detekci míst navíc. V realitě se zde nacházelo pouze jedno parkovací místo a to bylo také nalezeno, což lze vidět na obrázku 5.3. Aby místo bylo dostatečně viditelné, vizualizace jej kreslí hlubší, než skutečně je. Také určení GPS polohy je, jak ukazuje tabulka 5.2, uspokojivé.





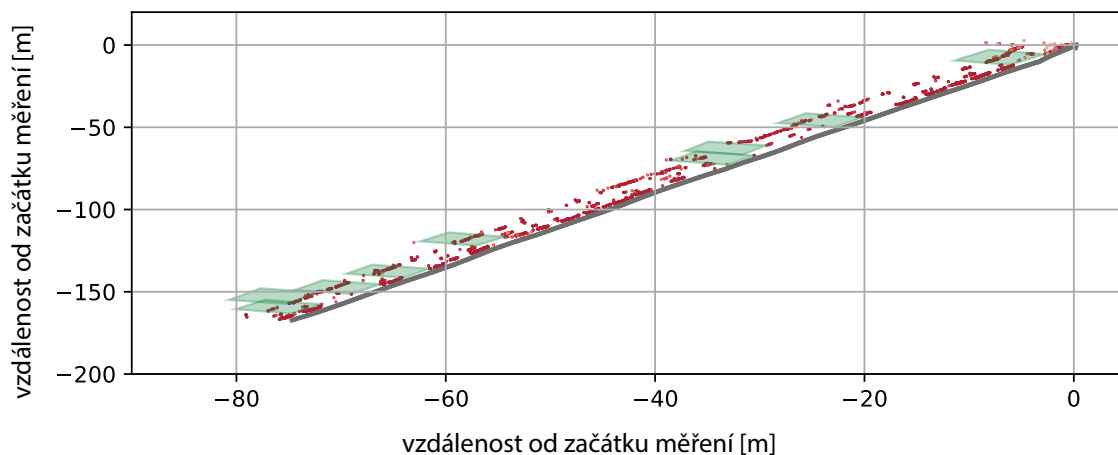
Obrázek 5.3: Detekce podélných parkovacích míst ve dvou navzájem kolmých ulicích.

	Reálná GPS poloha	Detekovaná GPS poloha	Odchylka [m]
1	49.212185, 16.630581	49.212161, 16.630589	2.731

Tabulka 5.2: Výsledky detekce podélných parkovacích míst ve dvou navzájem kolmých ulicích.

### Podélné parkování - Brno-Husovice II.

Další detekce podélných parkovacích míst, tentokrát v ulici Elgartova. V tomto úseku se nacházelo 5 volných míst. Detekováno jich bylo 9 - dvě navíc oprávněně z důvodu kolmé ulice (systém nemůže rozpoznat, že zde parkovací místo být nemá). Další dvě přebývající místa byla určena chybně. Detekce je vizualizována na obrázku 5.4. Místa jsou opět vykreslována s delší hloubkou, aby bylo dobře poznat, kde se místo nachází. Tabulka 5.3 ukazuje, že souřadnice jsou v tomto případě detekovány velmi dobře.



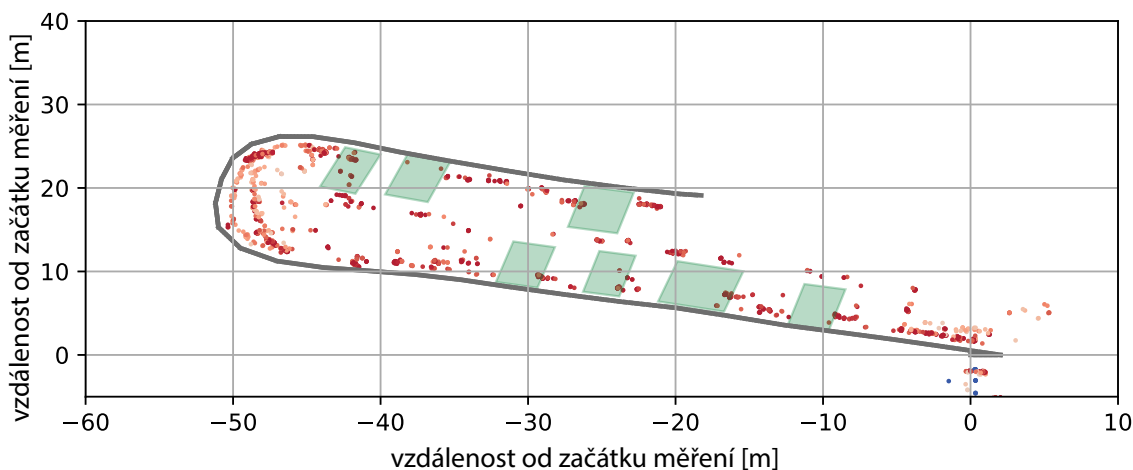
Obrázek 5.4: Detekce podélného parkovacího místa.

