



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

ZPĚTNÝ CYKLISTICKÝ RADAR

REARVIEW CYCLING RADAR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MAREK HLAVAČKA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ MARŠÍK

BRNO 2024

Zadání diplomové práce



155160

Ústav: Ústav počítačové grafiky a multimédií (UPGM)
Student: **Hlavačka Marek, Bc.**
Program: Informační technologie a umělá inteligence
Specializace: Počítačové vidění
Název: **Zpětný cyklistický radar**
Kategorie: Zpracování signálů
Akademický rok: 2023/24

Zadání:

1. Nastudujte literaturu související se zpracováním radarového signálu, principy detekce a sledováním vozidel v provozu. Následně se seznamte s vhodným radar-on-chip řešením, jeho architekturou a principem programování.
2. Prostudujte si dostupná řešení zpětných cyklistických radarů, jako je například Garmin Varia Radar. Vytipujte vhodné vlastnosti a specifikace, které by mělo takové zařízení splňovat.
3. Nasbírejte reálná data na zapůjčeném HW a vytvořte komplexní dataset a to včetně anotace a odpovídajícího video záznamu.
4. Po dohodě navrhnete či zvolte metodu, která na základě extrahovaných informací z radarového signálu umožní sledování a vyhodnocení okolního přibližujícího se provozu. Tuto ověřte například v prostředí Python na nasbíraných datech.
5. Implementujte ověřenou metodu na vhodné platformě.
6. Proveďte důkladné vyhodnocení spolehlivosti metody nad nasbíranou datovou sadou. Následně proveďte sérii vhodných testů na zvolené platformě pro ověření funkčnosti a specifikací systému v reálném prostředí.
7. Diskutujte dosažené výsledky a navrhnete možné pokračování práce.

Literatura:

- Dle domluvy s vedoucím.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1 až 4 zadání.

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

Vedoucí práce: **Maršík Lukáš, Ing.**
Vedoucí ústavu: Černocký Jan, prof. Dr. Ing.
Datum zadání: 1.11.2023
Termín pro odevzdání: 31.7.2024
Datum schválení: 23.11.2023

Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření zpětného cyklistického radaru založeného na milimetrovém radaru IWR6843AOPEVM od společnosti Texas Instruments Inc. V rámci práce byla vytvořena datová sada skládající se z radarových dat, videozáznamů a výstupů z tříosého akcelerometru. Na základě těchto dat bylo možné sledovat provoz za cyklistou, detekovat nebezpečný boční odstup vozidla a prudké zpomalení cyklisty. Výsledkem je aplikace, která zpracovává a vizualizuje radarová data, čímž demonstruje funkčnost zpětného cyklistického radaru. Evaluace řešení byla provedena na základě porovnání s radarem Garmin Varia RTL 515.

Abstract

The aim of this thesis was to develop a rear bicycle radar based on the IWR6843AOPEVM millimeter-wave radar from Texas Instruments Inc. As part of the work, a dataset was created consisting of radar data, video recordings, and outputs from a three-axis accelerometer. Based on these data, it was possible to monitor traffic behind the cyclist, detect dangerous lateral vehicle distances, and sudden deceleration of the cyclist. The result is an application that processes and visualizes radar data, demonstrating the functionality of the rear bicycle radar. The solution was evaluated by comparing it with the Garmin Varia RTL 515 radar.

Klíčová slova

Cyklistický radar, FMCW radar, IWR6843AOPEVM, detekce objektů, cyklistika, bezpečnost, Python

Keywords

Cycling radar, FMCW radar, IWR6843AOPEVM, object detection, cycling, safety, Python

Citace

HLAVAČKA, Marek. *Zpětný cyklistický radar*. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Lukáš Maršík

Zpětný cyklistický radar

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Lukáše Maršíka. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....
Marek Hlavačka
30. července 2024

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Lukášovi Maršíkovi za vedení mé diplomové práce, cenné rady a odborný dohled.

Obsah

1	Úvod	4
2	Bezpečnost cyklistů	6
2.1	Statistika nehodovosti cyklistů	6
2.2	Analýza hrozeb pro cyklisty v provozu	7
2.3	Možnosti pro zvýšení bezpečnosti cyklistů	9
3	Radary a jejich princip	12
3.1	Historie radarů	12
3.2	Princip radarů	13
3.3	Druhy radarů	15
3.4	Radary s frekvenčně modulovanou kontinuální vlnou	17
3.5	Cyklistické radary	18
4	Zpracování radarového signálu	22
4.1	Měření vzdálenosti	22
4.2	Měření rychlosti	24
4.3	Detekce úhlů	25
4.4	Dopplerův jev	26
5	Návrh a implementace	28
5.1	Návrh zařízení	28
5.2	Sběr dat	33
5.3	Grafické uživatelské rozhraní	34
5.4	Implementace	36
6	Testování	39
6.1	Testování funkcí	39
6.2	Testování v provozu	41
6.3	Zhodnocení výsledků a možná pokračování	44
7	Závěr	45
	Literatura	46
A	Obsah paměťového média	50
B	Konfigurace radaru	51

Seznam obrázků

2.1	Počet nehod dle roků.	7
2.2	Následky dopravních nehod.	7
2.3	Četnosti příčin dopravních nehod.	8
2.4	Počet nehod dle směrového poměru.	8
2.5	Cyklista odbočující vlevo, vozidlo přijíždějící zleva.	9
2.6	Cyklista projíždí rovně, vozidlo zleva nebo zprava.	9
2.7	Cyklista sražen vozidlem zezadu.	10
2.8	Čelní střet cyklisty a vozidla.	10
3.1	Telemobiloscope.	12
3.2	Princip fungování radaru.	13
3.3	Blokový diagram jednoduchého radaru.	14
3.4	Schéma radaru FMCW	18
3.5	Ikubu Prototyp vnější a vnitřní pohled	19
3.6	Vývoj cyklistických radarů.	20
3.7	Ostatní cyklistické radary	21
4.1	Chirp signál s amplitudou jako funkcí času. Převzato z [14].	22
4.2	Chirp signál s frekvencí jako funkcí času. Převzato z [14].	22
4.3	Odeslaný (TX) a přijatý (RX) chirp. Převzato z [14].	23
4.4	Konstantní IF signál. Převzato z [14].	23
4.5	Vyslaný a zpožděný chirp	24
4.6	Měření rychlosti pomocí chirpů	24
4.7	Soubor N vyslaných chirpů	25
4.8	Výsledek range-FFT	25
4.9	Rozdílná vzdálenost přijímacích antén od cílového objektu	26
4.10	Dopplerův jev	27
5.1	Rozložení antén modulu IWR6843AOPEVM	29
5.2	Milimetrový radar IWR6843AOPEVM.	29
5.3	Části zařízení	30
5.4	Zařízení pro sběr dat umístěné na sedlovou trubku kola.	31
5.5	Ukázka organizace dat v rámci.	32
5.6	Struktura uložení záznamů v datové sadě.	33
5.7	Drátěný model grafického uživatelského rozhraní.	34
5.8	Ikony použity pro vizualizace radarových dat	35
5.9	Aplikace zpětného cyklistického radaru	36
5.10	My Bike Traffic Radar	36
5.11	Postup zpracování dat z radaru.	38

6.1	Ukázka testování radaru.	40
6.2	Umístění radarů na kole	41
6.3	Testování radaru ve městě	42
6.4	Testování radaru mimo město	43
6.5	Testování radaru na stezce pro cyklisty, lze vidět blížícího se cyklistu. . . .	44

Kapitola 1

Úvod

V dnešní době, kdy svět cílí na udržitelnou dopravu, je cyklistika jednou z možných a šetrných forem dopravy. Avšak s narůstajícím počtem motorových vozidel i cyklistů v provozu se zvyšuje riziko pro obě strany, které se v něm pohybují. I přes neustálé budování cyklistických stezek a pruhů musí cyklisté na mnoha místech stále využívat rušných silnic. Pohyb cyklistů zvyšuje hustotu dopravy a tím i bezpečnostní riziko pro všechny účastníky, nejvíce však pro cyklisty, neboť oproti automobilům je jejich jediná ochrana při případné srážce pouze cyklistická přilba, která je povinná pouze do osmnácti let. Vyjma cyklistické přilby mohou cyklisté zvyšovat svou bezpečnost dalšími pasivními prvky, jako jsou světla, reflexní pásy či vhodné oblečení. Poslední dobou mezi pasivní ochranné prvky začínají pronikat právě i zpětné cyklistické radary, kterým se věnuje tato práce. Radarová technologie je hojně využívána pro detekci provozu či měření rychlosti. V kombinaci s nízkou cenou a spotřebou představují ideální technologii pro zařízení snímající provoz za cyklistou.

Cílem této diplomové práce je sestavení zařízení sloužícího pro sběr dat a vytvoření datové sady. Datová sada je využita pro implementaci řešení na sledování a vyhodnocování okolního provozu. Funkčnost implementace se následně porovnává pomocí radaru Garmin Varia radar 515 RTL.

K výběru tohoto tématu mě motivovala osobní zkušenost s cyklistikou a spousta absolvovaných kilometrů v silničním provozu, během nichž docházelo k nespočetnému množství nebezpečných situací. Jako řešení eliminující některé tyto situace se ukázal cyklistický radar, který je schopen upozornit na vozidla za cyklistou.

Kapitola 2 se zabývá problematikou bezpečnosti cyklistů v provozu. První část se zaměřuje na nehodovost cyklistů z dostupných dat Policie České republiky, která se každoročně zveřejňuje. Dále jsou zkoumány hrozby, jimiž jsou cyklisté v provozu denně ohroženi. Poslední část kapitoly se věnuje možnostem, jak zajistit vyšší bezpečnost cyklistům v provozu. Kapitola 3 se věnuje tématu radarů. První část mapuje klíčové milníky ve vývoji radarové technologie a uvádí jejich postupné změny. Druhá sekce se zaměřuje na základní principy fungování radarů a poskytuje hlubší náhled do fungování této technologie. Třetí část kapitoly rozebírá rozdělení radarů. Čtvrtá část se soustředí na popis využití radarové technologie v různých oblastech. Poslední část kapitoly se detailně věnuje cyklistickým radarům a zkoumá jejich vývoj a současné možnosti v této oblasti. Kapitola 4 se zaměřuje na zpracování radarového signálu. V první části se popisuje měření vzdálenosti pro jeden i více objektů. Druhá část rozebírá měření rychlosti pomocí radaru, taktéž pro jeden i více objektů. Třetí část je zaměřena na detekci úhlů mezi objektem a radarem. Kapitola 5 se v úvodní části věnuje návrhu zařízení a jeho klíčovými vlastnostem. Současně podrobně popisuje jednotlivé komponenty, které jsou zahrnuty do tohoto zařízení. Další část této kapitoly

je věnována procesu sběru dat. Tato nasbíraná data se využijí při implementaci a jejím následném vyhodnocení. Předposlední část se věnuje popisu uživatelského rozhraní aplikace zpětného cyklistického radaru. Poslední část se v první sekci věnuje popisu implementace zařízení pro sběr dat. Ve druhé sekci je zaměřena na implementaci aplikace zpětného cyklistického radaru. Kapitola 6 obsahuje vyhodnocení práce. První část testování se zabývá porovnáním teoretických hodnot s naměřenými hodnotami. Druhá část porovnává navrhanou implementaci s již existujícím řešením cyklistického radaru (Garmin Varia 515 RTL) a to v městském provozu, mimo městský provoz a na stezkách pro cyklisty.

Kapitola 2

Bezpečnost cyklistů

Tato kapitola se zaměřuje na aktuální bezpečnostní situaci cyklistů v provozu. První podkapitola se věnuje statistice nehodovosti cyklistů v posledních letech. Konkrétně v období od roku 2011 do roku 2023. Následuje analýza hrozeb, se kterými se mohou cyklisté setkat v provozu. Závěrečná podkapitola je věnována možnostem, jež mohou zvýšit bezpečnost cyklistů a tím přispět ke snížení počtu nehod, zranění či úmrtí.

2.1 Statistika nehodovosti cyklistů

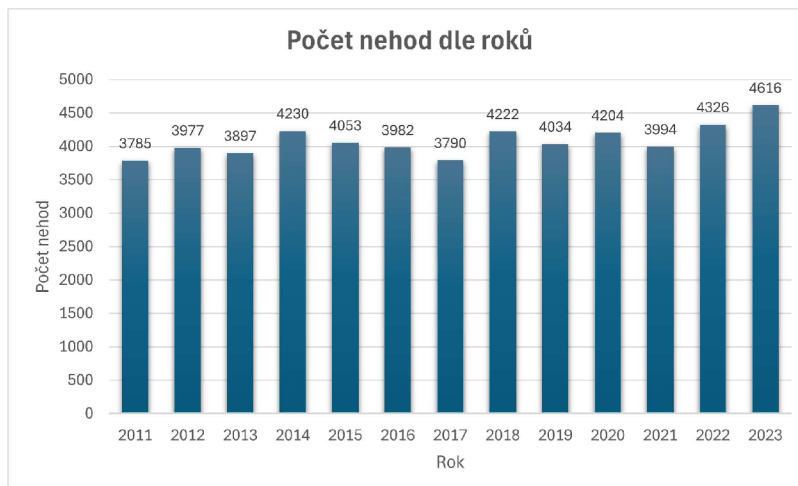
Tato podkapitola se zaměřuje na analýzu statistických údajů pocházejících z dat nehodovosti Policie České republiky [40]. Data obsahují spoustu užitečných informací, avšak pro potřeby následující analýzy byly vybrány pouze záznamy týkající se dopravních nehod s účastí cyklistů v letech 2011 až 2023. V rámci této analýzy se zaměříme na následky vzniklé při nehodě, druh směrového poměru a příčiny vzniku nehody.

Rok od roku se zvyšuje počet cyklistů v provozu, což vede také k růstu počtu nehod, při kterých mohou být cyklisté zranění či usmrceni. Zejména v městské mobilitě dochází k nárůstu až o 50 %. Ročně dochází v České republice až k 4 000 nehodám s účastí cyklistů, při kterých umírá každý rok až 40 cyklistů.

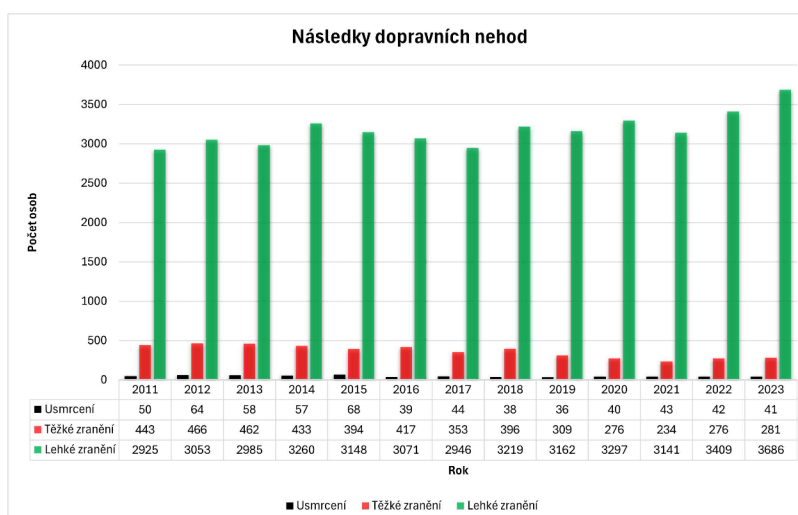
Na grafech 2.2, 2.1 si ovšem lze všimnout, že počet dopravních nehod s účastí cyklistů se stále zvyšuje, avšak množství úmrtí a vážných zranění má klesající trend, což odpovídá zvolené strategii **Vize Nula**. Základní filozofie této strategie považuje za nepřijatelné, aby v provozu docházelo k vážnému zranění či dokonce úmrtí. K úspěšnému naplnění Vize Nula je potřeba vytvořit bezpečný systém složený z účastníků provozu, vozidel a dopravní infrastruktury. V letech 2020 a 2021 byla data částečně ovlivněna restrikcemi z důvodu pandemie Covid-19, které měly různé dopady, včetně snížení mobility obyvatel. Toto snížení vedlo také ke snížení četnosti všech nehod, avšak dle analýzy [3] byla nehodovost jednostopých vozidel, tedy i cyklistů, ovlivněna více sezonností.

Následující graf 2.2 zobrazuje následky dopravních nehod ve zkoumaném období od roku 2011 do roku 2023. Lze si všimnout, že i přes narůstající počet nehod a zároveň i lehkých zranění odpovídá trend klesajícímu počtu úmrtí a vážných zranění. To odpovídá plnění cílů, které byly stanoveny v rámci strategie Vize Nula.

Graf 2.3 vyobrazuje množství a druh následků při různých příčinách dopravních nehod. Lze si všimnout, že nejtragičtějšími příčinami jsou nepřiměřená rychlost a nesprávné předjíždění. Naopak při nedání přednosti či nesprávném způsobu jízdy dochází častěji k lehčím zraněním. Z grafu 2.4 je možné vidět, statistiku nehodovosti cyklistů dle různých typů



Obrázek 2.1: Počet nehod dle roků.



