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

RADAROVÝ SENZOR PRO ADAPTIVNÍ TEMPOMAT

RADAR SENSOR FOR ACTIVE CRUISE CONTROL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — RICHARD LACEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. LUKÁŠ MARŠÍK
SUPERVISOR

BRNO 2021

Ústav počítačové grafiky a multimédií (UPGM) Akademický rok 2020/2021

Zadání bakalářské práce

24171

Student: **Lacek Richard**
Program: Informační technologie
Název: **Radarový senzor pro adaptivní tempomat**
Radar Sensor for Active Cruise Control
Kategorie: Zpracování signálů
Zadání:

1. Nastudujte literaturu související se zpracováním radarového signálu a principy detekce a sledováním vozidel v provozu. Následně se seznamte s vhodným state-of-the-art radar-on-chip řešením, jeho architekturou a principem programování.
2. Nasbírejte reálná data na zapůjčeném odpovídajícím HW a vytvořte komplexní dataset a to včetně anotace a odpovídajícího video záznamu.
3. Po dohodě navrhněte či zvolte metodu, která na základě extrahovaných informací z radarového signálu umožní sledování a vyhodnocení okolního provozu. Tuto ověřte v prostředí MATLAB na nasbíraných datech.
4. Implementujte ověřenou metodu na vhodném HW.
5. Proveďte důkladné vyhodnocení spolehlivosti metody nad nasbíranou datovou sadou. Následně proveďte sérii vhodných testů na zvoleném HW pro ověření funkčnosti a výkonnosti systému v reálném prostředí.
6. Diskutujte dosažené výsledky a navrhněte možné pokračování práce.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 až 3

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

Vedoucí práce: **Maršík Lukáš, Ing.**
Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1. listopadu 2020
Datum odevzdání: 12. května 2021
Datum schválení: 30. října 2020

Abstrakt

Cieľom práce bolo navrhnúť implementáciu adaptívneho tempomatu s pomocou radaru ako senzoru okolia pred vozidlom. V riešení bola použitá aplikácia VCDS-Lite na zisťovanie aktuálnej rýchlosti vozidla, a demo od spoločnosti Texas Instruments, na zachytávanie okolia pred vozidlom radarom AWR1843. Za použitia týchto dvoch aplikácií bolo vyhodnotené okolie pred vozidlom, z ktorého vychádzala inštrukcia pre vodiča. Výsledkom práce je aplikácia zobrazujúca aktuálnu rýchlosť vozidla spolu s aktuálnou inštrukciou adaptívneho tempomatu. Okrem nastavenia rýchlosti, aplikácia poskytuje aj možnosť nastavenia časového rozostupu od vozidla, ktoré nasleduje.

Abstract

The aim of the work was to design the implementation of adaptive cruise control with the help of radar as a sensor to evaluate the surroundings in front of the vehicle. The solution used the VCDS-Lite application to determine the current vehicle speed and the Medium Range Radar demo, from Texas Instruments, to capture the surroundings in front of the vehicle with AWR1843 radar. Using these two applications was evaluated the environment in front of the vehicle from which the instruction for a driver was derived. The result of the work is an application that displays the current vehicle speed along with the current adaptive cruise control instruction. In addition to setting the speed, the application also provides a setting of the time interval from the vehicle that follows.

Kľúčové slová

Adaptívny tempomat, FMCW radar, Texas Instruments automotive radar, AWR1843, Dopplerov efekt, diskrétna Furierova transformácia, Kalmanov filter

Keywords

Adaptive cruise control, FMCW radar, Texas Instruments automotive radar, AWR1843, Doppler effect, discrete Furier transformation, Kalman filter

Citácia

LACEK, Richard. *Radarový senzor pro adaptivní tempomat.* Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Lukáš Maršík

Radarový senzor pro adaptivní tempomat

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Lukáša Maršíka. Uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

. . . . . .
Richard Lacek
7. mája 2021

Poďakovanie

Chcel by som poďakovať vedúcemu práce, Ing. Lukášovi Maršíkovi, za ochotu a vyhradený čas pre odbornú pomoc.

Obsah

1 Úvod **3**

2 Adaptívny tempomat **4**
2.1 Adaptívne tempomaty založené na technológii LIDAR 5
2.2 Adaptívne tempomaty využívajúce radary 7
2.3 Adaptívne tempomaty využívajúce kamery 8

3 TI mmWave radar **9**
3.1 Radar AWR1843BOOST 9
3.2 Princíp funkcie FMCW radaru 10
3.3 Diskrétna Furierová transformácia 12
3.4 Vyhodnotenie vzdialenosti 13
3.5 Vyhodnotenie rýchlosti 14
3.6 Vyhodnotenie odklonu 15
3.7 Kalmanov filter 17

4 Návrh riešenia **18**
4.1 Medium Range Radar demo 18
4.2 VCDS-Lite 20
4.3 GUI 22
4.4 Adaptívny tempomat 24

5 Implementácia **27**
5.1 Uart 27
5.2 Vcds 27
5.3 Triedy reprezentujúce dáta z radaru 27
5.4 Frame 28
5.5 Acc 28
5.6 Worker 30
5.7 Window 30

6 Testovanie **31**
6.1 Testy na mestských okruhoch 32
6.2 Testy na mestských obchvatoch 32
6.3 Testy na okresných cestách 33
6.4 Testy na diaľničnej komunikácii 34

7 Záver **35**

Literatúra **36**

A Obsah priloženého pamäťového média **39**

B Manuál **40**

C Konfiguračný súbor **41**

Kapitola 1

Úvod

Automobily sú neoddeliteľnou súčasťou života väčšiny ľudí na Zemi. Tento dopravný prostriedok umožnil cestovať rýchlejšie a pohodlnejšie jednotlivcovi, ako aj menšej, či väčšej skupine cestujúcich. S postupným vývojom vozidiel a pribúdajúcim časom stráveným v nich, bolo potrebné zvyšovať úroveň prvkov, akými sú bezpečnosť premávky, kvalita vozidiel, ale aj pohodlie vodiča a zvyšnej posádky. Medzi hlavné prostriedky pre zvyšovanie bezpečnosti, ako aj pohodlia pre osoby za volantom, ktoré môže výrobca automobilov ponúknuť svojím zákazníkom, patrí tempomat. Tento systém udržuje rovnakú rýchlosť vozidla bez toho, aby vodič musel manuálne udržiavať rýchlosť pomocou pedálov. Tempomat, obľúbený najmä medzi vodičmi jazdiacimi dlhé a monotónne trasy, bol veľmi rýchlo implementovaný do väčšiny vozidiel strednej a vyššej triedy. Avšak, s hustnúcou premávkou sa oveľa častejšie vyskytovali situácie, kedy samotný tempomat nebol postačujúci a bolo potrebné hľadať iné alternatívy. Ako jednou z alternatív sa naskytoval systém vychádzajúci z tempomatu, adaptívny tempomat. S výkonnejšími a čoraz menšími technológiami bolo možné do predného nárazníka vozidla vstavať senzor, ktorý by sledoval okolitú premávku pred vozidlom. Postupom času sa na mieste senzora, detekujúceho okolie pred vozidlom, vystriedalo niekoľko technológií. V tejto práci sa pozrieme na princíp funkcie niekoľkých technológií, ktoré by sa mohli objaviť na mieste senzoru. Najpodrobnejšie bude rozobratá hlavne varianta používajúca radar na mieste senzoru. Následne bude navrhnuté riešenie implementácie adaptívneho tempomatu za pomoci už spomenutého radaru.

V kapitole 2 Adaptívny tempomat bude rozobratý princíp funkcie tempomatu a adaptívneho tempomatu. Taktiež, v tejto kapitole budú rozobraté rôzne technológie na pozícii senzoru snímajúceho okolie pred vozidlom. Najskôr to bude senzor s technológiou LIDAR, následne radar, a nakoniec kamera. V ďalšej kapitole 3 Ti mmWave series bude podrobne rozobratý princíp funkcie FMCW radarov, vyhodnotenie vzdialenosti, rýchlosti a odklonu objektov od radaru. Na začiatku kapitoly bude popísaný radar, od spoločnosti Texas Instruments, AWR1843. V kapitole 4 Návrh riešenia bude popísaný postup návrhu riešenia adaptívneho tempomatu, ako aj grafického užívateľského rozhrania. Taktiež budú v tejto kapitole rozobraté aplikácie tretích strán, VCDS-Lite a Medium Range Radar demo, využívané v práci. V kapitole 5 Implementácia bude popísaná implementácia jednotlivých tried a komunikácia medzi nimi. V kapitole 6 Testovanie budú popísané testy implementácie, vykonávané na mestských okruhoch a obchvatoch, okresných cestách a na diaľnici. V kapitole 7 Záver budú zhrnuté výsledky testovania implementácie adaptívneho tempomatu a navrhnutý prípadný ďalší postup práce.

Kapitola 2

Adaptívny tempomat

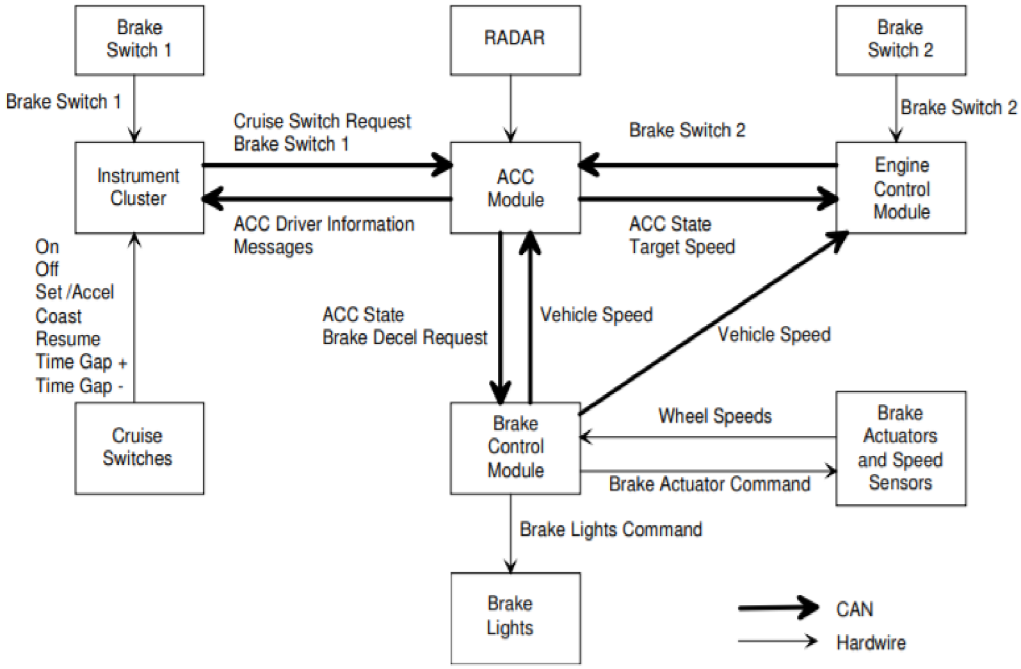
V tejto kapitole sa na začiatok pozrieme na systém, z ktorého vychádza adaptívny tempomat. Následne bude vysvetlený princíp a funkcia adaptívneho tempomatu. Potom sa bližšie pozrieme na základne technológie využívané ako senzory, ktoré detekujú prípadné objekty pred vozidlom.

Tempomat

Predchodcom adaptívneho tempomatu je obyčajný tempomat. Tento systém udržuje konštantnú rýchlosť vozidla zvolenú vodičom, pomocou pridávania plynu a brzdenia do určitej sily. Tempomat, v podobnej forme ako funguje dnes, sa vo vozidlách objavil už v päťdesiatych rokoch minulého storočia[24]. Výrazne uľahčil monotónne šoférovania na cestách, ktoré si nevyžadujú časté zmeny rýchlosti vozidla. Vodič vie jednoducho jedným tlačidlom nastaviť požadovanú rýchlosť, ktorú má vozidlo udržiavať. V prípade potreby vodič dokáže tempomat vypnúť zatlačením brzdového alebo spojkového pedálu, prípadne stlačením tlačidla na to určeného. V prípade, že vodič zatlačí na plynový pedál, systém sa nevypne. Po uvoľnení pedálu rýchlosť vozidla klesne len na predom nastavenú rýchlosť.

Adaptívny tempomat a jeho princíp funkcie

S hustnúcou premávkou, väčšími požiadavkami na plynulosť a komfort dopravy, už tento systém nie je postačujúci. Preto sa od deväťdesiatych rokov minulého storočia[27] začali na trhu objavovať prvé verzie systému adaptívneho tempomatu. Adaptívny tempomat obsahuje všetky prvky svojho predchodcu a pridáva k ním ešte udržovanie predom stanovenej vzdialenosti alebo časového rozdielu od nasledovaného vozidla. V prípade, že pred vozidlom nie je žiadne iné vozidlo, systém sa správa ako obyčajný tempomat. Ak by však vozidlo dobehlo pomalšie idúce vozidlo alebo by sa takéto vozidlo zaradilo pred vozidlo s aktívnym adaptívnym tempomatom, tak by vozidlo s týmto systémom spomalilo na rýchlosť vozidla, ktoré nasleduje a udržiavalo by od neho predom nastavenú vzdialenosť, prípadne časový rozostup. Vozidlo by naspäť zrýchlilo na predom stanovenú rýchlosť, ak by sa pred vozidlom zjavila opäť volná cesta. Aj tento systém podobne, ako v prípade obyčajného tempomatu, je možné kedykoľvek vypnúť pedálom spojky, brzdy alebo je ho možné vypnúť aj tlačidlom.



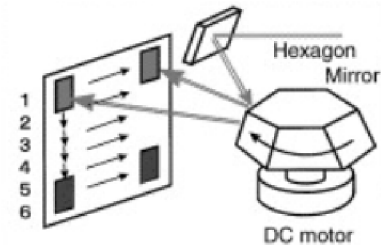
Obr. 2.1: Schéma toku informácií vo vozidle pre funkciu adaptívneho tempomatu. Prevzaté z [1]

Jedným z hlavných prvkov adaptívneho tempomatu, ako je možné vidieť na obrázku 2.1, je senzor na rozpoznávanie prípadných vozidiel, pohybujúcich sa pred vozidlom s daným systémom. Ak tento senzor zaznamená, že sa pred vozidlom nachádza iné vozidlo, systém rozhodne o tom, či vozidlo môže bezpečne pokračovať rovnakou rýchlosťou naďalej alebo bude treba patrične upraviť svoju rýchlosť. S postupom času sa na pozícii senzorov objavili rôzne technológie, ktoré si teraz postupne rozoberieme.

2.1 Adaptívne tempomaty založené na technológii LIDAR

Informácie pre túto podkapitolu boli čerpané z [21] a [26].