	Reálná GPS poloha	Detekovaná GPS poloha	Odchylka [m]
1	49.213018, 16.629774	49.213019, 16.629737	2.690
2	49.212577, 16.631252	49.212570, 16.631248	0.8308
3	49.212495, 16.631518	49.212497, 16.631505	0.9701
4	49.212457, 16.631658	49.212441, 16.631702	3.658
5	49.212434, 16.631741	49.212422, 16.631764	2.138

Tabulka 5.3: Výsledky detekce GPS poloh podélných parkovacích míst.

### Kolmé parkování ve dvou řadách - Brno-Židenice, parkoviště Kaufland

Tato testovací sada ověřuje detekci kolmých míst ve dvou řadách. Správně by se zde mělo nacházet 12 parkovacích míst. Jednalo se však o trochu složitější prostředí, kde bylo dost překážek. Systém detekoval 7 míst. Dvě místa detekována být nemohla, protože na nich stáli lidé. Tři místa nebyla rozpoznána. Výslednou vizualizační mapu lze vidět na obrázku 5.5. Tabulka 5.4 ukazuje, že přesnost GPS polohy je lehce s odchylkou.



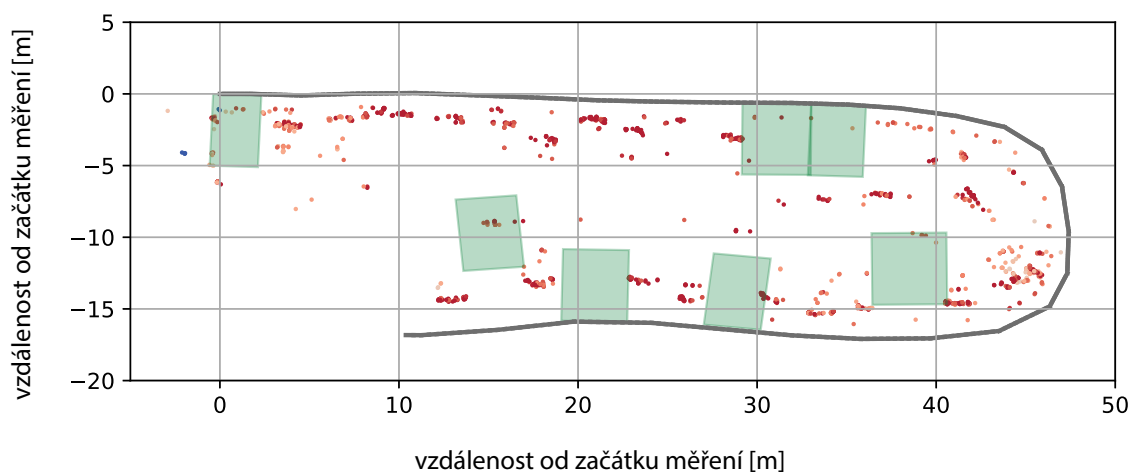
Obrázek 5.5: Detekce kolmých parkovacích míst ve dvou řadách - složitější prostředí.

	Reálná GPS poloha	Detekovaná GPS poloha	Odchylka [m]
1	49.202103, 16.636151	49.202161, 16.636149	6.451
2	49.202015, 16.636105	49.202095, 16.636125	9.013
3	49.201961, 16.636089	49.202060, 16.636113	11.150
4	49.201918, 16.636078	49.201995, 16.636088	8.593
5	49.201940, 16.635918	49.201978, 16.635883	4.932
6	49.201967, 16.635920	49.202009, 16.635897	4.960
7	49.202078, 16.635965	49.202115, 16.635936	4.622

Tabulka 5.4: Výsledky detekce GPS poloh kolmých parkovacích míst ve dvou řadách - složitější prostředí.