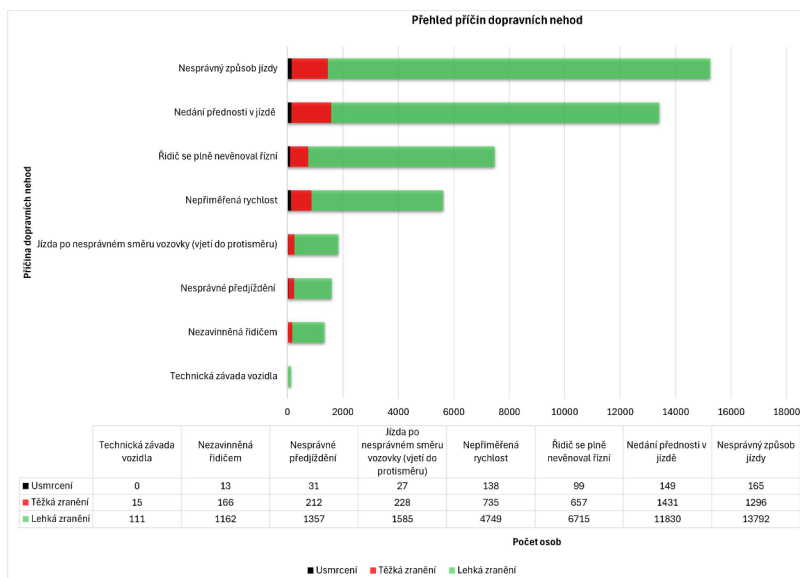
Obrázek 2.2: Následky dopravních nehod.

směrových poměrů na silnicích, což poskytuje důležité informace o místech, kde dochází k největšímu počtu nehod. Na základě těchto informací lze říci, že největší množství nehod se stává na přímých úsecích, kdy většina těchto nehod vznikla při nesprávném způsobu jízdy či v případě, kdy se řidič nevěnoval řízení. Nehody vzniklé v křižovatkách, ať už průsečných či stykových jsou zaviněny nedáním přednosti v jízdě.

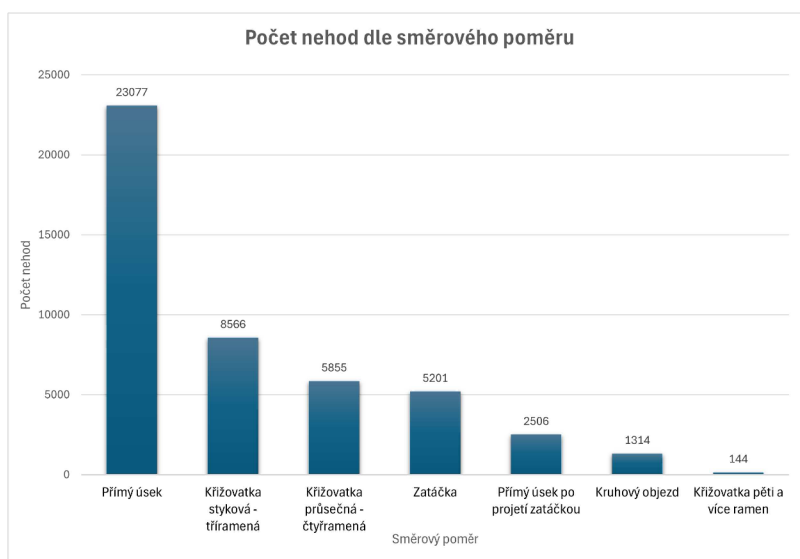
2.2 Analýza hrozeb pro cyklisty v provozu

Cyklista pohybující se v provozu je klasifikován jako řidič nemotorového vozidla. Musí tedy znát pravidla silničního provozu a řídit se jimi jak při jízdě po silnici, tak po stezce pro cyklisty. Kromě toho je důležité dodržovat základní pravidla pro pohyb v dopravě, čímž jsou myšleny ohleduplnost a opatrnost. Nepřípustná je také jízda pod vlivem alkoholu [8].

Častým případem nehod cyklistů jsou tzv. samonehody. Jedná se o nehody, při kterých cyklista havaruje sám vlastním přičiněním bez účasti jiných osob. Nejčastější příčinami



Obrázek 2.3: Četnosti příčin dopravních nehod.



Obrázek 2.4: Počet nehod dle směrového poměru.

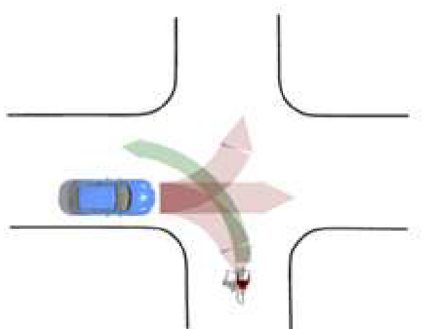
jsou nezvládnutí řízení jízdního kola, nepřizpůsobení rychlosti či náraz do pevné překážky. Samonehody tvoří 40% podíl všech nehod s účastí cyklistů [2].

Při zaměření se na nehody cyklistů s motoristy je nejčastější příčinou nedání přednosti jedním z účastníků, nesprávný způsob jízdy nebo nevěnování se řízení. Z analýz BESIPu vyplývá, že nejčastěji jsou na vině řidiči vozidel, a to v 58 % případů, zatímco v 39 % je vina na straně cyklistů. Ve zbylých situacích nebylo možné identifikovat jednoznačného viníka nehody [2].

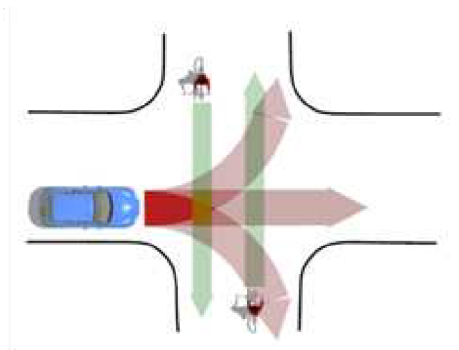
Nejzávažnější střety cyklistů a motoristů se stávají na křižovatkách. Jedna z potenciálně nebezpečných situací pro cyklistu nastává, když se chystá odbočit vlevo na křižovatce a z jeho levé strany se blíží vozidlo. V případě střetu často dochází k tragickým následkům,

přičemž téměř v jedné třetině případů končí smrtelným zraněním cyklisty. Tato situace je nastíněna na obrázku 2.5 [2].

Další rizikovou situací v křižovatkách je setkání cyklisty, jedoucího přímo, s vozidlem, které přijíždí do křižovatky z levé nebo pravé strany. Tento nebezpečný střet nabývá na vážnosti zejména mimo obytné oblasti, kde vozidla dosahují daleko vyšších rychlostí a dochází k vážnějším zraněním cyklistů. Situace je vyobrazena na obrázku 2.6 [2].



Obrázek 2.5: Cyklista odbočující vlevo, vozidlo přijíždějící zleva. Převzato z [2].



Obrázek 2.6: Cyklista projíždí rovně, vozidlo zleva nebo zprava. Převzato z [2].

Kromě rizikových situací v křižovatkách mohou nebezpečné situace nastat i na rovných úsecích. Zde velmi často dochází k nárazům do cyklisty zezadu. Tyto případy spadají do druhé nejtragičtější skupiny nehod. Velké procento z nich se stává v nočních hodinách či při snížené viditelnosti. Účinným opatřením proti této situaci je být dostatečně osvětlen a využívat reflexní prvky. Situace je opět znázorněna na obrázku 2.7 [2, 3].

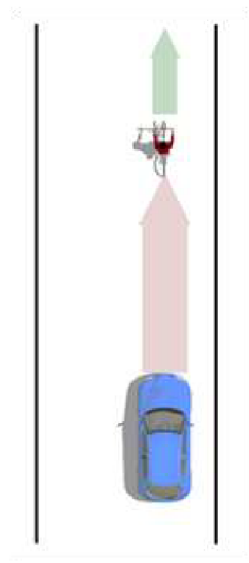
Ovšem mohou nastat i čelní střety a to často v případě, kdy se jeden z účastníků dostane do protisměru. Tato situace je znázorněna na obrázku 2.8, Příčinou těchto nehod bývá často nevěnování se řízení či jeho nezvládnutí [2, 3].

Mezi další velmi závažnou situací lze zařadit jízdu vedle podélně zaparkovaných vozidel. Často se v praxi tato situace nazývá jako „dooring“. Řidič či spolujezdec si nevšimne při otevírání dveří vozidla cyklisty, který projíždí v blízkosti. Ten následně nemá dostatek času na zareagování a naráží do otevřených dveří [3].

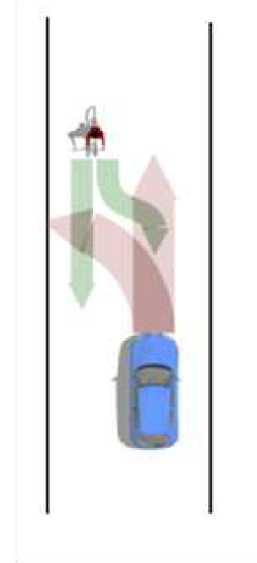
2.3 Možnosti pro zvýšení bezpečnosti cyklistů

Pro bezpečnou jízdu na pozemní komunikaci je důležité dodržet povinnou výbavu cyklisty. Její složení je obsaženo ve vyhlášce 153/2023 Sb. [32] o schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích. Některé vybavení, jako je cyklistická přilba, se řadí do povinné výbavy pouze do osmnácti let, avšak její nošení je výrazně doporučeno i poté, neboť několikanásobně snižuje riziko úmrtí či vážného poranění hlavy. Mezi další doporučenou výbavu cyklisty se řadí: cyklistické brýle, zvonek, blatníky či kryt řetězu [1, 18]. Mezi povinné bezpečnostní prvky cyklistů patří [1, 8, 18]:

- Dvě na sobě nezávisle účinné brzdy s odstupňovatelným ovládním brzdného účinku.
- Zaslepené konce trubek řídítek.
- Hrany ovládacích páček brzd, volných konců řídítek, páček měničů převodů a dalších součástí nesmí obsahovat ostré hrany.



Obrázek 2.7: Cyklista sražen vozidlem ze zadu. Převzato z [2].



Obrázek 2.8: Čelní střet cyklisty a vozidla. Převzato z [2].

- Matice nábojů kol, rychloupínací nebo v kombinaci s krytkou konce náboje musí být zapouzdřeny.
- Zadní odrazka červené barvy, může být kombinována se zadní svítilnou, nebo nahrazena odrazovými materiály podobných vlastností umístěných například na oděvu či obuvi.
- Přední odrazkou bílé barvy, taktéž může být nahrazena odrazovým materiálem podobných vlastností. Umístění je nutné v podélné střední rovině nad povrchem přední pneumatiky. Rovněž může být nahrazeno odrazovým materiálem na oděvu či obuvi.
- Odrazky oranžové barvy na obou stranách pedálů či světlo odrážející materiály na obuvi nebo v jejich blízkosti.
- Odrazky oranžové barvy v paprscích předního, zadního či u obou kol.

Dále pak za snížené viditelnosti jsou povinné [1, 18, 8]:

- Přední světlomet svítící bílým světlem.
- Zadní svítilna červené barvy.

Kromě standardní povinné a doporučené výbavy se stále objevují moderní bezpečnostní prvky, které mohou výrazně zlepšit ochranu cyklistů. Mezi tyto novinky patří například detektory pádu obsažené v cyklistických přilbách [6], které v případě nehody automaticky aktivují volání o pomoc a předají aktuální polohu události. Dalším inovativním prvkem je vesta, která funguje jako airbag a po detekci pádu se okamžitě nafoukne, poskytuje tak vyšší ochranu hrudníku cyklisty [24]. Je však nutné zdůraznit, že tyto pokročilé technologie často nesou nevýhodu vysokých nákladů.

Zvyšující se důraz na bezpečnost cyklistů se odráží i v nedávných novelách, které mají za cíl zlepšit podmínky pro cyklisty na silnicích. Jedním z klíčových opatření je zavedení povinného bočního odstupu 1,5 m od cyklisty. V místech s nejvyšší povolenou rychlostí 30 km/h stačí dodržet odstup pouze 1 m. Tato novela vstoupila v účinnost 1. ledna 2022. Měla by zajišťovat vyšší bezpečí pro cyklisty a zároveň umožnit cyklistům prostor pro vyhýbání se překážkám, jako jsou kanály, silniční nerovnosti či nečistoty vozovky, které se nejčastěji nacházejí na okrajích vozovky. Tato opatření jsou zavedena již v mnoha Evropských státech [15].

Další podstatnou novinkou v legislativě byla změna umožňující cyklistům legální užití silnic. Výjimkou je pouze situace, kdy je silnice doplněna o dopravní značení zákazu vjezdu jízdních kol. Tato úprava umožňuje cyklistům využívat silnice hlavně v situaci, kdy je stezka využívána i chodci nebo nedosahuje dostatečné kvality [38].

Kapitola 3

Radary a jejich princip

Tato kapitola se nejprve zaměřuje na historii radarů a jejich základních principů. Dále rozebírá druhy těchto radarů a jejich dnešní využití. Druhá část kapitoly se věnuje vývoji v oblasti zpětných cyklistických radarů a shrnutí jejich současného stavu.

3.1 Historie radarů

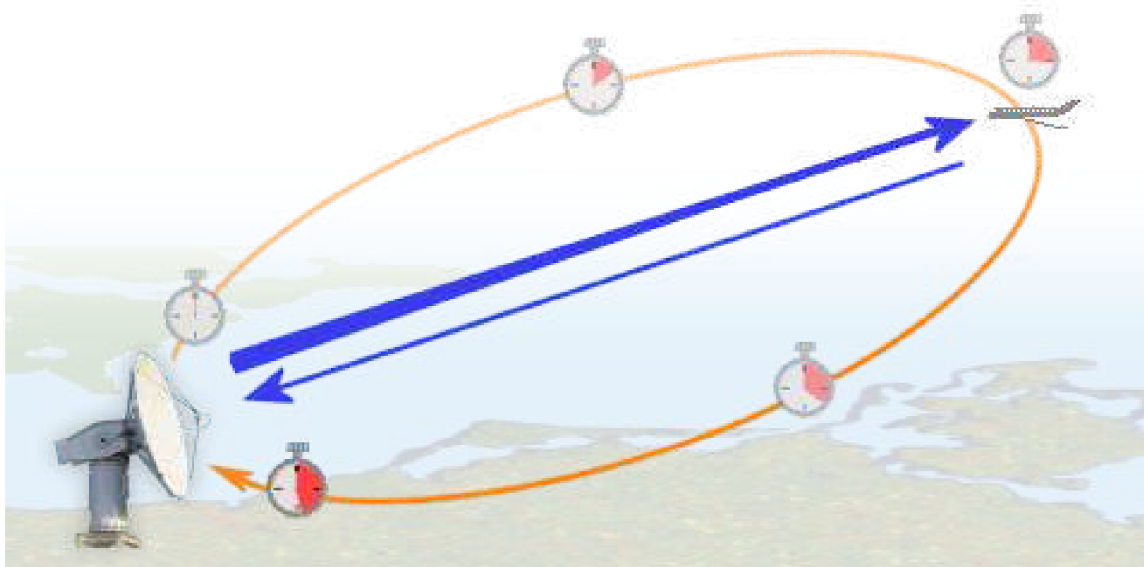
První principy odrazu elektromagnetických vln od kovových předmětů pocházejí z roku 1886 z práce německého fyzika Heindricha Hertze, který experimentálně potvrdil teorii fyzika Jamese Clerka Maxwella [7, 36, 42].

Významný výzkum radarové technologie byl zahájen osmi národy (Francie, Itálie, Německo, Japonsko, Nizozemí, Sovětský svaz, Spojené státy americké a Velká Británie) před druhou světovou válkou. První provozu schopné zařízení (telemobiloscope) bylo vytvořeno v roce 1904 německým inženýrem Christianem Hülsmejerem. Toto zařízení lze vidět na obrázku 3.1. Jednalo se o zařízení umožňující monitorovat loďní dopravu při nepříznivé viditelnosti na moři. Jeho dosah byl okolo 3000 m. Hülsmejer uplatnil svůj vynález a patentoval ho v Německu, Francii a Velké Británii [42, 7, 41, 36]. Dalším významným milníkem



Obrázek 3.1: Zařízení Telemobiloscope vytvořené německým inženýrem Christianem Hülsmejerem. Převzato z [41].

byla první lokalizace letadla, kterou provedl v roce 1930 Lawrence A. Hylandem z námořní výzkumné laboratoře Spojených států. Během své práce se zaměřovacím zařízením náhodou zaznamenal nárůst přijatého signálu od letadla. Výzkum postupoval velmi pomalu, neboť



Obrázek 3.2: Princip fungování radaru. Převzato z [42].

se mu nedostávalo oficiální podpory ani finančních prostředků. Výzkum byl až do roku 1933 zkoumán v utajení. O pár let později vznikl akronym radar pocházející z anglického spojení „radio detection and ranging“ (rádiové rozpoznávání a zaměřování) [7, 36]. Pozadu ovšem nezůstala ani Evropa. Německo, lídr v oboru Elektromagnetické technologie vyvinul v roce 1934 systém využívající kontinuální vlny napájený s dělenou anodou. Další inovativní posun zaznamenalo Německo v roce 1937, což vedlo k vytvoření pulzního radaru včasného varování Freya [7, 36]. Výzkumu elektromagnetických vln se také věnovala Velká Británie obávající se, že by Německo mohlo vyvinout paprsek smrti. V roce 1935 Robert Watson-Watt navrhl využití elektromagnetických vln pro detekci a zaměřování letadel. Návrh posloužil k vytvoření prototypu, ze kterého vychází výstražný radarový systém známý jako „Chain Home“. Tento systém se ukázal jako klíčový v bitvě o Británii, kdy docházelo k detekci letadel již nad územím Francie [7, 36].

Zavádění nových technologií pokračovalo i v letech 1950–1960. Mezi hlavní novinky patřily koherentní techniky, jako jsou dopplerovské zpracování či pulzní komprese [35]. Dnes jsou již radary běžnou součástí našich životů.

3.2 Princip radarů

Základní princip, na kterém radar pracuje, se velmi podobá principu odrazu zvukových vln. Radar vysílá puls elektromagnetické vlny skrz anténu do všech směrů. Rychlost šíření elektromagnetické vlny je konstantní a odpovídá rychlosti světla. Objekty, které jsou zasaheny tímto signálem, jej následně odrážejí zpět. To je znázorněno na obrázku 3.2. Část takto odraženého signálu je zachycena přijímačem v radaru. Přijatý signál je dále digitálně zpracován a zesílen. Následně se získávají další informace o objektu, například jeho poloha a rychlost. Informace získatelné z radaru jsou popsány níže v 3.2 [26, 36, 42].

