



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ PRO DETEKCI PRŮJEZDU VOZIDLA NA VOZOVCE

COMPARISON OF TECHNOLOGIES FOR VEHICLE PASSAGE DETECTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martina Mareková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Krajsa, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Studentka: Martina Mareková

ID: 220822

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Porovnání technologií pro detekci průjezdu vozidla na vozovce

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte rešerši technologií, které by mohly neintruzivní metodou poskytnout srovnatelné nebo lepší informace o průjezdu vozidla v porovnání s nejčastěji používanou metodou indukčních smyček ve vozovce. Mezi neintruzivní metody řadíme např. analýzu videa, mikrovlnný radar, laserový snímač (LIDAR), optické brány, ultrazvukové snímače nebo geomagnetické detektory. Z možných technologií vyberte alespoň tři vhodné snímače, implementujte zpracování dat z těchto senzorů a vyhodnoťte úspěšnost detekce průjezdu vozidla ve srovnání s indukčními smyčkami.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Traffic Detector Handbook. Third Edition. Georgetown Pike McLean, VA: Research, Development, and Technology, Turner-Fairbank Highway Research Center, 2006.
- [2] MEINECKE, Marc-Michael a Hermann ROHLING. COMBINATION OF LFM CW AND FSK MODULATION PRINCIPLES FOR AUTOMOTIVE RADAR SYSTEMS. In: ROHLING, Hermann. German radar symposium GRS 2000. Berlin: German Institute of Navigation, 2000, s. 1-5. ISSN 1557-959X.
- [3] J. Gajda, R. Sroka, M. Stencel, A. Wajda and T. Zeglen, "A vehicle classification based on inductive loop detectors," IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No.01CH 37188), 2001, pp. 460-464 vol.1, doi: 10.1109/IMTC.2001.928860.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Krajsa, Ph.D.

Konzultant: Ing. Václav Mach, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

ÚPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Systém pre detekciu vozidiel a meranie rýchlosti je dôležitou súčasťou v analýze dopravy, rovnako ako v poskytovaní údajov pre inteligentné a automatizované dopravné značenia. Technológie sa rozdeľujú na dva druhy, a to intruzívne a neintruzívne metódy. Tradičné meranie dopravnej situácie je založené na technológií indukčných slučiek. Táto metóda je intruzívnou, teda vyžaduje zásah do vozovky a vyššiu náročnosť na jej údržbu. Neintruzívnymi metódami, medzi ktoré radíme video analýzu, mikrovlnné radary, geomagnetické radary, vážiace senzory a laserové snímače sa vyhýbame týmto problémom, avšak sú to drahšie alternatívy. Implementáciou radarov boli vykonané merania na úsekoch vozovky, na základe ktorých bol zobrazený výstup z mikrovlnných, vážiacich senzorov a indukčných slučiek. Stretávame sa spracovanými a nespracovanými výstupnými dátami senzorov, pre ktoré je vytvorené programové riešenie pre sledovanie priebehu merania senzorom alebo priame meranie presnosti spracovaných dát v porovnaní s konkurenčnými technológiami. Výsledky meraní ukázali, že efektívnosť jednotlivých implementovaných senzorov je dostatočná pre využitie v analýze dopravy. Rovnako ako je vhodná implementácia mikrovlnných radarov a videokamier pre analýzu videa ako náhradu konvenčnej metódy indukčných slučiek.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Analýza dopravy, detekcia, geomagnetické radary, indukčné slučky, intruzívne, laserové snímače, LIDAR, mikrovlnné radary, neintruzívne, video analýza, vážiace senzory, VEK S4, UMRR-11 Type 44, UMRR-11 Type 132

ABSTRACT

System for vehicle detection and speed measurement system is an important part in traffic control as well as in providing data for intelligent and automated traffic signs. These technologies are divided into two types: intrusive and non-intrusive methods. Traditional traffic control is based on inductive loops. This method is intrusive and therefore requires intervention under the road and higher maintenance requirements. We can avoid this problem with non-intrusive methods, including video analysis, microwave radars, geomagnetic radars, weighing sensors and laser sensors, but these are more expensive alternatives. By implementing radars we performed measurements on road sections, on the basis of which the output data from microwave, weigh-in-motion sensors and induction loops were displayed. We receive processed and unprocessed output data of measurements from each sensors. For processing of those data is created software solution for graph rendering and direct measurement of the sensor accuracy in comparison with competing technology. The results of the measurements showed that the efficiency of the individually implemented sensors is sufficient for use in traffic control. As well we can consider the implementation of microwave radars and cameras for video analysis as a replacement for the conventional method of induction loops.

KEYWORDS

Traffic control, Detection, geomagnetic radar, inductive loops, intrusive, laser sensors, LIDAR, microwave radars, non-intrusive, video analysis, weigh-in-motion, VEK S4, UMRR-11 Type 44, UMRR-11 Type 132

MAREKOVÁ, Martina. *Porovnání technologií pro detekci průjezdu vozidla na vozovce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 57 s. Bakalářská práce. Vedúci práce: Ing. Ondřej Krajsa, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Martina Mareková
VUT ID autora: 220822
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečnéj práce: Porovnání technologií pro detekci průjezdu vozidla na vozovce

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracovala samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autorka uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušila autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahla nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomá následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autorky*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rada by som sa poďakovala svojmu vedúcemu práce Ing. Ondřejovi Krajsovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Václavovi Machovi, Ph.D. za ochotu pri spolupráci, cenné rady, návrhy a hlavne trpezlivosť.

Obsah

Úvod	13
1 Radary	14
1.1 Mikrovlnné radary	14
1.1.1 CW radar	14
1.1.2 FMCW radar	14
1.1.3 Testovanie presnosti merania	14
1.2 Analýza videa	16
1.2.1 Architektúra	16
1.2.2 Algoritmus detekcie vozidiel	17
1.3 Laserové snímače LIDAR	20
1.3.1 Testovanie LIDAR snímača TF02	20
1.4 Geomagnetické detektory	21
1.5 Ultrazvukové senzory	23
1.6 Vážiace senzory	24
2 Technológie v porovnaní s indukčnými slučkami	25
2.1 Mikrovlnné radary	25
2.1.1 Inštalácia radaru	25
2.1.2 Výsledky merania	26
2.1.3 Vyhodnotenie merania	26
2.2 Geomagnetické radary	27
2.2.1 Podmienky merania	27
2.2.2 Výsledky merania	27
2.2.3 Vyhodnotenie merania	28
3 Porovnanie mikrovlnných FMCW radarov	29
3.1 Mikrovlnný FMCW radar UMRR-11 Type 44	29
3.2 Mikrovlnný FMCW radar UMRR-11 Type 132	29
3.3 Výsledky teoretického porovnania radarov UMRR-11 Type 44 a UMRR-11 Type 132	31
3.4 Spracovanie výstupných dát radarov FMCW	31
3.5 Porovnanie merania dát z radarov FMCW a s indukčnými slučkami	32
4 Implementácia indukčných slučiek	36
4.1 Programové riešenie	36

5 Implementácia vážiacich senzorov	38
5.1 Tenzometrický vážiaci senzor	38
5.2 Piezoelektrický vážiaci senzor	39
5.3 Programové riešenie	41
5.4 Porovnanie vážiacich senzorov	41
6 Vyhodnotenie technológií v porovnaní s indukčnými slučkami	43
Záver	46
Literatúra	48
Zoznam príloh	51
A Spracovanie dát z indukčných slučiek v prostredí Matlab	52
B Spracovanie dát z vážiacich senzorov v prostredí Matlab	54
C Program prepočítania času prejazdu	56
D Obsah elektronickej prílohy	57

Zoznam obrázkov

1.1	Graf merania pomocou Dopplerovho radaru	16
1.2	Detekcia dopravného značenia	18
1.3	Algoritmus detekcie vozidiel	19
1.4	Graf geomagnetického radaru pri prechode väčšieho vozidla	22
1.5	Prejazd vozidla geomagnetickým detektorom	22
1.6	Blokový diagram merania rýchlosti geomagnetickým radarom	23
4.1	Grafy prejazdu vozidiel indukčnou slučkou	37
5.1	Graf prejazdu vozidiel tenzometrickým senzorom	39
5.2	Graf prejazdu jedného vozidla tenzometrickým senzorom	39
5.3	Graf prejazdu vozidiel piezoelektrickým senzorom	40
5.4	Graf prejazdu jedného vozidla piezoelektrickým senzorom	41

Zoznam tabuliek

1.1	Tabuľka merania pomocou Dopplerovho radaru	15
1.2	Tabuľka detekcie dopravného značenia	18
1.3	Tabuľka efektívnosti algoritmu detekcie vozidiel	19
1.4	Tabuľka merania TF02 v porovnaní s video analýzou	21
2.1	Tabuľka merania mikrovlnného radaru v porovnaní s indukčnými slučkami	26
2.2	Meranie geomagnetického radaru	28
3.1	Výsledky presnosti merania implementovaných senzorov	33
3.2	Ukážka výstupných dát zo senzoru UMRR-11 Type 132	34
3.3	Ukážka výstupných dát zo senzoru UMRR-11 Type 44	35
3.4	Ukážka výstupných dát z indukčných slučiek	35
6.1	Tabuľka porovnania implementovaných senzorov	43

Zoznam výpisov

A.1	Spracovanie dát z indukčných slučiek v Matlabe.	52
A.2	Prijaté dáta z indukčnej slučky v Matlabe.	53
B.1	Spracovanie dát z vážiacich senzorov v Matlabe.	54
B.2	Funkcia na vykreslenie dát z vážiacich senzorov.	55
C.1	Program na prepočítanie času prechodu vozidla pre indukčné slučky. .	56

Úvod

Systém detekcie vozidiel je neoddeliteľnou súčasťou inteligentných dopravných systémov. Technológie detekcie vozidiel sú používané pri monitorovaní premávky, zvyšovaní efektívnosti riadenia dopravy a zvýšení bezpečnosti cestnej premávky. Pod monitorovaním premávky rozumieme meranie dopravných parametrov ako je frekvencia prejazdu vozidiel, zisťovanie rýchlosti a typu vozidiel. V praxi sa stretávame s dvomi typmi technológií podľa spôsobu uloženia senzoru na intruzívne a neintruzívne. Medzi najpoužívanejšie intruzívne senzory sa radia indukčné slučky, ktoré ale majú zložitú inštaláciu a údržbu, a urýchľujú opotrebovanie asfaltu. Medzi neintruzívne metódy patria napríklad mikrovlnné radary, analýza videa, laserové snímače, optické brány, ultrazvukové snímače a geomagnetické detektory.

Bakalárska práca je zameraná na prieskum metód vhodných ako možnej náhrady so zrovnateľnými výsledkami s konvenčne používanou intruzívnou metódou indukčných slučiek. Pre zvolenie vhodného spôsobu nahradenia je potrebné vypracovanie rešerši venujúcej sa porovnávaniu zvolených technológií neintruzívnych senzorov. Medzi neintruzívne metódy radíme napríklad analýzu videa, mikrovlnné radary, laserové LIDAR snímače, vážiace senzory a geomagnetické snímače.

Táto práca sa venuje teoretickému opisu základnej funkčnosti vybraných senzorov a používaným podskupinám vybraných metód. Rovnako je potrebné venovať pozornosť experimentom na určenie efektivity jednotlivých metód a to v laboratórnom prostredí ako aj v reálnych podmienkach využitia. Praktická časť práce nadväzuje na teoretické poznatky o neintruzívnych senzoroch použitia v praxi. V prvej časti spracovania implementovaných senzorov sa zaoberá spracovaním a porovnaním dát z mikrovlnných radarov s indukčnými slučkami. Cieľom je vyhodnotenie presnosti meraní vybranými metódami a zhodnotenie efektívnosti senzorov v praxi. Ďalšia časť práce sa zameriava na nespracované dáta prijaté z indukčných slučiek implementovaných na vozovke. Spracované dáta zobrazujú vykreslenú vlnu signálu po spustení triggeru pri prejazde vozidla. Pre účely tejto práce sa dáta spracovávajú v programovom prostredí Matlab. Tretia časť práce je zameraná na vyhodnotenie dát z vážiacich senzorov. Jedná sa o dva druhy implementovaných senzorov, a to konkrétne piezoelektrický a tenzometrický senzor s funkciou váženia vozidiel v pohybe.

Cieľom práce ako aj poslednou kapitolou je porovnanie implementovaných metód v praxi s metódou indukčných slučiek. Porovnanie slúži na vyhodnotenie technológií vhodných pre poskytnutie lepších alebo porovnateľných výsledkov, ako v prípade intruzívnej metódy indukčných slučiek. Pre vyhodnotenie je porovnávaná miera náročnosti spracovania výstupných dát, cenová dostupnosť a spôsob inštalácie.