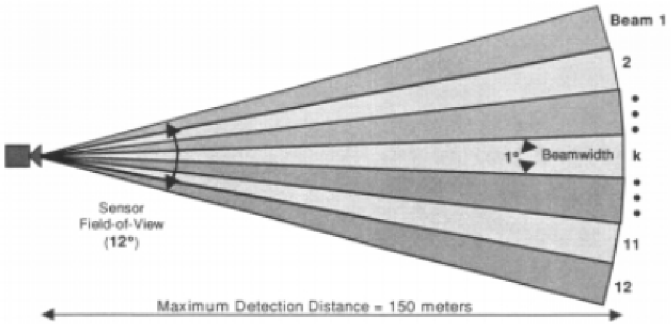
Adaptívne tempomaty, ktoré sú založené na technológii LIDAR, využívajú na detekciu premávky pred vozidlom, jednu alebo niekoľko paralelne rozložených laserových diód. Dióda vysiela lúče, ktoré sa následne odrazia od rôznych objektov späť a sú zachytávané prijímacou šošovkou, kde sú potom údaje ďalej spracované. Typy používajúce len jednu diódu zväčša využívajú, pre zabezpečenie horizontálneho aj vertikálneho pokrytia okolia pred vozidlom, točiace sa zrkadlá s rôznym uhlom náklonu, aby odrážali lúče v rôznom horizontálnom ako aj vertikálnom naklonení. Tento jav je možné vidieť na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Znázornenie hexagonových zrkadiel pre horizontálne pokrytie okolia laserom. Prevzaté z [21]

Pri vyhodnocovaní senzor najskôr horizontálne prejde odrazené lúče, a podľa ich vzdialenosti odrazu a uhlu odrazu vyhodnotí, či sa jedná o ten istý objekt. Tento proces sa opakuje aj pre vertikálny smer. Po vytvorení skupín lúčov odrazených od rovnakého objektu, senzor vypočíta ich relatívnu rýchlosť a vyhodnotí, či sa jedná o pohybujúci sa objekt alebo nie. Následne, na základe uhlu zatáčania vozidla je dopočítaný predpokladaný smer jazdy a vybraný vhodný objekt na nasledovanie.

Ďalším spôsobom, ako už bolo spomenuté vyššie, je využitie niekoľkých laserových diód rozložených paralelne, kedy každá dióda detekuje osobitnú časť priestoru pred vozidlom, ako je znázornené na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Znázornenie úsekov pokrytia okolia viacerými laserovými diodami. Prevzaté z [26]

V tomto prípade nie sú použité žiadne pohyblivé prvky, ktoré by menili smer vysielania signálu do priestoru, ako tomu bolo pri využití jednej diódy. Na toto sú použité šošovky, ktoré rozložia lúče do jednotlivých vzájomne sa neprekrývajúcich úsekov. Odrazené lúče z detekovaných objektov sú zachytávané sekvenčným striedaním medzi jednotlivými kontrolovanými úsekmi priestoru. Tieto úseky nakoniec vytvoria jeden ucelený obraz o priestore pred vozidlom. Na základe časového rozdielu medzi vyslaním a prijatím lúča, vie byť priamo rozoznaná vzdialenosť každého detekovaného odrazu od vozidla, ktoré sú prípadne zlúčené do jedného objektu, vďaka pulznému signálu. Avšak, na jednoznačné určenie relatívnej rýchlosti detekovaného objektu, je potrebné, aby bol daný objekt pozorovaný niekoľkokrát za sebou.

Niektoré novšie typy adaptívnych tempomatov, ktoré detekujú okolie pomocou technológie LIDAR, používajú systém GPS, na precíznejší výber sledovania vozidla pred sebou. Pri výbere vhodného vozidla, tento systém spolu s uhlom natočenia vozidla vie pomôcť aj v miernych zákrutách. Senzory využívajúce technológiu LIDAR sa vyznačujú veľmi veľkou presnosťou rozoznávania objektov, avšak sú citlivé na počasie a pri horších podmienkach ich presnosť klesá.

2.2 Adaptívne tempomaty využívajúce radary

Informácie pre túto podkapitolu boli čerpané z[22].

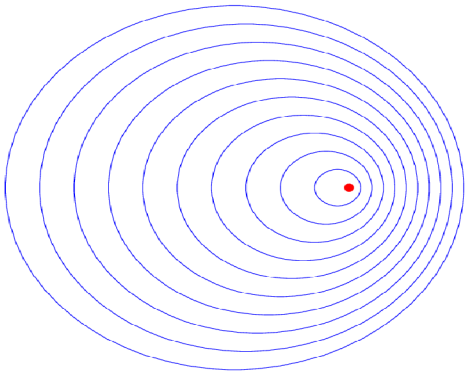
Ďalším zo spôsobov, ako je možné detekovať objekty pred vozidlom, je využitie radarov, ktoré vysielajú elektromagnetické vlny. V súčasnej dobe, radary využívané v automobilovom priemysle pracujú vo frekvenčných spektrách 24GHz a 77GHz, kde dokážu detekovať presnejšie vzdialenosť objektov a rozpoznávať objekty s vyššou rýchlosťou.

Elektromagnetické vlny vysielané radarmi môžeme reprezentovať rôznymi spôsobmi, ako napríklad spojitými vlnami (CW), kedy má vlna konštantnú amplitúdu a frekvenciu, ale aj pulznými spojitými vlnami (Pulsed CW), prípadne lineárne frekvenčne modulovanými vlnami (FMCW), ktoré sú bližšie popísané v nasledujúcej kapitole 3.

Na vyhodnotenie vzdialenosti detekovaného objektu pred vozidlom sa využíva čas, za ktorý dorazí vysielaná vlna k detekovanému objektu a zároveň sa vráti späť do prijímacej stanice $vzdialenost = (c * \tau)/2$, kde τ je celková doba putovania vlny a c je rýchlosť svetla. Spôsob reprezentácie vlny je v tomto prípade dôležitý, keďže pulzné spojité vlny sú periodicky vysielané v krátkych pulzoch, nasledované hluchými miestami. Tieto hluché miesta slúžia na zachytenie odrazeného signálu a ich dĺžka ovplyvňuje vzdialenosť, do ktorej je ešte radar schopný detekovať prípadné objekty. Avšak spojité vlny, ktoré nie sú pulzné modulované, nemajú takéto miesta medzi jednotlivými vysielaniami signálu, a teda sa nedajú využívať na stanovenie vzdialenosti detekovaného objektu.

Dopplerov efekt

Dopplerov efekt alebo Dopplerov posun je využívaný pri stanovení relatívnej rýchlosti detekovaného objektu pomocou radaru. Tento efekt vzniká pohybom vozidla vysielajúceho signál, alebo pohybom objektu, od ktorého sa signál odráža. Ak by sa pozorovaný objekt približoval k vysielajúcemu vozidlu, objekt by odrážal jednotlivé vlny skôr a tým pádom by sa frekvencia signálu zvyšovala, a zároveň vlnová dĺžka skracovala, ako je možne vidieť na obrázku 2.4. V opačnom prípade, keby sa objekt vzďaľoval od vysielajúceho vozidla, frekvencia signálu by klesala a vlnová dĺžka by sa zväčšovala.



Obr. 2.4: Znázornenie Dopplerovho efektu. Prevzaté z [13]

V prípade, že by sa pred vozidlom pohybovalo iné vozidlo s rozdielnou rýchlosťou, daný rýchlostný rozdiel by spôsobil frekvenčný posun v odrazenom signáli. Tento frekvenčný posun je známy ako Dopplerov posun $f_d = \pm 2v/\lambda$, kde v je relatívna rýchlosť medzi detekovaným objektom a vozidlom vysielajúcim signál a λ je vlnová dĺžka signálu. O tom, či

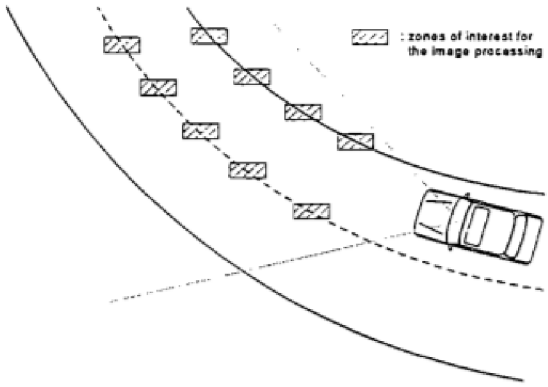
je posun pozitívny alebo negatívny rozhoduje relatívna rýchlosť detekovaného objektu voči vozidlu vysielajúcemu signál.

2.3 Adaptívne tempomaty využívajúce kamery

Medzi technológie využívané, ako to je v prípade využitia senzorov pre adaptívne tempomaty, patrí aj kamerový systém. Aj keď kamerový systém sa ako samostatný senzor na detekciu okolia pred vozidlom neuchytil, v súčasnosti najmä prémiové modely automobilových značiek používajú kamerové systémy v spojení s iným druhom technológie, pre zabezpečenie najvyššej kvality ich adaptívneho tempomatu.

Hlavným dôvodom pre využitie kamier v adaptívnych tempomatoch je možnosť chybného výberu vozidla, inými technológiami, na nasledovanie v zákrutách. Zákruty sú v tomto ohľade ťažké na vyhodnotenie pre adaptívne tempomaty využívajúce len jeden druh senzoru, keďže pri nekonštantnom uhle zatáčania v zákrute môže systém vybrať chybný objekt na nasledovanie. Kamery by mali tento problém odstrániť sledovaním okolia a určením jazdného pruhu, z ktorého by malo byť následne vozidlo na nasledovanie vybrané.

Takýto proces výberu sa skladá z troch častí. V prvej časti sa z obrazu vyberú čiary ohraničujúce jazdný pruh, v ktorom sa nachádza vozidlo a určia sa počiatočné hodnoty uhla natočenia vozidla a zakrivenia cesty pred vozidlom. Paralelne s týmto procesom sa vyhodnotí zakrivenie vozovky pomocou malých obrazov čiar pruhov v konštantných rozostupoch, ako je možné vidieť na obrázku 2.5, ktorými sa skoriguje predom určený uhol zakrivenia. Nakoniec sú tieto výsledky spracované a z nich vyhodnotené smerové vektory pre ďalšie vyhodnocovanie, ako aj odoslané iným systémom na vyhodnotenie správneho vozidla na nasledovanie.



Obr. 2.5: Znázornenie úsekov čiar jazdných pruhov využívaných na vyhodnotenie zakrivenia jazdného pruhu. Prevzaté z [15]

Takto fungujúci systém môže na základe radarového senzoru alebo LIDAR senzoru vybrať niekoľko objektov, z ktorých bude na základe informácií z kamier nakoniec vybraný vhodný objekt na nasledovanie[15].

Kapitola 3

TI mmWave radar

V tejto kapitole sa bližšie pozrieme na FMCW radary od spoločnosti Texas Instruments, ktoré boli použité aj v tejto práci. Okrem toho sa budem venovať základnému princípu funkcie radaru. Taktiež sa budú vyhodnocovať vzdialenosti, rýchlosti a uhly objektov od radaru. Ak nie je uvedené inak, tak informácie pre túto kapitolu boli získané z videí[7][6][10][8][4], prezentácií[18][20], technickej dokumentácie[11] a publikácií[23] spoločnosti Texas Instruments.

Technológia mmWave

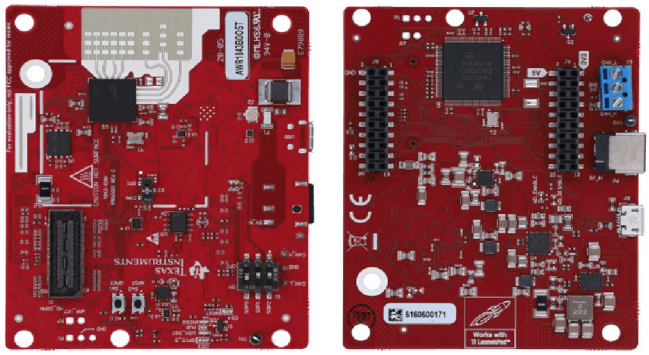
Skratka mmWave je odvodená z anglických slov *milimeter* a *wave*, a v preklade sa jedná o milimetrové vlny. Takto sú označované radary vysielajúce elektromagnetické vlny s milimetrovou vlnovou dĺžkou. Vďaka milimetrovým veľkostiam vlnovej dĺžky vĺn vysielaných radarom, môžu byť aj samotné radary menšie, čo je jedným z dôvodov prečo môžu byť využívané vo vozidlách. Ďalšou výhodou takýchto radarov je ich presnosť, kedy radary pracujúce na 77GHz až 81GHz dokážu detekovať aj veľmi malé pohyby.

3.1 Radar AWR1843BOOST

Radar AWR1843 (obrázok 3.1), od spoločnosti Texas Instruments, patrí do skupiny MIMO radarov. Skratka MIMO (multiple input multiple output) označuje radary s viacerým anténami pre vysielanie signálu, ako aj prijímanie signálu. V prípade radaru AWR1843 ide konkrétne o tri antény vysielajúce a štyri prijímajúce. Výhoda radarov s viacerými anténami, ktoré vysielajú signál, spočíva v efektívnosti a lepšej presnosti vyhodnotenia uhlu. Na to, aby radary s jednou vysielacou anténou mali rovnakú presnosť vyhodnotenia uhlu ako radary s viacerými vysielacími anténami, by museli zdvojnásobiť počet prijímajúcich antén za každú vysielajúcu anténu, ktorá im chýba oproti radarom s viacerými vysielajúcimi anténami. Taktiež každá prijímajúca anténa má vlastný proces spracovania prijatého signálu, čo robí radary s viacerými vysielajúcimi anténami efektívnejšími.

Tento radar pracuje na 77Ghz, čím získava výhodu oproti radarom pracujúcim na 24Ghz v presnosti vyhodnocovania vzdialenosti a rozlíšiteľnosti vzdialenosti. Túto výhodu získava vďaka šírke pásma, ktorá pri radaroch pracujúcich na 77Ghz môže dosahovať až 4Ghz, zatiaľ čo pri radaroch pracujúcich na 24Ghz je to len 200Mhz. Konektivita s počítačom je zabezpečená pomocou micro USB konektora cez XDS110 emulátor. Toto spojenie ponúka rozhrania, ako napríklad JTAG, pre spojenie s Code Composer Studio (popísané v podkapitole 4.1) alebo UART pre získavanie zasielaných dát radarom. UART spojenie tvoria

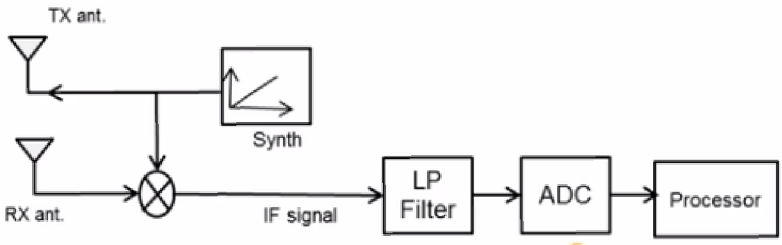
dva porty, a to port pre tok dát a aplikačný port na zasielanie príkazov radaru. Radar je napájaný cez 2,1mm 5V jack.



Obr. 3.1: Ukážka radaru AWR1843BOOST od firmy Texas Instruments. Prevzaté z [12]

3.2 Princíp funkcie FMCW radaru

Ako je možné vidieť na obrázku 3.2, radar najskôr vygeneruje pomocou syntetizátoru signál nazývaný *chirp*, ktorý následne vysielacia anténa odošle. Po odraze signálu od sledovaného objektu prijímacia anténa zachytí odrazený signál, ktorý je spolu s vyslaným signálom spracovaný pomocou mixéru. Výsledkom spracovania týchto dvoch signálov vzniká *IF signál*. Tento signál je potom prevedený cez filter s dolnou prepusťou, následne je digitalizovaný a pripravený na ďalšie spracovanie.