Na obrázku 3.3 je znázorněno základní blokové schéma subsystému nacházející se obvykle v radarech. Jednotlivé položky toho schématu jsou popsány níže [26, 36, 42].

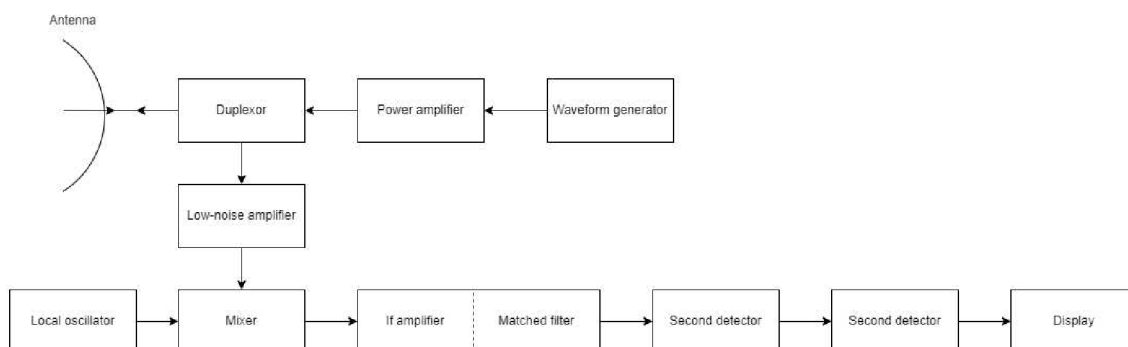
Vysílač generuje mikrovlnný signál s vhodným tvarem vlny pro konkrétní zaměření radaru. Jeho výkon může dosahovat pouze miliwattů, či naopak megawattů. Signál je vyslán v krátkých pulzních průbězích, což umožňuje použití antény jak pro vysílání signálu, tak i příjem odraženého signálu [26, 36, 42].

Duplexor zajišťuje střídavé připojení antény k vysílači nebo přijímači, díky čemuž je umožněno použití pouze jedné antény. Důvodem je prevence před poškozením nebo zničením obvodu přijímače, který je kalibrován pro signál s nízkým výkonem, neboť vysílač vysílá výkonné impulsy [26, 36, 42].

Anténa je zařízení umožňující přenášení signál do prostoru a následné sbírání ozvěny signálu při příjmu. Signál bývá usměrněn do úzkého paprsku pro soustředění výkonu a možnost určení směru objektu. Oblast pro příjem signálu bývá naopak větší, aby umožnila zachytit i slabé ozvěny od detekovaného objektu. Kromě těchto funkcí slouží anténa také jako prostorový filtr umožňující určit úhel, ve kterém se objekt vůči radaru nachází [26, 36, 42].

Přijímač se využívá k zesilování slabého přijímaného signálu na takovou úroveň, aby mohla být jeho přítomnost detekována. V rozsahu mikrovln, se kterými většina radarů pracuje, je šum ovlivňující výkonnost radaru vyšších frekvencí. Přijímač obvykle obsahuje také signálový procesor starající se o oddělení požadovaného signálu od nežádoucích [26, 36, 42].

Směšovač kombinuje vyslaný a odražený signál do jednoho. Tím vzniká signál obsahující informace o vzdálenosti či rychlosti cíle [26, 36, 42].



Obrázek 3.3: Blokový diagram jednoduchého radaru. Převzato z [36].

Informace získatelné z radarů

Detekce cíle není jedinou užitečnou informací získatelnou radarem. Při využití metod pro analýzu odraženého signálu jsme schopni získat spoustu dalších informací, avšak bez detekce cíle by tyto informace byly bezvýznamné. Tato sekce popisuje další získatelné informace [37].

Jednou z možná nejdůležitějších informací, které lze získat, je vzdálenost objektu. Radar využívá principu, že rychlost elektromagnetického signálu je totožná s rychlostí světla a může být využita k měření času mezi vyslaným signálem a návratem odraženého signálu zpět k radaru [37].

Další velmi důležitou informací je radiální rychlost cílového objektu. Ta je získatelná ze změny vzdálenosti za určitou periodu času. Druhou možností je využít měření dopplerovského frekvenčního posunu [37].

Je-li radar s dostatečně přesnou rozlišovací schopností v úhlu, umožní nám i získat velikost a tvar objektu. Kvalitních výsledků lze dosáhnout využitím dopplerovské frekvenční domény založené na SAR (Radar se syntetickou aperturou) či na ISAR (Radar s inverzní syntetickou aperturou) [37].

K výpočtu schopnosti radaru můžeme využít metriku SNR (Signal-to-Noise Ratio). Jedná se o poměr E/N_0 , kde E odpovídá celkové energii signálu přijatého radarem. N_0 je výkon šumu na jednotku šířky pásma přijímače [37].

3.3 Druhy radarů

Radary lze klasifikovat dle kritérií, jako jsou typ, druh použití, provozní frekvence, instalace, průběh vysílání či techniky zpracování přijímače. Některá možná rozdělení budou popsána níže v této sekci.

Dělení dle typu systému

Dle typu systému se radary dělí na dvě skupiny:

Primární radar vysílá elektromagnetické vlnění, které se po odražení od cíle vrací zpět. Jeho hlavní předností je možnost pracovat nezávisle na cíli, se kterým nevyžaduje žádnou spolupráci. Na druhou stranu neumožňují získat informace o velikosti nebo přesném umístění cíle. Tyto radary jsou často využívány pro vojenské účely za úkolem detekce lodí či letadel [21, 42].

Sekundární radar vyžaduje aktivní spolupráci se sledovaným objektem. Vysílací radar (dotazovač) vyšle elektromagnetický signál k objektu, ten pomocí odpovídače pošle odpověď na daný signál. Tyto systémy se často využívají pro monitorování leteckého prostoru a umožňují získat mnohem více informací (poloha, nadmořská výška, ...) než primární radary [21, 42].

Dělení dle vysílaných vln

Další možností je rozdělit radary dle vlastností vysílaného signálu. Rozdělení vypadá následovně:

Pulzní radary vysílají opakující se série krátkých obdelníkových impulzů. Přijatý signál pracuje s dopplerovým frekvenčním posunem, což umožňuje lokalizaci pohybujících se objektů. Dále se dělí na: MTI (moving target indication) radar a Pulzní dopplerovský radar [37].

Radary s pulzní kompresí využívají dlouhého pulsu s vnitřní modulací, může se jednat o frekvenční i fázovou, což zvyšuje rozlišovací schopnosti radaru [37].

Radary s kontinuální vlnou (Continuous Wave radar, CW-Radar) vysílají i přijímají nepřetržitě signál, to ovšem přináší nutnost zajistit, aby vysílaný signál nepronikal přímo do přijímače. Čehož lze dosáhnout prostorovým oddělením vysílací a přijímací antény [37].

Radary s frekvenčně modulovanou kontinuální vlnou (Frequency-Modulated Continuous Wave, FMCW-Radar) jsou speciální typ CW-Radaru, avšak na rozdíl od nich mohou během měření měnit svou frekvenci. Vysílaný signál je tedy frekvenčně modulován [37].

Dělení dle frekvence

Kromě možnosti klasifikace radarů dle jejich typu systému a vysílaných vln je možné klasifikovat je dle jejich frekvenčního pásma. Běžně radary využívají elektromagnetické spektrum v rádiovém pásmu (220–35 000 MHz), také některé mohou fungovat i v jiných spektrálních pásmech. V tabulce 3.1 je popsáno dělení dle IEEE z roku 2020. Například radary využívající pásmo od 6–30 MHz jsou uváděny jako OTH (Over-the-horizon radar). Tyto radary využívají ionosféru Země pro odraz radarového signálu, což umožňuje detekovat objekty za horizontem [37, 36].

V raných fázích vývoje se využívalo značení pomocí písmen. Radary na horní hranici pásma jsou označeny L, S, C, X. U těchto radarů mnohdy jejich velikost představuje omezení. Ostatní vyšší frekvenční pásma K_u , K , K_a jsou často ovlivněny počasím či atmosférickou absorpcí [37, 36].

Pásmo	Frekvence (GHz)	Použití
HF	0,003–0,03	OTH dohled (detekce objektů za obzorem).
VHF	0,03–0,3	využíván v civilním a vojenském letectví.
UHF	0,3–1,0	obdobně jako VHF, avšak přesnější.
L	1,0–2,0	Využití ve vojenských systémech.
S	2,0–4,0	sledování středně vzdálených objektů.
C	4,0–8,0	Detekce počasí, Wi-Fi zařízení.
X	8,0–12	Sledování střel, radar na lodi.
K_u	12–18,0	Vysílání satelitní televize, Měření rychlosti policíí.
K	18,0–27	Měření rychlosti policíí, detekce mraků.
K_a	27,0–40,0	Velmi vysokorozlišovací mapování, dohled na letišti.
V	40,0 – 75,0	Komunikace mezi satelity.
W	75,0 – 110	Aplikace v astronomii, adaptivní tempomaty.
MM-vlny.	110,0–300,0	Laserové dálkoměry a optické systémy zaměřování.

Tabulka 3.1: Pásmo frekvencí radaru a použití dle IEEE [10].

Dělení dle využití radarů

Jednou z možností, jak klasifikovat radary je dle jejich využití. Níže je popsáno několik možností využití dle [21, 36, 37].

Kontrola vzdušného prostoru

Na letištích jsou radary využívány pro bezpečnostní řízení letového provozu. Při nepříznivých povětrnostních podmínkách navádí letouny ke správnému přistání za pomoci radaru s vysokým rozlišením.

Kosmický průmysl

V kosmickém průmyslu mají radary velké množství využití, počínaje pozemními radary sloužícími pro sledování a detekci satelitů a kosmických lodí. Dále se využívají satelitní radary pro dálkový průzkum Země. Kosmickým lodím umožňují bezpečné přistání či dokování.

Vojenský průmysl

Ve vojenství mají radary široké uplatnění. Používají se jak pro pozemní, tak i vzdušné a námořní účely. Mezi jejich nejčastější úkoly patří sledování a detekce. Konkrétně například pro systémy včasné výstrahy, které jsou schopny varovat před nebezpečím vzdušného prostoru nebo raketovým útokem. Využití lze také pro řízení dělostřelecké palby či navádění raketových střel.

Meteorologie

Meteorologické radary využívají své antény pro detekci mraků. Fungují tedy na klasickém principu odrazu mikrovln od vzdálených objektů. Umožňují tedy získat informace o prostorovém rozložení oblačnosti, jejím pohybu či intenzitě srážek. Většinou bývají doplněny o údaje z meteorologických družic a pozemních stanic. V České republice se nacházejí dva meteorologické radary, jejich rozsah se pohybuje okolo 260 km.

Navigace a bezpečnost letadel a lodí

Letadla využívají radary mnoha způsoby, ať už se jedná o vyhýbání se nevhodnému počasí či zajištění bezpečnosti letadel před možnými srážkami s objekty nebo ostatními letadly.

V lodní dopravě jsou využívány radary s vysokým rozlišením jako navigační pomůcka v případě špatné viditelnosti či varování před hrozbami. Využívány jsou taktéž k určování hloubky moře.

Měření rychlosti

Hojně využíván policií pro měření rychlosti vozidel, měření lze provádět ze stojícího i jedoucího automobilu. Obvykle je využíván dopplerovský radar.

3.4 Radary s frekvenčně modulovanou kontinuální vlnou

Jedná se o speciální typ radarového senzoru vysílající spojitý přenosový signál obdobně jako radar s kontinuální vlnou. Avšak s rozdílem, že FMCW radar může během svého měření měnit svou pracovní frekvenci. Tato změna frekvence znamená, že vysílaný signál je modifikován. Na rozdíl od pulzních radarových systémů vysílajících krátké periodické pulzy [42].

FMCW radary jsou hojně využívány v různých oblastech, mezi které řadíme systémy autonomního řízení, systémy řízení dopravy, technologie inteligentních měst či v automobilových aplikacích, jako jsou parkovací asistent nebo adaptivní tempomat [43].

Mezi jejich hlavní přednosti řadíme [43]:

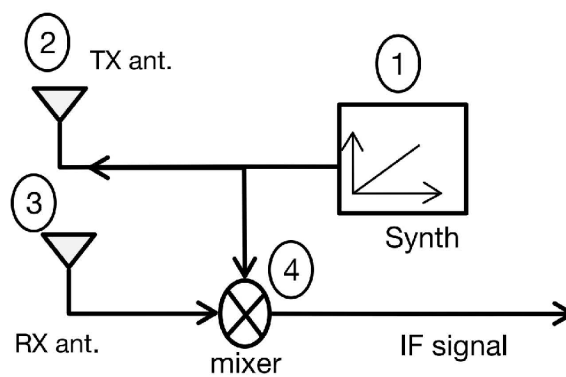
- Vzdálenost a radiální rychlost lze měřit současně.
- Přesnost měření rozsahu je velmi vysoká.
- Schopnost měřit velmi malé vzdálenosti cílů.
- Vysoká provozní spolehlivost.
- Nízké pořizovací náklady.

Blokové schéma FMCW radaru

Blokové schéma FMCW radarů je vidět na obrázku 3.4. Skládá se z:

1. syntetizér,
2. vysílací anténa,
3. přijímací anténa,
4. směšovač.

Syntetizér generuje frekvenčně modulovaný signál, který je následně vyslán vysílací anténou. Pokud narazí na nějaký objekt, dochází k jeho odrazu a přijetí přijímací anténou. Následně jsou přijatý a vyslaný signál smíchány ve směšovači. Výstupem směšovače jsou dvě sinusové vlny.



Obrázek 3.4: Schéma radaru FMCW. Převzato z [14].

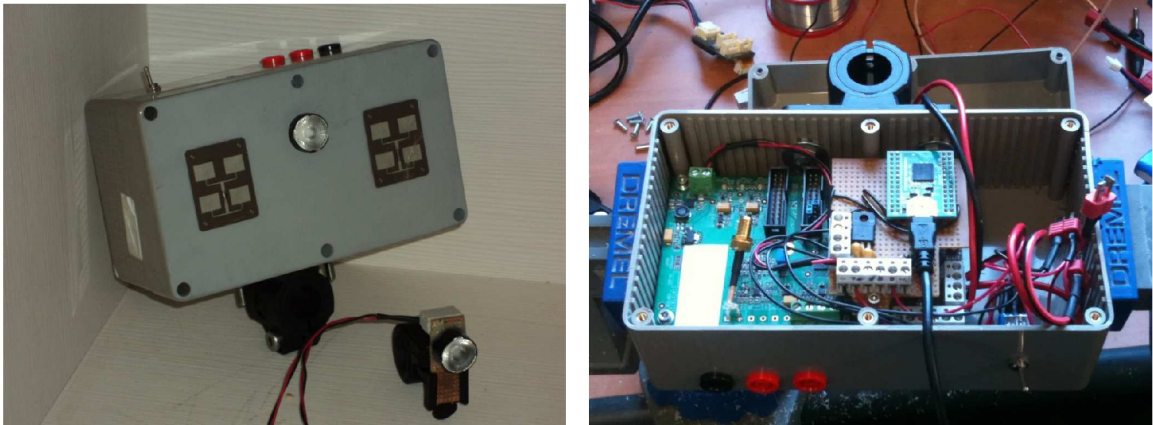
3.5 Cyklistické radary

Již v roce 2001 začaly vznikat první návrhy zařízení, které mělo fungovat jako cyklistický radar. Toto zařízení mělo být založeno na principu dopplerova radaru a LADARu [16]. Ovšem první prototyp přišel na svět až o několik let později, byl vyvinut společností Ikubu. Prototyp lze vidět na obrázku 3.5. Jedná se o 10 GHz radar a diodu, která byla umístěna na řídicích a blikala podle blížících se automobilů [9].

Další prototyp byl již stavět na 24 GHz radaru, obsahoval procesor ARM a také umožňoval bezdrátovou komunikaci pomocí standardu bluetooth. Zařízení dokázalo nejen rozpoznat vozidlo, ale také jeho vzdálenost a rychlost, kterou se blíží. Společnost IKubu byla následně koupena společností Garmin a výroba radarů se přesunula pod ně. Do roku 2022 existovaly pouze cyklistické radary od společnosti Garmin. Dnes již máme řadu zpětných cyklistických radarů, nejpoužívanější jsou popsány níže [9, 17].

Garmin Varia

Garmin Varia je jedním z nejpoužívanějších typů cyklistických radarů, se kterým se je možné setkat. První cyklistický radar byl představen touto společností v roce 2015. Jednalo se o Garmin Varia RTL500 radar, který vycházel z Radaru BackTracker od společnosti



Obrázek 3.5: Prototyp cyklistického radaru od vývojářů ze společnosti IKubu. Vnější pohled (vlevo), vnitřní pohled (vpravo). Převzato z [9].

IKubu, kterou Garminu odkoupil. Následně v roce 2018 byla vydána druhá verze Garmin Varia RTL510, zde došlo k výrazné změně vzhledu, čehož si je možné všimnout na obrázku 3.6. Třetí verze radaru, nesoucí označení Garmin Varia RTL515, vyšla v roce 2020. Oproti předchozí verzi umožňuje bezdrátovou komunikaci přes bluetooth, vyšší výdrž baterie a speciální režim pro jízdu cyklistů ve skupině. Společně s ní vychází i Garmin Varia RVR315, jedná se pouze o radar bez výstražného světla. V roce 2022 byla uvedena nová řada radarů rozšířených o zpětnou kameru s rozlišením 1080 pixelů pořizující záznam jízdy s funkcí automatického ukládání v případě nehody, což přispělo k většímu bezpečí cyklistů [17, 29].