1 Radary

1.1 Mikrovlnné radary

Mikrovlnné radary boli vyvinuté počas druhej svetovej vojny pre detekciu objektov. Jedná sa o elektronický prístroj využívajúci mikrovlny na detekciu a určenie vzdialenosti objektov. Mikrovlnné radary sú v súčasnosti používané vo viacerých odvetviach, ako sú zabezpečovacie systémy na senzory pohybu, takisto užitočné v bežnom živote na ovládanie svetiel a podobne. Využívajú sa dva typy snímačov, a to s nemodulovanou spojitou vlnou CW a s frekvenčne modulovanou spojitou vlnou FMCW. [1]

Mikrovlnné radary alebo inak nazývané Dopplerove radary merajú rozdiel vo frekvencii medzi prenášaným signálom a odrazeným signálom od pohybujúceho sa objektu. Tieto radary musia spĺňať prísne požiadavky, ktoré sa odzrkadľujú na vyšších nákladoch. [4]

1.1.1 CW radar

CW radar tiež označovaný ako mikrovlnný Dopplerov senzor funguje na princípe Dopplerovho efektu, kde pohyb vozidla spôsobuje posun vo frekvencii odrážaného signálu. Prejazd vozidla je detekovaný zaznamenaným frekvenčným posunom signálu. Meranie rýchlosti sa vykonáva pomocou Dopplerovho efektu, ktorý zisťuje zmenu frekvencie a vlnovej dĺžky prijímaného signálu oproti vysielanému. Nevýhodou vysielania konštantnej spojitej vlny, je možnosť zaznamenať len pohyblivé objekty a rozlíšenie len jedného vozidla súčasne. [1]

1.1.2 FMCW radar

V cestnej doprave je častejšie využívaný FMCW radar, ktorý ponúka viacej merateľných parametrov. FMCW funguje na princípe vysielania frekvenčne modulovanej spojitej vlny, kde je frekvencia konštantne menená v závislosti od času. Výhodou FMCW radaru je oproti CW radarom detekovať aj nepohyblivé objekty vďaka zmene frekvencie vysielacza. Pri montáži v smere dopravy je možné zhromažďovať dáta z viacerých pruhov. Využitím Dopplerovho javu je taktiež možné zistiť rýchlosť vozidla a veľkosť vozidla. [1]

1.1.3 Testovanie presnosti merania

Cieľom merania podľa článku "Comparative study on the effectiveness of various types of road traffic intensity detectors" bolo porovnanie Dopplerovho senzora s de-

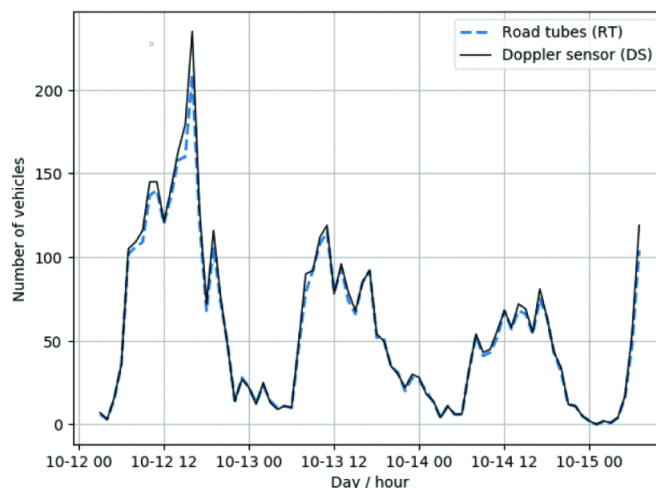
tektorom na báze cestných trubíc, z ktorého pochádzajú referenčné hodnoty merania. Dopplerov senzor bol doplnený o algoritmy, na spracovanie signálov, vyvinuté autormi. Meranie sa zameriavalo na počítanie vozidiel a meranie rýchlosti, senzor bol namontovaný na stene budovy vo výške 2,8 m a vzdialenosti 4,5 m od vozovky s pohybujúcimi sa autami. [4]

Podľa výsledkov merania v tabuľke 1.1 bola zhodnotená celková úspešnosť Dopplerovho senzora na 90%, čo je podľa požiadaviek prevedenie a kvalitu inteligentných systémov na diaľniciach a cestách v správe "Ředitelství silnic a dálnic ČR" nedostatočné. Presnosť detekcie musí byť minimálne 98%. [15] V grafe 1.1 môžeme pozorovať počet zaznamenaných vozidiel jednotlivými detektormi v čase. Dopplerov radar detekoval 8% falošných záznamov a 3,8% vozidiel nebolo zaznamenaných. Výsledky nemusia byť kvôli možnej nepresnosti cestných trubíc presné, čo môže vysvetľovať vysoký pomer falošne zaznamenaných vozidiel. [4]

V prípade merania rýchlosti sa hodnota rozdielu medzi detektormi pohybovala okolo 4,5 km/h. V tomto prípade je dôležité poznamenať, že cestné trubice vykonávajú zónové meranie na rozdiel od Dopplerovho senzoru, ktorý vykonáva meranie bodovo. Takisto sa vozidlá v detekčnej zóne nepohybujú konštantnou rýchlosťou. [4]

Popis	Celkový počet	Priemer za hodinu
Počet vozidiel detekovaných pomocou Dopplerovho senzoru	4371	56,8
Počet vozidiel detekovaných pomocou cestných trubíc	4182	54,3
Skutočné detekcie (detekované pomocou oboch senzorov)	4022	52,2
Falošné detekcie Dopplerovho senzora	349	4,53
Falošné detekcie cestných trubíc	160	2,08

Tab. 1.1: Tabuľka merania pomocou Dopplerovho radaru [4]



Obr. 1.1: Graf merania pomocou Dopplerovho radaru [4]

1.2 Analýza videa

Analýza videa na cestných komunikáciách poskytuje možnosť získavať informácie o množstve cestných parametrov. Takisto poskytuje možnosť detekovať dopravné nehody na diaľniciach. [1] Analýza videa nám umožňuje bohatšie vizuálne informácie ako ostatné zariadenia bez ovplyvnenia integrity vozovky s možnosťou intuitívneho spracovania údajov. Je nákladovo efektívna a dobre vyvinutá z hľadiska spracovania dát, avšak nevýhodou je, že jej presnosť je ovplyvnená skreslením obrazu a rozlíšením. Takisto sú optické kamery citlivé na nepriaznivé osvetlenie a poveternostné podmienky. [3]

1.2.1 Architektúra

Základom zavedenia systému analýzy videa je dodržanie správnej pozície kamier pri ich montáži. Kamerový systém dosahuje vzdialenosť viditeľnosti kamery 100 až 150 metrov pričom dokáže kontrolovať až tri pruhy bežnej cestnej premávky alebo jeden pruh pre vjazd, alebo výjazd vozidiel. Systém dokáže identifikovať kategóriu vozidla a takisto je možné identifikovať objekty, ktoré nepatria medzi vozidlá ako cudzie objekty. Z kamerového záznamu sa detekuje vozidlo, ktoré je sledované od vstupu do obrazu až po jeho odchod. [1]

Počas sledovania je zistená jeho rýchlosť, kategória, počet vozidiel, počet vozidiel v pravom a ľavom pruhu a takisto možná nehoda. [1]

1.2.2 Algoritmus detekcie vozidiel

Pri spracovaní obrazu je potrebné brať ohľad na zmeny osvetlenia scény, pohyblivé tieň, svetlo z pouličných svetiel a svetlometov vozidla, poveternostné podmienky ako aj uhly snímania kamier. [2]

Systém analýzy je možné použiť na riešenie problémov v reálnom čase (adaptívne riadenie dopravy) ako aj na získavanie štatistík dopravnej situácie. Štatistické informácie nám umožňujú zvýšiť efektívnosť opatrení osobnej a nákladnej dopravy a bezpečnosti cestnej premávky, ako je osadenie semaforov a reguláciu ich činnosti, úpravu križovatky, vybudovanie prídavných jazdných pruhov a podobne. [2]

Senzor je väčšinou rozdelený do dvoch zón, vstupnej a výstupnej, čo nám umožňuje určiť smer pohybu vozidla, hrubý výpočet jeho pohybu. [2]

Detekcia cestného značenia nám definuje oblasti záujmu pre každý cestný pruh. Aby sme tento proces automatizovali je potrebné vykonať detekciu dopravného značenia pre sledovaný úsek cesty. Jednou z metód na detekciu priamych čiar je integrálna vektorová Radónová transformácia v skratke IVRT. [2]

Výsledky testovania algoritmov podľa "Vehicle detection and counting system for real-time traffic surveillance". Výskumy boli realizované pomocou reálne zaznamenaných videí na zabudovanej platforme inteligentných kamier počas pozorovania viacerých cestných úsekov v reálnom čase. Pozorovanie bolo uskutočnené za rôznych poveternostných podmienok pri rôznych svetelných podmienkach. [2]

Výsledky algoritmu detekcie cestného značenia

Použitie algoritmu detekcie dopravného značenia nie je pre konfiguráciu parametrov systému detekcie nevyhnutné. V systémoch pokiaľ je kamera umiestnená staticky nie je detekcia pruhov nutná a vystačí manuálne zadanie pozície pruhov. Na obrázku 1.2 sme pozorovali ako systém rozoznal cestné pruhy na vozovke. V tomto experimente sa použili obrázky z 11 videí, ktoré boli zaznamenané na rôznych miestach a v iných podmienkach. [2]



Obr. 1.2: Detekcia dopravného značenia [2]

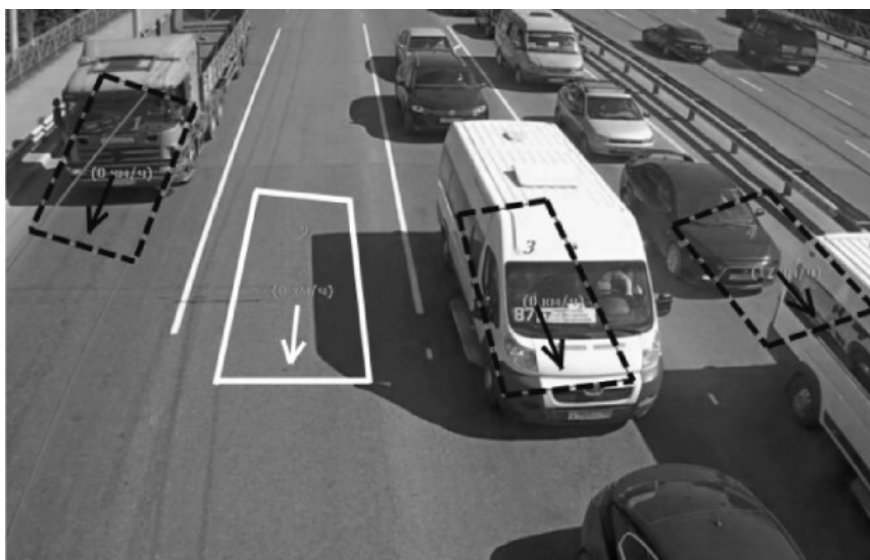
Priemerná účinnosť detekcie podľa vybraných obrázkov sa pohybuje okolo 76%. Výsledky zaznamenaných detekcií sú viditeľné v tabuľke 1.2. Kde môžeme pozorovať, že v niektorých prípadoch algoritmus nedokázal detekovať všetky cestné pruhy. [2]

Testovaný snímok	Výsledky	
	Počet správnych detekcií	Počet chybajúcich cestných značení
1	3	2
2	5	0
3	6	2
4	5	1
5	6	0
6	5	2
7	4	0
8	5	1
9	7	5
10	4	2
11	4	2

Tab. 1.2: Tabuľka detekcie dopravného značenia [2]

Výsledky algoritmu detekcie a počítania vozidiel

Vyvinutý algoritmus bol testovaný na sieťovej kamere, kde sa sledovalo päť jazdných pruhov s časom spracovania jedného snímku 4 ms 1.2. Na obrázku 1.3 môžeme sledovať snímky z dvoch kamier pri pozorovaní 4 jazdných pruhov. [2]



Obr. 1.3: Algoritmus detekcie vozidiel [2]

Presnosť algoritmu detekcie vozidiel pre testované video sekvencie sa pohybovala okolo 98 – 100%, ako môžeme vidieť v tabuľke 1.3. [2]

Testovacia sekvencia	Výsledky		
	Počet vozidiel	Presnosť detekcie	Súhrn falošných poplachov
1	657	99.69%	0.61%
2	505	99.29%	0.59%
3	458	100%	0.73%
4	1262	98.52%	0.65%
5	330	96.96%	1.35%

Tab. 1.3: Tabuľka efektívnosti algoritmu detekcie vozidiel [2]

1.3 Laserové snímače LIDAR

Laserové snímače vyžarujú infračervený lúč vysielaný v krátkych svetelných impulzoch, ktoré sa šíria priamočiaro, odrazia sa od predmetov a vracajú sa do meracieho zariadenia. Sú umiestňované pozdĺž alebo kolmo na povrch vozovky. Presnosť snímačov nie je ovplyvnená časom merania, avšak sú citlivé na poveternostné podmienky. Laserové snímače poskytujú možnosť detekcie vozidiel, obsadenosti jazdných pruhov a frekvencie pohybu vozidiel. V porovnaní s inými snímačmi môžeme konštatovať, že LIDARové snímače sú menej náchylné na chyby merania. [4]

Panoramatický 3-D lidar aktívne skenuje 360 ° okolie a zachytáva údaje o všetkých objektoch v dosahu skenovania. Skladá sa z vertikálne konfigurovaných laserových lúčov pokrývajúcich široké vertikálne zorné pole v závislosti od počtu lúčov. Keďže LIDAR operuje na vysokých frekvenciách je potencionálne zaznamenané vozidlo detekované v 3-D s vysokou priestorovou presnosťou. Tento druh senzorov sa používa hlavne v prípade autonómnych vozidiel, avšak ich využitie pri sledovaní dopravy sa aj vďaka vysokej presnosti a schopnosti zachytávať objekty v 3-D zvýšilo. [3]

1.3.1 Testovanie LIDAR snímača TF02

Meranie bolo realizované pomocou TF02 LIDAR od Benawake s frekvenciou merania 100Hz. Testovanie prebiehalo na dvoch miestach, a to jednopruhovej obojsmernej ceste s maximálnou povolenou rýchlosťou 50km/h. Druhé testovanie sa odohrávalo na jednopruhovej obojsmernej ceste s maximálnou povolenou rýchlosťou 90km/h. Meranie prebiehalo cez deň aj v noci a boli použité tri rôzne scenáre osadenia LIDAR snímača, a to:

- 90 stupňový uhol k osi vozovky, vo výške 40cm od povrchu a vzdialenosti 100cm od jazdného pruhu,
- 45 stupňový uhol k osi vozovky, vo výške 40cm a vzdialenosti 100cm od jazdného pruhu,
- 45 stupňový uhol k osi vozovky, vo výške 80cm a vzdialenosti 100cm od jazdného pruhu.