## Kolmé parkování ve dvou řadách - Brno-Zábrdovice

Jako poslední testovací sadu jsem vybrala opět kolmé parkování na parkovišti před obchodem. Při zatáčení vozu jsem totiž očekávala špatnou detekci míst způsobenou volným prostorem se zelení v zatáčce. Tento problém však nenastal a detekce proběhla v pořádku. Na tomto parkovacím úseku se nacházelo 7 volných míst a všech 7 bylo skutečně detekováno, jak ukazuje obrázek 5.6. V tomto případě je i přesnost GPS poloh uspokojivá. Konkrétní výsledky lze vidět v tabulce 5.5.



Obrázek 5.6: Detekce kolmých parkovacích míst ve dvou řadách - testování při zatáčení.

	Reálná GPS poloha	Detekovaná GPS poloha	Odchylka [m]
1	49.199264, 16.627721	49.199252, 16.627701	1.973
2	49.199514, 16.627755	49.199522, 16.627710	3.388
3	49.199550, 16.627760	49.199550, 16.627714	3.342
4	49.199480, 16.627928	49.199537, 16.627930	6.340
5	49.199371, 16.627924	49.199432, 16.627915	6.814
6	49.199308, 16.627912	49.199358, 16.627922	5.607
7	49.199267, 16.627917	49.199330, 16.627927	7.043

Tabulka 5.5: Detekce kolmých parkovacích míst ve dvou řadách - testování při zatáčení.

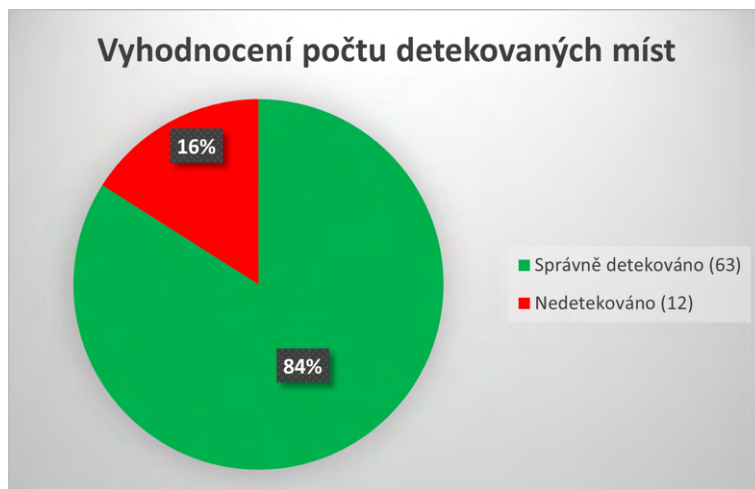
## 5.2 Vyhodnocení testů

Celkem bylo vyhodnoceno 5 testovacích sad. Dvě sady se zabývaly přesností podélných míst a ostatní míst kolmých. Testování proběhlo ve dvou oblastech - počet detekovaných míst a přesnost GPS polohy. Co se týče správného počtu detekovaných míst, výsledky jsou více než průměrné. Přesnost GPS polohy se občas vyskytuje s odchylkou oproti předpokládanému výsledku, který byl ovšem odhadnut pouze podle místa na mapě, takže nemusí být stoprocentně korektní.

Celková úspěšnost systému byla vyhodnocena na 8 datasetech obsahujících 75 volných míst. V tabulce 5.6 je souhrnný výpis výsledků. Na následujícím obrázku 5.7 je graf, který ukazuje procentuální úspěšnost testů. Co se týče vyhodnocení přesnosti GPS poloh, nejlepším ukazatelem jsou jednotlivé tabulky u každého testování. Obecně lze říct, že ani jednou nedošlo k extrémnímu rozdílu porovnávaných GPS poloh, i když se často vyskytuje odchylka.

Celkový počet míst:	75
Počet detekovaných míst:	63
Počet nedetekovaných míst:	12
Počet detekovaných míst navíc:	5

Tabulka 5.6: Vyhodnocení detekce míst.



Obrázek 5.7: Procentuální zobrazení úspěšnosti detekce.