Všechny tyto radary jsou založeny na 24 GHz radaru využívající Dopplerův efekt. Díky čemuž je radar schopný detekovat objekty za cyklistou do vzdálenosti až 140 m pohybující se rychlostí od 10 km/h do 160 km/h s šířkou radarového paprsku 40 stupňů. Takto detekované objekty následně vizualizuje na radarový displej, cyklopočítač či chytré hodinky. Vizualizace znázorňuje graficky vzdálenost vozidla a jeho rychlost [17, 29].

Komunikace s těmito zařízeními je zajištěna pomocí komunikačního protokolu bezdrátové sítě ANT+,¹ u novějších verzí komunikačním protokolem bluetooth.² Všechny verze, kromě RVR315 jsou vybaveny zadním světlem se svítivostí 65 lm se schopností upravovat intenzitu světla dle rychlosti vozidel [17, 29].

¹<https://www.thisisant.com/>

²<https://www.bluetooth.com/>



Obrázek 3.6: Vývoj cyklistických radarů. Zleva Garmin Varia Rearview Radar, Garmin Varia RTR315, Garmin Varia RTL515 a Garmin Varia RCT7155. Převzato z [22].

Bryton gardia R300 radar

Zpětný cyklistický radar od společnosti Bryton zveřejněný v roce 2022. Je schopen detekovat blížící se vozidla ve vzdálenosti do 190 m a podle rychlosti vozidla vyhodnotit nebezpečí, které následně vizualizuje na displej cyklopočítače. Na základě vyhodnocení se také upravuje rychlost blikání a intenzita světla radaru, aby upozornil blížící se vozidlo. Svítivost se pohybuje v rozmezí od 51–150 lm. K bezdrátové komunikaci využívá taktéž standard ANT+ a bluetooth. Další předností tohoto zařízení je vestavěný akcelerometr umožňující detekovat brzdění cyklisty a fungovat tak jako brzdné světlo a informovat tím vozidla za cyklistou [27, 30].

Magene (MAGICSHINE) Seemee 508

Zpětný cyklistický radar Seemee 508 byl zveřejněn stejně jako radar Guardian R300 v roce 2022. Detekce blížících se vozidel funguje až do vzdálenosti 140 m a relativní rychlostí detekovaného cíle 10–120 km/h v horizontálním detekčním úhlu 40 stupňů. Pro komunikace se zařízeními sloužícími k vizualizaci je využito rovněž standardů ANT+ a bluetooth. Zařízení také obsahuje akcelerometr detekujícím i mírné brzdění a následnou světelnou signalizaci. Nevýhodou je ovšem slabší svítivost světelného zdroje, která dosahuje pouze 20 lm [23, 33].

IGPSport SR30

Zpětný cyklistický radar představen na výstavě EuroBike 2023. Zařízení je vybaveno milimetrovým radarem schopným detekovat vozidla blížící se rychlostí 10–120 km/h do vzdálenosti 150 m. Pro komunikaci se zařízeními využívá rovněž standardů ANT+ a bluetooth. Svítivost zadního světla u tohoto zařízení dosahuje 65 lm. Hlavní výhodou tohoto cyklistického radaru je výdrž baterie, kterou překonává ostatní cyklistické radary a to téměř 17 hodin [11, 25].

Trek CarBack radar

Jedná se o nejnovější a nejpokročilejší zpětný cyklistický radar. Radar na rozdíl od výše zmíněných již nevyužívá 24 GHz, ale 77–81 GHz. To umožňuje radaru detekovat vozidla až ve vzdálenosti 240 m s rychlostí v rozmezí 6–111 km/h. Zařízení obsahuje také svítilnu se svítivostí 5–90 lm. Výhodou je rovněž využití konektoru USB-C. Pro komunikaci se zařízeními využívá rovněž standardů ANT+ a bluetooth [4, 5].



Obrázek 3.7: Cyklistické radary zleva Magene Seemee 508, IGPSport SR30 a Bryton Gardia R300. Převzato z [23, 11, 27].

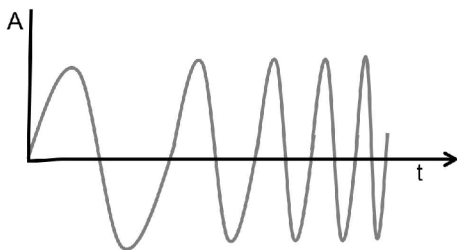
Kapitola 4

Zpracování radarového signálu

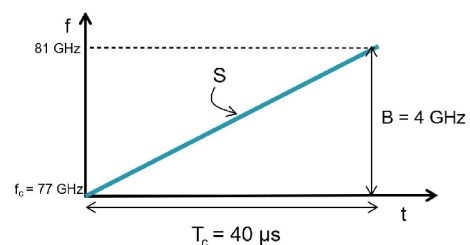
Tato kapitola se zabývá základními operacemi nad radarovým signálem, na jehož základě je možné měřit vzdálenost mezi radarem a objekty, měřit jejich rychlost či měřit úhel detekovaných objektů vůči radaru. Informace v následujících třech sekcích jsou čerpány z materiálů od Texas Instruments [14, 31]. Poslední sekce se zaměřuje na Dopplerův jev.

4.1 Měření vzdálenosti

Základní princip radarových systémů spočívá v přenosu elektromagnetického signálu. Tento signál je následně odražen objekty, které mu stojí v cestě. U FMCW radarů se frekvence signálu lineárně zvyšuje s časem. Tento typ signálu nazýváme chirp a je charakterizován počáteční frekvencí (f_c), šířkou pásma (B), trváním chirpu (T_c) a jeho sklon (S) zachycující rychlost změny frekvence. Na obrázku 4.1 je vidět chirp signál s amplitudou jako funkcí času, zatímco na obrázku 4.2 je frekvence znázorněna jako funkce času.



Obrázek 4.1: Chirp signál s amplitudou jako funkcí času. Převzato z [14].



Obrázek 4.2: Chirp signál s frekvencí jako funkcí času. Převzato z [14].

Syntetizér generuje chirp, který je následně vyslán vysílací anténou. V případě, že chirp signál narazí na objekt, dojde k jeho odražení a přijetí přijímací anténou. Tyto signály jsou za pomoci mixéru zkombinovány a vytvoří mezifrekvenční (IF – intermediate frequency) signál. Rovnice vstupních signálů do mixéru jsou sinusoidy, které vypadají následovně:

$$x_1 = \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \quad (4.1)$$

$$x_2 = \sin(\omega_2 t + \Phi_2) \quad (4.2)$$

výsledný signál x_{out} má okamžitou frekvenci i fázi rovnou rozdílu okamžité frekvence a fáze vstupních signálů x_1 a x_2 .

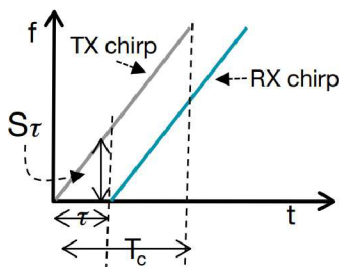
$$x_{out} = \sin[(\omega_1 - \omega_2)t + (\Phi_1 - \Phi_2)] \quad (4.3)$$

Na obrázku 4.3 vidíme dva chirpy, kde si lze všimnout, že chirp RX je pouze zpožděný chirp TX. Toto zpoždění se vypočítá pomocí následující rovnice:

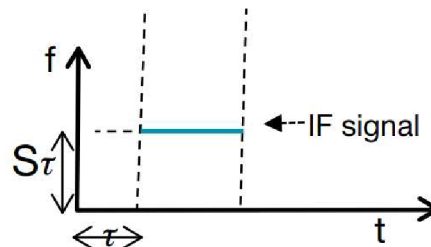
$$\tau = \frac{2d}{c} \quad (4.4)$$

,kde d odpovídá vzdálenosti detekovaného objektu a c představuje rychlost světla.

Na obrázku 4.3 je znázorněno získání IF signálu na výstup frekvenčního směřovače. Abychom získali jeho hodnotu, je nutné odečíst hodnotu odraženého a vyslaného signálu. Můžeme vidět, že oba signály jsou stejné, pouze se liší o časové zpoždění τ . Díky tomu, že je vzdálenost mezi signály stejná, má výsledný IF signál konstantní frekvenci, jak je vidět na obrázku 4.4. Důležité je také poznamenat, že IF signál je platný pouze ve chvíli, kdy se chirpy vzájemně překrývají.



Obrázek 4.3: Odeslaný (TX) a přijatý (RX) chirp. Převzato z [14].



Obrázek 4.4: Konstantní IF signál. Převzato z [14].

Signál vystupující z mixéru odpovídá sinusové vlně, jak vyplývá z rovnice 4.3. Počáteční fáze výstupního signálu IF (Φ_0) je rozdíl fází TX chirpu a RX chirpu.

$$\Phi_0 = 2\pi f_c \tau \quad (4.5)$$

následně z rovnic 4.5 a 4.4 se odvodí:

$$\Phi_0 = \frac{4\pi d}{\Lambda} \quad (4.6)$$

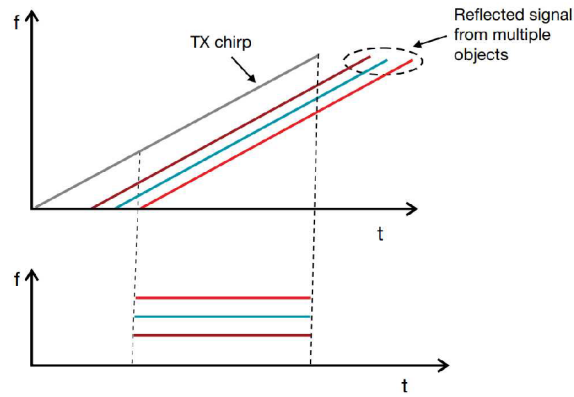
odpovídá-li IF signál sinusové vlně, lze získat pro objekt ve vzdálenosti d od radaru rovnici:

$$A \sin(2\pi f_0 t + \Phi_0) \quad (4.7)$$

kde $f_0 = \frac{S2d}{c}$ a $\Phi_0 = \frac{4\pi d}{\Lambda}$.

Až doposud jsme předpokládali pouze měření vzdálenosti mezi radarem a jedním detekovaným objektem. Často je však potřeba měřit vzdálenost několika objektů zároveň. K tomu již výše popsaná metoda nestačí a je nutné provést její úpravy.

Na obrázku 4.5 můžeme vidět vyslaný signál a následně přijaté odražené signály od více objektů s různým zpožděním. Zpoždění je úměrné vzdálenosti k danému objektu. Chirpy označující odražené signály jsou převáděny do více IF signálů, které mají stále konstantní frekvenci. Tentokrát nelze IF signál zpracovat stejně jako při detekci jednoho objektu, ale je potřeba zpracovat jej pomocí Fourierovy transformace. Výstupem je frekvenční spektrum zobrazující samostatné vrcholy, které odpovídají přítomnosti objektů v různých vzdálenosti.



Obrázek 4.5: Zobrazení vyslaného (TX) a zpožděného odraženého (RX) chirpu. Pře-
vzato z [14].

4.2 Měření rychlosti

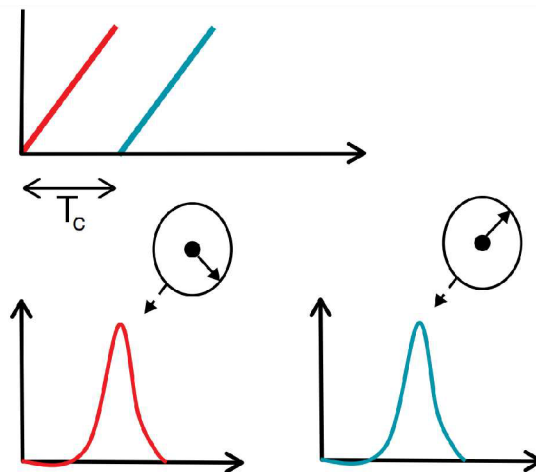
Aby bylo možné měřit rychlost, vysílá FMCW radar alespoň dva chirpy, které odděluje časový interval o velikosti T_c . Pro každý odražený chirp dochází ke zpracování pomocí range-FFT, která počítá vzdálenost objektů. Avšak vrcholy chirpů vypočítány pomocí range-FFT budou na stejných místech, avšak s odlišnou fází. Rozdílná fáze tedy značí vzdálenost uraženou objekty za časový interval T_c .

Fázový rozdíl můžeme vypočítat vztahem:

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi v T_c}{\lambda} \quad (4.8)$$

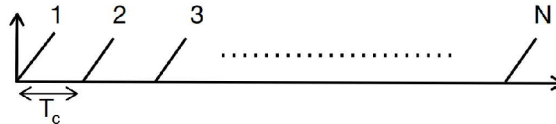
Následně lze z rovnice 4.8 odvodit rychlost:

$$v = \frac{\lambda \Delta\Phi}{4\pi T_c} \quad (4.9)$$

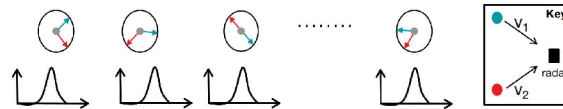


Obrázek 4.6: Měření rychlosti pomocí dvou po sobě jdoucích chirpů v časové a frekvenční doméně. Pře-
vzato z [14].

Avšak tato technika nebude funkční, pokud v okamžiku měření existuje více objektů ve stejné vzdálenosti, od radaru pohybující se s různými rychlostmi. Stejná vzdálenost způsobuje, že odražené chirpy mají identickou frekvenci IF. Z tohoto důvodu bude výsledkem range-FFT pouze jediný vrchol představující kombinovaný signál od všech objektů ve stejné vzdálenosti. Pokud chceme aby bylo možné měřit rychlost více objektů ve stejné vzdálenosti, je nutné, aby radarový systém vyslal více než dva chirpy. Radarový systém tedy vyšle soubor N rovnoměrných chirpů. Tento soubor se nazývá chirp frame. Range-FFT tedy zpracovává odražený soubor chirpů, což sice opět vede k sadě N identických vrcholů, avšak každý vrchol má nyní odlišnou fázi.



Obrázek 4.7: Znázornění souboru N rovnoměrně vyslaných chirpů – chirp Frame. Převzato z [14].



Obrázek 4.8: Výsledek range-FFT v N fázích pro odražený chirp frame. (Modrou a červenou barvou jsou zvýrazněny fázové příspěvky.) Převzato z [14].

4.3 Detekce úhlů

Abychom byli schopni přesněji určit umístění objektů ve scéně, je nutné kromě vzdálenosti a rychlosti znát i úhel, ze kterého odražený signál přichází. Radary od Texas Instruments pracují na principu MIMO (multiple-input-multiple-output), což znamená, že radar obsahuje více přijímacích (RX) a vysílacích (TX) antén. Rozložení a množství těchto antén ovlivňuje přesnost výpočtu. Antény umístěné horizontálně slouží k určení azimutu, zatímco antény umístěné vertikálně slouží k určení elevace.

Pro odhad směru dopadu odraženého signálu od objektu potřebujeme alespoň dvě přijímací (RX) antény v horizontálním směru, jak je znázorněno na obrázku 4.9. Signál vyslaný vysílací anténou (TX) se odráží od objektu pod úhlem θ a je přijímán pomocí obou přijímacích antén (RX). Na obrázku lze vidět, že odražený signál do druhé přijímací antény musí urazit delší vzdálenost (Δd). To způsobuje fázový posun mezi odraženými signály, který je následně možné využít při stanovení směru odraženého signálu. Definuje se následující rovnicí:

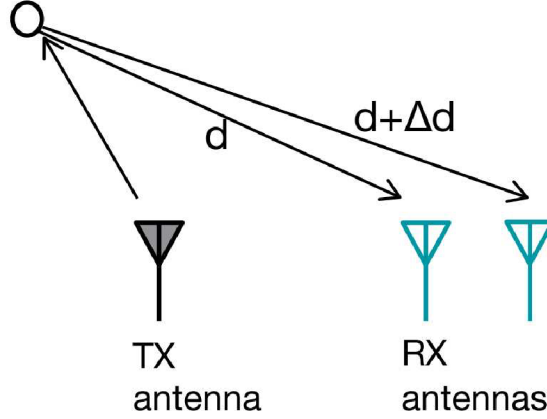
$$\Phi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \quad (4.10)$$

Avšak aby bylo možné určit přesný směr objektu vůči radaru musí dojít k úpravě předchozího výrazu. Výraz Δd lze nahradit pomocí $l \sin(\theta)$, kde l odpovídá vzdálenosti mezi anténami.

$$\Phi = \frac{2\pi l \sin(\theta)}{\lambda} \quad (4.11)$$

Následně je třeba vyjádřit θ :

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \Phi}{2\pi l} \right) \quad (4.12)$$



Obrázek 4.9: Zobrazení rozdílné vzdálenosti pro přijímací antény od cílového objektu. Převzato z [14].

4.4 Dopplerův jev

Dopplerův jev, někdy také nazýván jako Dopplerův posun, byl popsán v roce 1842 rakouským vědcem Christianem Dopplerem. Hlavním principem tohoto jevu je změna frekvence vlny mezi vysílačem a přijímačem vlny způsobená relativním pohybem mezi nimi. Tento efekt je pozorován u všech vlnových jevů (zvukové vlny či světlo). To lze pozorovat na obrázku 4.10. V levé části můžeme vidět stejnou vzdálenost dvou přijímačů od vysílače, ovšem v pravé části dochází k posunu vysílače. Můžeme si všimnout, že směrem ke vzdálenějšímu přijímači se vlnová délka zvýší, zatímco k bližšímu přijímači se vlnová délka sníží [34, 19, 20].

V praxi se lze s Dopplerovým jevem setkat při průjezdu vozidel integrovaného záchraného systému. Rychlost vozu způsobuje zvýšení kmitočtu zvukové vlny vozidlem, zatímco za ním se snižuje. To způsobuje, že pozorovatel slyší tón příjíždějícího vozidla vyšší, než vozidla vzdalujícího se od něj [28].