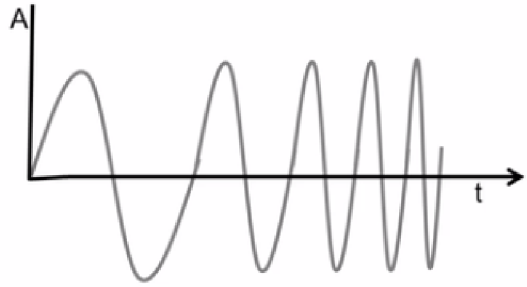
Obr. 3.2: Schéma princípu funkcie FMCW radaru. Prevzaté z [8]

Chirp

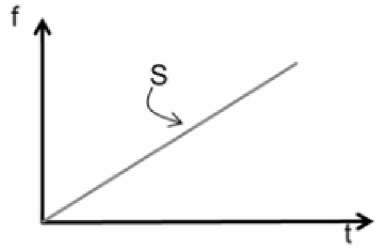
Vo všeobecnosti je *chirp* spojitý signál, ktorého frekvencia je lineárne modulovaná. Tento signál reprezentuje sínusoidu, ktorej frekvencia lineárne narastá s pribúdajúcim časom, viď obrázok 3.3. Vďaka tejto vlastnosti sa radary používajúce chirpy nazývajú FMCW radary.

Ďalší zo spôsobov reprezentácie signálu je pomocou grafu frekvencie voči času, zobrazený na obrázku 3.4, kde by sme mohli daný signál definovať pomocou počiatočnej frekvencie,

šírky vlnového pásma B a dĺžky trvania chirpu T_c. Výsledkom tohto grafu je hodnota sklonu rastu daného signálu $S = BT_c$.



Obr. 3.3: Graf frekvenčne modulovanej sinusoidy. Prevzaté z [7]



Obr. 3.4: Reprezentácia chirpu na grafe frekvencie voči času. Prevzaté z [7]

Mixér

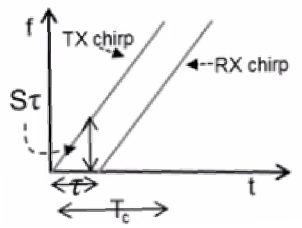
Mixér je zariadenie, ktoré na vstupe prijíma sinusoidu vysielaného signálu $x_1 = sin[w_1 t + \phi_1]$ a sinusoidu prijatého signálu $x_2 = sin[w_2 t + \phi_2]$. Jeho výstupom je sinusoida s parametrami vypočítanými na základe nasledujúceho výrazu.

$$x_{out} = sin[(w_1 - w_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \tag{3.1}$$

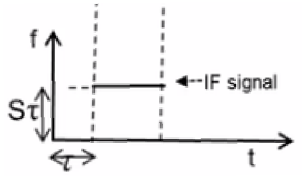
Z výrazu (3.1) je zrejme, že frekvencia výsledného signálu je rovná rozdielu okamžitých frekvencií vysielaného a prijatého signálu. Fáza výsledného signálu je rovná rozdielu počiatočných fáz vysielaného a prijatého signálu.

IF signál

Z pod-sekcie Mixér vyplýva, že IF signál vzniká rozdielom prijatého a odoslaného signálu. Keďže tieto signály sú rovnaké, v grafe zobrazujúcom frekvenciu voči času by sa javili ako kópie posunuté o časovú dĺžku, od odoslania signálu po prijatie odrazeného signálu (obrázok 3.5). Vzhľadom na danú skutočnosť by bol výsledný IF signál zobrazený ako konštantná rovná čiara v grafe zobrazujúcom čas voči frekvencii (obrázok 3.6). Táto čiara by bola posunutá na ose frekvencie o frekvenciu výsledného signálu. Frekvenciu výsledného signálu možno vypočítať výrazom $S_\tau = S2d/c$.



Obr. 3.5: Graf zobrazujúci vyslaný a prijatý chirp. Prevzaté z [7]



Obr. 3.6: Graf IF signálu vzniknutého z rozdielu odoslaného a prijatého chirpu. Prevzaté z [7]

Digitalizácia signálu

Pred tým, než môže byť signál spracovaný v procesore, je potrebné ho ešte digitalizovať. Pri tomto procese zohráva dôležitú úlohu požadovaná maximálna vzdialenosť pozorovania d_{max}. Podľa tejto vzdialenosti je nastavený filter, ktorý prepúšťa signál do najväčšej možnej frekvencie IF signálu $f_{IF_{max}} = \frac{S2d_{max}}{c}$. Podľa tejto vzdialenosti sa taktiež nastavuje aj vzorkovacia frekvencia pre digitalizovanie signálu $F_s \geq \frac{S2d_{max}}{c}$.

3.3 Diskrétna Furierová transformácia

Diskrétna Furierová transformácia je jednou z verzií Furierovej transformácie. Furierová transformácia (3.2)[16], kde $S(f)$ je spojitá funkcia vo frekvenčnej doméne, $x(t)$ je spojitá funkcia v časovej doméne, t je čas, je základnou metódou pre spracovanie signálu. Táto transformácia transformuje vzorky zo spojitej časovej domény do frekvenčnej domény.

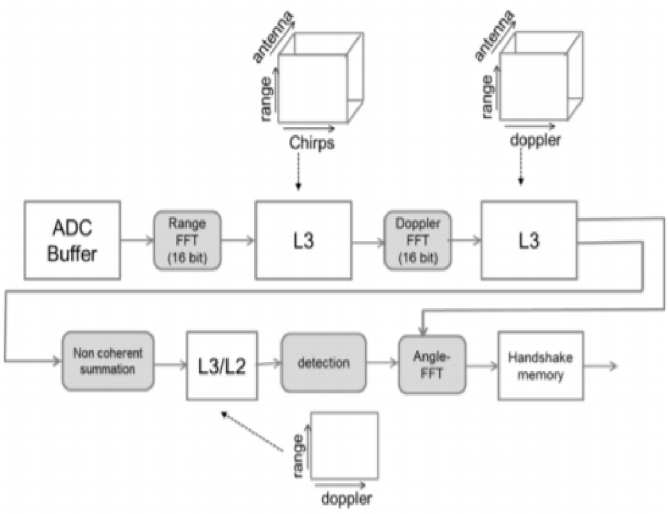
$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * e^{-j2\pi ft} dt \tag{3.2}$$

Keďže radar spracováva prijatý signál digitálne a jeho vzorky sú reprezentované v diskrétnom čase, radary od spoločnosti Texas Instrumetns, využívajú diskrétnu verziu Furierovej transformácie.

Diskrétna Furierová transformácia (3.3)[19], kde $X(k)$ je vzorka vo frekvenčnej doméne, $x(n)$ je vzorka v časovej doméne, n je časový index, k je frekvenčný index a N je počet vzoriek, je jednou z hlavných metód spracovania radarového signálu. Táto metóda je využívaná na výpočet vzdialenosti, relatívnej rýchlosti objektov od radaru a uhlu, ktorí zvierajú voči radaru.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) * e^{-j2\pi n \frac{k}{N}} \tag{3.3}$$

Radary od spoločnosti Texas Instruments využívajú diskrétnu Furierovú transformáciu na všetky tri vyššie spomenuté výpočty, viď obrázok 3.7.



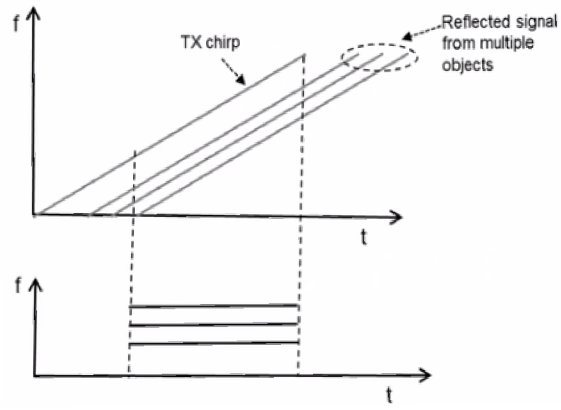
Obr. 3.7: Proces spracovania signálu, radarmi od spoločnosti Texas Instruments, s využitím rýchlych Furierových transformácií. Prevzaté z[14]

.

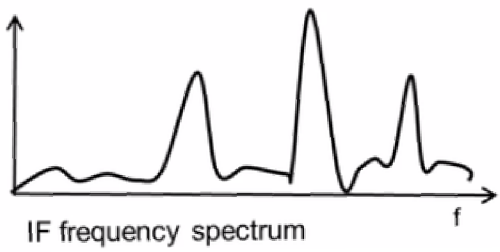
Najskôr je spravená séria rýchlych Furierových transformácií, počítajúcich diskrétnu Furierovú transformáciu, pre každú prijímaciu anténu, nazývaná Range-FFT. Výsledkom tejto serie transformácii je vzdialenosť objektov od radaru a zároveň aj vstup pre ďalšiu sériu transformácií, nazývaných Doppler-FFT. Po tejto sérii transformácií je k objektom priradená aj ich relatívna rýchlosť voči radaru a výsledok tejto serie je ako v minulom kroku aj teraz využitý ako vstup pre ďalšiu sériu transformácií. Z týchto dvoch sérií transformácií je spravená matica, v ktorej sa pomocou detekčných algoritmov nájdu vrcholy reprezentujúce objekty. Posledná séria transformácií, nazývaná Angle-FFF, nakoniec vypočíta pre nájdené objekty uhly, ktoré zvierajú voči radaru. Jednotlivé série transformácií začínajú až po skončení všetkých výpočtov predošlej série.

3.4 Vyhodnotenie vzdialenosti

Na to, aby bolo možné rozoznať od seba viac objektov (obrázok 3.8), je potrebné použiť diskrétnu Furierovú transformáciu (popísaná v podkapitole 3.3), ktorá slúži na transformáciu z časovej oblasti do frekvenčnej oblasti. Výsledkom takéhoto spracovania by bolo frekvenčné spektrum (obrázok 3.9), ktoré by malo niekoľko osobitných vrcholov označujúce spozorované objekty. Frekvencie daných objektov sú priamo úmerne ich vzdialenosti od radaru.



Obr. 3.8: Grafy viacerých prijatých chirpov a ich IF signály. Prevzaté z [7]



Obr. 3.9: Frekvenčne spektrum po spracovaní IF signálov z obrázku 3.6. Prevzaté z [7]

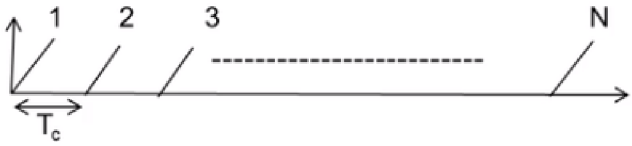
Rozlíšiteľnosť blízkych objektov

Ak by boli dva alebo viac objektov veľmi blízko pri sebe, mohli by sa javiť ako jeden. Pre zistenie, do akej vzdialenosti blízke objekty nesplynú do jedného, je možné využiť poznatok, že frekvencia objektu je rovná $S_\tau = \frac{S2d}{c}$. Ďalším poznatkom je schopnosť Furierovej transformácie, ktorá dokáže rozoznať dve frekvencie rozdielne viac než $\frac{1}{T}Hz$. Z toho vyplýva, že rozdiel frekvencií objektov, aby boli rozlíšiteľné, musí byť väčší ako $\frac{1}{T_c}$, kde T_c je dĺžka trvania jedného chirpu. Keďže rozdiel frekvencií by sa dal zapísať $\Delta f = \frac{S2\Delta d}{c}$, v tom prípade predošlí vzťah by bolo možné zapísať nasledovne: $\frac{S2\Delta d}{c} > \frac{1}{T_c}$. Po osamostatnení Δd a úprave $B = ST_c$, by sme dostali vzťah $\Delta d > \frac{c}{2B}$. Z tohto vzťahu vyplýva, že rozlíšiteľnosť objektov ovplyvňuje len šírka pásma chirpu, ktorá je priamo úmerná presnosti rozlíšiteľnosti.

3.5 Vyhodnotenie rýchlosti

Na vyhodnotenie rýchlosti objektu, radar odošle dva chirpy, ktoré budú medzi sebou rozdelené o dĺžku chirpu. Po spracovaní rýchlou Furierovou transformáciu zistíme, že vrcholy sú v rovnakej vzdialenosti, avšak majú rôzne fázy. Vďaka rozdielnym fázam dokážeme vypočítať rýchlosť objektu na základe výrazu $\Delta\Phi = \frac{4\pi v T_c}{\lambda}$. Po úprave dostaneme výraz na výpočet rýchlosti $v = \frac{\Delta\Phi\lambda}{4\pi T_c}$. Ak by však boli dva alebo viac objektov v rovnakej vzdialenosti s rozdielnou rýchlosťou, tak by na výpočet už nestačili len dva chirpy, keďže po spracovaní by mali vrcholy fázy z viacerých objektov. Kvôli takýmto prípadom sa rýchlosť vyhodnocuje tak, že

radar namiesto dvoch chirpov vyšle N rovnomerne rozdelených chirpov, nazývaných rámec chirpov (obrázok 3.10). Po spracovaní vzoriek pomocou rýchlej Furierovej transformácie pre vyhodnotenie vzdialenosti objektu, sa vzorky spracujú ešte raz rýchlou Furierovov transformáciou, ktorá na základe rozdielnych frekvencií rotujúcich fáz rozlíši objekty od seba. Potom sa spätne dopočíta rýchlosť objektov výrazmi $v_1 = \frac{\Delta\omega_1\lambda}{4\pi T_c}$, $v_2 = \frac{\Delta\omega_2\lambda}{4\pi T_c}$.



Obr. 3.10: Graf jedného rámca chirpov. Prevzaté z [10]

Maximálna merateľná rýchlosť

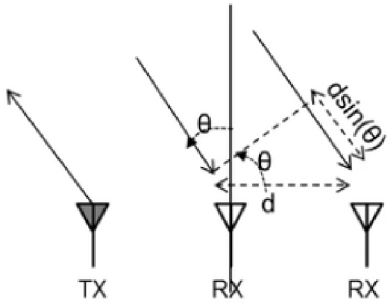
Na to, aby sa dal jednoznačne určiť smer pohybu, musí byť fázový posun menší ako π, teda $|\Delta\Phi| < \pi$. Keď zoberieme do úvahy, že $\Delta\Phi = \frac{4\pi v T_c}{\lambda}$, tak zistíme, že maximálna rýchlosť objektu nesmie prekročiť $v < \frac{\lambda}{4T_c}$.

Rozlíšiteľnosť podobne rýchlych objektov

Z diskrétnej Furierovej transformácie vyplýva, že dve frekvencie sú rozpoznateľné osobitne, pokiaľ $\Delta\Phi > \frac{2\pi}{N}$. Ako už bolo spomenuté, rýchlosť objektu sa dá vyjadriť ako $\Delta\Phi = \frac{4\pi v T_c}{\lambda}$. Po spojení výrazov a následnej úprave nám vyjde, že minimálny rozdiel rýchlostí musí byť $v > \frac{\lambda}{2T_f}$, kde T_f je celkový čas jedného rámca. Z toho vyplýva, že celkový čas rámca je nepriamo úmerný minimálnemu rozdielu rýchlostí objektov.