Pre referenčné hodnoty bola použitá Go Pro Hero 6, z ktorej sa vozidlá počítali manuálne a TMS-SA na zaznamenanie počtu vozidiel a meranie ich rýchlosti. Výsledky merania sme pozorovali v tabuľke 1.4, kde môžeme sledovať detekcie všetkých scenárov počas dňa a noci, a porovnávať referenčné hodnoty z video analýzy a TMS-SA s hodnotami testovaného snímača TF02. [4]

V prípade umiestnenia 45 stupňov na os vozovky sme pozorovali nepresnosti spôsobené prítomnosťou vozidiel v oboch jazdných pruhoch súčasne. Môžeme kon-

Scenár		Video analýza	TMS-SA	Správne detekcie	Pomer falošných detekcií [%]
Deň	90deg/40cm	48	48	46	4.17
Noc	90deg/40cm	69	69	69	0
Deň	45deg/40cm	43	43	42	2.32
Noc	45deg/40cm	61	61	59	3.28
Deň	90deg/80cm	45	45	40	11.11
Noc	90deg/80cm	51	51	51	0

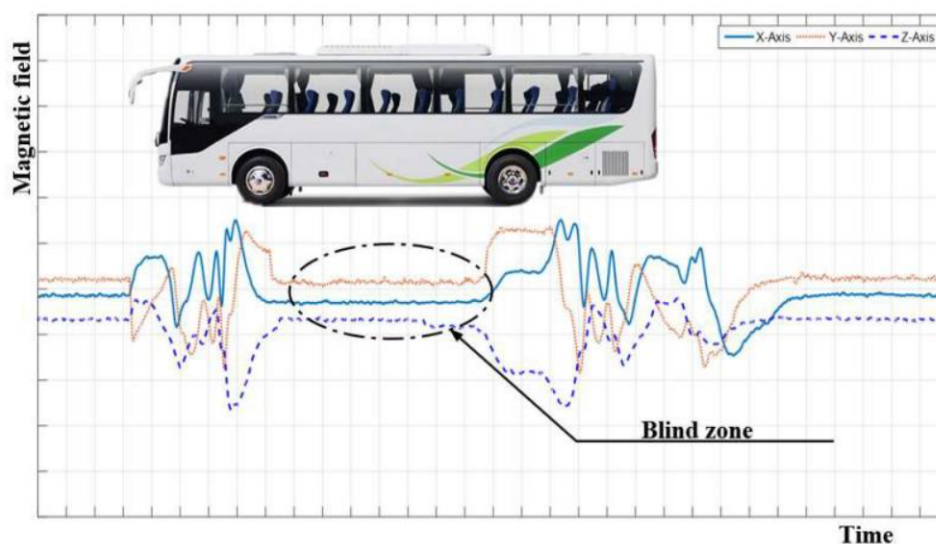
Tab. 1.4: Tabuľa merania TF02 v porovnaní s video analýzou [4]

štatovať najvyššiu úspešnosť pri použití kolmo na os vozovky. [4]

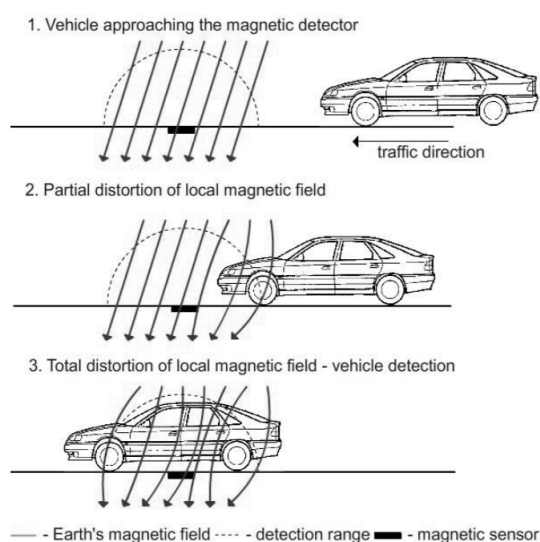
1.4 Geomagnetické detektory

Geomagnetické senzory detekujú vozidlá na základe zmeny v magnetickom poli zeme pri pohybe feromagnetického predmetu ponad detektor ako môžeme pozorovať na obrázku 1.5. Nie sú ovplyvnené klímou a sú odolné voči rušeniu. Nejedná sa o kompletne neintruzívnu metódu, pretože zariadenie je umiestnené pod jazdným pruhom, avšak sú ľahko udržiavateľné, škody na vozovke minimálne a pri samotnej montáži nie je potrebné uzatvorenie jazdného pruhu. [11]

Nevýhodou algoritmu identifikácie vozidla je v prípade pomaly pohybujúceho sa vozidla spájanie viacerých vozidiel do jedného alebo priamo nedetekovanie vozidla. Táto chyba môže byť spôsobená nedostatočným výkonom jedno-čipového mikropočítača, ktorý v tomto prípade nebude v reálnom čase dostatočne citlivý na vysokofrekvenčné geomagnetické signály s malými zmenami strednej hodnoty. [5] Rovnako, ako pri pomalých vozidlách sa stretávame s problémom pri detekcii väčších vozidiel s vysokým podvozkom. V tomto prípade môžeme pozorovať na obrázku 1.5, že signál magnetického rušenia je najsilnejší pri predných a zadných kolesách, a medzi týmito priestorom sa nachádza takzvaná slepá zóna. [8]



Obr. 1.4: Graf geomagnetického radaru pri prechode väčšieho vozidla [8]

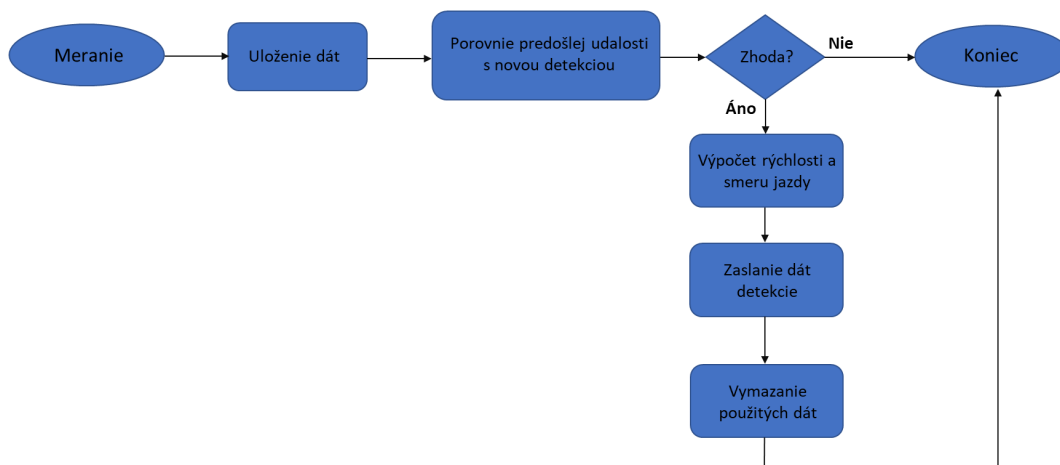


Obr. 1.5: Prejazd vozidla geomagnetickým detektorom [14]

V prípade merania rýchlosti pomocou geomagnetických detektorov by sme museli uvažovať o umiestnení viacerých snímačov. Dôležitým parametrom je vzdialenosť medzi jednotlivými detektormi a časová synchronizácia. Detektory tiež obsahujú takzvanú korelačnú jednotku, ktorá je schopná detekovať či sa jedná o dva záznamy. [9]

Blokový diagram 1.6 nám zobrazuje postup pri zaznamenávaní rýchlosti vozidla. Meranie rýchlosti sa aktivuje záznamom alebo periodickým časovačom. Detektor

zaznamená vozidlo, záznam uloží a porovná predošlú udalosť s novou detekciou. Pokiaľ bola zaznamenaná zhoda, prebehne výpočet rýchlosti a určí sa smer vozidla, a odošlú sa zaznamenané dáta. [9]



Obr. 1.6: Blokový diagram merania rýchlosti geomagnetickým radarom [9]

1.5 Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory prenášajú zvukové tlakové vlny s frekvenciou medzi 25 kHz až 50 kHz, ktoré sú nad hranicou počutelnosti u človeka. Väčšina ultrazvukových senzorov pracuje na princípe pulznej vlny. Poskytujú informácie ako je počet vozidiel a obsadenosť vozovky. [6]

Pulzné vlny sa používajú pre meranie vzdialeností ku povrchu vozovky a povrchu vozidla detekovaním odrazeného signálu naspäť do senzora. Pokiaľ je vzdialenosť merania rozdielna od vzdialenosti od vozovky senzor automaticky zaznamenáva prechod vozidla. [6]

Výpočet rýchlosti nám umožňuje pulzná energia prenášaná v dvoch nevzdialených uhloch dopadu, kde je zaznamenaný čas kedy vozidlo prejde týmito lúčmi. Rýchlosť je vďaka známej vzdialenosti možné vypočítať ako vzdialenosť medzi lúčmi delená časom prechodu vozidla medzi nimi. Montáž pre meranie vzdialenosti je uprednostňovaná pre pohľad zvrchu a z boku vozidla. [13]

Výhodou ultrazvukového senzora je možnosť fungovať v takmer akýchkoľvek podmienkach. Výsledky meraní nie sú ovplyvňované svetelnými podmienkami, ako je nízka alebo vysoká intenzita osvetlenia. Oproti metóde video analýzy sú lacnejšie, menšie a lacnejšie. Tieto senzory majú nízku spotrebu energie a ich implementácia je relatívne nenáročná. [12]

1.6 Vážiace senzory

Vážiace senzory. Vážiace senzory alebo inak nazývané dynamické váhy poskytujú možnosť váženia vozidiel v pohybe. Systém poskytuje nepretržité meranie hmotnosti pohybujúcich sa vozidiel bez ovplyvnenia premávky. Cieľom merania senzorom je stanovenie jednotlivých zatažení náprav vozidla a jeho celkovej hmotnosti. Systém merania vozidiel za jazdy pozostáva zo sady snímačov zataženia na vozovke, systému úpravy signálu a implementovaným algoritmom na odhad hmotnosti náprav a ďalších parametrov vozidla. Proces dynamického váženia spočíva na zaznamenávaní a následnom spracovaní signálov generovaných snímačom na základe zataženia nápravou prechádzajúceho vozidla. So senzormi merania hmotnosti sa bežne v praxi aplikujú aj senzory iných typov, ako sú indukčné slučky, snímače teploty a vlhkosti, a akcelerometre pre meranie vibrácií zeme. Tieto snímače poskytujú potrebné informácie o podmienkach váženia vozidla, pre zlepšenie presnosti výsledkov váženia. [18]

Typicky sú používané dva snímače zataženia, ktoré pre každú z náprav zaznamenajú dve vzorky, z ktorých aritmetického priemeru sa vypočíta výsledok váženia. Súčtom zatažení všetkých náprav je odhad celkovej váhy vozidla. Presnosť váženia je možné zlepšiť obmedzením vplyvu dynamickej zložky zataženia nápravy a zberom väčšieho počtu vzoriek zataženia náprav a ich algoritmickým spracovaním. Toto riešenie však požaduje inštaláciu viacerých snímačov. Ďalšie zlepšenie je možné poskytnúť napríklad informácia o teplote asfaltu, ktoré je možné využiť na teplotnú korekciu výsledkov váženia. Rýchlosť vozidla je možné použiť na výber vhodného algoritmu odhadu zataženia snímača. [18]

2 Technológie v porovnaní s indukčnými slučkami

V tejto kapitole sa budeme zaoberať porovnávaním neintruzívnych metód detekcie vozidiel v cestnej premávke s metódou indukčných slučiek. Metóda indukčných slučiek je do dnešnej doby jednou z najpoužívanějších pri riadení dopravy po celom svete. Ich najväčšou nevýhodou je nutnosť zásahu do vozovky pri montáži a údržbe, s čím sa skracuje životnosť povrchu vozovky, a obmedzuje premávka po dobu inštalácie. Jedná sa o zavedenie jedného alebo viacerých závitov izolovaného drôtu do okruhu s priemerom 1,8 metra a viac. [6]

V tomto prípade sme zvolili tri technológie, ktoré budeme porovnávať s metódou indukčných slučiek a sledovať vyhodnotenie úspešnosti detekcie v porovnaní s touto metódou.