Pro výpočet kmitočtu vnímaného přijímačem v případě stacionárního přijímače a pohyblivého vysílače lze využít následující rovnici:

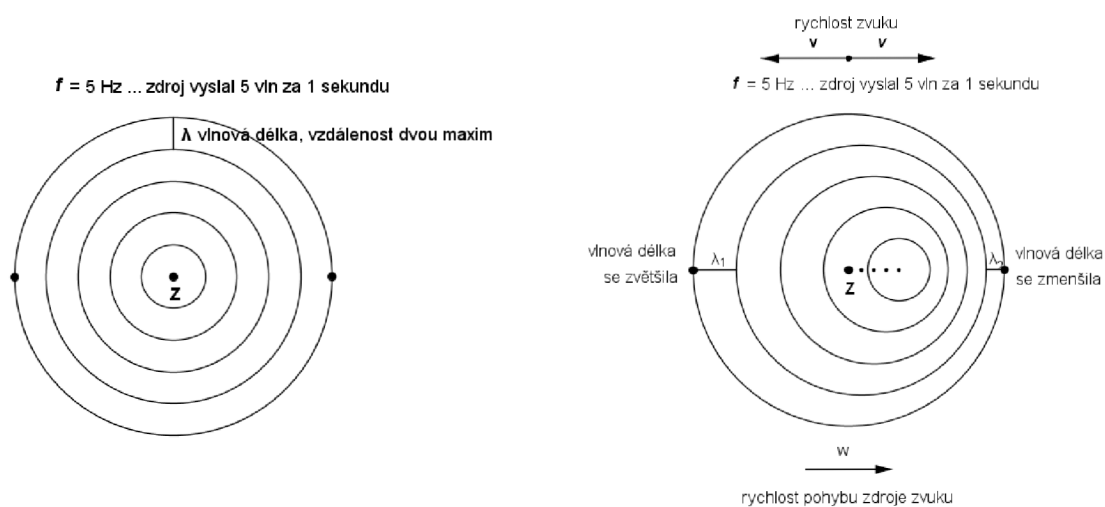
$$f_E = f_S \frac{1}{1 \pm \frac{v_s}{v}} \quad (4.13)$$

V případě stacionárního vysílače a pohyblivé přijímače se využívá následujícího vztahu:

$$f_E = f_S \left(1 \pm \frac{v_E}{v} \right) \quad (4.14)$$

kde f_E odpovídá frekvenci na přijímači, f_S frekvenci na vysílači, v_E rychlosti přijímače v relativním poměru k prostředí, v_s rychlosti vysílače v relativním poměru k prostředí a v rychlosti šíření vln v prostředí tedy rychlosti zvuku [34, 28, 20].

Radary tento jev využívají pro měření rychlosti, proto se nazývají dopplerovské radary. Příkladem mohou být policejní radary založeny na skutečnosti, že rozdíl mezi frekvencí vysílaného a přijatého signálu je přímo úměrný rychlosti jedoucího vozidla [20].



Obrázek 4.10: Dopplerův jev pro stejnou vzdálenost pozorovatelů (vlevo) a různou vzdálenost pozorovatelů (vpravo). převzato z [19].

Kapitola 5

Návrh a implementace

Tato kapitola se věnuje návrhu řešení zpětného cyklistického radaru. První část se zaměřuje na sestavení zařízení a požadavky na něj. Druhá část se zabývá sběrem dat pomocí vytvořeného zařízení a popisem vytvořené datové sady. Další část se věnuje návrhu grafického uživatelského rozhraní, od počátečního drátového modelu až po konečnou verzi. Poslední část je věnována implementaci zařízení zpětného cyklistického radaru a aplikace sloužící k jeho vyhodnocení.

5.1 Návrh zařízení

V této sekci je obsažen popis všech využitých modulů pro zařízení sloužící jako zpětný cyklistický radar a jeho následné sestavení. Dále jsou popsány požadavky, které by mělo vytvořené zařízení splňovat. Poslední část je věnována aplikaci **Out of Box Demo** pro radary od společnosti Texas Instruments, na níž je zpětný cyklistický radar postaven.

Modul IWR6843AOPEVM

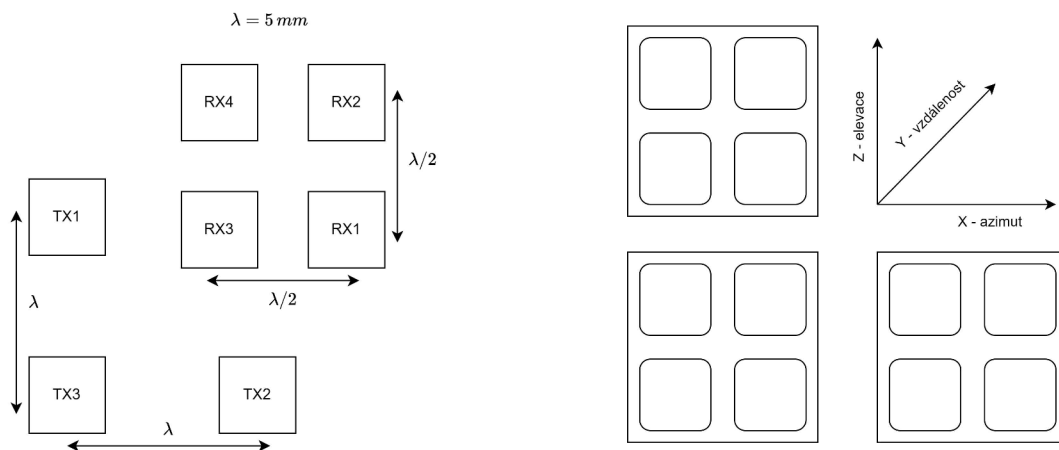
Jako radarový modul byl zvolen **IWR6843AOPEVM** od společnosti Texas Instruments Inc.¹ Tento modul spadá do kategorie průmyslových radarů, což plyne z jeho označení IWR (IWR – industrial mmWave radar). Druhou možností jsou radary s označením AWR (AWR – automotive mmWave radar), které jsou určeny pro automobilový průmysl. Radar je zobrazen na obrázku 5.2.

Radar využívá šířku pásma 4 GHz ve frekvenčním rozsahu od 60 GHz do 64 GHz. Současné cyklistické radary, které byly zmíněny v kapitole 3.5, jako jsou Garmin Varia či Bryton Gardia R300 využívají frekvenční pásmo 24 GHz. Jedinou výjimkou je radar CarBack 3.5, který využívá frekvenční rozsah 76 GHz až 81 GHz.

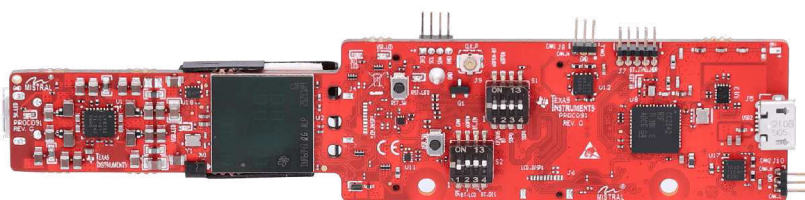
Jeho další předností je umístění vysílacích (TX) a přijímacích (RX) antén přímo na čipu (AOP – Antenna-on-package), což umožnilo snížit rozměry zařízení. Celkem zařízení obsahuje čtyři přijímací a tři vysílací antény. Jejich rozmístění je zobrazeno na obrázku 5.1. Kombinací těchto antén lze vytvořit 12 virtuálních antén, což zvyšuje přesnost a rozlišení radaru. Rozmístění a kombinace virtuálních antén je zobrazeno na obrázku 5.1.

Větší množství antén v ose X vede k lepšímu rozlišovacímu úhlu v azimutu, zatímco více antén v ose Z vede k lepšímu rozlišení úhlu ve výškovém zorném poli. Zorný úhel azimutu i ve výškovém poli dosahuje 120°. Napájení a přenos dat jsou umožněny přes rozhraní USB.

¹<https://www.ti.com/>



Obrázek 5.1: Rozložení antén a virtuálních antén pro modul IWR6843AOPEVM. Převzato z [12].



Obrázek 5.2: Milimetrový radar IWR6843AOPEVM od společnosti Texas Instruments. Převzato z [12].

Waveshare 10 DOF IMU Senzor

Modul Waveshare 10 DOF IMU² s nízkou spotřebou energie se skládá ze dvou senzorů: MPU9250 a BMP280. První zmíněný zastává tři funkce: akcelerometr, gyroskop a magnetometr. Hodnoty je schopen měřit ve třech osách (x, y, z) s přesností až 16 bitů. Druhý zmíněný senzor, BMP280 slouží pro měření barometrického tlaku. Komunikace s minipočítačem Raspberry Pi je zajištěna pomocí synchronní sériové sběrnice I2C. V této práci byl modul využit pro zaznamenávání hodnot z akcelerometru.

²<https://www.waveshare.com/10-dof-imu-sensor-c.htm>

Raspberry Pi Camera 3 Wide

Kamera Raspberry Pi camera 3 wide³ obsahuje CMOS senzor Sony IMX708 s rozlišením 11,9MPx, což umožňuje nahrávat videa v HD kvalitě. Raspberry Pi Camera 3 se vyrábí ve dvou verzích s různými ohniskovými vzdálenostmi a to 4,74 mm a 2,75 mm pro širokoúhlou verzi, která je využita v této práci, neboť umožňuje snímat větší rozsah okolí. Kamera se připojuje přes CSI konektor k minipočítači Raspberry Pi 4 Model B.

Sestavení zařízení

Aby bylo zařízení možné připevnit na silniční kolo, bylo nutné pro něj vymodelovat držák pro umístění na sedlové trubce a kryt chránící moduly před vnějšími vlivy. K vymodelování byl využit CAD software Fusion 360 od společnosti Autodesk Inc.⁴ Při modelování byl kladen důraz na snadnou manipulaci se zařízením, ať už se jednalo o možnost snadného odstranění z jízdního kola, tak i rozebrání celého zařízení. Model se tedy skládá z více částí:

1. Držák na sedlovou trubku.
2. Kryt radaru a kamery.
3. Box na umístění všech modulů.
4. Horní víko zařízení.
5. Část pro uchycení Raspberry Pi.



Obrázek 5.3: Části pro sestavení zařízení. Zleva část pro uchycení Raspberry Pi, Uchycení radaru a kamery ze zadní a přední strany.

Důležité bylo myslet také na ochranu všech modulů, neboť je radar umístěn na místě, které je velmi náchylné na znečištění od zadního kola. Aby byl radar umístěn ve správném úhlu, bylo potřeba pracovat s geometrií testovacího kola tak, aby byl radar v rovině s vozovkou. To zajišťovalo vymodelování držáku zařízení se skosením $73,5^\circ$, což odpovídá úhlu sedlové trubky.

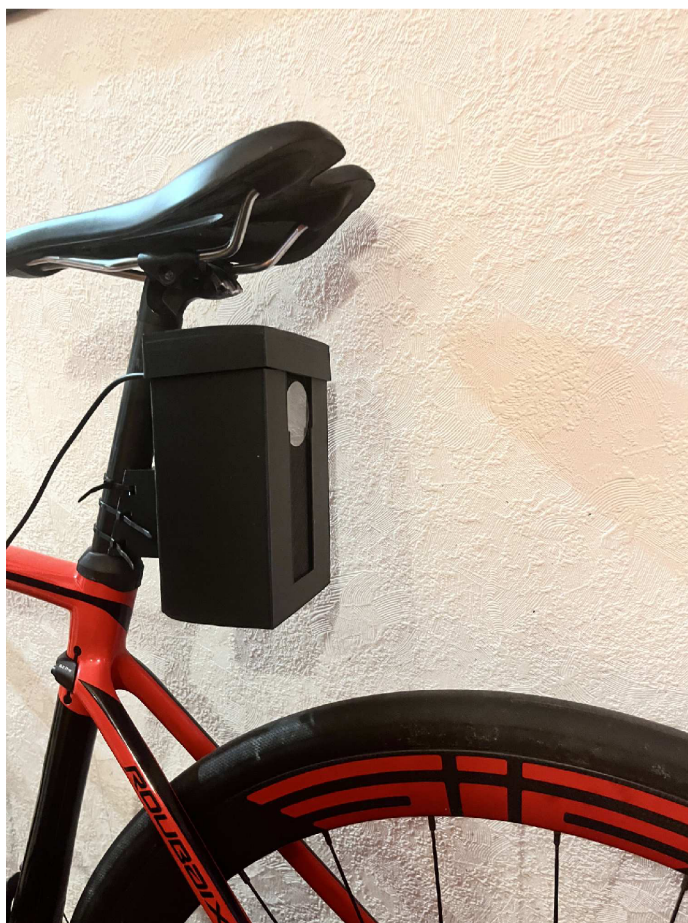
Prototyp modelu byl následně vytištěn na 3D tiskárně z materiálu PLA (polylactic acid – kyselina polylactonová, dále jen PLA) z důvodu snadnějšího tisku a nižší ceny materiálu. Po otestování došlo k nahrazení materiálu PLA materiálem PETG (polyethylentereftalát-glykol), který vykazuje vyšší pevnost a teplotní odolnost.

Sestavené zařízení lze vidět na obrázku 5.4. Držák na sedlovou trubku obsahuje otvory pro upevnění pomocí tří stahovacích pásek, což zajišťuje dostatečnou pevnost uchycení. Systém uchycení boxu je řešen otočným mechanismem, zajišťující snadnou manipulaci a odstranění z jízdního kola.

³<https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-3/>

⁴<https://www.autodesk.com/>

Zdroj napájení byl umístěn do brašny na řídítka, odkud byl veden napájecí kabel USB-C podél horní rámové trubky do zařízení umístěném na sedlové trubce. Toto umístění napájecího zdroje jej umožnilo mít pod kontrolou.



Obrázek 5.4: Zařízení pro sběr dat umístěné na sedlovou trubku kola.

Požadavky na zařízení

Na základě nastudovaných informací o aktuálních cyklistických radarech a vlastních zkušenostech získaných při pohybu v dopravě by mělo zařízení být schopno detekovat následující informace:

1. Detekce vzdálenosti – zařízení by mělo být schopno určit přibližnou vzdálenost blížícího se vozidla. U stávajících řešení je maximální detekovatelná vzdálenost okolo 150 m.
2. Měření rychlosti – zařízení by mělo být schopno měřit rychlost vozidla, neboť je pro cyklistu rozdíl, zda jej vozidlo předjíždí rychlostí 50 km/h nebo 100 km/h. Aktuální komerční řešení obsahují barevné indikátory rychlosti.
3. Detekce úhlu – v případě, že se cyklista nachází na vícepruhové silnici, může být užitečnou funkcí určení, ve kterém pruhu se vozidlo za ním nachází či zda má od cyklisty dostatečný odstup.

4. Detekce prudkého zpomalení cyklisty – na základě dat z akcelerometru detekovat prudká zpomalení cyklisty.

Out Of box demo

Jedná se o základní firmware pro radary od společnosti Texas Instruments, který je možné spustit téměř na všech radarech od této společnosti [13]. Jeho výhodou je webová vizualizační aplikace,⁵ která umožňuje pracovat s konfigurací radaru dle jeho použití a následnou úpravu parametrů sloužících pro filtrování dat na úrovni jeho hardwaru. Zároveň také umožňuje vizualizaci příchozích dat, což pomáhá při úpravách konfigurace. Pro ještě podrobnější konfigurování radaru byl využit program mmWave Sensing Estimator,⁶ který umožňuje generovat konfiguraci chirpu dle parametrů scény a následně ještě upravit vygenerovanou konfiguraci dle potřeby.

Kromě vytvoření konfigurace je potřeba radar také zkalibrovat, neboť při jeho výrobě dochází k určité odchylce, která je pro každý radar unikátní. Tuto chybu lze právě pomocí kalibrace kompenzovat. Kalibrace se provádí pomocí koutového odražeče. Ten se umístí do předem známé vzdálenosti před radar s nahraným OOB firmwarem. Následně pomocí parametru v konfiguraci `measureRangeBiasAndRxChanPhase 1 1 0.2` je kalibrace spuštěna. Vytvořený řetězec se následně využil v konfiguraci, což umožní přesnější měření radaru.

Výstupní data

Neboť většina radarových senzorů od Texas Instruments obsahuje programovatelný MCU, je možno formát výstupních dat plně konfigurovatelný. Avšak většina aplikací od TI využívá formátu paketů. Každý rámec na svém začátku obsahuje hlavičku a následně seznam paketů ve formátu TLV (Type-length-value). Každé TLV má definován typ určující druh dat obsažených v paketu, velikost těchto dat a data samotná. Jejich ukázkou je možno vidět na obrázku 5.5, který zobrazuje jeden rámec dat [14].



Obrázek 5.5: Ukázka organizace dat v rámci. Převzato z [14].

Hlavička rámce má velikost 40 bajtů, z čehož prvních 8 bajtů je pro správné identifikování začátku hlavičky rámce. Další informace obsažené v hlavičce rámce jsou verze SDK, celková délka paketu, typ zařízení, číslo rámce, počet detekovaných bodů, počet paketů v rámci a případně číslo pomocných rámců. Následné pakety ve formátu TLV kromě výše zmíněných hodnot obsahují také informace reprezentující detekované body, jako jsou kartézské souřadnice X, Y, Z a jejich dopplerovská rychlost. Dále je ke každému bodu zaznamenána informace týkající se šumu, SNR (signal to noise ratio – poměr signálu a šumu). Dopočítány jsou také informace ohledně vzdálenosti, úhlu ve vertikální rovině a úhlu v horizontální rovině [14].