3.6 Vyhodnotenie odklonu

Na vyhodnotenie uhlu objektu voči radaru sa taktiež, ako pri vyhodnotení rýchlosti objektu využije fáza IF signálu. Ak by sme mali jednu vysielaciu a dve prijímacie antény, tak by sme mohli využiť fázový rozdiel medzi signálmi zachytenými rôznymi anténami. Keďže antény sú od seba vzdialené, a tým pádom by signál musel prejsť dlhšiu vzdialenosť k druhej anténe, budú mať tieto dva signály rozdielnu fázu (obrázok 3.11). Pri vzdialenosti d by táto nadbytočná vzdialenosť malá dĺžku $dsin(\theta)$. Z výrazu na výpočet fázového rozdielu $\Delta\Phi = \frac{2\pi dsin(\theta)}{\lambda}$ vieme odvodiť výsledný uhol dopadu $\theta = sin^{-1}(\frac{\lambda\Delta\Phi}{2\pi d})$.



Obr. 3.11: Schéma zvierajúceho uhlu objektu voči radaru. Prevzaté z [4]

Rovnako ako pri vyhodnocovaní rýchlosti dvoch objektov v rovnakej vzdialenosti, nie je možné použiť na výpočet rozdiel fáz, tak je to aj v prípade, ak chceme vyhodnotiť uhol objektov v rovnakej vzdialenosti s rovnakou rýchlosťou. Taktiež, ako pri výpočte rýchlosti sa využije na spracované signály rýchla Furierová transformácia, ktorá oddelí objekty od seba a spätne sa dopočíta uhol dopadu signálu od objektov z ich fázových rozdielov $\theta_1 = sin^{-1}(\frac{\lambda\Delta\Phi_1}{2\pi d})$, $\theta_2 = sin^{-1}(\frac{\lambda\Delta\Phi_2}{2\pi d})$.

Presnosť vyhodnotenia

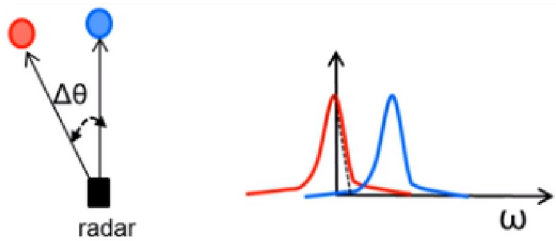
Presnosť vyhodnotenia uhlu dopadu sa líši od samotného uhlu, ktorý zviera objekt voči radaru. Vzhľadom na to, že vzťah medzi fázovým rozdielom a uhlom nie je lineárny, najpresnejšie výsledky budú dosiahnuté, keď bude objekt priamo pred radarom a výsledky budú čím ďalej tým menej presné, ako sa bude objekt odkláňať od radaru.

Maximálny uhol dopadu

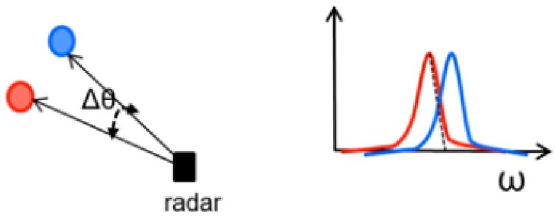
Ako už bolo spomenuté v prípade vyhodnocovania rýchlosti objektov, tak aj v tom prípade platí, že na to, aby sa dal uhol jednoznačne určiť, musí byť fázový rozdiel menší ako π. Z toho vyplýva, že maximálny zmerateľný uhol dopadu je $\theta_{max} = \pm sin^{-1}(\frac{\lambda}{2d})$.

Rozlíšiteľnosť objektov s rovnakou rýchlosťou a vzdialenosťou od radaru

Aj v tejto časti využijeme poznatku, že na to, aby boli dva objekty rozoznateľné pomocou rýchlej Furierovej transformácie, musí byť $\Delta\Phi > \frac{2\pi}{N}$. Po vyjadrení $\Delta\Phi$, by predchádzajúci vzťah vyzeral $\frac{2\pi}{N} < \frac{2\pi d(sin(\theta+\Delta\theta)-sin(\theta)}{\lambda}$. Z tohto vzťahu po vyjadrení $\Delta\theta$ a následnej úprave vzniká výsledný výraz $\Delta\theta > \frac{\lambda}{Nd\cos\theta}$. Rovnako aj v tomto prípade môžeme vidieť, že výsledok závisí od samotného uhla, v ktorom sa tieto objekty nachádzajú. Preto sa objekty priamo pred radarom s rovnakým rozdielom medzi sebou (obrázok 3.12) budú javiť po spracovaní rýchlou Furierovou transformáciou vzdialenejšie od seba, ako objekty viac odklonené od radaru (obrázok 3.13).



Obr. 3.12: Graf frekvenčnej modulácie dvoch objektov pred radarom. Prevzaté z [4]



Obr. 3.13: Graf frekvenčnej modulácie dvoch objektov odklonených voči radaru. Prevzaté z [4]

3.7 Kalmanov filter

Kalmanov filter je častokrát používaný v adaptívnych tempomatoch za účelom spresňovania výsledkov detekcie objektov v okolí vozidla alebo aj za účelom dopočítavania relatívnej rýchlosti daných objektov v prípadoch, kedy je možné z detekcie určiť len ich vzdialenosť od vozidla s adaptívnym tempomatom. Tento filter je využívaný na spresňovanie výsledkov aj v demách od spoločnosti Texas Instruments, ktoré slúžia na ukážku funkcie ich radarov.

Aby bolo možné filter použiť, musí byť pozorovaný proces opísateľný lineárnym systémom reprezentovaným rovnicou výstupu (3.4).V spomínanej rovnici je v šum merania. Stavovou rovnicou je (3.5), kde Φ, Γ a Ψ sú stavové matice a w je procesný šum[25].

$$y = C * x + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * v \tag{3.4}$$

kde

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x_{n+1} = \Phi * x_n + \Gamma * u_n + \Psi * w_n \tag{3.5}$$

kde

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -h & -h^2/2 & 1 & h & h^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Gamma = \begin{bmatrix} h \\ 0 \\ -h^2/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Psi = \begin{bmatrix} h^2/2 & 0 \\ h & 0 \\ -h^3/6 & h^3/6 \\ 0 & h^2/2 \\ 0 & h \end{bmatrix}$$

Proces filtrácie spočíva v dvoch krokoch. Prvým krokom je vypočítaný budúci stav pomocou rovnice (3.6). Druhý krok vyhodnocuje budúci stav korekciou pomocou rovnice (3.7),

$$\tilde{x}_{n+1} = \Phi * \hat{x}_n + \Gamma * u_n \tag{3.6}$$

$$\hat{x}_{n+1} = \Phi * \tilde{x}_n + L * (y_n - C * x_n) \tag{3.7}$$

kde výsledný stav závisí od Kalmanového prírastku L, ktorý rozhoduje o tom, či bude mať pri výpočte nového stavu väčšiu váhu nameraný stav alebo vypočítaný predpokladaný budúci stav. Kalmanov prírastok je možné dopočítať pomocou rovnice (3.8), kde R je konvariančná matica meracieho šumu w. Konvariancu P je možné dopočítať pomocou Riccatiho rovnice pre matice[17].

$$L = P * C^T * R^{-1} \tag{3.8}$$

Kapitola 4

Návrh riešenia

V tejto kapitole je bližšie popísaný postup návrhu riešenia samotného adaptívneho tempomatu, ako aj zobrazovanie inštrukcií cez grafické užívateľské rozhranie. Taktiež sú v tejto kapitole rozobraté aplikácie tretích strán, ktoré bude riešenie využívať.

- Medium Range Radar demo 4.1
- VCDS-Lite 4.2
- GUI 4.3
- Adaptívny tempomat 4.4

4.1 Medium Range Radar demo

Medium Range Radar demo, od americkej spoločnosti Texas Instruments, je voľne prístupné demo určené na demonštráciu funkčnosti zaznamenávania a vyhodnocovania okolia. Toto demo pracuje s použitím jedného z automotive radarov AWR1843BOOST spoločnosti Texas Instruments[5]. Tento radar a princíp jeho funkcie je bližšie popísaný v kapitole 3.

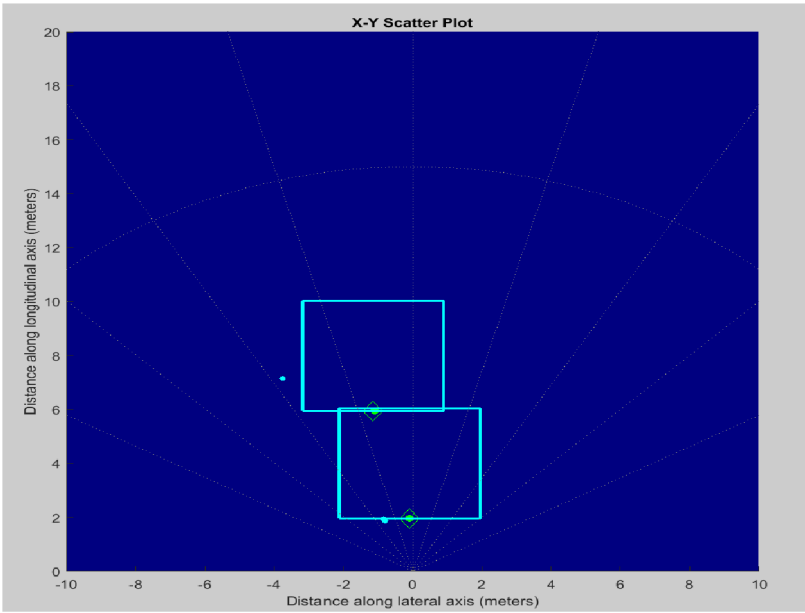
Na to, aby mohol byť radar využívaný v bežnej premávke, musí byť dostatočne výkonný a presný. Výrobca radarov a autori dema deklarujú dosah radaru až 150 metrov, ako aj maximálnu rýchlosť $150km/h$, dostatočnú pre použite aj na diaľniciach. Presnosť dema rozlíšiť od seba dva alebo viac objektov pohybujúcich sa za sebou je udávaná $68cm$ a rozlíšiteľnosť dvoch alebo viacerých objektov pohybujúcich sa v rovnakej vzdialenosti, ale s inou rýchlosťou je $0.11m/s$[5].

Demo využíva všetky tri z dostupných antén radaru AWR1843BOOST, určených pre vysielanie signálu, aby vysielalo dva druhy chirpov. Pojem chirp je vysvetlený v podkapitole 3.2. Dôvodom využívania dvoch druhov chirpov, je zaručenie konzistentného určovania rýchlosti a vyššej maximálnej detekovanej rýchlosti. Použité chirpy sa neprekrývajú a sú identické. Jediným rozdielom je, že jeden druh je vysielaný s vyššou periodicitou ako druhý. Odosielané chirpy sú zachytávané ôsmimi anténami pre vyhodnocovanie v azimutálnej rovine a štyrmi anténami vyhodnocujúcimi horizontálnu rovinu okolia radaru [5].

Prijaté dáta sú najskôr spracované pomocou rýchlej Furierovej transformácie na zistenie vzdialenosti objektov. Výstup z tejto transformácie taktiež slúži ako vstup pre ďalšiu rýchlu Furierovu transformáciu na zistenie rýchlosti objektov. Jednotlivé objekty sú identifikované podľa x, y a z súradníc. Demo okrem identifikovania objektov a ich vlastností,

dokáže identifikovať pomocou DBSCAN[1] algoritmu zhluky bodov. V prípade, že sú nejaké zhluky identifikované, môžu z nich vzniknúť sledované objekty. Sledované objekty vznikajú vybratím najsilnejšieho bodu v zhluku, ktorý je potom spracovaný rozšíreným Kalmanovým filtrom[5].

Po spracovaní a vyhodnotení všetkých bodov detekovaných radarom, demo vytvára rámec s hlavičkou, identifikovanými bodmi, zhlukmi a sledovanými objektmi, ktorý posiela cez rozhranie UART na ďalšie spracovanie. Výstup z dema je taktiež možné zobraziť pomocou grafického užívateľského rozhrania určeného pre dané demo (obrázok 4.1). Veľkosť hlavičky jedného rámca je fixná a obsahuje špeciálny reťazec čísel, informácie o deme, počet zaznamenaných objektov, počet pod rámcov a veľkosť rámca. Zaznamenané objekty sú uložené v rámci vo formáte: typ-veľkosť-hodnota. Označením typu zistíme o aký typ detekovaných objektov pôjde, nasleduje veľkosť časti rámca obsahujúca zaznamenané objekty a nakoniec sú za sebou radené informácie o objektoch označeného typu. Pri detekovaných bodoch to sú súradnice v kartezkom tvare, hodnota Dopplerovho efektu a vrchol odrazeného signálu. Pri detekovaných zhlukoch to sú stredy zhluku na osách x a y, a veľkosti zhluku na osách x a y. Pre sledované objekty sú ukladané informácie o x a y súradnici objektu, rýchlosti v smere x a y, a veľkosti objektu na ose x a y [5].



Obr. 4.1: Ukážka výstupu Medium Range Radar dema. Prevzaté z MRR dema verzia 1.1.

Code Composer Studio

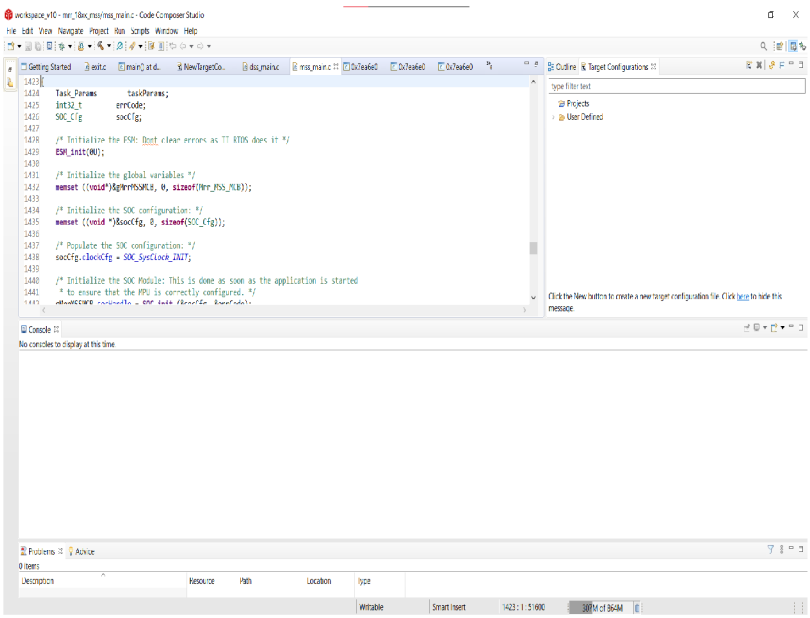
Code Composer Studio (obrázok 4.2) je voľne dostupné vývojové prostredie od spoločnosti Texas Instruments. Toto vývojové prostredie poskytuje rozhranie pre jednoduchú úpravu a spúšťanie programov na radaroch od spoločnosti Texas Instruments.

Medium Range Radar demo, použité v tejto práci, sa skladá z dvoch programovateľných podsystémov. Prvým podsystémom je Master Sub-System, ktorého hlavou úlohou je zaistenie komunikácie medzi radarom a externými zariadeniami. Ďalšie z činností, ktoré tento

[1] https://towardsdatascience.com/dbscan-algorithm-complete-guide-and-application-with-python-scikit-learn-d690cbae4c5d

podsystém môže vykonávať sú činnosti vykonávané v neskorých fázach výpočtov dema, ako napríklad výpočty Kalmanovho filtra (popísaný v podkapitole 3.7), počítanie počtu detekovaných objektov alebo fúzie informácií z jednotlivých podsystémov[14].