# Kapitola 6

## Závěr

Cílem práce bylo navrhnout metodu, která na základě extrahovaných informací z radarového signálu umožní detekci míst mezi zaparkovanými vozy z jedoucího automobilu, a implementovat ji pomocí radarového zařízení AWR1843. Nejprve byla nastudována literatura a potřebné teoretické znalosti související s prací se samotným radarovým modulem a zpracováním signálu. Poté byla nasbírána reálná data potřebná k vytvoření komplexního datasetu, jenž obsahuje odpovídající anotaci, radarové záznamy, GPS záznamy a také příslušející videozáznamy. Práce s radarovým signálem a návrh samotné detekce volných míst byl nejprve testován v prostředí MATLAB. Ukázalo se, že radarová data je možné dobře filtrovat a lze analyzovat volná parkovací místa. Poté byla provedena samotná implementace celého systému v prostředí Python. Na závěr celé práce bylo provedeno testování na nasbíraném datasetu. Soustředila jsem se na dvě oblasti - vyhodnocení správného počtu volných míst a přesnost příslušejících GPS souřadnic konkrétního místa. Určení přesnosti GPS nemusí být vždy příliš vypovídající, jelikož opravdová GPS poloha je určena pouze z umístění daného místa na mapě. I přesto však nedocházelo k extrémním odchylkám. Z celkového počtu detekovaných míst bylo 84 % míst detekováno správně.

Jelikož práce je spíše vstupem pro celkový monitorovací systém parkovacích míst, je zde spousta prostoru pro další inovace. Aktuální stav práce neumožňuje automaticky rozpoznat kolmá a podélná parkovací místa v případě, že je více kolmých míst umístěno vedle sebe. To by se snad dalo řešit prostřednictvím dalšího automatizovaného rozpoznávání. Prozatím se neuvažuje ani o možnosti detekce šikmého parkování, což by byl další podnět k případnému rozšíření. Do budoucna by bylo nejspíš efektivní mít radarová data nad konkrétní mapou a vědět, že daný úsek slouží k parkování. V aktuální fázi totiž není vyloučeno, že bude jako parkovací místo vyhodnocena například zeleň či různé vjezdy k budovám. Pokud by se pak jednalo o rozšíření práce na robustní systém, dalo by se uvažovat o sběru dat z více vozidel. Automobily by mohly odesílat data do centrálního střediska, kde by probíhalo zpracování a distribuce výsledků řidičům. Uvažovat by se dalo například nad mobilní aplikací, která by přímo v mapě zobrazovala detekovaná volná místa a neustále by se aktualizovala.

Potencionální využití systému vidím na menších parkovištích umístěných spíše v ulicích. Velká parkoviště systémy k detekci míst často obsahují a navíc není příliš pravděpodobné, že na nich nebude ani jedno volné místo. Naopak pouliční parkování jsou čím dál větším problémem. I když je v práci ještě spousta prostoru na zlepšení, myslím, že už teď může být přínosem. To se ukázalo také přijetím práce na studentskou konferenci inovací, technologií a vědy v IT Excel@FIT a oceněním práce partnerem této konference - firmou NXP.

# Literatura

- [1] AMATO, G., CARRARA, F., FALCHI, F., GENNARO, C. a VAIRO, C. Car parking occupancy detection using smart camera networks and Deep Learning. In: *IEEE Symposium on Computers and Communication, ISCC 2016, Messina, Italy, June 27-30, 2016*. IEEE Computer Society, 2016, s. 1212–1217. DOI: 10.1109/ISCC.2016.7543901. ISBN 978-1-7281-6813-5.
- [2] BABB, T. *How a Kalman filter works, in pictures* [online]. 2015 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <http://www.bzarg.com/p/how-a-kalman-filter-works-in-pictures/>.
- [3] CARNEVALI, S. *Shutterstock: A radar tower to monitor general aviation around airports* [Digitální obrázek]. Shutterstock Inc., 30. Listopad 2015 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/cs/image-photo/milan-italy-30-november-2015-radar-349919549>.
- [4] EL RABBANY, A. *Introduction to GPS the Global Positioning System*. Massachusetts Artech House, 2002. Artech House mobile communications series. ISBN 9781580531832.
- [5] JIN, F., SENGUPTA, A., CAO, S. a WU, Y.-J. MmWave Radar Point Cloud Segmentation using GMM in Multimodal Traffic Monitoring. In: *2020 IEEE International Radar Conference (RADAR)*. 2020, s. 732–737. DOI: 10.1109/RADAR42522.2020.9114662. ISBN 978-1-7281-6813-5.
- [6] KIM, S., PAEK, I. a KA, M. Simulation and test results of triangular fast ramp FMCW waveform. In: *2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13)*. 2013, s. 1–4. DOI: 10.1109/RADAR.2013.6586092. ISBN 978-1-4673-5794-4.
- [7] KUSALA, J. *Radarová encyklopedie* [online]. 2008 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: [https://www.army.cz/images/id\\_8001\\_9000/8753/radar/radar.htm](https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/radar.htm).
- [8] LI, Q., LI, R., JI, K. a DAI, W. Kalman Filter and Its Application. In: *2015 8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)*. 2015, s. 74–77. DOI: 10.1109/ICINIS.2015.35. ISBN 978-1-4673-8221-2.
- [9] LIN, J.-J., LI, Y.-P., HSU, W.-C. a LEE, T.-S. Design of an FMCW radar baseband signal processing system for automotive application. *SpringerPlus*. Prosinec 2016, sv. 5. DOI: 10.1186/s40064-015-1583-5.
- [10] PAVAN, V., NISHANTH, N. a KATHIRVELAN, J. Automation of Vehicular Parking Using Loop Detector with single lane traffic: A Design Approach. *International Journal of Engineering and Technology*. Červen 2013, sv. 5, s. 2471–2475.