⁵https://dev.ti.com/gallery/view/mmwave/mmWave_Demo_Visualizer/ver/3.6.0/

⁶<https://dev.ti.com/gallery/view/mmwave/mmWaveSensingEstimator/ver/2.4.0/>

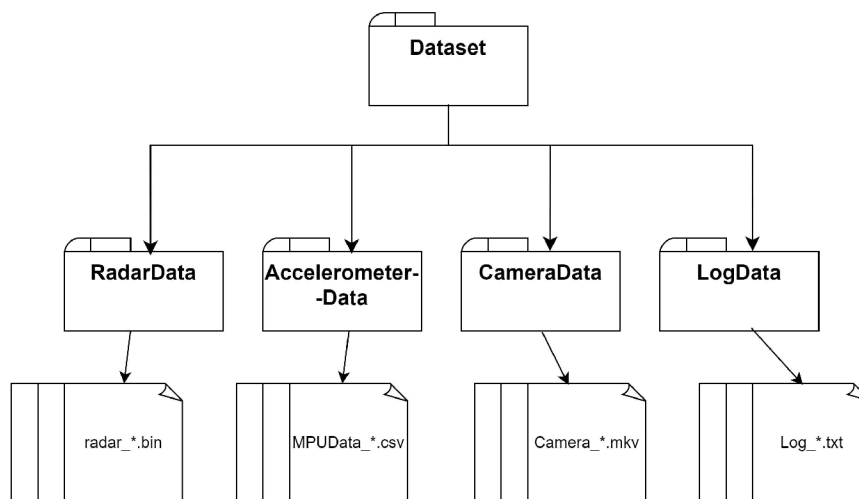
5.2 Sběr dat

Vzhledem k tomu, že implementace vyžadovala práci s reálnými daty, bylo prvním krokem vytvoření datové sady obsahující záznam radarových dat a k němu odpovídajícího videozáznamu. Následně byla datová sada rozšířena o data z akcelerometru a logu zaznamenávající snímání.

Sběr dat probíhal na silničních komunikacích druhé a nižší třídy ve Zlínském kraji v okolí města Napajedla. Nižší třídy komunikací byly voleny z důvodu nižšího vytížení a tím zvýšené bezpečnosti cyklisty. V první fázi docházelo ke snímání celých jízd, avšak postupem času se ukázalo, že je efektivnější zaznamenávat pouze určité úseky, na kterých je možné detekovat vozidla za cyklistou. Proto následně došlo k vytváření záznamů o délce 10 minut, což odpovídá úsekům o vzdálenosti 4–5 km.

Datová sada

Vytvořená datová sada se skládá z dat ze senzoru **Waveshare 10 DOF IMU**, milimetrového radaru **IWR6843AOPENV**, záznamu z kamery **Raspberry Pi Camera 3 Wide** a logu. Data jsou uložena do složek, podle druhu modulu. Struktura jejich uložení je vizualizována na obrázku 5.6. Názvy jednotlivých záznamů jsou složeny z názvu modulu a časové značky ve formátu `YYYYMMDDTHHMMSS`, například `camera_20240504T114200.mkv`.



Obrázek 5.6: Struktura uložení záznamů v datové sadě.

Data rámců z milimetrového radaru jsou ukládána do binárního souboru s frekvencí snímání 10 FPS (Frames Per Second – snímek za sekundu). Detailní popis uložení radarových dat v rámci byl popsán v podkapitole 5.1.

Data ze senzoru Waveshare 10 DOF IMU jsou ukládána do CSV (Comma-separated values – hodnoty oddělené čárkou) souboru. Soubor obsahuje hodnoty jak z akcelerometru, tak i gyroskopu a magnetometru. Dle prvního sloupce lze určit, o který senzor se jedná. Druhý sloupec udává časovou značku vytvoření záznamu. Následující tři sloupce obsahují hodnoty senzorů v osách x, y a z. Data byla zaznamenávána stejně jako radarová data každou desetinu sekundy (100 ms).

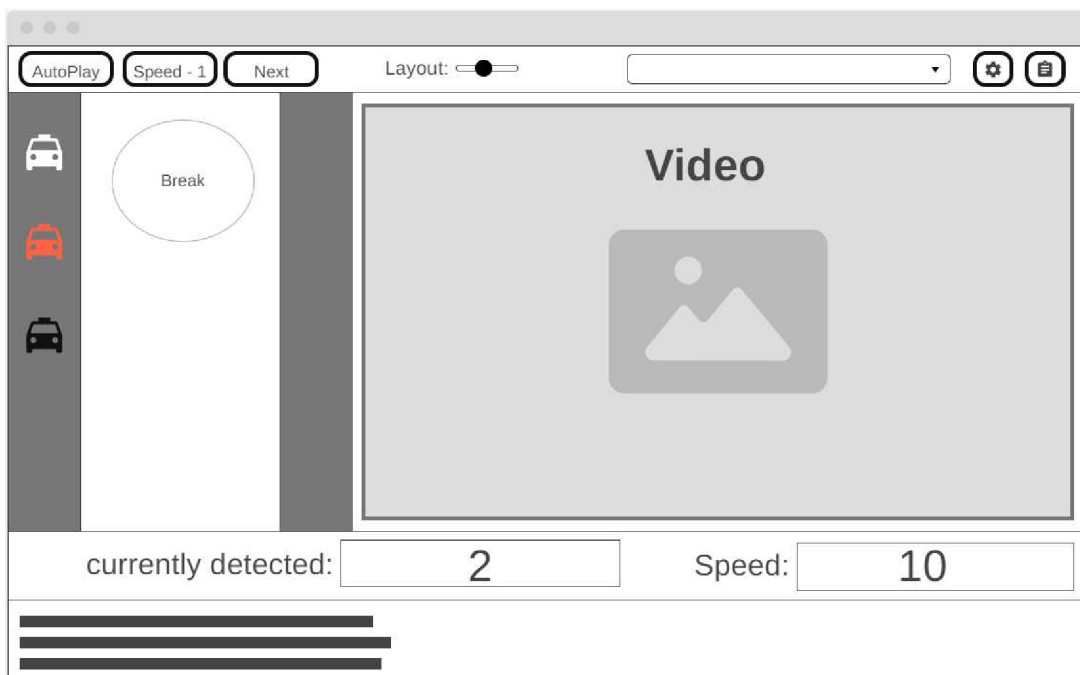
Kamerové záznamy jsou uloženy ve formátu mkv (Matroska Multimedia Container) a slouží primárně pro ověření funkčnosti vytvořeného řešení. Každý snímek videa obsahuje

v levém horním rohu informaci ohledně času a pořadí snímku. To lze využít pro ověření, zda se shoduje rámeček z radarových dat a videozáznamu.

Poslední zaznamenávanou informací v rámci datové sady je log. Ten v případě problémů se zařízením obsahuje chybové hlášky, v opačném případě slouží k zaznamenání konfigurace radaru.

5.3 Grafické uživatelské rozhraní

Při návrhu a následném implementaci grafického uživatelského rozhraní byl jako první vytvořen drátěný model. Ten posloužil jako vizuální kostra aplikace, která poskytla přehled o pozici jednotlivých prvků uživatelského rozhraní, což poskytlo jasný plán pro další pokračování. Drátěný model je vyobrazen na obrázku 5.7. Jeho struktura byla vertikálně rozdělena do tří částí. V horní části jsou obsaženy ovládací prvky. Prostřední část byla rozdělena na dvě podčásti, levá část slouží pro vizualizaci dat z radaru, zatímco pravá část je věnována videozáznamu. Spodní část obsahuje další doplňkové informace, jako aktuální rychlost či výpis o počtu detekovaných bodů.



Obrázek 5.7: Drátěný model grafického uživatelského rozhraní.

Na základě vytvořeného drátěného modelu došlo k implementaci grafického uživatelského rozhraní, při kterém byl kladen důraz na intuitivnost a uživatelskou přívětivost. Finální podoba grafického uživatelského rozhraní je zobrazena na obrázku 5.9. Horní část s ovládacími prvky obsahuje ve své levé části tři tlačítka. Tato tlačítka slouží k ovládní vytvořených záznamů. První tlačítko **Autoplay** slouží ke spuštění automatického přepínání snímků. Tlačítko **Speed** určuje rychlost přehrávání záznamu, kliknutím lze záznam 32× zrychlit. Tlačítko **Next** umožňuje posouvání záznamu snímek po snímku. Dalším ovládacím prvkem je **Layout** posuvník (slider) sloužící ke změně zobrazení vizualizace radarových dat a to na bodový graf nebo grafickou vizualizaci. Pro výběr záznamu slouží kombinované

pole (combo box), které obsahuje všechny záznamy identifikované dle času vytvoření v zařízení. Předposlední tlačítko s ikonou ozubeného kola umožňuje otevřít menu pro nastavování filtrace bodů z radaru. Uživatel tedy může upravovat krajní hodnoty bodů, jenž se zobrazují. Poslední tlačítko zobrazí v novém okně konfiguraci, se kterou byl radar spuštěn, zároveň nabízí možnost tuto konfiguraci uložit.

Prostřední část je rozdělena na dvě podčásti, kdy v pravé z nich se nachází videozáznam. Levá podčást obsahuje vizualizaci radarových dat a to buď bodovým grafem, nebo grafickou vizualizací. Bodový graf zobrazuje jednotlivé body a zároveň každý shluk bodů odlišuje barevně, díky čemuž uživatel lépe rozliší jednotlivé objekty. Grafické zobrazení radarových dat obsahuje po stranách dva pruhy znázorňující vozovku za cyklistou. Levý pruh znázorňuje objekty na levé straně cyklisty, zatímco pravý na straně pravé. Jednotlivé objekty jsou znázorněny jako ikony auta, kdy pozice v pruhu se odvíjí od vzdálenosti zaznamenané radarem. Rychlost aut je odlišena barvou, dle toho, jak rychle se k cyklistovi blíží. Pokud je dopplerovská rychlost menší než 4 m/s, ikona auta je černá, má-li auto rychlost mezi 4 m/s a 13 m/s, jeho barva je žlutá. V případě rychlosti vyšší než 13 m/s je ikona auto vizualizována červeně. Další funkcí je zobrazení indikátoru nebezpečného bočního odstupu. Ten je zobrazen červenou značkou vedle ikony vozidla. Všechny tyto ikony jsou vyobrazeny na obrázku 5.8.



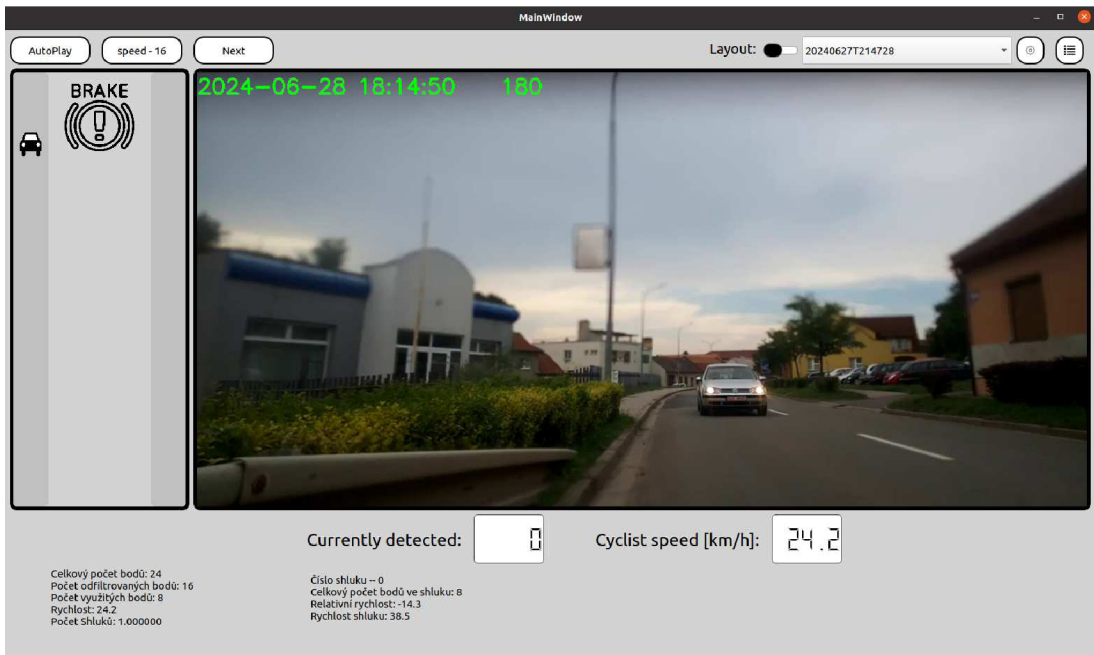
Obrázek 5.8: Ikony použité pro vizualizace radarových dat. Zleva tři ikony pro zobrazení vozidel za cyklistou dle jejich rychlosti. Zbývající dvě ikony pro zobrazení stavu prudkého zpomalení.

Mezi pruhy se nachází ikona s nápisem **brake** vizualizující, že cyklista mění prudce svou rychlost, je-li překročen stanovený práh, rozsvítí se ikona červeně.

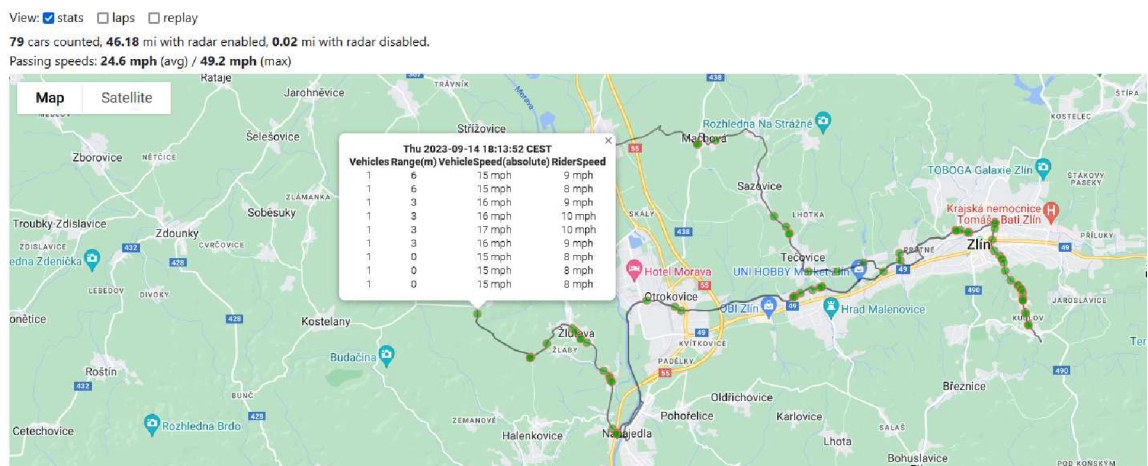
Ve spodní části jsou zobrazeny doplňkové informace. První informací je počet aktuálně detekovaných shluků ve směru k radaru. Druhou vizualizovanou informací je aktuální rychlost cyklisty. Kromě těchto dvou informací se ve spodní části nachází také výpis informací z radaru. Mezi tyto informace se řadí: počet detekovaných, odfiltrovaných, využitých bodů a počet vytvořených shluků. Následně se zde také zobrazují klíčové informace tří nejbližších shluků: počet bodů ve shluku, vzdálenost shluku, relativní rychlost shluku vůči cyklistovi a rychlost shluku.

My Bike Traffic Radar

Aplikace vznikla pro vyřešení hypotézy, zda jsou silnice s nižším provozem nebezpečnější než rušné silnice. Aplikace je vyvinuta pro zařízení Garmin podporující ConnectIQ SDK (sada vývojových nástrojů) v3.0 a vyšší, neboť nižší verze nepodporují extrahovat data z radarů Garmin. Aplikace pracuje s informacemi jako jsou počet vozidel, vzdálenost vozidel od jezdce, rychlost jezdce a rychlost vozidla. Tyto informace jsou následně po importu ukládány na základě GPS souřadnic do mapy. Aplikace poté vizualizuje místa, kde k detekci vozidla došlo [39]. Toho lze využít při vyhodnocení vytvořeného zařízení.



Obrázek 5.9: Finální podoba grafického uživatelského rozhraní aplikace zpětného cyklistického radaru.



Obrázek 5.10: Ukázka z aplikace My Bike Traffic Radar. Levý horní roh zobrazuje statistiku za celou jízdu. V mapě jsou zobrazeny jednotlivé detekce umožňující zobrazení detailu každé z nich [39].

5.4 Implementace

V této sekci je popsána implementace zpětného radaru. První část obsahuje popis implementace zařízení pro sběr dat. Druhá část popisuje implementaci aplikace zpětného cyklistického radaru využívající radarový senzor IWR6843AOPEVM.

Zařízení pro sběr dat

Tato podsekcce obsahuje implementaci zařízení sloužícího jako zpětný cyklistický radar. Využitý hardware a další součástky byly popsány v sekci 5.1. Program pro sběr dat se spouští automaticky při spuštění mikropočítače. Tohoto je docíleno skriptem **rc.local**, sloužícího pro spuštění vlastních příkazů. Hlavní program je složen ze čtyř modulů, přičemž každý modul zaznamenává data z jednoho senzoru.

Modul **radarModule** je využit pro zaznamenávání radarových dat. Pro komunikace přes sériový port je využita knihovna **serial**.⁷ Sériový port se využívá jak pro přijímání dat, tak i pro odeslání konfigurace radaru, kterou je nutné radaru při každém spuštění poslat. Využívaná konfigurace se nachází v příloze B. Modul **cameraModule** slouží k vytvoření kamerového záznamu, k čemuž je využita knihovna **Picamera2**⁸ sloužící k ovládání kamerových modulů od Raspberry Pi. Modul **accelerometerModule** se využívá k zaznamenávání dat z akcelerometru za pomoci knihovny **mpu9250_jmdev**,⁹ která umožňuje snadné získávání dat ze senzoru MPU-9250.