Druhým programovateľným podsystémom je DSP Sub-System. Hlavnou úlohou tohto podsystému je to najpodstatnejšie, a teda spracovávanie signálu z radaru. DSP Sub-System využíva na svoju prácu digitálny procesor signálu, ako aj hardwarovú akceleráciu na rýchlejšie výpočty a odľahčenie procesoru[14].



Obr. 4.2: Ukážka vývojového prostredia Code Composer Studio v10. Prevzaté z Code Composer Studio v10.

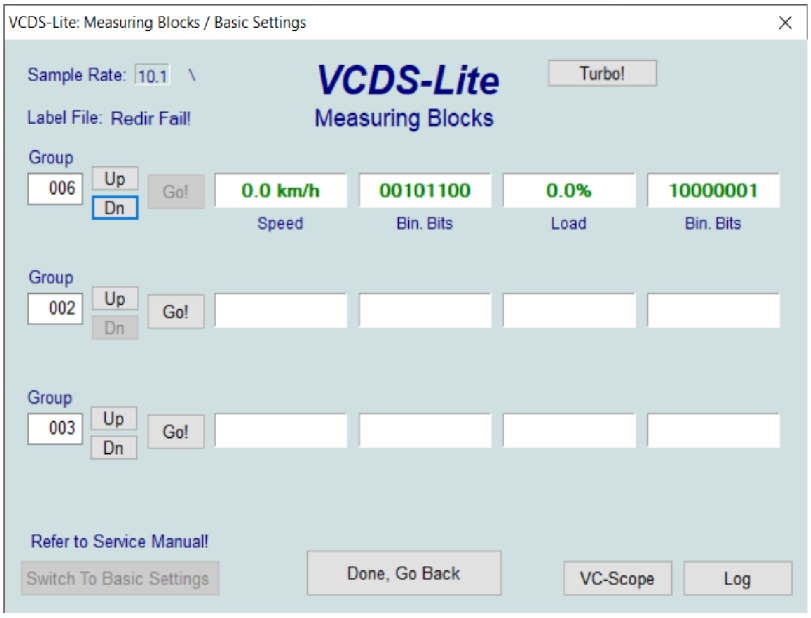
Medium Range Radar demo bude využívané v tejto práci na detekciu okolia pred vozidlom. Na základe vlastností detekovaných bodov a sledovaných objektov z dema bude ďalej vyhodnotený priestor pred vozidlom, prípadne bude vybraté vozidlo na nasledovanie.

4.2 VCDS-Lite

VCDS-Lite (obrázok 4.3), od spoločnosti Ross-Tech, je program určený na diagnostiku vozidiel koncernu Volkswagen. Verzia Lite tohto programu je oproti plnej verzii dostupná zadarmo, avšak s obmedzenými funkciami a menšou kompatibilitou, najmä s vozidlami vyrobenými po roku 2006. Program získava a zobrazuje údaje o vozidle z jeho riadiacej jednotky pomocou OBD-II diagnostického káblu[9]. V práci bol využitý na spojenie s riadiacou jednotkou OBD-II KKL diagnostický kábel.

V tejto práci je program VCDS-Lite využívaný na získavanie aktuálnej rýchlosti vozidla. Aktuálna rýchlosť je dostupná medzi meranými blokmi pohonnej jednotky vozidla. Rýchlosť vozidla je udávaná vo forme desatinného čísla, ale ukazuje len celé číslo, ktoré sa aktualizuje približne desaťkrát za sekundu. Samotná rýchlosť vozidla je základným prvkom pri vyhodnocovaní nasledujúcej inštrukcie pre adaptívny tempomat. Okrem toho, aktuálna rýchlosť vozidla napomáha aj pri vyhodnotení vhodného objektu na nasledovanie, a to tak, že vypočítaním skutočnej rýchlosti objektov detekovaných radarom vieme vyfiltrovať napríklad stacionárne objekty na kraji vozovky. Reálnu rýchlosť objektu dostaneme spočítaním

aktuálnej rýchlosti vozidla, prepočítanej na jednotku m/s, a rýchlosti objektu detekovaného radarom, určenej pomocou Dopplerovho efektu.



Obr. 4.3: Ukážka zobrazenia aktuálnej rýchlosti vozidla v programe VCDS-Lite. Prevzaté z VCDS-Lite 1.2.

Korekcia rýchlosti podľa GPS a rozmerov kolies

Keďže vozidlo využívané na testovanie adaptívneho tempomatu nemá v sebe zabudovaný systém GPS, bolo potrebné spraviť sadu testov na zistenie odchýlky rýchlosti, ktorá bude pripočítaná k aktuálnej rýchlosti vozidla pre presnosť údajov, získanej z programu VCDS-Lite oproti rýchlosti získanej pomocou GPS. Testy ukázali, že rýchlosť získaná z riadiacej jednotky vozidla ukazuje o $1km/h$ vyššiu rýchlosť, ako rýchlosť nameraná systémom GPS, respektíve o $2km/h$ pri rýchlostiach vyšších ako $100km/h$.

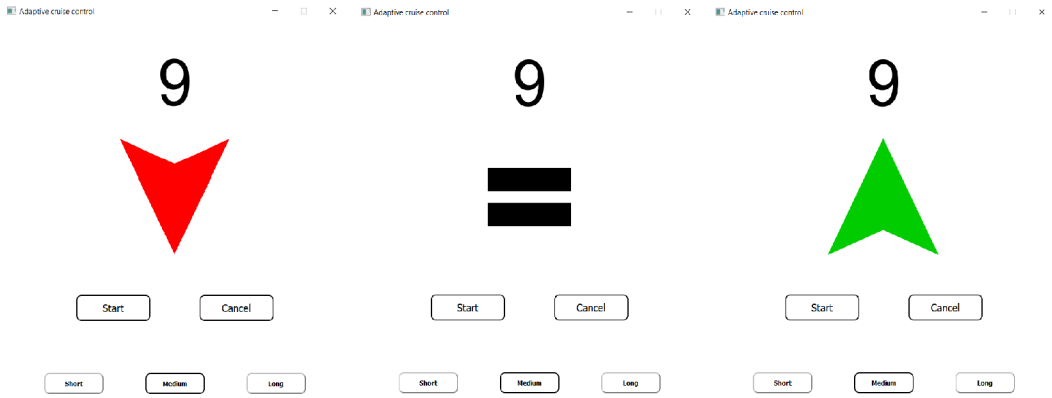
Ďalším prvkom, ktorý môže ovplyvniť presnosť údajov o rýchlosti vozidla, je prípadný rozdiel rozmerov kolies s použitou zimnou sadou pneumatík alebo sadou určenou na leto. Vzhľadom na fakt, že testy zisťujúce odchýlku rýchlostí získaných z riadiacej jednotky respektíve systému GPS, boli robené v čase kedy vozidlo používalo zimné pneumatiky, je treba vypočítať aj rozdiel rýchlostí medzi sadami pneumatík. Pomocou vzorcov dostupných zo zdroja[3] boli vypočítané polomery kolies s použitím oboch sád a následný rozdiel rýchlostí. Sada zimných pneumatík má rozmery: $195mm$ šírka pneumatiky, 65 percentuálna výška pneumatiky vzhľadom na šírku pneumatiky a 15" priemer disku. Z týchto hodnôt bol určený polomer kolesa $R = r + v$, súčtom polomeru disku $r = \frac{priemer\,disku * pocet\,palcov\,v\,mm}{2}$ s výškou pneumatiky $v = sirka\,pneu * profil$. Polomer kolesa so zimnými pneumatikami je $315.95mm$. Rovnakým spôsobom bol vypočítaný polomer kolies pre sadu letných pneumatík s rozmermi: $205mm$ šírka pneumatiky, 55 percentuálna výška pneumatiky vzhľadom na šírku pneumatiky a 16" priemer disku. Kolesa so sadou letných pneumatík majú polomer $317.25mm$. Následne bol dopočítaný percentuálny rozdiel rýchlostí pri rovnakých otáčkach motora $\Delta = (\frac{R_z}{R_l} - 1) * 100$, kde R_z je polomer kolies so zimnými pneumatikami a R_l je polomer kolies s letnými pneumatikami. Z výsledného rozdielu rýchlostí 0.41% vychádza,

že rozdiel rýchlostí pri maximálnej možnej povolenej rýchlosti na Slovensku $130km/h$ by bol $0.53km/h$. Keďže program VCDS-Lite udáva rýchlosť ako celé číslo, rozhodol som sa tento rozdiel rýchlosti nezohľadniť.

4.3 GUI

Grafické užívateľské rozhranie môžeme rozdeliť do štyroch častí (obrázok 4.4). V prvej časti, ktorá sa nachádza navrchu, je zobrazovaná aktuálna rýchlosť vozidla. Táto rýchlosť je zobrazovaná počas celého času, počas ktorého je aplikácia spustená.

Pod rýchlosťou je zobrazená aktuálna inštrukcia pre vodiča vozidla. V prípade, že adaptívny tempomat nie je aktívny, nie je zobrazená žiadna inštrukcia. Akonáhle je adaptívny tempomat aktívny, aplikácia ukazuje jednu zo štyroch inštrukcií. Ak by vozidlo prekročilo nastavenú rýchlosť na udržiavanie alebo by sa priblížilo k vozidlu, ktoré nasleduje bližšie ako by bolo bezpečné, zobrazí sa vodičovi červená šípka smerujúca dole, vyžadujúca brzdenie. Počas udržiavania bezpečnej vzdialenosti od vozidla, ktoré je nasledované alebo nastavenej rýchlosti, aplikácia zobrazí čierny znak rovnosti. V situáciách, kedy vozidlo ide pomalšie ako má nastavenú rýchlosť na udržiavanie a premávka pred ním dovoľuje ísť rýchlejšie, aplikácia zobrazí zelenú šípku nahor.



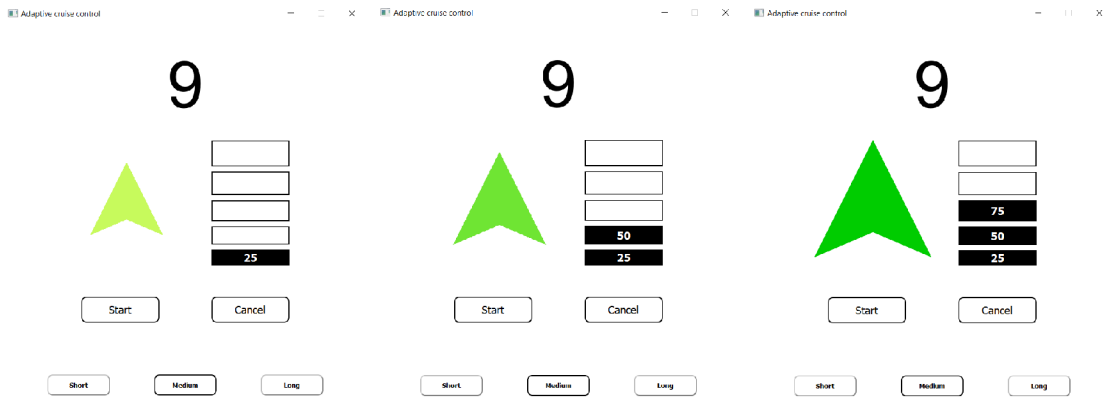
Obr. 4.4: Ukážka zobrazenia aktuálnej inštrukcie pre vodiča vozidla.

V ďalšej časti, umiestnenej pod inštrukciou, sa nachádzajú tlačidlá na aktivovanie a deaktivovanie adaptívneho tempomatu. Tlačidlo `Start` slúži na aktivovanie adaptívneho tempomatu. Po jeho opakovanom stlačení sa zmení rýchlosť, ktorú má adaptívny tempomat udržiavať. Tlačidlo `Cancel` slúži na deaktivovanie adaptívneho tempomatu a po jeho stlačení aplikácia prestane zobrazovať inštrukciu pre vodiča.

V poslednej časti sa nachádzajú tri tlačidlá, ktorými sa nastavuje vzdialenosť, ktorú má vozidlo udržiavať od vozidla pred sebou. Vodič má na výber z troch možností, ktoré reprezentujú časový rozdiel odstupu od vozidla na pred sebou. Tieto hodnoty boli vybraté s inšpiráciou hodnôt vozidiel značky Audi [2]. Najmenší časový rozostup medzi vozidlami je, rovnako ako u vozidiel značky Audi [2], 1 sekunda. Stredný časový rozostup a zároveň rozostup, ktorý je predom nastavený, sú 2 sekundy. Tento časový rozostup je upravená hodnota odporúčaného časového rozostupu pre vozidlá značky Audi [2]. Najväčší časový rozostup, 3 sekundy, bol pridaný pre vodičov s opatrným štýlom jazdy.

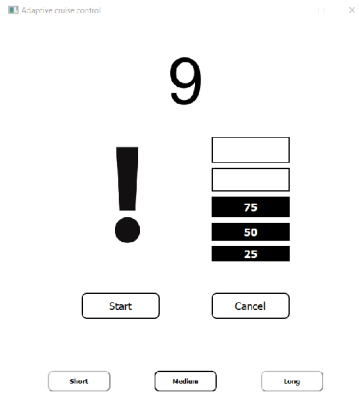
Po niekoľkých jazdách v premávke sa však ukázalo, že takto jednoducho riešené inštrukcie síce fungujú správne, ale jazda podľa nich je veľmi kostrbatá. Rozmedzie, kedy aplikácia ukazuje znak rovnosti, bolo 2 metre, a udržať sa v ňom bolo náročné. K udržiavaniu sa v bezpečnej vzdialenosti nenapomáha moc ani rovnaká veľkosť inštrukcie brzdenia a pridávania pri akejkoľvek vzdialenosti od vozidla pred sebou.

Kvôli problémom spomenutých vyššie bolo rozmedzie zobrazovania inštrukcie udržiavania vzdialenosti zväčšené na 8 metrov, a to tak, že 6 metrov sa pridalo k nastavenej vzdialenosti a 2 metre vo vnútri nastavenej vzdialenosti. Inštrukcie pre pridávanie a uberanie rýchlosti boli upravené tak, že pri približovaní sa do vzdialenosti menšej ako 20 metrov od nastavených hraníc, pre inštrukciu udržiavania vzdialenosti, sa tieto dve inštrukcie postupne zmenšujú a to až do polovičnej veľkosti pôvodnej inštrukcie. Pre lepšie zvýraznenie inštrukcie sa taktiež menia aj farebné odtiene inštrukcií označujúcich zrýchľovanie a brzdenie (obrázok 4.5).



Obr. 4.5: Ukážka zobrazenia zmeny veľkosti inštrukcie pri približovaní sa do požadovanej vzdialenosti.

Pri niektorých jazdách aj napriek upraveným inštrukciám dochádzalo k situáciám, kedy sa vozidlo dostalo príliš blízko k vozidlu pred sebou. K takýmto situáciám dochádzalo v prípade, kedy bol medzi vozidlami veľký rýchlostný rozdiel a pri nedostatočne silnom brzdení sa tak dostalo vozidlo príliš blízko. Tento problém bol vyriešený pridaním ďalšej inštrukcie, ktorá vodiča upozorňuje na nebezpečenstvo pred ním. Táto inštrukcia je reprezentovaná čiernym znakom výkričníka a zobrazí sa za podmienok, že rýchlostný rozdiel medzi vozidlami je väčší ako $14km/h$ a súčet vzdialenosti medzi vozidlami a ich rýchlostný rozdiel je menší ako osemnásť násobok absolútnej hodnoty rýchlostného rozdielu medzi vozidlami. Správna reakcia na túto inštrukciu je len povolenie plynového pedála, keďže vzdialenosť medzi vozidlami je ešte väčšia ako nastavená vzdialenosť na udržiavanie a spomalením túto vzdialenosť vodič neprejde, len sa k nej pomaly priblíži a tým zvýši plynulosť jazdy.