2.1 Mikrovlnné radary

V prvej kapitole sme si rozobrali ako mikrovlnné radary fungujú, ich delenie a mohli sledovať testy ich presnosti. Z výsledkov sme mohli v tomto prípade vydedukovať, že sa jedná o presnú metódu, ktorou by sme sa mohli zaoberať ako jednou s možnosťí v prípade nahradenia metódy indukčných slučiek. [7]

V tomto prípade budeme vychádzať z článku CT TECHNOLOGY, kde porovnávali dopplerov radar Icoms TMSA-SA s indukčnými slučkami. V prípade tohto radaru je možné zbieranie dát po dobu troch týždňov bez potreby výmeny batérie alebo iného servisu. Radar má vstavanú motorizovanú jednotku pre doladenie nastavení po montáži. Je navrhnutý pre zbieranie dát ako je počet vozidiel, ich rýchlosti a typ s presnosťou na stotiny sekundy. [7]

2.1.1 Inštalácia radaru

Pre skutočné otestovanie v reálnej premávke bolo zvolené miesto 400 metrov od svetelnej križovatky s plynulou premávkou, kde je radar nasmerovaný chrbtom ku križovatke smerom ku prichádzajúcim vozidlám. V tomto smere bolo testované meranie pri nízkych rýchlostiach a zápchach pri dopravnej špičke, čo nám umožnilo sledovať výkon radaru pri bežnej premávke a pravidelne zastavujúcich a rozbiehajúcich sa vozidlách. [7]

2.1.2 Výsledky merania

Rozdiel medzi radarom sa za 24 hodín pohyboval okolo 5% (viď tabuľka 2.1). Najväčšie rozdiely boli zaznamenané pri dopravnej špičke kde sa vozidlá pohybovali veľmi pomalou rýchlosťou alebo úplne zastavovali pred radarom. Je ale potrebné brať do úvahy, že miesto zvolené pre inštaláciu nie je ideálne podľa odporúčaní výrobcu. Presnosť radaru v laboratórnych podmienkach bola vyššia ako 98% pri meraní rýchlosti a pokiaľ sa jedná o klasifikáciu vozidiel bola presnosť okolo 90%. Z merania sme taktiež pozorovali rozdiel, približne 4% pri detekcii počtu vozidiel medzi TMS-SA a indukčnou slučkou. [7]

Cesta na severnú stranu			Cesta na južnú stranu		
TMA-SA radar	Denný priemer		TMA-SA radar	Denný priemer	
	5-dňový	7-dňový		5-dňový	7-dňový
07:00 - 19:00	9422	8721	07:00 - 19:00	9379	8728
06:00 - 22:00	10896	10016	06:00 - 22:00	10916	10078
06:00 - 00:00	11161	10265	06:00 - 00:00	11161	10317
00:00 - 00:00	11368	10482	00:00 - 00:00	11483	10635
Indukčná slučka	Denný priemer		Indukčná slučka	Denný priemer	
	5-dňový	7-dňový		5-dňový	7-dňový
07:00 - 19:00	10016	9226	07:00 - 19:00	9848	9097
06:00 - 22:00	11512	10540	06:00 - 22:00	11401	10458
06:00 - 00:00	11768	10783	06:00 - 00:00	11639	10692
00:00 - 00:00	11964	10991	00:00 - 00:00	11963	11011
Hodinový priemer v porovnaní s indukčnými slučkami					
Čas	5-dňový priemer	7-dňový priemer	Čas	5-dňový priemer	7-dňový priemer
07:00 - 19:00	-594	-505	07:00 - 19:00	-469	-369
06:00 - 22:00	-616	-524	06:00 - 22:00	-485	-380
06:00 - 00:00	-607	-519	06:00 - 00:00	-477	-375
00:00 - 00:00	-596	-509	00:00 - 00:00	-480	-376
Percentuálny rozdiel	-5%	-5%	Percentuálny rozdiel	-4%	-4%

Tab. 2.1: Tabuľka merania mikrovlnného radaru v porovnaní s indukčnými slučkami [7]

2.1.3 Vyhodnotenie merania

Z tohto merania nám vyplývajú minimálne rozdiely medzi danými metódami merania. Priemerný hodinový rozdiel bol 22 vozidiel čo je približne 528 vozidiel za deň pri dennom priemere 11000 vozidiel. Tieto výsledky nám ukazujú vysokú úspešnosť Dopplerovho radaru, ktorý napriek nevhodnej inštalácii nezaznamenal len približne 4,8% z celkového počtu vozidiel za deň. [7] Pri porovnaní výkonu mikrovlnných radarov s indukčnými slučkami by bolo vhodné zváženie nahradenie indukčných slučiek v nových križovatkách alebo ako náhrady chybného staršieho systému. Mikrovlnné radary sa v tomto prípade preukázali ako lacnejšia a efektívna metóda počítania vozidiel a riadenia dopravy.

2.2 Geomagnetické radary

Aj keď geomagnetické radary nemôžeme považovať za kompletne neintruzívne, jedná sa o efektívnu metódu detekcie vozidiel. Pri montáži nie je potrebný drastický zásah do vozovky a teda nie je potrebné uzavretie celého pruhu, čo je oproti indukčným slučkám veľkou výhodou. Najväčším problémom geomagnetických radarov je problém pri detekcii väčších vozidiel. Pre vyriešenie tohto problému existujú experimenty, kde sa ku geomagnetickému radaru pridáva rádiový FM modul. Táto metóda je realizovaná kombináciou signálu prijímaného z FM modulu a zmeny v geomagnetickom poli okolo vozidla. Touto metódou sa ale v tejto práci ďalej nebudeme zaoberať. [8]

2.2.1 Podmienky merania

Experiment bol uskutočnený pri vstupe do svetelnej križovatky, kde sa nachádzal geomagnetický radar a indukčná slučka. Priemerná rýchlosť vozidiel sa na týchto miestach pohybovala okolo 25 km/h počas dopravnej špičky až 50 km/h v bežnej premávke. Najfrekvencovanejšie hodiny pohybu vozidiel boli v čase odchodu a príchodu z práce čo je v ranných hodinách od 7:00 do 9:00, a podvečer od 17:00 do 19:00. [8]

Vozidlá boli rozdelené na dve podkategórie a to malé vozidlá nepresahujúce dĺžku 5 m, kde zaraďujeme bežné autá, a veľké vozidlá dlhšie ako 5 m ako napríklad autobusy, nákladné autá a pod.. [8]

2.2.2 Výsledky merania

V tabuľke 2.2 sme porovnávali manuálne spočítané vozidlá pre presné vyhodnotenie úspešnosti s metódou indukčných slučiek a geomagnetického radaru. Pri sledovaní malých vozidiel sme mohli vidieť minimálny rozdiel medzi danými metódami. Presnosť indukčných slučiek dosiahla až 99,4% a geomagnetický senzor mal presnosť 98%, obidva detektory v tomto prípade detekovali viac vozidiel, ako týmto úsekom skutočne prešlo. Podobné výkyvy sme zaznamenali aj pri väčších vozidlách, kde však geomagnetický radar zaznamenal až 18 falošných detekcií, jeho úspešnosť bola len 83,4%, kdežto indukčné slučky dosiahli až 99% úspešnosť s jedným falošne detekovaným vozidlom. Pokiaľ sme sa zamerali na konkrétne hodiny bol viditeľný rozdiel úspešnosti počas bežnej premávky a počas dopravnej špičky. Geomagnetický radar mal problémy detekovať hlavne väčšie vozidlá, ktoré sa pohybovali nízkymi rýchlosťami alebo sa vozidlá zastavili počas čakania na semafor. Pri zastavení sa prejavuje problém slepej zóny a to isté vozidlo bolo zaznamenané viac krát. [8]

Periódy	Manuálne detekované vozidlá		Metóda geomagnetických senzorov		Metóda indukčných slučiek	
	Počet veľkých vozidiel	Počet malých vozidiel	Počet veľkých vozidiel/presnosť[%]	Počet malých vozidiel/presnosť[%]	Počet veľkých vozidiel/presnosť[%]	Počet malých vozidiel/presnosť[%]
7:30 - 7:50	21	72	24/85,7%	75/95,8%	22/95,2%	72/100%
08:00 - 8:20	19	81	24/73,6%	83/97,5%	19/100%	82/98,7%
12:00 - 12:20	7	39	8/85,7%	40/97,4%	7/100%	39/100%
12:30 - 12:50	10	32	11/90,0%	32/100%	10/100%	32/100%
17:00 - 17:20	28	89	32/85,7%	92/96,6%	28/100%	90/98,9%
17:30 - 17:50	24	85	28/83,3%	85/100%	24/100%	85/100%
Celkovo	109	398	127/83,4%	407/98,0%	110/99,0%	400/99,4%

Tab. 2.2: Meranie geomagnetického radaru [8]

2.2.3 Vyhodnotenie merania

Mohli sme pozorovať, že geomagnetické radary sa ukázali ako vcelku efektívny spôsob detekcie vozidiel avšak so značnými problémami pri detekcii pomalých a veľkých vozidiel. Pri meraní v meste v miestach, kde premáva mestská doprava, kamióny a nákladné autá v pomalých rýchlostiach by bolo vhodnejšie využitie inej technológie ako je video detekcia alebo indukčné slučky. V prípade úsekov diaľnic s malou pravdepodobnosťou obmedzenia dopravy by sa jednalo o účinnú a presnú metódu. [8]

3 Porovnanie mikrovlnných FMCW radarov

V tejto kapitole sme sa venovali porovnávaniu mikrovlnných radarov typu FMCW. Konkrétne o radary UMRR-11 Type 44 a UMRR-11 Type 132. Jedná sa o radary od rovnakého výrobcu s rozdielnou operačnou frekvenciou.

3.1 Mikrovlnný FMCW radar UMRR-11 Type 44

Jedná sa o 24GHz radarový senzor určený na zaznamenávanie viacerých pruhov a objektov v rovnakom čase, ktorý obsahuje 4D/HD technológiu. [16]

Šírka a vzdialenosť dohľadu je ovplyvniteľná použitou anténou. Anténa typu 44 slúži na pokrytie stredných vzdialeností so širokým horizontálnym uhlom. Dohľad je limitovaný od 1 metra po 140 metrov pri osobných vozidlách a 180 metrov pre nákladné autá a meraná rýchlosť od -320km/h po 320km/h s presnosťou $\pm 1\%$. V svojom poli rozhľadu je schopný zaznamenať až do 6 pruhov a maximálne 64 objektov súčasne. Zaznamenané objekty môžu byť limitované vybraným komunikačným rozhraním. Senzor zaznamenáva vzdialenosť, rýchlosť, uhol a ďalšie parametre viacerých stojacich a pohybujúcich sa objektov súčasne. Rovnako je schopný oddelenia objektov aj v oblastiach s vysokou hustotou premávky, ako sú dopravné zápchy alebo rušné úseky a križovatky s potrebou zastavenia. V takomto prípade je pole rozhľadu rozdelené a je vykonávané Dopplerovo meranie oddelene pre každú z oddelených oblastí. Jedná sa o senzor vysokého rozlíšenia 4D/HD, kde HD označuje schopnosť rozdelenia objektov podľa ich rýchlosti a vzdialenosti od senzoru. Výhodou je minimálna ovplyvniteľnosť svetelnými podmienkami, teplotou a počasím. [16]

Dôležitým parametrom je spôsob montáže a nastavenia daného senzoru. Pri montáži z uhla na viacpruhových cestných komunikáciách je výstup senzoru zdieľaný prostredníctvom LAN schopný vyčítať polohu objektu v závislosti na X a Y, absolútnu rýchlosť, uhol sklonu, dĺžku, atď.. Pokiaľ sa jedná o montáž priamo nad vozovku, vieme získavať dáta o klasifikácii vozidla, rýchlosti a smere jazdy, taktiež o obsadenosti vozovky, počte vozidiel a ich prítomnosti, rovnako ako detekovanie nesprávneho smeru jazdy vozidla. [16]

3.2 Mikrovlnný FMCW radar UMRR-11 Type 132

UMRR-11 Type 132 je 77GHz radarový senzor využiteľný v automobilovom priemysle, ktorý obsahuje 4D/HD* technológiu. Senzor tohto typu sa špecializuje na veľké vzdialenosti a zaznamenávanie širokého uhlu záberu s možnosťou zaznamenávania viacerých objektov a pruhov v rovnakom čase. [17]

Pracovať môže v dvoch módoch so zameraním na väčšiu vzdialenosť s obmedzeným uhlovým rozsahom záberu a so strednou vzdialenosťou s režimom širokého záberu, ktoré sa líšia v tvare vlny a detekčnom výkone. Obidva módy vysielajú na viacerých neprekrývajúcich sa frekvenčných pásmach (štyri pre mód s dlhým dosahom a dve pre stredný dosah), aby sa zabránilo vzájomnému rušeniu. Mód s dlhým dosahom má dosah od 1 m do 175 m a nameraná rýchlosť sa môže pohybovať od -320 km/h do 320 km/h, azimutov uhol môže nabráť hodnoty od -16° do 16° . Mód so stredným dosahom má vzdialenosť dosahu obmedzenú od 0,5 m do 64 m a maximálnu zaznamenanú rýchlosť od -320 km/h do 320 km/h, azimutov uhol je -50° až 50° . Výstupom sledovania je list objektov, ktorý obsahuje pozíciu na vozovke, detekčnú zónu, v ktorej bolo vozidlo detekované, rýchlosť, dĺžku vozidla a jeho smer jazdy. [17]

Senzor využíva patentovanú prenosovú vlnu a zaznamenáva vzdialenosť, rýchlosť, azimut a výškový uhol, a ďalšie parametre viacerých pohyblivých aj nepohyblivých objektov súčasne. Schopnosť rozlíšenia HD* označuje schopnosť rozdeľovania objektov nezávisle od ich vzdialenosti a rýchlosti voči senzoru. 4D meranie založené na Dopplerovej detekcii pohybu zabezpečuje priame Dopplerovo meranie rýchlosti, priame meranie vzdialenosti, priame meranie azimutového uhla a vertikálneho uhla. Senzor má integrované algoritmy na filtrovanie a sledovanie všetkých detekovaných objektov v čase. [17]