Algoritmus snímání při spuštění zaznamená čas zahájení, který bude následně sloužit jako identifikátor záznamu. Poté dochází ke konfiguracím všech senzorů. Poslední fází je samotné snímání, zde dochází k 10minutovému snímání. Po jeho ukončení dochází k restartování zařízení a novému spuštění. Vytváření 10minutových záznamů umožňuje odstranění těch záznamů, které nejsou relevantní pro vyhodnocení, může se jednat o špatnou kvalitu či nedostatek vhodných dat.

Zpětný cyklistický radar

Tato podsekcce se zabývá popisem implementace aplikace zpětného cyklistického radaru. V první části je popsána detekce vozidel za cyklistou společně s dalšími informacemi dostupnými z radaru. Druhá část je věnována detekci prudkého zpomalení cyklisty.

Zpracování mračna bodů

Jak je popsáno v sekci 5.1, radarová data jsou ukládána v paketech. Ke zpracování těchto paketů byly využity skripty od Texas Instruments s menšími úpravami, neboť radar není otočen v základní poloze a bylo tedy nutné upravit prohozením os x a z.

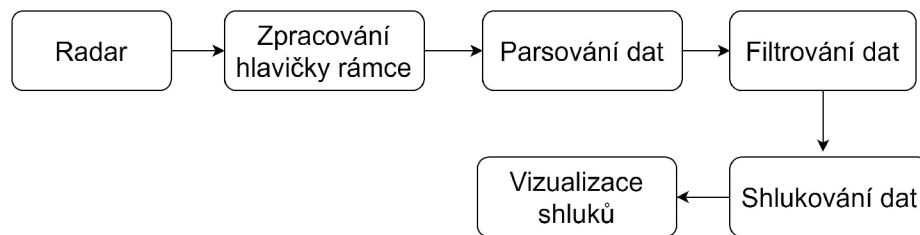
Načtená data jsou následně převedena do DataFrame z knihovny Pandas,¹⁰ což usnadňuje práci s radarovými daty. Po načtení dat dochází k odfiltrování bodů, které jsou nerelevantní pro další zpracování. Odfiltrování v osách y a z probíhá na základě definovaných krajních hodnot, rozdíl nastává pouze v ose x, která je odfiltrována na základě funkce $y = \frac{x^4}{10}$. Filtrovací parametry je možno konfigurovat v rámci aplikace. Nad takto upravenými daty je spuštěn shlukovací algoritmus DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) umožňující vytvoření shluků bez nutnosti znát jejich počet předem. Z takto shlukovaných bodů je následně možné zjistit informace o relativní rychlosti, vzdálenosti či bočním odstupu a ty následně v aplikaci vizualizovat. Celý tento postup zpracování dat lze vidět na obrázku 5.11.

⁷<https://pyserial.readthedocs.io>

⁸<https://datasheets.raspberrypi.com/camera/picamera2-manual.pdf>

⁹<https://pypi.org/project/mpu9250-jmdev/>

¹⁰<https://pandas.pydata.org/docs/>



Obrázek 5.11: Postup zpracování dat z radaru.

Detekce rychlosti cyklisty

K výpočtu rychlosti cyklisty jsou rovněž využívána radarová data, avšak pouze body s kladnou relativní rychlostí. Tyto body jsou následně shlukovány algoritmem DBSCAN. Poté se pro každý shluk vypočítá průměrný odstup signálu od šumu. Rychlost je určena na základě shluku, který má nejvyšší odstup signálu od šumu. V případě, že není dostupný žádný shluk bodů, není rychlost cyklisty určena.

Detekce prudkého zpomalení

Pro detekci prudkého zpomalení jsou využita data z modulu tříosého akcelerometru. Tato data společně s časem vzniku jsou uložena do klouzavého okna. Hodnoty z akcelerometru jsou vyhlazeny pomocí klouzavého průměru. Následně se z klouzavého okna pomocí výpočtu první derivace zjistí, zda je trend klesající či naopak stoupající. Poté se pomocí prahu určí, zda došlo k prudkému klesání, tedy zpomalení. Hodnotu prahu je možné upravovat v rámci aplikace.

Kapitola 6

Testování

Tato kapitola se zaměřuje na testování vyvinutého zařízení zpětného cyklistického radaru. Testování bylo rozděleno do dvou částí. První část se zabývá testováním maximálních hodnot, které je radar schopen zachytit. Druhá část se věnuje testování v reálných podmínkách, které ukazuje, jak si radar poradí s praktickými situacemi a reálnými daty. Testy probíhaly v různých prostředích, včetně hustého městského provozu, oblastí mimo město a na cyklostezkách.

6.1 Testování funkcí

Tato část testování byla zaměřena na dosažení mezních hodnot, které je možné získat s radarem v použité konfiguraci. Testy probíhaly na uzavřené komunikaci, aby se předešlo omezení či ohrožení ostatních účastníků silničního provozu.

Při těchto testech byl radar umístěn na stativ ve výšce 85 cm, což odpovídá umístění na sedlové trubce silničních kol. Velikost zadního kola je 71,2 cm a s přičtením výšky pláště se dostáváme na 80 cm. Toto umístění je znázorněno na obrázku 6.1. Jako detekovaný objekt byl zvolen osobní automobil, protože právě s osobními automobily se bude radar nejčastěji setkávat. V tabulce 6.1 jsou uvedeny maximální teoretické hodnoty radaru vycházející z jeho konfigurace.

Parametr	Hodnota
Rozlišení vzdálenosti	1,4 m
Maximální jednoznačně určitelná vzdálenost	125 m
Maximální radiální rychlost	96 km/h
Rozlišení radiální rychlosti	1,4 km/h

Tabulka 6.1: Přehled teoretických hodnot scény dle konfigurace radaru IWR6843AOPEVM.

Nejprve bylo provedeno měření maximální vzdálenosti, kterou radar dokáže detekovat. Automobil byl umístěn do vzdálenosti 100 m a následně se začal pomalu přibližovat. Jakmile byl automobil detekován, došlo k zaznamenání vzdálenosti a opakování testu. Test byl proveden celkem 10krát. Následně došlo ke zprůměrování naměřených hodnot. Podle teoretických hodnot vycházejících z konfigurace by měl být dosah radaru 125 m. Ukázalo se však, že v praxi těchto hodnot nedosahuje. Nejdelší vzdálenost, na kterou radar dokázal detekovat vozidlo při tomto testování, byla 60 m.



Obrázek 6.1: Ukázka testování radaru.

Druhý test spočíval v měření maximální rychlosti a přesnosti rychlosti. Podle konfigurace by měla být maximální rychlost 96 km/h a přesnost měření rychlosti 1,4 km/h. V tomto testu se automobil blížil k radaru různými konstantními rychlostmi a následně se porovnávala rychlost automobilu vůči radaru. Bylo nutné vzít v úvahu, že tachometr automobilu měří rychlost vyšší o 1 až 2 km/h. Celkem bylo provedeno 9 měření s postupným zvyšováním rychlosti. U rychlostí vyšších než 65 km/h bylo obtížné udržet rychlost konstantní po celou dobu měřitelné vzdálenosti radarem. Následně bylo provedeno měření maximální rychlosti, při kterém byla dosažena nejvyšší naměřená rychlost 93,6 km/h. Vyšší rychlosti nebylo možné dosáhnout z důvodu krátké rozjezdové a brzděné dráhy. Hodnoty z těchto měření jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Číslo měření	Rychlost auta [km/h]	Rychlost dle radaru [km/h]	Rozdíl [km/h]
1	30	29,2	0,8
2	35	34,7	0,3
3	50	47,7	2,3
4	60	60,4	0,4
5	65	64,2	0,8
6	90	88,3	1,7
7	90	86	4
8	90	87,1	2,9
9	95	93,6	1,4

Tabulka 6.2: Hodnoty z měření rychlosti. Hodnoty jsou udávány v km/h.

Potvrdilo se, že radar je schopen detekovat vozidla s vyšší rychlostí než 90 km/h, což odpovídá i teoretické rychlosti dle konfigurace. Pokud by se tedy v praxi započítala i rychlost

cyklisty na silničním kole, která může odpovídat průměrné rychlosti 30 km/h, radar by byl schopen zaměřit vozidla pohybující se rychlostí až 120 km/h.

Předposlední test spočíval v měření přesnosti vzdálenosti radarem. Automobil byl postupně umístěn do předem změřených vzdáleností pomocí laserového dálkoměru s přesností 2 mm, což bylo pro toto testování dostatečné. Celkem byla změřena vzdálenost v 5 různých bodech ve 3 měřeních. Na základě těchto hodnot byla vypočítán průměrný rozdíl 0,44 m. Výsledné hodnoty lze nalézt v tabulce 6.3.

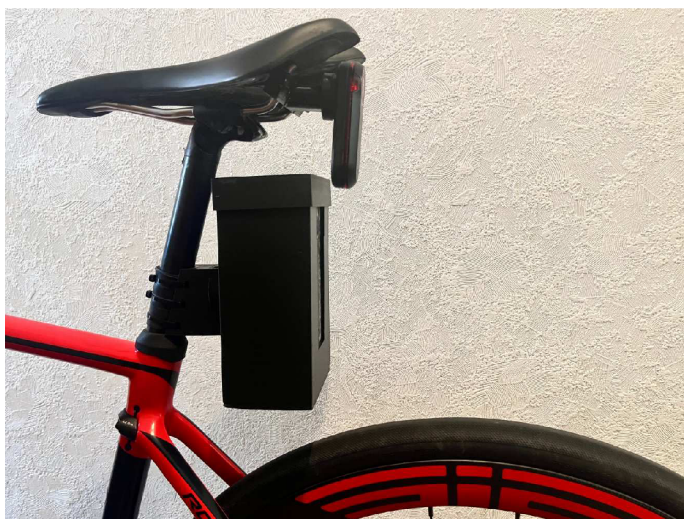
	Referenční hodnota [m]	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměrný rozdíl [m]
1	4,6	3,5	4,6	3,8	0,6
2	10,6	10,6	10,9	10,7	0,1
3	16,5	15,7	17,0	16,6	0,5
4	25,9	25,5	25,2	25,8	0,4
5	35,2	36,5	35,3	35,5	0,6

Tabulka 6.3: Hodnoty měření přesnosti vzdálenosti. Hodnoty jsou udávány v metrech.

Poslední test spočíval v testování bočního odstupu. Test probíhal tak, že byla určena boční vzdálenost 50 cm od radaru a následně pro automobil, kterou měl radar detekovat jako nebezpečnou. Detekce bočního odstupu proběhla ve všech testech úspěšně.

6.2 Testování v provozu

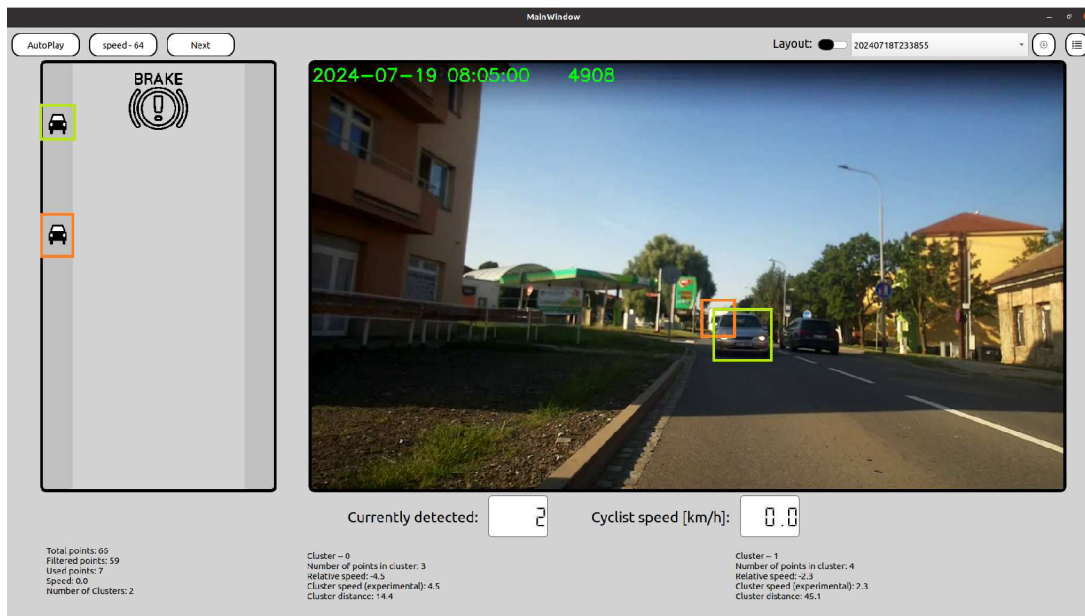
Následující testování probíhalo za pomoci jízdního kola v provozu. Stejně jako u předchozích testů byl kladen důraz na bezpečnost ostatních účastníků silničního provozu, a proto byla zvolena místa a časy s nižším provozem. Testování v provozu lze rozdělit na tři části: testování v městském provozu, testování mimo město a testování na stezkách pro cyklisty. Při testování byl využit také radar Garmin Varia RTL 515, pro který byl rovněž vytvořen držák na 3D tiskárně na sedlo, a aplikace My Bike Traffic Radar, popsaná v sekci 5.3, umožňující vizualizovat data ze zmíněného radaru. Umístění obou radarů můžeme vidět na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Umístění obou radarů na kole připraveném pro testování v provozu.

Testování v městském provozu

Testování v městském provozu umožnilo vyzkoušet, jak radar pracuje s velkým množstvím objektů. Kromě zvýšeného počtu automobilů se zde nachází i více rušivých objektů. Na obrázku 6.3 lze vidět detekci dvou blížících se automobilů ve městě.



Obrázek 6.3: Testování radaru ve městě. Lze vidět dva blížící se automobily.

Při testování v hustějším provozu se projeví dva nedostatky. Prvním nedostatkem bylo při hustém víceproudovém provozu splnutí aut z vedlejších pruhů. Ta byla poté zobrazena pouze jako jeden shluk.

Druhý nedostatek nastával, když se auto nacházelo za cyklistou a nemělo možnost jej předjet. V takovém případě docházelo k tomu, že se auto pohybovalo stejnou nebo mírně nižší rychlostí než cyklista, což vedlo k jeho zmizení z vizualizace i radarových dat. Obdobný problém se vyskytuje i u radaru Garmin Varia RTL515.

I přes tyto nedostatky si radar v městském provozu vedl dobře a zvládl detekovat všechna vozidla, stejně jako radar Garmin Varia RTL515. Avšak k detekcím docházelo na kratší vzdálenosti. Maximální vzdálenost, na kterou se podařilo detekovat objekt za cyklistou, byla 86 m při relativní rychlosti 36 km/h. Z důvodu občasných falešných detekcí dosahovala přesnost radaru v městském provozu 85,5 %. Při testování v městském provozu mělo být detekováno 65 objektů, avšak detekováno bylo 76 objektů. Tyto falešné detekce měly negativní vliv na výslednou přesnost. Tyto hodnoty jsou v tabulce 6.4.

Parametr	Hodnota
Maximální detekovaná relativní rychlost	36 km/h
Maximální detekovaná vzdálenost	86 m
Přesnost	85,5 %

Tabulka 6.4: Tabulka s výsledky z testování ve městě.

Testování mimo město

Testování zpětného cyklistického radaru mimo město sloužilo k ověření, jak si radar dokáže poradit v méně hustém provozu. Zároveň se testovalo v prostředí s menším množstvím rušivých objektů.



Obrázek 6.4: Testování radaru mimo město.

Radar při testovacích jízdách mimo město zvládnul detekovat všechny objekty, ať už se jednalo o motocykl, osobní automobil či nákladní automobil, které se za cyklistou nacházely. Detekce byly obdobné jako u radaru Garmin Varia, avšak všechny detekce byly pozdější, protože vytvořený radar nedosahoval dostatečného dosahu. Občas se také objevovaly falešné detekce, které měly negativní vliv na přesnost vytvořeného řešení. Tyto falešné detekce se objevovaly častěji v zatáčkách než na rovinách.

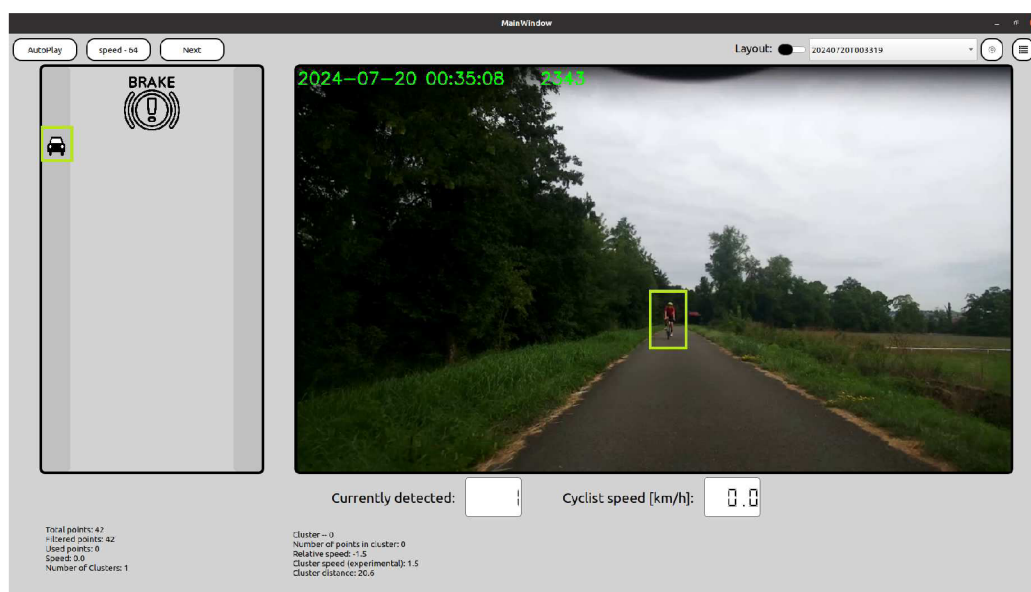
Přesnost vytvořeného zpětného cyklistického radaru při testování mimo město dosahovala 86 %. Při testování mělo být detekováno 62 objektů, avšak bylo detekováno 72 objektů. Falešné detekce měly tedy negativní vliv na přesnost. Nejrychleji jedoucí automobil dosahoval relativní rychlosti 91,8 km/h. Nejvyšší detekovaná vzdálenost byla 53 m. Tyto hodnoty lze vidět v tabulce 6.5. Detekci bočního odstupu nebylo možno v praxi přesně zaměřit, avšak dle osobních poznatků fungovala spolehlivě a pokud vozidlo objíždělo cyklistu velmi blízko, byl identifikátor spuštěn. Při vývoji byla také pozorována situace, kdy auto detekováno radarem Garmin Varia RTL515 nebylo, ale vytvořeným radarem ano, avšak jednalo se pouze o ojedinělý případ.