Obr. 4.6: Ukážka zobrazenia inštrukcie pri veľmi rýchlom približovaní sa k prekážke a ukazovateľa rozostupu od vozidla pred sebou.

Nakoniec bol ešte pridaný ukazovateľ vzdialenosti od vozidla pred sebou (obrázok 4.6). Ukazovateľ je rozdelený na päť častí, z ktorej každá reprezentuje určitý úsek vzdialenosti od vozidla na nasledovanie. Taktiež sa v každej časti nachádza aj hodnota najväčšej vzdialenosti prislúchajúcej danej časti. V prípade, že pred vozidlom nie je žiadne iné vozidlo, tento ukazovateľ je plne vyfarbený ako keby bol odstup od vozidla pred sebou najväčší. Ak je pred vozidlom iné vozidlo, tak počet vyfarbených častí závisí podľa vzdialenosti medzi vozidlami.

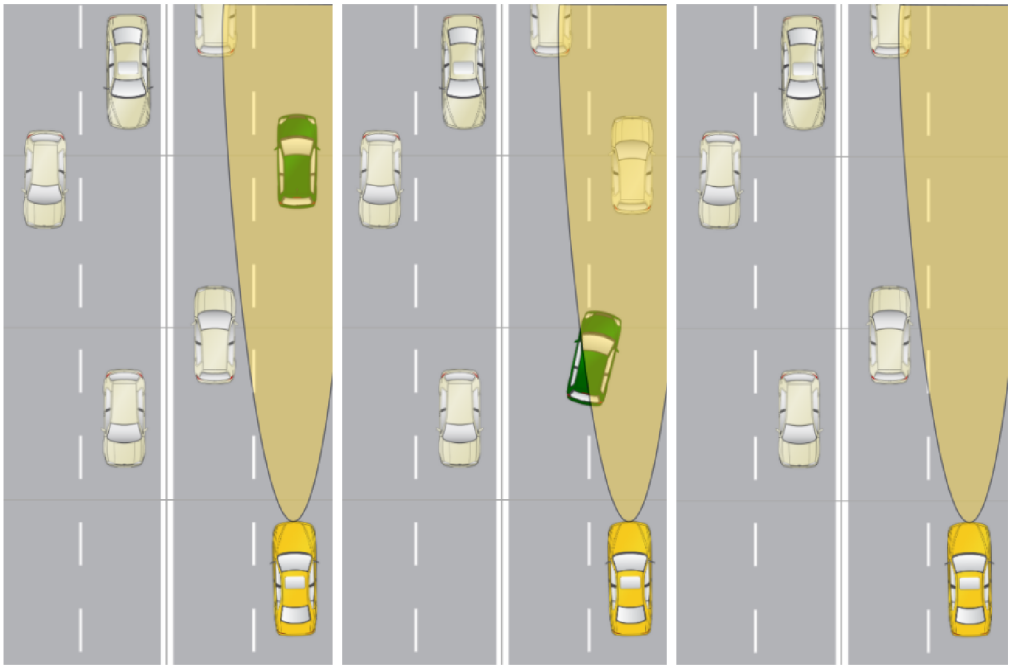
4.4 Adaptívny tempomat

Na to, aby adaptívny tempomat mohol fungovať, musí minimálne poznať svoju rýchlosť a premávku pred sebou. V prvotnom návrhu (obrázok 4.8), pomocou dát z Medium Range Radar dema, popísaného v podkapitole 4.1, si adaptívny tempomat udržiaval informácie ohľadom premávky pred sebou len na vzdialenosť, vypočítanú z rýchlosti vozidla, získanú z programu VCDS-lite, popísaného v podkapitole 4.2 a veľkosti odstupu. Z týchto objektov boli následne vypočítaním reálnej rýchlosti objektov, zo súčtu rýchlosti vozidla a rýchlosti objektu, vyfiltrované stacionárne objekty ako napríklad zvodidlá, dopravné značenie alebo značenie o stave vozovky a ovzdušia. Z takto vyfiltrovaných dát bol následne aktualizovaný objekt na nasledovanie a vybratý jeho prípadný náhradník. Na to, aby mohol byť objekt vybratý ako objekt na nasledovanie, musel splňovať tri podmienky. Prvou podmienkou bolo, aby bol evidovaný vo vyfiltrovanom priestore minimálne pól sekundy. Druhou podmienkou bolo, aby súradnice objektu patrili funkcii (4.1).

$$y = 2x^2 \tag{4.1}$$

V tretej podmienke bol vybratý najbližší objekt splňujúci predchádzajúce podmienky. Po aktualizovaní vozidla na nasledovanie a výbere prípadného nového vozidla na nasledovanie, boli ešte tieto dva objekty porovnávané medzi sebou. Ak by aktuálne vozidlo na nasledovanie zmizlo z priestoru pred vozidlom, tak by bol nový objekt automaticky nastavený ako vozidlo na nasledovanie. Podobne ako v predchádzajúcom prípade, ak by sa nenašiel nový objekt na nasledovanie, tak by aktuálny objekt zostal aj naďalej ako vozidlo na nasledovanie. Ak by bolo aktuálne vozidlo na nasledovanie aktualizované a zároveň by bol nájdený nový objekt, tak by o výbere vozidla na nasledovanie rozhodovala x súradnica

objektov. Za podmienok, že absolútna hodnota súradnice na osi x nového objektu je väčšia ako 3 metre, a aktuálneho objektu nie je väčšia ako 3 metre alebo absolútne hodnoty súradníc x oboch objektov sú väčšie ako 3 metre, tak by aktuálny objekt zostal aj naďalej ako vozidlo na nasledovanie. Ak by boli súradnice oboch objektov menšie ako 3 metre, tak by bol vybratý ako nový objekt na nasledovanie bližší objekt z porovnávaných. V ostatnom prípade by bol zmenený objekt na nasledovanie na náhradníka, viď obrázok 4.7.



Obr. 4.7: Ukážka návrhu riešenia výberu vozidla na nasledovanie pomocou kvadratickej funkcie.

Po vybratí vozidla na nasledovanie bola následne určená jeho vzdialenosť súčtom vzdialenosti medzi objektmi a ich rýchlostným rozdielom. Táto vzdialenosť bola porovnaná s bezpečnou vzdialenosťou medzi objektmi a na základe toho vybraná nasledujúca inštrukcia pre vodiča. Za predpokladu, že nebol detekovaný žiadny objekt alebo vybratý objekt sa pohybuje ďaleko pred bezpečnou zónou adaptívny tempomat sa správa ako obyčajný tempomat a nasledujúca inštrukcia je vyhodnotená len na základe rýchlosti vozidla.

Aj keď takýto návrh poskytuje, rýchlu reakciu na vozidla preradzujúce sa do jazdného pruhu vozidla s adaptívnym tempomatom, objavilo sa aj veľa chýb. Najväčší problém návrhu bol spôsobený filtrovaním objektov, ktoré sa nachádzali za hranicou bezpečnej vzdialenosti. Toto spôsobovalo to, že vozidlo sa pri väčšom rýchlostnom rozdiele dostávalo príliš blízko k vozidlu na nasledovanie. Ďalší problém vznikol rozličnosťou šírok vozoviek. Tým sa stávalo, že vozidlo na nasledovanie nebolo vybraté na nasledovanie, aj keď tak malo byť. Taktiež vznikal problém pri vyberaní vozidla na nasledovanie v prípade, že sa vozidlo približovalo k pomalšie idúcemu vozidlu v zákrute.

Prvou zmenou bolo odstránenie filtrovania dát z dema na vzdialenosť určenú rýchlosťou vozidla a nastaveným časovým rozostupom. Táto zmena výrazne zvýšila plynulosť jazdy a vo väčšine prípadov zabraňovala vozidlu sa dostať až za hranicu bezpečnej vzdialenosti. Taktiež bol zmenený výpočet bezpečnej vzdialenosti. Tá je nastavovaná podľa súčinu rýchlosti vozidla na nasledovanie a zvoleného časového rozostupu od tohto vozidla.

Spôsob aktualizovania okolia pred vozidlom bol tiež upravený. Každému detekovanému objektu sa zvyšovala hodnota záznamu len do hodnoty 50. Kvôli rýchlosti reakcie na zmenu a počet záznamov sa zmenšovala postupne, čo napomáhalo udržať vozidlo na nasledovanie po prejazde dilatačnými škárami alebo na horizonte.

Ďalšia zmena sa týkala najmä jazdy po mestských okruhoch, kedy sú vozidla vzdialené od seba len v malých vzdialenostiach a dynamika premávky je vysoká. Táto zmena upravuje výber vozidla na nasledovanie takým spôsobom, že do vzdialenosti 30 metrov od vozidla s adaptívnym tempomatom bude môcť byť vybratý ako objekt na nasledovanie len, ak je typu sledovaný objekt alebo bod výrazne pomalší od vozidla s adaptívnym tempomatom.

Funkcia pre výber vozidla na nasledovanie bola zmenená s predpokladom, že pri vyšších rýchlostiach sú väčšinou vozovky širšie, na funkciu (4.2), kde x a y sú súradnice objektu a v je rýchlosť objektu.

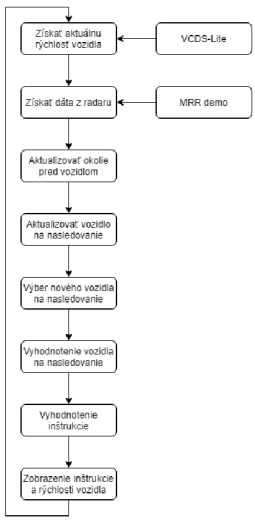
$$y = \frac{50x^2}{\frac{v}{2}} \tag{4.2}$$

Takýto charakter funkcie taktiež napomáhal lepšiemu vybratiu vozidla na nasledovanie v prípade, že vozidlo išlo do zákruty.

Zmeny pri porovnávaní aktuálneho vozidla na nasledovanie a prípadného vozidla na nasledovanie boli spravené za účelom zvýhodnenia aktuálneho vozidla. A to tak, že ak nový vybratý objekt bude detekovaný dlhšie ako 3 sekundy a zároveň bude strednejšie pred vozidlom s adaptívnym tempomatom ako aktuálne vozidlo na nasledovanie, bude vybratý bližší objekt k vozidlu. V ostatných prípadoch bude preferované aktuálne vozidlo na nasledovanie.

Python

Pre túto prácu bol vybratý programovací jazyk Python. Python je narozdiel od jazyka uvedeného v zadaní (Matlab), voľne dostupný. Taktiež obsahuje knižnice, ktoré zjednodušia komunikáciu s aplikáciami tretích strán, ako napríklad knižnica piwinauto[2]. S týmto programovacím jazykom už mám skúsenosť.



Obr. 4.8: Bloková schéma návrhu implementácie.

[2] https://pywinauto.readthedocs.io/en/latest/

Kapitola 5

Implementácia

V tejto kapitole je popísaná implementácia návrhu riešenia adaptívneho tempomatu pomocou opisu funkcie jednotlivých tried a komunikácie medzi nimi (obrázok 5.2).

5.1 Uart

Trieda Uart je využívaná na vytvorenie spojenia medzi počítačom a radarom. Jej atribútmi sú porty `CLI port`, cez ktorý bude počítač spúšťať Medium Range Radar demo (popísaný v podkapitole 4.1) a `DATA port`, cez ktorý bude počítač čítať dáta posielané z radaru. Na vytvorenie spojenia s radarom bola použitá metóda `Serial`, z knižnice `serial`, ktorej boli nastavené argumenty názov portu a prenosová rýchlosť[1]. Keďže konfigurácia radaru je pevne stanovená v deme od výrobcu, iba dva konfiguračné príkazy, ktoré radar prijíma, je možné zasielať. Príkaz `sensorStart` je posielaný pri vytvorení spojenia a zároveň aj spúšťa demo. Druhý príkaz, ktorý je možné posielať, `advFrameConfig`, nie je posielaný.

5.2 Vcds

Trieda Vcds bola využívaná na získavanie aktuálnej rýchlosti vozidla z aplikácie VCDS-Lite, ktorá je bližšie popísaná v podkapitole 4.2.

Na spojenie s aplikáciou VCDS-Lite je využitá metóda `Application.connect()` knižnice `pywinauto`, cez ktorú sa program na základe názvu aplikácie k danej aplikácii pripojí a následne v `top_window().descendants()` vyhľadá okno rýchlosti vozidla, na ktoré sa bude odkazovať pri získavaní rýchlosti vozidla[2].

Samotné získavanie hodnoty rýchlosti zabezpečuje metóda `get_car_velocity(self)`, ktorá hodnotu rýchlosti upravuje podľa odchýlok nameraných pri porovnávaní rýchlosti z VCDS-Lite a rýchlosti udávanej pomocou GPS.

5.3 Triedy reprezentujúce dáta z radaru

Dáta získané z Medium Range Radar dema, popísaného v podkapitole 4.1, sú uchovávané v jednotlivých triedach podľa typu detekovaného objektu. Typy objektov sú reprezentované pomocou výpočtovej množiny[3] `TYPE`.

[1] https://pythonhosted.org/pyserial/
[2] https://pywinauto.readthedocs.io/en/latest/
[3] https://docs.python.org/3/library/enum.html

Pre detekované objekty typu `bod` je vytvorená trieda `Point` s atribútmi `object_type`, kde je uložená hodnota výpočtovej množiny daného typu objektu, `doppler`, reprezentujúci hodnotu Dopplerovho efektu, `peak`, reprezentujúci vrchol odrazeného signálu, `x`, reprezentujúci pozíciu objektu na osi x,`y`, reprezentujúci pozíciu objektu na osi y a `z`, reprezentujúci pozíciu objektu na osi z.

Pre detekované objekty typu `sledovaný objekt` je vytvorená trieda `Tracked` s atributmi `object_type`, kde je uložená hodnota výpočtovej množiny daného typu objektu, `x`, reprezentujúci pozíciu objektu na osi x ,`y`, reprezentujúci pozíciu objektu na osi y, `velocity_x`, reprezentujúci rýchlosť objektu v smere osi x ,`velocity_y`, reprezentujúci rýchlosť objektu v smere osi y, `cluster_size_x`, reprezentujúci veľkosť zhluku na osi x a `cluster_size_y`, reprezentujúci veľkosť zhluku na osi y.

5.4 Frame

Táto trieda je využívaná na čítanie a spracovanie dát posielaných Medium Range Radar demom, popísaným v podkapitole 4.1. Trieda `Frame` používa spojenie nadviazané triedou `Uart` 5.1 na prijímanie dát posielaných radarom, z ktorých následne vytvorí zoznam s detekovanými objektmi. Detekované objekty sú reprezentované triedami popísanými v podkapitole Dáta 5.3. Tento zoznam je ďalej spracovaný v triede `Acc` 5.5.