Vďaka možnosti zaznamenávania viacerých objektov je možné detekovať maximálne 128 alebo 256 objektov v rámci rozhľadu v rovnakom čase. Zorné pole typicky pokrýva až šesť pruhov. V senzore je integrovaný sledovací algoritmus pre sledovanie všetkých detekovaných objektov v čase. Množstvo zaznamenaných objektov môže byť obmedzené na základe zvoleného komunikačného rozhrania. Senzor dokáže oddeliť objekty v úsekoch s hustou premávkou, kde majú objekty medzi sebou minimálne vzdialenosti ako sú dopravné zápchy, križovatky so svetelnou signalizáciou... Senzor rozdeľuje pole rozhľadu na menšie časti, v ktorých individuálne pre každú z nich vykonáva Dopplerovo meranie. Zaznamenané objekty sú rozlišované pomocou detekčného algoritmu podľa rozdielnej rýchlosti alebo odlišnej hodnoty rozsahu po 0,66 m alebo 1,8 m závisle od zvolenej šírky pásma. [17]

Výhodou je takmer nulová ovplyvniteľnosť vonkajšími podmienkami, ako je počasie, teplota alebo svetelné podmienky okolia. Taktiež nie je citlivý na vibrácie a vysoké úrovne otrasov, je bezúdržbový s dlhou životnosťou. Ďalšou dôležitou výhodou je možnosť zaznamenania ako pohyblivého tak aj nepohyblivého objektu a zaznamenanie viacerých objektov v rovnakom čase. [17]

3.3 Výsledky teoretického porovnania radarov UMRR-11 Type 44 a UMRR-11 Type 132

V prípade porovnávania vybraných radarov sme sa mohli zamerať na viacero meraných aspektov konkrétnym radarom. Vzdialenosť merania je v prípade senzoru Typu 132 s dlhým dosahom nižšia o 44 metrov avšak s vyššou presnosťou merania, ktorú zaručuje väčšia citlivosť tohto radaru. Pri sledovaní azimuthovho uhla alebo uhla prevýšenia dosahuje Type 132 so stredným dosahom rovnaké hodnoty ako Type 44. V porovnaní zaznamenatej rýchlosti majú senzory rovnaké hodnoty maximálnej aj minimálnej rýchlosti. Najväčším rozdielom je v prípade merania rýchlosti a oddeľovania vozidiel na základe ich rýchlosti presnosť merania, kde je senzor s pásmom 77 GHz o polovicu presnejší. Rovnako je to aj v prípade oddeľovania objektov podľa hodnoty rozsahu.[16, 17]

Algoritmus sledovania a oddeľovanie objektov senzoru s 77GHz pásmom vysiela- nia, v porovnaní s 24GHz pásmom je dostupné širšie frekvenčné pásmo a Dopplerova frekvencia je vyššia približne o faktor 3. Schopnosť oddelenia objektov podľa hodnoty rozsahu je lepšia o faktor 3 a zlepšenie oddelenia objektov podľa nominálnej rýchlosti je lepšia o približne 0,13m/s. [16, 17]

3.4 Spracovanie výstupných dát radarov FMCW

Výstupné dáta FMCW senzorov sú prijímané vo forme spracovaných dátových signálov. Každý prejazd zaznamenaný senzorom je spracovaný interným systémom výrobcu v radarovom senzore a to triggermi na prechádzajúce vozidlo. Prijaté dáta zo senzora obsahujú časovú známku kedy bolo vozidlo zaznamenané daným senzorom, pozíciu na vozovke alebo detekčnú zónu, na ktorej bolo vozidlo zaznamenané, rýchlosť, dĺžku a kategóriu vozidla. Dáta prijaté zo senzorov Type 44 a Type 132 sú rovnaké. Jedná sa o spracovanie od rovnakého výrobcu rovnakými technológiami. Rozdiely medzi senzormi môžeme sledovať v prípade bližšieho pozorovania konkrétnych hodnôt. Príklad výstupu prijatých dát môžeme sledovať v tabuľkách. Jedná sa o hodnoty z rovnakého časového úseku pre senzor UMRR-11 Type 132 viď tabuľka 3.2, UMRR-11 Type 44 viď tabuľka 3.3 a pre indukčné slučky viď tabuľka 3.4.

Porovnávané dáta zo senzorov v tejto práci sú zaznamenávané v rovnakom časovom úseku na rovnakej časti vozovky. Jedná sa o 24 hodinový časový úsek od 7:00 do 7:00 nasledujúceho dňa. Senzorom UMRR-11 Type 44 bolo zaznamenaných za 24 hodín 10914 vozidiel, čo je v porovnaní s UMRR-11 Type 132 o 184 vozidiel viac. Najčastejším dôvodom falošného záznamu bolo v prípade senzora UMRR-11 Type 44 detekovanie jedného vozidla prechádzajúceho cez dva pruhy ako dve vozidlá s

rovnakou rýchlosťou. Záznam bol v takomto prípade časovo posunutý len o niekoľko milisekúnd, vozidlo sa pohybovalo rovnakou rýchlosťou avšak bolo identifikované v inom pruhu. V priemere sme sledovali tento typ chyby pri vozidlách pohybujúcich sa rýchlosťou menšou ako je 90km/h. Takisto bol zaznamenaný nedostatok v prípade detekovania vozidiel s rýchlosťou nad 130km/h, kde neboli detekované všetky vozidlá, ako v prípade senzoru typu 132.

Pre prípad porovnávania výstupu z FMCW radarov a indukčných slučiek bol vytvorený program na prepočítanie času záznamu merania v časovej známke výstupu. Nevyhnutnosť prepočítania času vznikla z dôvodu umiestnenia senzorov. Obidva mikrovlnné senzory zaznamenávajú vozidlo 46 metrov pred indukčnou slučkou. Zaznamenanie vozidla je teda posunuté o čas potrebný na prejdenie tohto úseku. Ako riešenie bol vytvorený program v Matlabe C.1, pomocou ktorého je vypočítaný tento časový posun a prirátaný k pôvodnej hodnote času. Ako vstupné dáta je do programu načítaná tabuľka s hodnotami prejazdu vozidiel indukčnou slučkou a časovou korekciou vypočítanou pomocou programu excel. Premenná ΔT bola určená na základe rýchlosti vozidla a dĺžky prejdeného úseku. Samotný program začína prípravou prostredia, a to odstránením predchádzajúcich premenných a vyčistením terminálového okna. Po načítaní dát sú inicializované vektory pre výpočet hodín, minút a sekúnd, s veľkosťou určenou podľa vstupných dát. Dáta sú postupne spracované pomocou for cyklu. Vstupný reťazec znakov je najprv orezaný o údaj o časovom pásme. Funkciou split boli ďalej dáta rozdelené na časové jednotky teda hodiny, minúty a sekundy, pre ich lepšie spracovanie. Premenné nesúce hodnotu času sú vo formáte string, a preto pre ich ďalšie použitie bolo potrebné ich prevedenie na typ double pomocou funkcie str2double. Po prevedení dát na číselný typ double je k nemu pripočítaná predodšle vypočítaná časová korekcia. Pred ukončením aktuálneho cyklu sú dáta skontrolované aby nedošlo k pretečeniu, teda aby hodnota sekúnd neklesla na záporné hodnoty, a prepočítané pre splnenie významu z fyzikálneho hľadiska. Pre možné vyhodnotenie v programe excel sú dáta spätne prevedené na dátový typ string, pred čím bolo zároveň potrebné vymazanie prvého prázdneho znaku, ktorý vznikol pri pretypovaní str2double.

3.5 Porovnanie merania dát z radarov FMCW a s indukčnými slučkami

Senzory boli porovnávané na základe dát z indukčných slučiek. Indukčné slučky obsahovali celkovo 10530 záznamov, ktoré boli postupne podľa prepočítaného času prechodu porovnávané s dátami zo senzorov UMRR-11 Type 44 a UMRR-11 Type 132. V prípade výstupných dát sme sledovali len 9 záznamov detekovaných len týmito sen-

zorom, a preto ich budeme považovať za falošné. Metóda indukčných slučiek naopak nezachytila až 148 vozidiel, ktoré boli zachytené obomi mikrovlnnými radarmi. V takomto prípade bolo možné, že sa jednalo o chybu samotnej indukčnej slučky alebo tieto záznamy môžeme považovať za falošne zaznamenané v prípade obidvoch mikrovlnných senzorov. Pre ďalšie účely tejto práce sme nezachytené záznamy indukčnou slučkou považovali za chybné. Z celkového počtu zachytených vozidiel indukčnými slučkami nám vyšlo 1,49 % chybných záznamov, čo vo výsledku za daný časový úsek detekuje úspešnosť až 98,51 %. Výsledné hodnoty merania môžeme sledovať v tabuľke na 3.1

Tab. 3.1: Výsledky presnosti merania implementovaných senzorov

Počet záznamov	Indukčné slučky	UMRR-11 Type 132	UMRR-11 Type 44
Celkovo	10530	10729	10913
Falošné záznamy	9	101	378
Nezachytené vozidlá	148	37	137
Chybné záznamy	1,49%	1,28%	4,72%
Presnosť senzoru	98,51%	98,72%	95,28%

Mikrovlnný radar UMRR-11 Type 132 je považovaný z teoretického hľadiska za presnejšiu alternatívu detekcie vozidiel medzi nami porovnávanými mikrovlnnými radarmi. Tento fakt bol meraním na tomto úseku v priebehu 24 hodín podložený úspešnosťou senzora až 98,72 % z celkového počtu 10729 záznamov. V porovnaní so zachytenými vozidlami indukčnými slučkami bolo zaznamenaných 101 falošných záznamov a celkovo 37 nezachytených prechádzajúcich vozidiel. V prípade falošných záznamov sme mohli sledovať najvyššiu neúspešnosť z dôvodu dvojitej detekcie pri prejazde jedného vozidla. Dvojité detekcie môže byť zaznamenaná pokiaľ sa jedná napríklad o predbiehajúce vozidlo, ktoré nemení svoju rýchlosť avšak je zaznamenané pre dva pruhy.

Výsledky merania mikrovlnným radarom UMRR-11 Type 44 boli oproti predošlým radarom výrazne horšie. Radar sa potýkal s výrazným problémom dvojitej detekcie, na základe čoho vzniklo až 378 falošných záznamov. Jednalo sa väčšinou o vozidlá s rýchlosťou okolo 90 km/h, ktorých bolo zaznamenaných najviac. Ďalším výrazným rozdielom bol problém zaznamenávania vozidiel pri vyšších rýchlostiach. Vozidlo bolo v takomto prípade detekované aj indukčnými slučkami ako aj senzorom UMRR-11 Type 132 avšak vynechané radarom UMRR-11 Type 44. Celkovo senzor zaznamenal 10913 záznamov o prechádzajúcich vozidlách, z čoho v 378 prípadoch sa jednalo o falošné záznamy a celkový počet nezaznamenaných vozidiel bol 137.

Presnosť senzora sa v prípade nášho časového úseku pohybuje na hodnote 95,28 %, teda s 4,72% podielom neúspešných záznamov.

Celkovo bolo možné konštatovať presnosť senzorov z hľadiska na požiadavky prevedenia a kvalitu inteligentných systémov na diaľniciach a cestách v správe "Ředitelství silnic a dálnic ČR"[15] za dostačujúcu. Meraním bolo potvrdené, že vhodnejším a presnejším senzorom je UMRR-11 Type 132. Senzorom bolo zachytených výrazne menej falošných záznamov a vynechaných vozidiel bolo len 37, čo je zanedbateľná hodnota. Presnejšia citlivosť senzoru je z teoretického hľadiska zaručená vyššou operačnou frekvenciou, a to až 77 GHz na ktorej senzor vysielá. V prípade senzoru UMRR-11 Type 44 boli výsledky presnosti merania výrazne nižšie. Vo finále je však možné hodnotiť meranie všetkými senzormi za úspešné aj v prípade, že by senzor nebol v zapojení v kombinácii s inou technológiou.