Parametr	Hodnota
Maximální detekovaná relativní rychlost	91,8 km/h
Maximální detekovaná vzdálenost	53 m
Přesnost	86,1 %

Tabulka 6.5: Tabulka s výsledky z testování mimo město.

Testování na stezkách pro cyklisty

Cílem tohoto testování bylo ověřit schopnost zpětného cyklistického radaru reagovat na různé objekty, nejen na automobily. Zpětný cyklistický radar může zvýšit bezpečnost i na stezkách pro cyklisty díky včasné detekci přijíždějících cyklistů zezadu. Při testování na stezkách pro cyklisty byly provedeny dvě varianty testů. První test spočíval v tom, že první cyklista se vzdálil a druhý cyklista jej následně dojížděl. Tato situace je vidět na obrázku 6.5. Druhý test zahrnoval jízdu cyklistů za sebou „v háku“. Detekce přijíždějících cyklistů fungovala spolehlivě a byly úspěšně detekovány všechny pokusy přiblížení. Na rozdíl od radaru Garmin Varia RTL515 však došlo k více detekcím při kratší vzdálenosti, což může být způsobeno jiným zorným úhlem nebo nižší příjezdovou rychlostí. Při jízdě „v háku“ docházelo k častým detekcím cyklisty nacházejícího se za radarem, což je ale pochopitelné, protože při každé detekci měl detekovaný cyklista lehce vyšší rychlost.



Obrázek 6.5: Testování radaru na stezce pro cyklisty, lze vidět blížícího se cyklistu.

6.3 Zhodnocení výsledků a možná pokračování

Na základě testování vytvořeného zpětného cyklistického radaru lze konstatovat, že při vyšším dosahu by radary od společnosti Texas Instruments byly pro tento typ zařízení vhodné. Radar IWR6843AOPEVM neměl problém s detekcí, avšak tyto detekce byly oproti radaru Garmin Varia RTL515 zpožděné. Maximální vzdálenost, na kterou radar dokázal detekovat vozidlo, byla 86 m. Nejvyšší detekovaná rychlost dosahovala 93 km/h. Přesnost radaru činila 85 %, což bylo ovlivněno občasnými falešnými hlášeními.

Možným pokračováním této práce by mohlo být rozpoznávání vozidel na základě dat z radaru či využití dalších dostupných modulů. Modul akcelerometru by mohl být využit nejen pro detekci prudkého zpomalení, ale také k detekci pádu. V kombinaci s kamerovým modulem by bylo možné při detekci pádu automaticky uložit videozáznam. Kamera by rovněž mohla být použita k fúzi s radarovými daty, což by umožnilo získávat podrobnější informace o okolí.

Kapitola 7

Závěr

Cílem této diplomové práce byla implementace zpětného cyklistického radaru, který umožňuje cyklistovi sledovat situaci za sebou, jeho následné otestování a vyhodnocení. V rámci této práce byla vytvořena aplikace v programovacím jazyce Python, která vyhodnocuje data z radaru. Tato data jsou následně v aplikaci vizualizována uživateli. Uživatel má možnost sledovat blížící se vozidla a být informován při nízkém bočním odstupu nebo vysoké rychlosti vozidla.

V první fázi práce bylo nutné nastudovat informace týkající se zpracování radarového signálu a provést analýzu rizik, se kterými se cyklisté mohou v provozu setkat. Dalším důležitým krokem byla analýza a otestování dostupných zpětných radarů v praxi. V rámci této fáze byly testovány radary Garmin Varia a Bryton Gardia v provozu. Při testování byly určeny hlavní vlastnosti, které by vytvořené zařízení mělo splňovat. Na základě těchto poznatků bylo vytvořeno zařízení, které umožnilo vytvořit datovou sadu obsahující záznamy z reálných cyklistických jízd. Tato datová sada obsahuje radarová data, videozáznam a data z tříosého akcelerometru. Na základě vytvořené datové sady byla vyvinuta aplikace, která tato data vyhodnocuje a je schopna zobrazit informace jako vzdálenost blížícího se vozidla, rychlost vozidla vůči radaru a výstrahu při nízkém bočním odstupu. Řešení bylo rozšířeno o modul akcelerometru, což umožnilo detekovat prudké zpomalení cyklisty. Na závěr bylo vytvořené zařízení vyhodnoceno v reálném provozu a porovnáno s již existujícím řešením zpětného cyklistického radaru Garmin Varia.

Při testování byl radar schopen ve svém rozsahu detekovat všechna vozidla, která se za cyklistou nacházela. Nejvyšší vzdálenost, ve které byl objekt za cyklistou detekován, dosahovala 86 m. Maximální relativní rychlost dosahovala 91,8 km/h. Přesnost radaru byla 85 %, přičemž nižší hodnota byla způsobena falešně detekovanými objekty.

Práce mi umožnila vyzkoušet si práci s radarovou technologií a díky tomu získat cenné zkušenosti v tomto oboru. Do budoucna by stálo za zvážení otestovat radar s vyšším dosahem či provést fúzi radarového signálu s videozáznamem, což by umožnilo rozpoznávat druh vozovky. Zároveň by díky akcelerometru mohla být detekována nehoda, na jejímž základě by se následně ukládal videozáznam.

Literatura

- [1] BESIP. *Povinná výbava jízdního kola* online. Dostupné z: <https://besip.cz/Ucastnici-silnicniho-provozu/Cykliste/Povinna-vybava-jizdniho-kola>. [cit. 2024-01-20].
- [2] BESIP. *Nejčastější příčina střetu cyklisty a motoristy? Nedání přednosti v jízdě, ukazují statistiky* online. Zář 2022. Dostupné z: <https://besip.cz/Pro-media/Clanky/Nejcastejsi-pricina-stretu-cyklisty-a-motoristy-Ne>. [cit. 2024-01-24].
- [3] CARL SUNDSTROM, D. N. *Bicycle Safety Guide and Countermeasure Selection System* online. Zář 2014. Dostupné z: http://www.pedbikesafe.org/bikesafe/guide_statistics.cfm#crashfactors. [cit. 2024-01-24].
- [4] CHABANOV, D. *Trek's Carback Bicycle Radar Light Takes on the Market Leader* online. Červen 2024. Dostupné z: <https://www.bicycling.com/bikes-gear/a61010249/trek-carback-radar-review/>. [cit. 2024-07-15].
- [5] CORPORATION, T. B. *CarBack bike radar* online. 2024. Dostupné z: https://www.trekbikes.com/us/en_US/carback/. [cit. 2024-07-15].
- [6] ENGEL, T. *A Cry For Help: Reviewing the Aleck Tocsen Helmet Crash Sensor Without Actually Using It* online. Červen 2023. Dostupné z: <https://theradavist.com/aleck-tocsen-helmet-crash-sensor/>. [cit. 2024-01-24].
- [7] GUARNIERI, M. The Early History of Radar [Historical]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2010, sv. 4, č. 3, s. 36–42.
- [8] HANA RUBÁŠOVÁ pprap. *PREVENCE – CYKLISTÉ* online. Červen 2017. Dostupné z: <https://www.policie.cz/clanek/uzemni-utvary-sprava-zapadoceskeho-kraje-zpravodajstvi-prevence-cykliste.aspx>. [cit. 2024-01-20].
- [9] HURST, N. *The Transformation of a Bike Radar Device* online. makezine.com, červenec 2014. Dostupné z: <https://makezine.com/article/craft/the-transformation-of-a-bike-radar-device/>. [cit. 2023-11-20].
- [10] IEEE. IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands. *IEEE Std 521-2019 (Revision of IEEE Std 521-2002)*, 2020, s. 1–15.
- [11] IGSPOORT. *SR30 Bike Radar Tail Light* online. cyclistshub.com, listopad 2023. Dostupné z: <https://www.igpsport.com/product/tpldf/SR30/>. [cit. 2023-12-05].

- [12] INSTRUMENTS, T. *IWR6843AOP Single-Chip 60- to 64-GHz mmWave Sensor Antennas-On-Package (AOP)* online. Texas Instruments, duben 2020, 2022. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/IWR6843AOP>. [cit. 2024-01-25].
- [13] INSTRUMENTS, T. *MMWAVE SDK User Guide* online. 1. Texas Instruments, září 2020. Dostupné z: <https://www.ti.com/tool/MMWAVE-SDK>. [cit. 2024-01-25].
- [14] IOVESCU, C. *The fundamentals of millimeter wave radar sensors* online. 2020. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/wp/spyy005a/spyy005a.pdf>. [cit. 2024-01-18].
- [15] KINDL, T. *Kindl: Jak předjet cyklistu?* online. Leden 2022. Dostupné z: <https://mestemnakole.cz/2021/12/kindl-jak-predjet-cyklistu/>. [cit. 2024-01-24].
- [16] KLAUS, D. *Vehicle Proximity-Alerting Device*. 17 Rogers Wood, San Antonio, TX (US) 78248-1623: [b.n.], květen 2004. Filing date: 2001-09-28, Appl. No.: 09/966,418.
- [17] KOMCYCLING. *Garmin Varia and Other Cycling Radars: A Brief History* online. komcycling.com, říjen 2023. Dostupné z: <https://komcycling.com/blogs/news/a-brief-history-of-the-garmin-varia-and-other-cycling-radars>. [cit. 2023-11-21].
- [18] KONÍČEK, J. T. *Cyklistická sezóna je tady; nezapomínejte ale také na možná rizika odcizení kola či vzniku úrazu při jízdě na kole* online. Dostupné z: <https://www.mvcr.cz/clanek/cyklisticka-sezona-je-tady-nezapominejte-ale-take-na-mozna-rizika-odcizeni-kola-ci-vzniku-urazu-pri-jizde-na-kole.aspx>. [cit. 2024-01-20].
- [19] KRÁLOVÁ, M. M. *Dopplerův jev* online. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/sites/default/files/podrobnosti/insert/8-2.gif>. [cit. 2024-01-23].
- [20] KUSALA, R. J. *Dopplerův jev* online. 2008. Dostupné z: https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k14.htm. [cit. 2024-01-20].
- [21] KUSALA, R. J. *Radarová Encyklopedie* online. 2008. Dostupné z: https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/radar.htm. [cit. 2024-01-01].
- [22] LTD., G. *Garmin International* online. 2024. Dostupné z: <https://www.garmin.com/cs-CZ/>. [cit. 2024-02-02].
- [23] MAGICSHINE. *SEEMEE 508 Radar Taillight Safety Light* online. magicshine.com, prosinec 2022. Dostupné z: <https://magicshine.com/products/seemee508-radar-taillight-safety-light>. [cit. 2023-12-05].
- [24] MAREK, M. *Francouzi představili vestu pro cyklisty, která se při nehodě nafoukne jako airbag* online. Leden 2019. Dostupné z: <https://cc.cz/francouzi-predstavili-vestu-pro-cyklisty-ktera-se-pri-nehode-nafoukne-jako-airbag/>. [cit. 2024-01-24].
- [25] MINARIK, P. *IGPSport SR30 Review: Just Another Cycling Radar?* online. cyclistshub.com, listopad 2023. Dostupné z: <https://www.cyclistshub.com/igpsport-sr30-review/>. [cit. 2023-12-05].

- [26] NIRAJ, P. a GEETHA PRIYA, M. Radar and its applications. *International Journal of Computer Technology and Applications*, 2016, sv. 9, č. 28, s. 1–9.
- [27] PRESSNEWS. *Přichází nový radar Bryton Gardia 300* online. mtbs.cz, květen 2023. Dostupné z: <https://mtbs.cz/clanek/prichazi-novy-radar-bryton-gardia-300/kategorie/doplanky-na-kolo>. [cit. 2023-12-05].
- [28] PTAK, D. A. *Doppler Shift* online. Zář 2020. Dostupné z: https://imagine.gsfc.nasa.gov/features/yba/M31_velocity/spectrum/doppler_more.html. [cit. 2024-01-23].
- [29] RAINMAKER, D. *Garmin Varia RTL515 and RVR315 Cycling Radar In-Depth Review* online. dcraimaker.com, květen 2020. Dostupné z: <https://www.dcrainmaker.com/2020/05/garmin-rtl515-rvr315-cycling-radar-review.html>. [cit. 2023-11-21].
- [30] RAINMAKER, D. *Bryton Gardia R300 Magene L508 Cycling Radar Sensors Announced at Eurobike* online. dcraimaker.com, červenec 2022. Dostupné z: <https://www.dcrainmaker.com/2022/07/bryton-guardia-r300-magene-l508-cycling-radar-units.html>. [cit. 2023-12-05].
- [31] RAO, S. *MIMO Radar* online. Texas Instruments, květen 2017, 2018. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/swra554a/swra554a.pdf>. [cit. 2024-01-18].
- [32] REPUBLIKY, M. dopravy České. *Příloha 8 vyhlášky č. 153/2023 Sb., o schvalování technické způsobilosti vozidel a technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích* <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2023-153#p8>. 2023. Příloha k vyhlášce upravující technické podmínky provozu vozidel.
- [33] ROSS, J. *Magicshine Seemee 508 review: Choices emerge for radar tail lights* online. cyclingnews.com, prosinec 2022. Dostupné z: <https://www.cyclingnews.com/reviews/magicshine-seemee-508-review-choices-emerge-for-radar-tail-lights/>. [cit. 2023-12-05].
- [34] SAMUEL J. LING, W. M. *University Physics*. OpenStax, 2016. ISBN 978-1-947172-20-3.
- [35] SEVGI, L. Radar. In: CRC Press, červen 2006, s. 1–35. ISBN 978-0-8493-7363-3.
- [36] SKOLNIK, M. *Introduction to Radar Systems*. 3. vyd. McGraw-Hill, 2001. Electrical engineering series. ISBN 9780071181891.
- [37] SKOLNIK, M. *Radar Handbook, Third Edition*. 3. vyd. McGraw-Hill Education, 2008. Electronics electrical engineering. ISBN 9780071485470. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=76uF2Xebm-gC>.
- [38] TOMÁŠ KINDL, V. V. *Komentář: Jsou cyklostezky povinné? Kdepak, je to mýtus* online. Duben 2022. Dostupné z: <https://mestemnakole.cz/2022/04/kindl-jsou-cyklostezky-povinne-kdepak-je-to-mytus/>. [cit. 2024-01-24].
- [39] TOONE, B. *MyBikeTraffic* online. MyBikeTraffic.com, 2023. Dostupné z: <https://www.mybiketraffic.com/about/>. [cit. 2023-11-21].

- [40] VÝZKUMU, C. dopravního. *DOPRAVNÍ NEHODY V ČR* online. Květen 2024. Dostupné z: <https://nehody.cdv.cz/>. [cit. 2024-05-30].
- [41] WOLETZ, P. *Radiolokátor (1): Zrození* online. Březen 2016. Dostupné z: <https://www.armadinoviny.cz/radiolokator-1-zrozeni.html>. [cit. 2024-01-01].
- [42] WOLFF, C. *Historical Overview* online. Christian Wolff. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu>. [cit. 2023-12-30].
- [43] ZULKIFLI, S. a BALLERI, A. FMCW Radar Prototype Development for Detection and Classification of Nano-Targets. In: *2020 IEEE International Radar Conference (RADAR)*. 2020, s. 738–743.

Příloha A

Obsah paměťového média

- Zdrojové soubory zařízení pro sběr dat.
- Zdrojové soubory aplikace zpětného cyklistického radaru.
- Zdrojové soubory textu diplomové práce.
- Text diplomové práce.
- Vytvořená datová sada.
- Seznam potřebných knihoven.
- Soubor readme.md.
- Video ukázka aplikace

Příloha B

Konfigurace radaru

```
flushCfg
dfeDataOutputMode 1
channelCfg 15 7 0
adcCfg 2 1
adcbufCfg -1 0 1 1 1
profileCfg 0 60 2 3.8 13.5 0 0 12 1 110 12499 0 0 40
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 90 0 100 1 0
lowPower 0 0
guiMonitor -1 1 0 0 0 0 0
cfarCfg -1 0 2 8 4 3 0 20 0
cfarCfg -1 1 0 4 2 3 1 20 0
multiObjBeamForming -1 1 0
clutterRemoval -1 1
calibDcRangeSig -1 0 -5 8 256
extendedMaxVelocity -1 1
%bpmCfg -1 0 0 1
lvdsStreamCfg -1 0 0 0
compRangeBiasAndRxChanPhase 0.0677330 -0.73395 0.25418 0.79495 -0.32309
-0.62256 0.04651 0.73001 -0.22678 -0.79669 0.37915 0.88486 -0.44153
-0.71237 0.11771 0.80112 -0.31952 -0.72128 0.52573 0.78979 -0.61337
-0.667510.26028 0.72873 -0.46918
measureRangeBiasAndRxChanPhase 0 1.5 0.2
CQRxSatMonitor 0 3 4 63 0
CQSigImgMonitor 0 127 4
analogMonitor 0 0
aoaFovCfg -1 -90 90 -90 90
cfarFovCfg -1 0 0 124
cfarFovCfg -1 1 -26 30
calibData 0 0 0
sensorStart
```