Hlavnou metódou triedy `Frame` je metóda `read_and_process_data(self, uart_data)`. Metóda najskôr prečíta dáta zasielané z radaru, pričom skontroluje či je veľkosť prijatého rámca validná. Ďalej je potrebné nájsť začiatok rámcov a jednotlivé rámce od seba oddeliť. Po tom, ako sú rámce od seba oddelené, je spracovaná ich hlavička a rozlíšené od seba typy deketovaných objektov podľa informácií z hlavičky. Následne metóda `process_tvls(self, number_of_detected_objects_and_tvls, tvls)` spracuje a vytvorí zoznam s objektmi pripravený na ďalšie spracovanie. Spracovanie rámcov prebieha, na základe informácií o počte detekovaných typov objektov. Typy detekovaných objektov sú od seba oddelené pomocou metódy `cut_tvls(self, tvl, num)` a následne metóda `create_objects(self, string_object, object_type)` rozdelí jednotlivé objekty od seba a vytvorí zoznam objektov rovnakého typu. Hodnoty jednotlivých atribútov objektov sú získavané pomocou metódy `def get_attributes(self, string, num_of_attrs, starting_pos)`, ktorej riešenie bolo inšpirované riešením dema[4] od spoločnosti Texas Instruments.

5.5 Acc

Trieda `Acc` je využívaná na vyhodnotenie novej inštrukcie pre vodiča vozidla. Na to, aby mohla vyhodnotiť novú inštrukciu, trieda využíva informácie o okolí pred vozidlom, ziskané pomocou triedy `Frame` 5.4, aktuálnu rýchlosť vozidla získanú z triedy `Vcds` 5.2 a informácie o nastavení adaptívneho tempomatu získané z triedy `Worker` 5.6.

Prácu triedy `Acc` by sme mohli rozdeliť do štyroch činností, a to filtrovanie stacionárnych objektov, aktualizovanie okolia, výber vozidla na nasledovanie a vyhodnotenie novej inštrukcie (obrázok 5.1). Všetky štyri činnosti sú postupne vykonávané v metóde `evaluate(self, objects, velocity, set_velocity, range_to_keep, leading_vehicle, cars)`.

[4] https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=APkoqQrDmfEOWhcyZY68WA__AocYeEd__LATEST

Obr. 5.1: Bloková schéma práce triedy `Acc`.

Prvou činnosťou je filtrovanie nových detekovaných objektov a je vykonávaná metódou `sort_by_velocity(objects, velocity)`. Táto metóda najskôr vyfiltruje objekty, ktoré sa javia ďalej ako je dosah radaru alebo obsahujú zápornú hodnotu na osi y. Následne sú filtrované stacionárne objekty a to vypočítaním ich skutočnej rýchlosti súčtom rýchlosti vozidla s hodnotou Dopplerovho efektu objektu. Taktiež sú filtrované objekty s výrazne väčšou rýchlosťou, ako je rýchlosť vozidla. Potom, ako sú odfiltrované objekty, podľa rýchlosti prebehne filter objektov, podľa ich výšky voči vozidlu s radarom. Tento filter prebieha za účelom odfiltrovania dopravného značenia umiestneného nad vozovkou.

Ďalšou činnosťou je aktualizovanie okolia pred vozidlom. Aktualizovanie prebieha v metóde `update_threats(self, threats, new_threats)`. Táto metóda hľadá zhodné objekty medzi aktuálnym a novým okolím. V prípade, že bol nájdený zhodný objekt, hodnota záznamu daného objektu sa zvýši, ak nie je väčšia ako 50. Ak sa nenájde zhoda objektu z aktuálneho okolia v novom okolí, hodnota záznamu objektu klesne o jeden záznam. Ostatné novo-detekované objekty bez zhody sa pridajú do okolia s hodnotou záznamu rovnej 1.

Po aktualizovaní okolia sa následne program pokúsi aktualizovať vozidlo na nasledovanie, ak je priradené. Tento proces prebieha v dvoch krokoch, kedy v prvom kroku je striktne vyhľadávaný objekt rovnakého typu v okolí jedného metra od priradeného objektu. Ak sa žiadny objekt nenájde, tak v druhom pokuse môže byť objekt aktualizovaný za objekt rozdielneho typu a okruh je zväčšený na 2,5 metra. Potom, ako prebehne aktualizácia aktuálneho vozidla na nasledovanie, je vyhľadaný možný nový objekt vhodný na nasledovanie. Výber nového objektu na nasledovanie je určením najbližšieho objektu spĺňajúceho dve podmienky. Súradnice objektu patria do funkcie (4.2), kde x a y sú súradnice objektu a v je rýchlosť objektu, a ak počet záznamov objektu je väčší ako 3. Z týchto dvoch objektov je následne vyhodnotený objekt na nasledovanie, pričom aktuálny objekt na nasledovanie je vybratý okrem situácie, že nový objekt je viac ako pól metra bližšie na stred voči vozidlu s radarom a dĺžka detekovania objektu sú minimálne tri sekundy.

Poslednou činnosťou je vyhodnotenie nasledujúcej inštrukcie pre vodiča vozidla. V metóde `determine_next_instruction(self, velocity, set_velocity, range_to_keep, leading_vehicle, cars)` sa najskôr zisťuje podmienka nezávislá na okolí pred vozidlom, či vozidlo nejde rýchlejšie ako má nastavenú rýchlosť. Následne v prípade, že nie je priradané žiadne vozidlo na nasledovanie, adaptívny tempomat vyhodnotí nasledujúci inštrukciu na základe rozdielu medzi aktuálnou rýchlosťou vozidla a nastavenou rýchlosťou na udržiavanie. V prípade, že je priradené vozidlo na nasledovanie, nasledujúcu inštrukciu vyhodnotí metóda `count_instruction(self, leading_vehicle, threat, velocity, range_to_keep)`. Táto metóda vyhodnocuje inštrukciu súčtom rýchlostného rozdielu medzi vozidlami s rozdielom medzi aktuálnou vzdialenosťou medzi vozidlami a vypočítanej bezpečnej vzdialenosti.

5.6 Worker

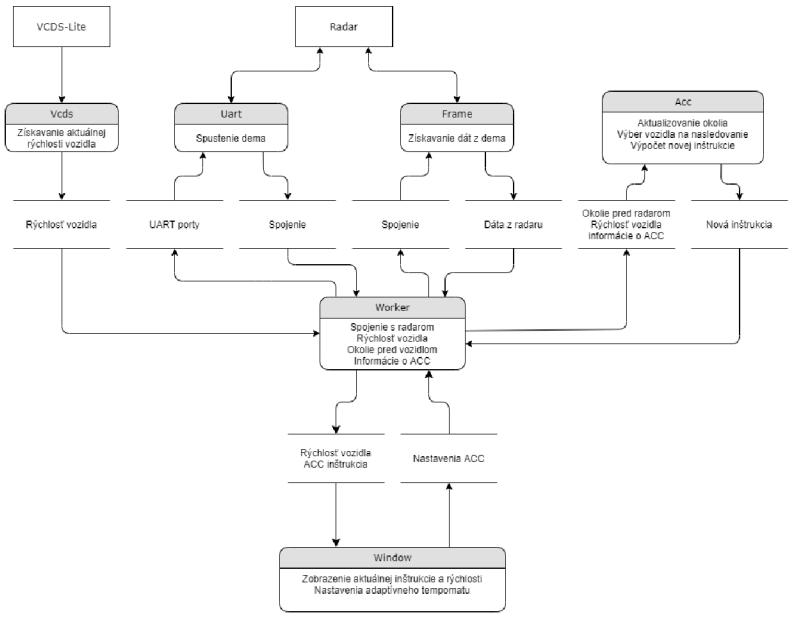
Trieda `Worker` zabezpečuje prácu adaptívneho tempomatu. Uchováva v sebe aktuálne nastavenia tempomatu a aktualizuje informácie o rýchlosti vozidla pomocou triedy `Vcds` 5.2 a informácie o okolí a nasledujúcej inštrukcii pomocou triedy `Acc` 5.5. Aktualizované informácie o adaptívnom tempomate ďalej posiela triede `Window` 5.7 na zobrazenie.

Hlavnou metódou triedy `Worker` je metóda `run(self)`. Táto metóda obsahuje cyklus, ktorý postupne aktualizuje informácie ohľadom adaptívneho tempomatu. Najskôr aktualizuje aktuálnu rýchlosť vozidla. Následne, ak je adaptívny tempomat aktívny, tak vyhodnotí novú inštrukciu pre vodiča a aktualizuje prostredie pred vozidlom, ako aj nastavené vozidlo na nasledovanie. Informácie o rýchlosti vozidla a nasledujúcej inštrukcii potom odošle grafickému užívateľskému rozhraniu na zobrazenie.

5.7 Window

Trieda `Window` slúži na zobrazenie aktuálnej rýchlosti vozidla a inštrukcie pre vodiča. Taktiež slúži na aktivovanie a deaktivovanie systému adaptívneho tempomatu a tiež umožňuje nastavovanie vzdialenosti, ktorú bude systém udržiavať od vozidla pre sebou.

Trieda `Window` je vytvorená ako potomok triedy `QMainWindow` z knižnice `PyQt5`[5]. Vďaka tejto knižnici je od seba oddelené zobrazovanie aktuálnych informácií od vyhodnocovania nových informácií. Toto vyhodnocovanie sa deje v triede `Worker`, ktorá je vložená do triedy `Window` ako osobitný proces `Qthread`[6]. Tieto dva procesy medzi sebou komunikujú pomocou signálov `pyqtSingal`[7], taktiež z knižnice `PyQt5`, kedy trieda `Worker` po vyhodnotení novej inštrukcie odošle signál s aktuálnou rýchlosťou a inštrukciou triede `Window` na zobrazenie.



Obr. 5.2: Diagram funkcie tried a komunikácie medzi nimi.

[5] https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/
[6] https://realpython.com/python-pyqt-qthread/
[7] https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/signals_slots.html

Kapitola 6

Testovanie

V tejto kapitole je popísaný spôsob uchytenia radaru k prednému nárazníku vozidla (obrázok 6.1) a podrobne popísané správanie sa adaptívneho tempomatu v rôznych situáciach na štyroch hlavných typoch vozovky.

Uchytenie radaru a externého zdroja k vozidlu

Radar bol kvôli bezpečnosti uložený v plastovej krabici, určenej na prenos obedov. Táto krabica je spojená s hliníkovou platňou, ktorá sa zasúvala za kryt evidenčného čísla vozidla. Hliníková platňa a kryt evidenčného čísla boli spolu uchytené tak, aby sa krabica nemohla hýbať. Káble k externému zdroju a počítaču, boli vedené dierou v zadnej časti krabice a následne popod prednú kapotu vozidla, odkiaľ kábel bol k počítaču vedený cez spoj medzi karosériou a pravými prednými dverami. Externý zdroj bol uchytený v priestore pod kapotou vozidla plastovými sťahovacími páskami o hrdlo nádrže na vodu do ostrekovačov.

Obr. 6.1: Ukážka uchytenia radaru a externého zdroja na vozidle.

6.1 Testy na mestských okruhoch

Testovanie na mestských okruhoch, s množstvom podnetov na malom priestore, predstavovalo pre adaptívny tempomat, ako aj radar samotný, najväčšiu výzvu. V tomto prípade bolo treba odfiltrovať dopravné značenie, mestské osvetlenie, alebo aj vozidlá odstavené po krajoch vozovky. Adaptívny tempomat si aj v takýchto podmienkach viedol relatívne spoľahlivo a nevyhodnotil žiadny zo stacionárnych objektov, ako vozidlo na nasledovanie. Ďalším z prípadov, kedy si adaptívny tempomat viedol dobre, boli situácie, v ktorých vozidlo nasledovalo vozidlo pred sebou. V takýchto prípadoch, aj na rovnej ceste (obrázok 6.2), alebo aj v miernych zákrutách, adaptívny tempomat nezmenil vozidlo na nasledovanie za vozidlo vo vedľajšom jazdnom pruhu v rovnakom smere. Taktiež po ostrých zákrutách, kedy sa vozidlo na nasledovanie stratilo z dohľadu, bolo rýchlo znovu vyhodnotené, ako vozidlo na nasledovanie. V situáciach, kedy nebolo pred vozidlom v rovnakom pruhu žiadne vozidlo, adaptívny tempomat niekedy chybne vyhodnotil ako vozidlo na nasledovanie vozidlá z vedľajšieho pruhu idúce v rovnakom smere. K tomuto dochádzalo najčastejšie v miernych zákrutách, kedy sa vozidlo z vedľajšieho pruhu na chvíľu dostalo priamo pred vozidlo s adaptívnym tempomatom. Ďalším z prípadov, kedy nebolo dobre vyhodnotené vozidlo na nasledovanie, boli situácie, kedy vozidlo v súbežnom pruhu malo výrazne nižšiu rýchlosť, ako vozidlo s adaptívnym tempomatom. Takéto situácie boli sčasti obmedzené typom objektu, ktorý sa môže stať objektom na nasledovanie v blízkej vzdialenosti. Avšak, kvôli rýchlemu približovaniu k vozidlu pred sebou na okresných cestách boli pri veľkých rýchlostných rozdieloch povolené všetky typy objektu a tým pádom vznikali situácie, kedy na mestských okruhoch adaptívny tempomat chybne určil ako vozidlo na nasledovanie výrazne pomalšie vozidlo zo súbežného pruhu.

Obr. 6.2: Ukážka správneho vyhodnotenia vozidla na nasledovanie.

6.2 Testy na mestských obchvatoch

Testovanie na mestských obchvatoch bolo priaznivejšie pre adaptívny tempomat, ako testovanie na mestských okruhoch. Tomuto napomáhali hlavne širšie jazdné pruhy. Na tejto

komunikácii bolo potrebné odfiltrovať hlavne zvodidlá a veľké dopravné značenia priamo nad vozovkou. Adaptívny tempomat vedel rýchlo a dobre reagovať v prípadoch, kedy sa vozidlo priraďovalo, alebo sa stratilo z dohľadu na určitý čas za horizont. Občas sa stávalo, že sa v zákrute vyhodnotilo vozidlo jazdiace v súbežnom pruhu, ako vozidlo na nasledovanie. Tomuto napomáhali hlavne širšie jazdné pruhy, ako aj rovnejší profil zákrut oproti mestským okruhom. Treba ale povedať, že takéto situácie nezmizli úplne, ale dochádzalo k ním aj naďalej pri ostrejších zákrutách. Ďalším z prípadov, kedy pomohli širšie pruhy boli situácie s veľkým rýchlostným rozdielom medzi vozidlom s adaptívnym tempomatom a vozidlom jazdiacim v súbežnom pruhu. K chybným priradeniam, pri vyhodnocovaní vhodnosti objektu na nasledovanie v blízkej vzdialenosti, dochádzalo výrazne menej, vďaka širším pruhom a kontrole typu objektov, ako tomu bolo na mestských okruhoch. Testovanie na mestských obchvatoch však ukázalo aj chybné vyhodnocovanie, ktoré sa na mestských okruhoch nedialo. Boli to situácie, kedy sa vybraté vozidlo na nasledovanie preradilo z jazdného pruhu do vedľajšieho, a pred vozidlom s adaptívnym tempomatom nebolo žiadne vozidlo. V takýchto prípadoch bolo preradené vozidlo chybne stále považované za vozidlo na nasledovanie. Adaptívny tempomat toto vyhodnotenie nezrušil, lebo predpokladal, že vozidlo ide do zákruty.

Obr. 6.3: Ukážka vyhodnotenia nebezpečenstva pred vozidlom s adaptívnym tempomatom.