Tab. 3.2: Ukážka výstupných dát zo senzoru UMRR-11 Type 132

Časová známka	Pruh	Rýchlosť [km/h]	Dĺžka vozidla
2022-05-09T07:00:06.585+02:00	LN1-radar	102	5600
2022-05-09T07:00:07.193+02:00	LN2-radar	131	4600
2022-05-09T07:00:08.906+02:00	LN2-radar	134	4600
2022-05-09T07:00:12.696+02:00	LN1-radar	84	5600
2022-05-09T07:00:15.608+02:00	LN2-radar	173	4600
2022-05-09T07:00:15.944+02:00	LN1-radar	157	5000
2022-05-09T07:00:25.016+02:00	LN1-radar	127	5600
2022-05-09T07:00:27.544+02:00	LN2-radar	134	4600
2022-05-09T07:00:27.928+02:00	LN1-radar	124	4600

Tab. 3.3: Ukážka výstupných dát zo senzoru UMR-11 Type 44

Časová známka	Pruh	Rýchlosť [km/h]	Dĺžka vozidla
2022-05-09T07:00:06.683+02:00	LN1-radar	102	5600
2022-05-09T07:00:07.275+02:00	LN2-radar	131	4600
2022-05-09T07:00:08.925+02:00	LN2-radar	134	5000
2022-05-09T07:00:12.747+02:00	LN1-radar	85	14000
2022-05-09T07:00:15.675+02:00	LN2-radar	173	5000
2022-05-09T07:00:15.979+02:00	LN1-radar	156	5000
2022-05-09T07:00:25.051+02:00	LN1-radar	127	5000
2022-05-09T07:00:27.61+02:00	LN2-radar	135	5000
2022-05-09T07:00:27.978+02:00	LN1-radar	124	4600

Tab. 3.4: Ukážka výstupných dát z indukčných slučiek

Časová známka	Pruh	Rýchlosť [km/h]
2022-05-09T05:00:07.949282+00:00	LN1-radar	103
2022-05-09T05:00:08.240805+00:00	LN2-radar	131
2022-05-09T05:00:09.887957+00:00	LN2-radar	135
2022-05-09T05:00:14.377797+00:00	LN1-radar	85
2022-05-09T05:00:16.340578+00:00	LN2-radar	173
2022-05-09T05:00:16.772334+00:00	LN2-radar	151
2022-05-09T05:00:26.091503+00:00	LN1-radar	128
2022-05-09T05:00:28.518075+00:00	LN2-radar	135
2022-05-09T05:00:29.002437+00:00	LN1-radar	124

4 Implementácia indukčných slučiek

V rámci bakalárskej práce bola jedna z implementovaných technológií metóda indukčných slučiek. Využívanou technológiou analýzy signálu bol v našom prípade slučkový detektor VEK S4. Jedná sa o štvorkanálový slučkový detektor určený pre získavanie parametrov rýchlosti a triedy detekovaných vozidiel. Vlastnosťami tohto detektora je zaznamenávanie rýchlosti, dĺžky a klasifikácie vozidiel s dvojslučkovým systémom. Výstupom detektoru pre účely tejto práce boli dva druhy signálov. V prvom prípade boli použité čisté nespracované hexadecimálne dáta z priameho výstupu indukčnej slučky. Tieto dáta zobrazujú prechod vozidla indukčnou slučkou a na ich ďalšie spracovanie sa v praxi používa systém analýzy signálu, ako je napríklad už spomínaný VEK S4 a VEK S4C. Druhým, ďalej rozoberaným výstupom, sú už spracované dáta pomocou technológie VEK S4. Dáta sú už analyzátorom signálu spracované a zaznamenané do súboru CSV. Takéto dáta obsahujú časovú stopu záznamu, rýchlosť prechádzajúceho vozidla, pruh, v ktorom sa vozidlo pohybovalo a pridelené identifikačné číslo viď 3.4. Z týchto dát je už možné priamo spracovať štatistiky premávky vo vybranom časovom rozmedzí, bez nutnosti ďalšieho spracovania.

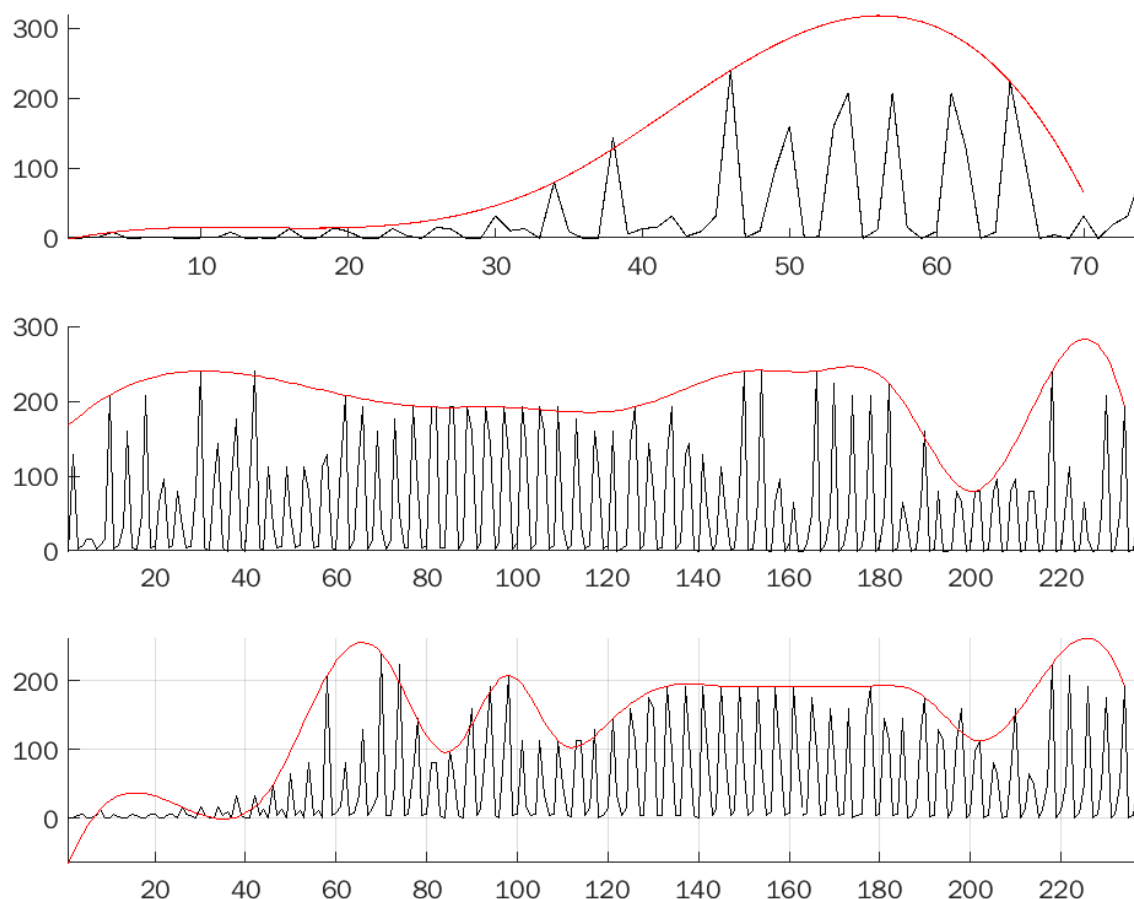
Cielom tejto kapitoly bolo vykreslenie nespracovaných dát prijatých indukčnou slučkou do grafov pomocou Matlabu. Prijaté hexadecimálne dáta nám zobrazujú výchylku indukčnosti cievky pri prechode feromagnetického objektu, v tomto prípade auta, magnetickým poľom indukčnej slučky. Prechodom feromagnetického objektu sa zmenia parametre indukčnosti, čo spôsobí následnú výstupnej amplitúdy pozorovateľnú v jednotlivých grafoch na obrázku 4.1. Z nami získaných dát vieme pozorovať prechod vozidla indukčnou slučkou, ako aj typ vozidla. V tejto kapitole sme si spracovali dáta po prechode osobného vozidla a dvoch nákladných áut. Výkyv signálu je badateľný bežným pohľadom na vykreslený graf. Z dĺžky výkyvu je pozorovateľné ako dlho sa vozidlo nachádzalo v poli indukčnej slučky a podľa frekvencie je taktiež možné pozorovať o akú kategóriu vozidla sa jednalo.

4.1 Programové riešenie

V programe vykreslenia A.1 sa nachádzajú tri premenné pre tri rôzne prejazdy vozidiel. Obsahom premenných `car1_str`, `car2_str`, `car3_str` sú už spomínané hexadecimálne dáta prijaté z indukčných slučiek. Program začína načítaním poľa reťazcov, ktoré sú v hexadecimálnom formáte uložené do štruktúry. Následne sú nastavené parametre envelope funkcie a pre spracované dekodované dáta je alokovaná pamäť, ktorá je vypočítaná podľa veľkosti pôvodných dát. Pred samotným vykresľovaním je zavolaný príkaz `hold on`, ktorý zabezpečuje, aby nedošlo k prepisovaniu dát v

grafe. Dáta sú následne prechádzané pomocou cyklu `for`. Samotné dáta sú prezentované ako súbor po sebe idúcich hexadecimálnych znakov. Údaj je uložený ako byte, ktorému príslužia dva hexadecimálne znaky. Funkciou `reshape` boli dáta rozdelené po dvojiciach, vďaka čomu je umožnené funkcii `hex2dec` prevod na číselnú hodnotu. Takto spracované dáta sú vykreslené funkciou `plot` a pre ich obal je použitá funkcia `envelope`, ktorá vytvorí vonkajšiu obálku. Pre lepšie odčítanie je upravená os x a zapnutá mriežka zobrazenia.

Na obrázku 4.1 je možné pozorovať vykreslený signál z indukčných slučiek po prechode vozidla. V prvom prípade sa jedná o prechod osobného automobilu. Môžeme sledovať krátky výkyv s nízkou frekvenciou signálu. Dva grafy ďalej zobrazujú prechod nákladného vozidla. Výchylka je znateľne väčšia s vyššou frekvenciou a dĺžkou prejazdu vozidla ponad indukčnú slučku.



Obr. 4.1: Grafy prejazdu vozidiel indukčnou slučkou

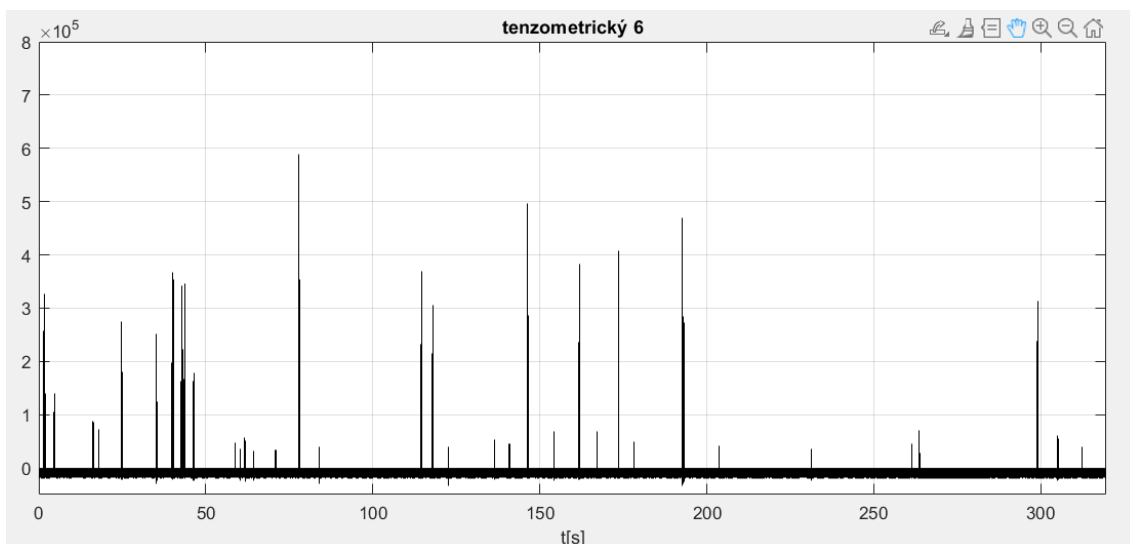
5 Implementácia vážiacich senzorov

V rámci tejto kapitoly boli implementované vážiace senzory dvoch typov. Jednalo sa o tenzometrický vážiaci senzor a kremíkový piezoelektrický vážiaci senzor. Výstupom vážiacich senzorov sú dáta o prechádzajúcom vozidle a jeho váha meraná za jazdy. Možnosť merania sa vzťahuje na vozidlá jazdiace od necelých 3km/h po vysoké rýchlosti. Taktiež nie je potrebná aplikácia pod vozovku, keďže sa v oboch prípadoch jedná o takzvané prúžkové snímače, ktoré sa pokladajú na povrch vozovky. Výstupné dáta z týchto senzorov nie sú zverejnené v tejto práci.

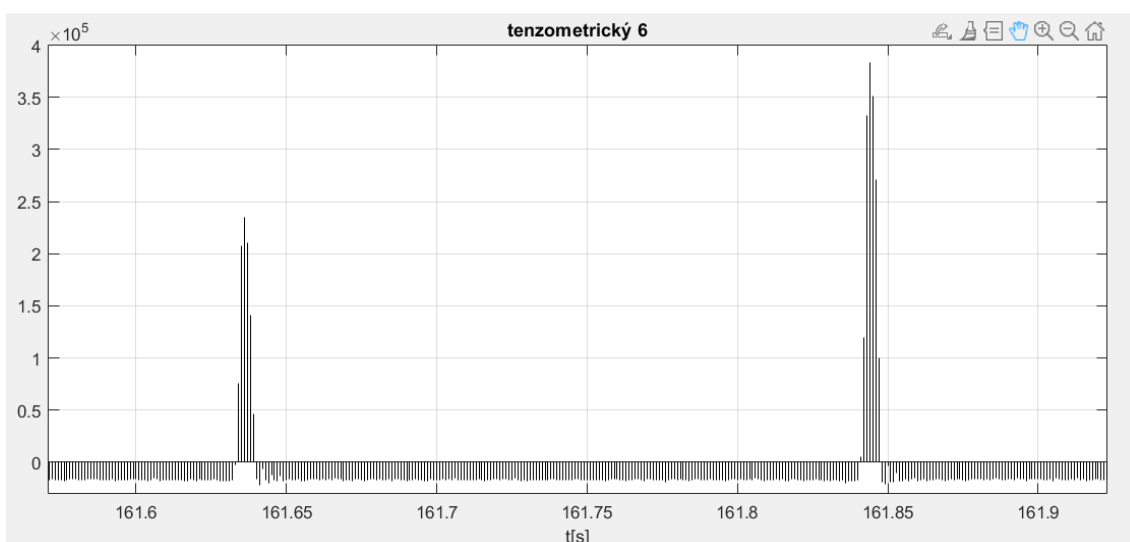
5.1 Tenzometrický vážiaci senzor

Použitý tenzometrický senzor je od spoločnosti Intercomp. Jedná sa o senzor určený na meranie váhy za pohybu. Na jeden jazdný pruh sú typicky umiestnené dva senzory. Proces váženia je založený na princípe zaznamenávania a spracovania signálov generovaných senzorom pri zmene zaťaženia. Tenzometrický jav, na ktorom princípe stavia senzor, reaguje na prítlak alebo ohyb drôtu v senzore, čo následne zapríčiní zmenu odporu. Pri prechode vozidla senzorom sa drôt stlačí, čo vedie k následnému zmenšeniu prierezu drôtu a zväčšeniu jeho dĺžky a na základe týchto zmien sa zvýši veľkosť odporu v senzore. Na každú nápravu prijímame dva výkyvy a ich aritmetickým priemerom sa vypočíta výsledok váženia prechádzajúcej nápravy. Súčtom meraných nápravových zaťažení vozidla je brutto odhad váhy vozidla. Výkyv senzoru je digitálny signál, teda je signál vzorkovaný. Chyby merania tenzometrickými senzormi sú bežne spôsobené jeho citlivosťou na rušenie, teplo atď. Rušenie sa obvykle odstraňuje diferenciálnym zapojením.