- [11] PROPHET, R., HOFFMANN, M., VOSSIEK, M., LI, G. a STURM, C. Parking space detection from a radar based target list. In: *2017 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*. 2017, s. 91–94. DOI: 10.1109/ICMIM.2017.7918864. ISBN 978-1-5090-4354-5.
- [12] QIAN, K., HE, Z. a ZHANG, X. 3D Point Cloud Generation with Millimeter-Wave Radar. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* 2020, sv. 4, č. 4, s. 148:1–148:23. DOI: 10.1145/3432221.
- [13] REICH, B. *Zpracování radarového signálu a fúze informací*. Brno, CZ, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/22650/>.
- [14] RICHARDS, M. A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill, 2005. ISBN 978-0-07-144474-3.
- [15] SKOLNIK, M. I. *Introduction to Radar Systems*. 3. vyd. McGraw-Hill, 2001. ISBN 978-0-07-288138-7.
- [16] SKOLNIK, M. I. *Radar Handbook*. 3. vyd. McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-07-148547-0.
- [17] SPREMBERG, W. *Shutterstock: Old radar system at the former Gatow military airport near Berlin* [Digitální obrázek]. Shutterstock Inc., 5. Duben 2015 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/cs/image-photo/berlin-germany-april-05-2015-old-1621828975>.
- [18] SRINIVASAN, S. *The Kalman Filter: An algorithm for making sense of fused sensor insight* [online]. 2018 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/kalman-filter-an-algorithm-for-making-sense-from-the-insights-of-various-sensors-fused-together-ddf67597f35e>.
- [19] STUDIO CREATIVE STOCK. *Shutterstock: CCTV system isolated from the background cipping part, camera recording safety in our property, It can be seen in the park, separate roads*. [Digitální obrázek]. Shutterstock Inc., 15. Zář 2018 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/cs/image-photo/bangkok-thailand-september-15-2018-cctv-1186606669>.
- [20] SWERTY. *Wikimedia Commons: Inductance detectors* [Digitální obrázek]. Únor 2015 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inductance\\_detectors.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inductance_detectors.jpg).
- [21] TEXAS INSTRUMENTS. *AWR 1843 Single-chip 76-GHz to 81-GHz automotive radar sensor integrating DSP, MCU and radar accelerator* [online]. 2021 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/AWR1843>.
- [22] TONELSONPRODUCTIONS. *Shutterstock: A view of a FrogParking parking lot stall meter sensor device seen at a local shopping center*. [Digitální obrázek]. Shutterstock Inc., 22. Červenec 2020 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/cs/image-photo/irvine-californiaunited-states-07222020-view-frogparking-1789549748>.

- [23] WIKIMEDIA COMMONS. *Wikimedia Commons: FuMG 401 Freya LZ = Lufttransport Zerlegbar* [Digitální obrázek]. [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Freya-radar-lz.jpg>.
- [24] WOLFF, C. *Radar Basics* [online]. 1998 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/index.en.html>.
- [25] YEONGHWAN JU, YOUNGSEOK JIN a JONGHUN LEE. Design and implementation of a 24 GHz FMCW radar system for automotive applications. In: *2014 International Radar Conference*. 2014, s. 1–4. DOI: 10.1109/RADAR.2014.7060385. ISBN 978-1-4799-4195-7.



## Příloha A

# Obsah přiloženého paměťového média

Na přiložené SD kartě jsou uloženy veškeré materiály týkající se této práce:

- /xkunor00\_bp.pdf
- /xkunor00\_bp.zip
- /xkunor00\_dataset/
- /xkunor00\_video.mp4
- /xkunor00\_mmwDataAnalyzer/
- /xkunor00\_plakat.pdf

## Příloha B

### Plakát



Obrázek B.1: Plakát práce vzniklý za účelem účasti na konferenci Excel@FIT.