6.3 Testy na okresných cestách

Adaptívny tempomat najlepšie pracoval práve na okresných cestách. Dôvodom je rozhodne fakt, že okresné cesty majú len jeden pruh smerujúci daným smerom a nevznikali problémové situácie popisované vyššie na komunikáciach s viacerými jazdnými pruhmi v rovnakom smere. Adaptívny tempomat dostatočne rýchlo priraďoval vozidlá na nasledovanie, prípadne rýchlo reagoval a zrušil ich nasledovanie v prípadoch, kedy vozidla odbočili. Taktiež dokázal rýchlo reagovať pri jazde cez horizont, alebo pri rôznych iných nerovnostiach vozovky. Vozidlo na nasledovanie bolo dobre udržiavané aj v ostrejších zákrutách. Avšak, aj na tomto type vozovky sa objavili problémy pri vyhodnocovaní. Prvým problémom bolo neskoré vyhodnocovanie vozidla na nasledovanie prvotného návrhu. Tento problém mal za následok,

že vozidlo s adaptívnym tempomatom sa dostalo až príliš blízko k vozidlu na nasledovanie. Tento problém bol opravený a viedol k pridaniu inštrukcie, kedy je vodič informovaný o nebezpečenstve pred sebou pri zistenom veľkom rýchlostnom rozdiele (obrázok 6.3). Druhým problémom bolo neskoré vyhodnocovanie vozidla na nasledovanie v ostrých zákrutách. V takomto prípade adaptívny tempomat vyhodnotil, že súradnice objektu nepatria funkcii (4.2) a teda vozidlo nie je v rovnakom jazdnom pruhu.

6.4 Testy na diaľničnej komunikácii

Testovanie na diaľničnej komunikácii bolo najdôležitejším z pohľadu adaptívneho tempomatu. Diaľnica ponúka najviac možností, ktoré môžu byť testované, a hlavne na takejto komunikácii bude tento systém najviac využívaný. Z pohľadu falošných podnetov sa tu dá stretnúť so zvodidlami, veľkým dopravným značením priamo nad vozovkou, ako aj bariérami na odhlučnenie po krajoch vozovky. Z pohľadu vozovky, diaľnice obsahujú najširšie jazdné pruhy a najmenší polomer zákrut v porovnaní s ostatnými typmi vozoviek, na ktorých bol adaptívny tempomat testovaný. Výsledky vyhodnocovania vozidla na nasledovanie boli podobné tým na mestských okruhoch. Adaptívny tempomat dokázal udržiavať vozidlo na nasledovanie vo všetkých zákrutách (obrázok 6.4). Avšak, to malo za následok to, že vozidlo na nasledovanie udržal, aj keď sa toto vozidlo preradilo do druhého jazdného pruhu a pred ním už nebolo žiadne iné vozidlo, tak ako tomu bolo pri testovaní na mestských okruhoch. Širšie vozovky, miernejšie zákruty a celkovo miernejší profil vozovky na diaľnici obmedzili situácie, kedy by sa vozidlo na nasledovanie stratilo z dohľadu, alebo obmedzili chybný výber vozidla na nasledovanie v prípade, že vozidlo v súbežnom pruhu ide do zákruty. Tiež pretrvával problém, odhalený už pri testovaní na mestských okruhoch, kedy bolo priradené, ako vozidlo na nasledovanie, vozidlo zo súbežného pruhu s výrazne nižšou rýchlosťou. Avšak, vďaka širším jazdným pruhom sa tieto situácie nestávali tak často, ako v meste. Vyhodnotenie nebezpečenstva pred vozidlom aj v tomto prípade fungovalo zodpovedne, ako tomu bolo na všetkých typoch komunikácií.

Obr. 6.4: Ukážka správneho vyhodnotenia vozidla na nasledovanie na diaľnici.

Kapitola 7

Záver

Zámerom práce bolo vytvoriť adaptívny tempomat, ktorý by na mieste senzora, vyhodnocujúceho okolie pred vozidlom, využíval mmWave radar. Za týmto účelom bola vytvorená aplikácia, ktorá v reálnom čase ukazuje vodičovi aktuálnu rýchlosť vozidla, inštrukciu pre udržiavanie nastavenej rýchlosti alebo odstupu od vozidla, ktoré nasleduje, ako aj prípadný odstup od daného vozidla.

Na začiatku práce bola rozobratá teória ohľadom adaptívnych tempomatov, ako aj rôznych technológií využitých na pozícii senzoru okolitej premávky. Následne bol popísaný spôsob detekovania objektov a vyhodnocovania ich vlastností radarmi od spoločnosti Texas Instruments. Ďalej bol popísaný návrh implementácie adaptívneho tempomatu, samotná implementácia a nakoniec testovanie na rôznych cestných komunikáciach.

Radar, ako senzor na vyhodnocovanie okolitej premávky pred vozidlom, sa javil spoľahlivo. Údaje z radaru boli presné aj pri premenlivom počasí, ktoré sa niekoľkokrát objavilo pri testovaní systému. Systém tak dokázal pracovať spoľahlivo a vo väčšine prípadov správne vyhodnocoval vozidlá pred sebou. Systém najlepšie pracoval na okresných cestách, kde sa nenachádzajú súbežné pruhy a vyhodnotenie je teda priamočiare. Na cestných komunikáciach, ktoré obsahujú dva a viac súbežných pruhov, systém pracoval relatívne spoľahlivo. Vo väčšine prípadov dokázal správne vyhodnotiť premávku pred ním, no stávali sa aj situácie, kedy bolo chybne vyhodnotené vozidlo zo súbežného pruhu ako vozidlo na nasledovanie. Kvôli takýmto situáciám je radar, podľa mňa, ako samostatný senzor na vyhodnocovanie okolia pred vozidlom nepostačujúci. Pridaním ďalšieho senzora by mohol byť počet chybných vyhodnotení podstatne menší.

V práci by sa mohlo pokračovať pridaním fúzie radarového signálu s kamerovým záznamom. Vďaka záberom z kamery by adaptívny tempomat vedel lepšie vyhodnotiť pozíciu vozidiel na komunikáciach s viacerými súbežnými pruhmi. Pri takomto spojení by dochádzalo výrazne menej-krát k chybnému vyhodnoteniu vozidla na nasledovanie v situáciach ako napríklad, kedy sa vozidlo idúce do zákruty javí ako vozidlo z rovnakého pruhu. Ďalšou z možných alternatív, ako by sa dalo na túto prácu nadviazať, je okrem fúzie radarového signálu s kamerovým záznamom pridanie aj informácií o profile vozovky zo systému GPS. Pri využití informácií z GPS by mohol systém prediktívne reagovať aj na profil vozovky, ako napríklad na zákruty vyžadujúce si zmenu rýchlosti, čo by značne zvyšovalo bezpečnosť systému, ako aj komfort pre vodiča.

Literatúra

[1] *Adaptive Cruise Control System Overview* [online]. U.S. Software System Safety Working Group, apríl 2005. Dostupné z: http://sunnyday.mit.edu/safety-club/workshop5/Adaptive_Cruise_Control_Sys_Overview.pdf.

[2] *Setting the distance* [online]. www.auditech.org, 2013 [cit. 2021-3-30]. Dostupné z: http://www.auditech.org/acont-901.html.

[3] *Ako vplýva veľkosť kolies na jazdné vlastnosti a prevádzku vozidla* [online]. Marcel Janco, marec 2015 [cit. 2021-3-30]. Dostupné z: http://www.autorubik.sk/clanky/ako-vplyva-velkost-kolies-na-jazdne-vlastnosti-prevadzku-vozidla/.

[4] *Angle Estimation* [online]. Texas Instruments, apríl 2017. Dostupné z: https://training.ti.com/intro-mmwave-sensing-fmcw-radars-module-5-angle-estimation?context=1128486-1139153-1128546.

[5] *Medium Range Radar 1.1 - Developer's Guide* - [online]. Texas Instruments, 2017 [cit. 2021-3-30]. Dostupné z: https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=APkoqQrDmfEOWhcyZY68WA__AocYeEd__LATEST.

[6] *The phase of IF signal* [online]. Texas Instruments, apríl 2017 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://training.ti.com/intro-mmwave-sensing-fmcw-radars-module-2-phase-if-signal?context=1128486-1139153-1128543.

[7] *Range Estimation* [online]. Texas Instruments, apríl 2017 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://training.ti.com/intro-mmwave-sensing-fmcw-radars-module-1-range-estimation?context=1128486-1139153-1128542.

[8] *Some System Design Topics* [online]. Texas Instruments, apríl 2017. Dostupné z: https://training.ti.com/intro-mmwave-sensing-fmcw-radars-module-4-some-system-design-topics?context=1128486-1139153-1128545.

[9] *VCDS-Lite* [online]. Ross-Tech LLC, 2017 [cit. 2021-3-30]. Dostupné z: https://www.ross-tech.com/vcds-lite/.

[10] *Velocity Estimation* [online]. Texas Instruments, apríl 2017 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://training.ti.com/intro-mmwave-sensing-fmcw-radars-module-3-velocity-estimation?context=1128486-1139153-1128544.

[11] *XWR1843 Evaluation Module (xWR1843BOOST) Single-Chip mmWave Sensing Solution* [online]. Texas Instruments, december 2018 [cit. 2021-4-14]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ug/spruim4b/spruim4b.pdf?ts=1618305707068&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FIWR1843.

[12] *AWR1843BOOST* [online]. Texas Instruments, 2021 [cit. 2021-4-6]. Dostupné z: https://www.ti.com/tool/AWR1843BOOST.

[13] *The Doppler Effect* [online]. Shmoop University Inc, 2021 [cit. 2021-3-30]. Dostupné z: https://www.shmoop.com/study-guides/physics/waves/doppler-effect.

[14] Anil Mani, J. N. M. Y. a Johnson, B. *Introduction to the DSP Subsystem in the IWR6843* [online]. Texas Instruments, jún 2018 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/swra621/swra621.pdf?ts=1618236749129&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.

[15] Baum, D., Hamann, C. a Schubert, E. High Performance ACC System Based on Sensor Fusion with Distance Sensor, Image Processing Unit, and Navigation System. *Vehicle System Dynamics*. Taylor Francis. 1997, zv. 28, č. 6, s. 327–338. DOI: 10.1080/00423119708969360. Dostupné z: https://doi.org/10.1080/00423119708969360.

[16] Brigham, E. O. a Morrow, R. E. The fast Fourier transform. *IEEE Spectrum*. 1967, zv. 4, č. 12, s. 63–70. DOI: 10.1109/MSPEC.1967.5217220.

[17] Fritz, A. a Schiehlen, W. Nonlinear ACC in Simulation and Measurement. *Vehicle System Dynamics*. Taylor Francis. 2001, zv. 36, 2-3, s. 159–177. DOI: 10.1076/vesd.36.2.159.3556. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1076/vesd.36.2.159.3556.

[18] Iovescu, C. a Rao, S. *The fundamentals of millimeter wave sensors* [online]. Texas Instruments, 2020. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/wp/spyy005a/spyy005a.pdf?ts=1607948078114&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsensors%252Fmmwave-radar%252Fwhat-is-mmwave.html.

[19] Jacobsen, E. a Lyons, R. The sliding DFT. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2003, zv. 20, č. 2, s. 74–80. DOI: 10.1109/MSP.2003.1184347.

[20] Karthik Ramasubramanian, K. R. a Aginskiy, A. *Moving from legacy 24 GHz to state-of-the-art 77 GHz radar* [online]. Texas Instruments, 2017 [cit. 2021-4-14]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/wp/spry312/spry312.pdf.

[21] Osugi, K., Miyauchi, K., Furui, N. a Miyakoshi, H. Development of the scanning laser radar for ACC system. *JSAE Review*. 1999, zv. 20, č. 4, s. 549 – 554. DOI: https://doi.org/10.1016/S0389-4304(99)00038-7. ISSN 0389-4304. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0389430499000387.

[22] Patole, S. M., Torlak, M., Wang, D. a Ali, M. Automotive radars: A review of signal processing techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2017, zv. 34, č. 2, s. 22–35. DOI: 10.1109/MSP.2016.2628914.

[23] Rao, S. *MIMO Radar* [online]. Texas Instruments, máj 2017. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/swra554a/swra554a.pdf.

[24] Shaout, A. a Jarrah, M. Cruise control technology review. *Computers Electrical Engineering*. 1997, zv. 23, č. 4, s. 259 – 271. DOI: https://doi.org/10.1016/S0045-7906(97)00013-X. ISSN 0045-7906. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004579069700013X.

[25] Venhovens, P. J. a Naab, K. Vehicle Dynamics Estimation Using Kalman Filters. *Vehicle System Dynamics*. Taylor Francis. 1999, zv. 32, 2-3, s. 171–184. DOI: 10.1076/vesd.32.2.171.2088. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1076/vesd.32.2.171.2088.

[26] Widmann, G. R., Daniels, M. K., Hamilton, L., Humm, L., Riley, B. et al. Comparison of Lidar-Based and Radar-Based Adaptive Cruise Control Systems. *SAE Transactions*. SAE International. 2000, zv. 109, s. 126–139. ISSN 0096736X, 25771531. Dostupné z: http://www.jstor.org/stable/44699119.

[27] Xiao, L. a Gao, F. A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems. *Vehicle System Dynamics - VEH SYST DYN*. Október 2010, zv. 48, s. 1167–1192. DOI: 10.1080/00423110903365910.

Príloha A

Obsah priloženého pamäťového média

Adresárová štruktúra pamäťového média:

```
/
├── source_codes
│   ├── acc - zdrojové súbory aplikácie
│   └── main.exe - spustiteľná aplikácia
├── thesis
│   ├── xlacek00.pdf - text práce
│   └── xlacek00 - zdrojové súbory textovej práce
└── videos - ukážkové videá práce aplikácie
    └── oldGUI - ukážkové videá so starou verziou GUI
```

Príloha B

Manuál

Pre správny chod aplikácie je potrebné, aby bola spustená aplikácia VCDS-Lite a demo Medium Range Radar.

VCDS-Lite

Zdroj inštalačného súboru: https://www.ross-tech.com/vcds-lite/download/

Po spustení aplikácie treba v nastaveniach vybrať príslušný COM port pre spojenie počítača s riadiacou jednotkou vozidla. Následne je potrebné otestovať spojenie. Po otestovaní spojenia sa treba vrátiť na hlavnú stránku a vybrať kontrolné moduly. S pomedzi nich vybrať motor a v prvom okne nastaviť šiestu skupinu.

Medium Range Radar demo

V prípade dema treba postupovať podľa návodu[1] od firmy Texas Instruments až po bod spustenia GUI.

ACC

Aplikáciu je možné spustiť aj pomocou `main.py` a aj pomocou `main.exe`. Pre spustenie je potrebné, aby konfiguračné súbory `config.cfg` a `awr.cfg` boli umiestnené v rovnakom adresári. Taktiež je potrebné nastaviť COM porty v súbore `config.cfg`. V prípade spúšťania aplikácie pomocou `main.py` je potrebné mať nainštalovaný python 3.8 a všetky moduly uvedené v súbore `requirements.txt`.

[1] https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=APkoqQrDmfEOWhcyZY68WA__AocYeEd__LATEST

Príloha C

Konfiguračný súbor

Konfiguračný súbor `config.cfg` slúži na nastavenie COM portov prislúchajúcich spojeniu s radarom. Pre zabezpečenie komunikácie s radarom treba zmeniť hodnoty aj `DATA PORT` aj `CLI PORT`, podľa počítačom priradených portov. Nižšie je uvedený vzor súboru.

```
COM PORT = COM4
CLI PORT = COM3
```