Na grafe 5.1 je možné sledovať prechod vozidiel tenzometrickým senzorom. Každý väčší pozorovateľný výkyv zobrazuje prechod jedného vozidla. Môžeme rovnako pozorovať chyby v prípade menších výkyvov, ktoré môžu byť spôsobované napríklad mechanickými záskmitmi. Prechod nápravy senzorom je zaznamenaný ako jeden výkyv signálu, respektíve odporu. Pri bližšom pohľade zobrazenom na obrázku 5.2 sledujeme prechod dvoch náprav senzorom v priebehu niekoľkých stoviek milisekúnd. Jedná sa o postupný nábeh nápravy na tyč senzoru. Sledujeme nábeh vozidla v perióde vzorkovania na tyč senzoru s postupným zväčšovaním a zmenšovaním zaťaženia na senzore.



Obr. 5.1: Graf prejazdu vozidiel tenzometrickým senzorom



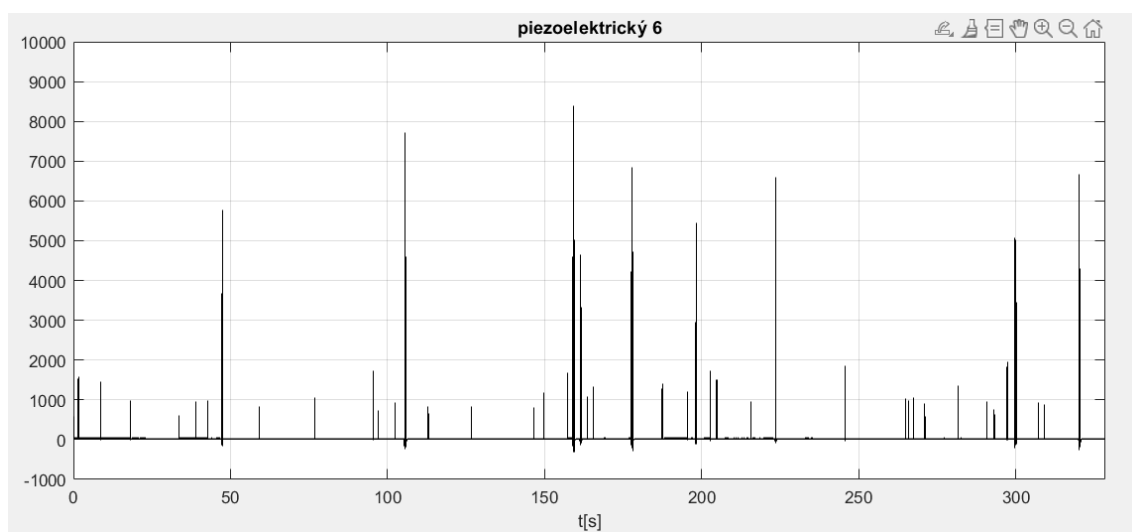
Obr. 5.2: Graf prejazdu jedného vozidla tenzometrickým senzorom

5.2 Piezoelektrický vážiaci senzor

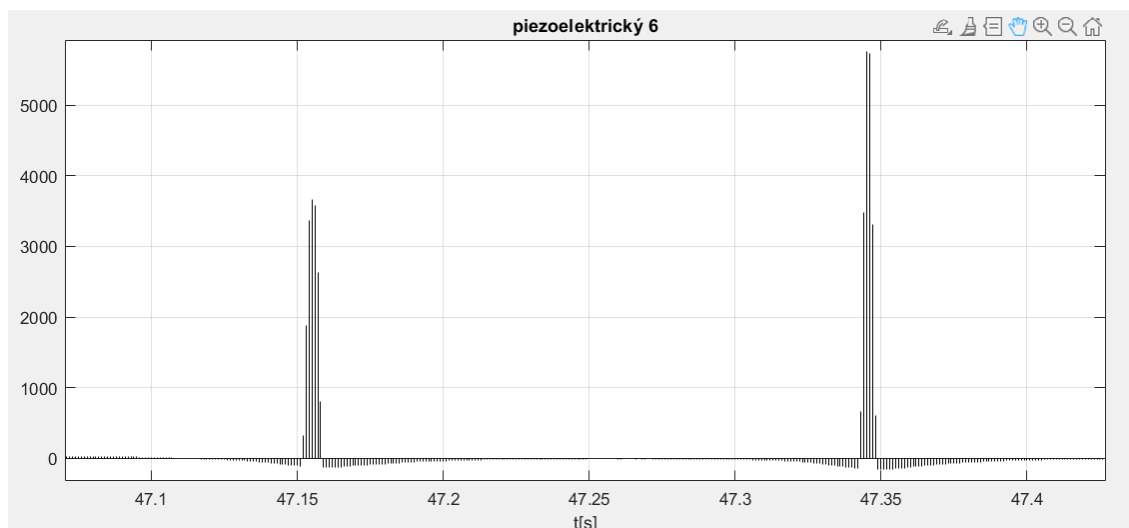
Druhým použitým senzorom je piezoelektrický senzor určený na meranie váhy vozidla v pohybe. Senzor je od spoločnosti enviko-tech. Je založený na princípe využitia piezoelektrického javu, kde pri prechode vozidla dôjde ku stlačeniu kryštálu, pri čom je generovaný náboj. Piezoelektrické senzory sú schopné detekovania len dynamických javov, preto sú vhodné na meranie váhy za pohybu. Pokiaľ by vozidlo

na senzore zastalo bola by detekovaná len zmena pri nábehu na tyč senzoru, avšak senzor by nedokázal určiť, že sa na ňom vozidlo stále nachádza. Generovaný náboj je následne prevedený na lepšie spracovateľný signál, teda napätie.

Na grafe piezoelektrického senzoru 5.3 môžeme pozorovať prechody vozidiel našim senzorom. Každý väčší výkyv zobrazuje prechod jedného vozidla. Menšie výkyvy sú spôsobené nepresnosťou merania spôsobenou citlivosťou senzoru na zmeny tlaku v okolí. Pri bližšom pohľade na konkrétny prejazd jedného vozidla na grafe 5.4 je pozorovateľný nábeh vozidla na tyč senzoru začínajúc s počiatočným podkmitom, ktorý je viditeľný aj na konci výkyvu, teda po prechode nápravy senzorom s postupným klesaním, ako sa vozidlo od senzora oddaľuje naspäť k nule. Podkmit je zapríčinený vysokou citlivosťou senzoru na zmenu tlaku na vozovke pri približovaní sa vozidla k tyči senzoru. Ďalej je možné sledovať postupný nábeh nápravy na tyč senzoru a postupné zvyšovanie výkyvu napätia, a zase spätné znižovanie pri zjazde nápravy zo senzora. Rovnaký priebeh sledujeme aj v prípade prejazdu druhej nápravy. Rovnako ako v prípade tenzometrického senzoru sledujeme, že sa jedná o rýchly priebeh zmeny. Rozdiel medzi prejazdom prednej a zadnej nápravy je rovnako niekoľko stoviek milisekúnd.



Obr. 5.3: Graf prejazdu vozidiel piezoelektrickým senzorom



Obr. 5.4: Graf prejazdu jedného vozidla piezoelektrickým senzorom

5.3 Programové riešenie

Pre prehľad a spracovanie dát z vážiacich senzorov bol vytvorený program B.1 na vykreslenie grafov prechodu vozidiel senzorom. Program prijíma dáta z csv súborov oboch vážiacich senzorov. Na začiatku je potrebné vyčistenie prostredia od nepotrebných premenných a uzavretím všetkých nepotrebných okien. Vstupné dáta sú uložené do štruktúry pre spracovanie pomocou ďalej vytvorenej triedy. Pre efektívne spracovanie dát bola vytvorená trieda `plot_senzor` B.2, ktorá má ako vstupné argumenty dáta zo senzorov, názvy senzorov, frekvenciu vzorkovania a limity pre y os. Celkový čas x-ovej osi je ďalej počítaný ako dĺžka priebehu dát danej pod sekcie vydelené frekvenciou senzora, čo je v našom prípade 1 kHz. Jednotlivé dáta sú prechádzané for cyklom, kde je ako prvé spustené načítanie súborom pri každom cykle. Keďže sa jedná o diskkrétne dáta v hodnote a čase, pre ich vykreslenie bola použitá funkcia `stem` namiesto klasického `plot`. Nakoniec boli upravené limity pre osi a zapnutá mriežka pre lepšie odčítanie údajov.

5.4 Porovnanie vážiacich senzorov

Pri porovnávaní piezoelektrického a tenzometrického senzoru vieme povedať, že sa jedná o senzory postavené na veľmi podobnom princípe, kde je hlavným rozdielom je citlivosť senzorov a zmena rozdielnych parametrov pri prechode vozidla na základe použitého fyzikálneho javu. Pre grafy v oboch senzoroch platí podobný

priebeh s porovnateľnými výsledkami nábehu vozidla pri výkyve. V oboch prípadoch vieme sledovať prechod vozidla ako súčet prechodu všetkých jeho náprav. Hlavným porovnateľným rozdielom pri prvom pohľade na dané grafy na obrázku 5.1 a 5.3 je viditeľný podkmit signálu v prípade piezoelektrického senzoru. Tieto senzory sa bežne používajú v kombinácii so senzormi určenými na merania rýchlosti prejazdu vozidiel a analýzu v doprave. Výsledkom sú porovnateľné výsledky dvoch veľmi podobných senzorov používaných v bežnej prevádzke.

6 Vyhodnotenie technológií v porovnaní s indukčnými slučkami

Pri celkovom vyhodnotení bolo potrebné sledovať viacero faktorov, ktoré priamo ovplyvňujú kvalitu a využiteľnosť neintruzívnych senzorov v porovnaní s indukčnými slučkami. Medzi dôležité faktory pri výbere vhodnej technológie patrí úspešnosť detekcie v bežnej prevádzke, cenová dostupnosť jednotlivých senzorov, náročnosť spracovania prijatých dát a spôsoby inštalácie a montáže na vozovke. Každý z týchto faktorov je pri voľbe vhodnej alternatívy kľúčový, či už sa jedná o výber konajúci sa v spoločnosti poskytujúcej služby inteligentných riešení dopravných systémov alebo dopravnej inštitúcie, pre ktorú sú výsledky merania smerodajné a dôležité.

Tab. 6.1: Tabuľka porovnania implementovaných senzorov

Použitá technológia	Cena	Presnosť	Náročnosť implementácie
Indukčné slučky	1 300 Kč	98,51%	Náročná inštalácia, nutnosť zásahu do vozovky, nenáročná softwarová implementácia
UMRR-11 Type132	Neuvedená	98,72%	Nenáročná inštalácia, bez potreby zásahu do vozovky, jednoduchosť spracovania dát
UMRR-11 Type44	32 000 Kč	95,28%	Nenáročná inštalácia, bez potreby zásahu do vozovky, jednoduchosť spracovania dát
Vážiace senzory	15 500 Kč	95% [20]	Inštalácia na povrch vozovky, potrebné odstavenie dopravy, nutnosť individuálneho spracovania

Ako prvou metódou boli implementované vážiace senzory s možnosťou váženia vozidiel za jazdy. Konkrétne boli nainštalované dva senzory, piezoelektrický a tenzometrický. Obidva senzory sú zamerané na samotné váženie, čím však detekujú aj samotný prejazd vozidla. V porovnaní s indukčnými slučkami sa jedná o drahšiu alternatívu merania, avšak aj o komplexnejšiu technológiu slúžiacu najmä k účelu váženia, nie len prejazdu jednotlivých vozidiel. Cena vážiacich senzorov sa pre jeden pruh pohybuje okolo hodnoty 15 500 Kč. Dáta prijaté z váhových senzorov je ďalej potrebné spracovať, vyhodnotiť prechod vozidla a vypočítať jeho váhu. Pre výpočet váhy je potrebná informácia o rýchlosti prechádzajúceho vozidla, preto sa vo väčšine prípadov spoločne s nimi implementuje aj senzor pre detekciu prejazdu

vozidla a meranie jeho rýchlosti, čo navyšuje celkovú cenu potrebnú pri ich využití. Samotné programové riešenie nie je zložitý proces pre skúseného programátora, je však potrebné aby sa jednalo o automatizovaný proces, aby spoločnosť vedela s dátami ďalej pracovať. Montáž vážiach senzorov nevyžaduje zásah do vozovky ani dlhšie uzavretie pruhu. Samotné senzory sú aplikované na povrch vozovky v rovnakých rozostupoch a pripojené na zbernicu dát.

Ďalšími implementovanými senzormi boli FMCW mikrovlnné radary, konkrétne sa jednalo o dva typy, UMRR-11 Type 132 a UMRR-11 Type 44. Hlavným rozdielom medzi zvolenými radarom je operačná frekvencia, kde sa v prípade typu 132 jednalo o 77 GHz a pre typ 44 je to 24 GHz. Operačná frekvencia v tomto prípade výrazne ovplyvňuje presnosť merania. Výsledky merania sú uvedené v tabuľke 3.1. Mikrovlnný senzor UMRR-11 Type 132 je citlivejší, presnejší a menej náchylný na falošné záznamy, ktorých bolo o 2/3 menej ako v prípade UMRR-11 Type 44. Rovnako sme mali možnosť pozorovať rozdiel v počte nezachytených vozidiel. Senzor v takomto prípade vykazoval minimálne rozdiely oproti vozidlám zachytených indukčnými slučkami. Pri pozorovaní presnosti merania dosahoval Radar UMRR-11 Type 132 veľmi presné výsledky, porovnateľné ba dokonca presnejšie v porovnaní s indukčnými slučkami. Rozdiel v efektívnosti merania medzi indukčnými slučkami a UMRR-11 Type 132 bol v priemere 0,21%. V prípade denného merania tisícok prechádzajúcich automobilov sa jedná o zanedbateľné hodnoty. Meranie mikrovlnným radarom UMRR-11 Type 44 nebolo až tak presné ako v prípade jeho konkurencie s vyššou operačnou frekvenciou. Tu bol počet falošných záznamov a nezaznamenaných prejazdov výrazne vyšší. Nepresnosti merania stúpili na 4,72%. Hodnoty meraní sú samozrejme rozdielne podľa dňa merania, počtu prechádzajúcich vozidiel a ich rýchlosti a frekvencie prejazdu. Zameriame sa ale na výsledky implementácie tejto práce, môžeme považovať efektívnosť senzoru UMRR-11 Type 44 za dostatočnú pre využitie na analýzu v doprave podľa požiadaviek na prevedenie a kvalitu inteligentných systémov na diaľniciach a cestách v správe "Ředitelství silnic a dálnic ČR"[15] avšak aj nepresnejšiu v porovnaní s ostatnými implementovanými technológiami viď porovnanie v tabuľke 6.1.

Cenové rozdiely medzi mikrovlnnými radarom sú vyššie. Pre účely tejto práce bola zistená cena UMRR-11 Type 44, pohybujúca sa okolo 32 000 Kč. Náklady na montáž a riadenie však už záležia od firmy poskytujúcej dané služby. Keďže sa však jedná o neintruzívne senzory a ich umiestnenie môže byť nad pruhom vozovky alebo na objektoch vedľa vozovky, podľa odporúčaní výrobcu na umiestnenie, náklady na inštaláciu sú nižšie. V prípade implementácie indukčných slučiek je cena za jednu indukčnú slučku pre jeden pruh 1 300 Kč. Pri indukčných slučkách však musíme rátať s výdavkami na ich implementáciu. Jedná sa o aplikovanie do vozovky, je teda potrebné poškodenie povrchu vozovky pre umiestnenie, zavedenie samotnej slučky

do vozovky a úpravu do pôvodného stavu. Táto metóda je neefektívna s ohľadom na dočasné obmedzenie dopravy pri montáži a potrebu vhodnej techniky, poprípadе využitie firmy pri zavádzaní čo značne navýši náklady pri implementácií. V prípade zavedenia indukčných slučiek je potrebné rátať s rýchlejším opotrebovaním vozovky. Rovnako v prípade indukčných slučiek sa využíva detektor na analýzu signálov, v našom prípade to bol VEK S4, cena tejto technológie nebola pre túto prácu zverejnená. Z mikrovlnných radarov je naopak prijímaný už spracovaný signál prejazdu vozidiel so všetkými potrebnými údajmi, čím je zaznamenanie času vozidla, rýchlosť, kategória a dĺžka. Ďalšie spracovanie dát ďalej závisí od potrieb využitia firmou, ktorá radar zavádzala a využíva.

Záver

Cielom bakalárskej práce bolo implementovať senzory vhodné ako efektívna náhrada bežne používaných indukčných slučiek, spracovanie dát z vybraných senzorov a vyhodnotenie úspešnosti merania. V teoretickej časti sa jednalo o rešerši problematiky jednotlivých senzorov, ich funkčnosti a presnosti merania podľa vybraných štúdií. Tieto teoretické poznatky boli následne využité pri vyhodnotení efektívnosti meraní jednotlivými senzormi a ich využitia v porovnaní s indukčnými slučkami.

Zameranie sa na indukčné slučky ako intruzívnu technológiu, ktorá je síce presným riešením v prípade merania a analýzy dát z vozovky, avšak jedná sa o invazívnu metódu s nutnosťou práce s nespracovanými dátami, potrebou údržby a dopadom na rýchle opotrebovanie vozovky. V tejto práci sme sledovali viacero metód, ktoré by mohli byť vhodnou a efektívnejšou alternatívou, či už na základe merania, montáže alebo samotného spracovania dát. Prvou vhodnou a využívanou metódou je analýza videa. Táto technológia síce nie je súčasťou implementovaných metód v tejto práci, avšak jedná sa o veľmi efektívne a moderné riešenie. Kamerové systémy sú už roky súčasťou modernej mestskej a cestnej infraštruktúry a ich využitie pre analýzu dát je jednoduchým a neintruzívnym riešením.

V rámci práce bolo implementovaných päť rôznych senzorov merania dát z vozovky. Prvou a najdôležitejšou bola metóda indukčných slučiek. Implementácia tejto metódy bola potrebná z hľadiska porovnávania výstupov jednotlivých technológií.

Ďalšími využívanými technológiami boli dva váhové senzory založené na dvoch základných fyzikálnych javoch, a to tenzometrickom a piezoelektrickom jave. Tieto technológie sú bežne využívané na kontrolu prepravy nadrozmerných nákladov, ktoré priamo prispievajú k poškodzovaniu verejných komunikácií a jedná sa o efektívnu a účinnú detekciu prevozu nákladov nad zákonom daným limitom. Zložitosť spracovania údajov a ich presnosti vieme priamo prirovnať k metóde indukčných slučiek. Jedná sa o podobné technológie založené na zmenách iných fyzikálnych veličín. Primárnym účelom týchto senzorov však nie je detekcia samotného vozidla, rovnako ani celková analýza premávky. Nejedná sa teda o technológiu, ktorou by bolo možné nahradenie zavedených indukčných slučiek. Jedná sa o doplnkovú technológiu s účelom váženía a detekcie nadrozmerných nákladov.

Medzi posledné implementované technológie sa radia dva mikrovlnné radary. Jednalo sa konkrétne o UMRR-11 Type 132 a UMRR-11 Type 44. Tieto radary pochádzajú od spoločnosti Smartmicro s rozdielom operačnej frekvencie vysielania a presnosti merania. Tieto radary môžeme na základe teoretických poznatkov, meraní zahrnutých v tejto práci, cenového hľadiska ale aj jednoduchosti montáže považovať za veľmi efektívnu metódu. V meraní dosahovali porovnateľné, dokonca v prípade senzoru UMRR-11 Type 132 môžeme zhodnotiť výsledky za presnejšie ako to bolo

v prípade indukčných slučiek. Pri montáži nie je potrebný zásah do vozovky ani odstavenie dopravy v danom úseku. Jedná sa síce o drahšiu technológiu, avšak s minimálnou potrebou údržby, efektívnym spracovaním údajov a zanedbateľnou ovplyvniteľnosťou okolnými podmienkami.

Vo výsledku sú mikrovlnné radary rovnako ako analýza videa presné a efektívne možnosti. Síce sa jedná o drahšie a zložitejšie náhrady, avšak pri ich inštalácii nie sú poškodené ani ovplyvnené iné časti vozovky. Tieto technológie spolu s indukčnými slučkami patria v praxi medzi jedny z najčastejšie používaných metód pre analýzu dopravy.

Literatúra

- [1] *Traffic Detector Handbook. Third Edition.* Georgetown Pike McLean, VA: Research, Development, and Technology, Turner-Fairbank Highway Research Center, 2006. Dostupné z URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/06108.pdf>.
- [2] B. A. Alpatov, P. V. Babayan and M. D. Ershov, "Vehicle detection and counting system for real-time traffic surveillance," 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/MECO.2018.8406017 Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8406017>.
- [3] J. Zhang, W. Xiao, B. Coifman and J. P. Mills, "Vehicle Tracking and Speed Estimation From Roadside Lidar," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 13, pp. 5597-5608, 2020, doi: 10.1109/JSTARS.2020.3024921.
- [4] A. Czyżewski et al., "Comparative study on the effectiveness of various types of road traffic intensity detectors," 2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/MTITS.2019.8883354.
- [5] Y. Guan et al., "Research on Geomagnetic Waveform Detection and Vehicle Identification Technology," 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2021, pp. 2343-2347, doi: 10.1109/IAEAC50856.2021.9390690.
- [6] Chiara, B. dalla, Deflorio, F., & Pinna, I. (2010, August 19). A comparing analysis of traffic monitoring systems. *Intelligent Transport*. Dostupné z URL: <https://www.intelligenttransport.com/transport-articles/1531/a-comparing-analysis-of-traffic-monitoring-systems/>
- [7] Webb, C. (2020, March 13). Compare a Radar Traffic Counter to an Inductive Loop Counter. *C & T*. <https://ct-technologyinfo.com/2020/02/10/comparing-a-radar-traffic-counter-to-an-inductive-loop-counter/>
- [8] Lou, L., Zhang, J., Xiong, Y., & Jin, Y. (2018). A Novel Vehicle Detection Method Based on the Fusion of Radio Received Signal Strength and Geomagnetism. *Sensors* (Basel, Switzerland), 19(1), 58. <https://doi.org/10.3390/s19010058>

- [9] B. Koszteczyk and G. Simon, "Magnetic-based vehicle detection with sensor networks," 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013, pp. 265-270, doi: 10.1109/I2MTC.2013.6555421. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6555421>>
- [10] Intelligent Transport. (2017, September 28). A comparing analysis of traffic monitoring systems. <<https://www.intelligenttransport.com/transport-articles/1531/a-comparing-analysis-of-traffic-monitoring-systems/>>
- [11] J. Song et al., "Research of Vehicle Detection System Based on Geomagnetic Disturbance Detection," 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), 2018, pp. 7840-7844, doi: 10.23919/ChiCC.2018.8482785.
- [12] Roni Stiawan et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1204 012017 <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1204/1/012017/pdf>>
- [13] Traffic Detector Handbook. Third Edition. Georgetown Pike McLean, VA: Research, Development, and Technology, Turner-Fairbank Highway Research Center, 2006.
- [14] Bugdol, Marcin & Miodonska, Zuzanna & Krecichwost, Michal & KASPEREK, Paweł. (2014). Vehicle detection system using magnetic sensors. *Transport Problems*. 9. 49-60.
- [15] Požadavky na provedení a kvalitu inteligentních dopravních systémů na dálnicích a silnicích ve správě Ředitelství silnic a dálnic ČR. <<https://smlouvy.gov.cz/smlouva/soubor/4675894/Smlouva%20Spel%20priloha%202.pdf>>
- [16] Datasheet | UMRR-11 Type 44 | Traffic Management <https://www.smartmicro.com/fileadmin/media/Downloads/Traffic_Radar/Sensor_Data_Sheets__24_GHz_/UMRR_Traffic_Sensor_Type_44_Data_Sheet.pdf>
- [17] Data Sheet | UMRR-11 Type 132 | Traffic Management <https://cdn.madison.tech/wp-content/uploads/2020/08/10113613/UMRR-11_Type_132_TM_Data_Sheet.pdf>
- [18] R. Sroka, J. Gajda, P. Burnos a P. Piwowar, "Information fusion in weigh in motion systems," 2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS) , 2015, s. 1-6, doi: 10.1109/SAS.2015.71336 . <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7133637>>

- [19] Z. Wang, Q. Wang and J. Hou, "The Research of Weigh-in-Motion Sensor Layout Based on Data Fusion,"2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009, pp. 127-131, doi: 10.1109/FSKD.2009.282. <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5358709>>
- [20] Weigh-in-Motion Pavement Interactive <<https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/design-parameters/weigh-in-motion/>>

Zoznam príloh

A	Spracovanie dát z indukčných slučiek v prostredí Matlab	52
B	Spracovanie dát z vážiacich senzorov v prostredí Matlab	54
C	Program prepočítania času prejazdu	56
D	Obsah elektronickej prílohy	57

A Spracovanie dát z indukčných slučiek v prostredí Matlab

Výpis A.1: Spracovanie dát z indukčných slučiek v Matlabe.

```
1 %Pole reťazcov dát v hexadecimálnom formáte
2 car_str = {car1_str, car2_str, car3_str};
3 %Vyhľadovanie obrysu signálu
4 envelope_smoothing = [8,15,10];
5 %Alokácia pola na dekodovanie dát
6 car_num = cell(size(car_str));
7
8 figure(1);
9 hold on;
10 %Prechádzanie reťazcov z pola
11 for i = 1:length(car_str)
12 %Rozdelenie reťazcov na časti po 2 znaky
13 car_data = reshape(car_str{i}, [], 2);
14 %Dekodovanie dát z matice car_data ako samostatné čísla
15 car_num{i} = hex2dec(car_data);
16 %Rozdelenie na grafy podľa počtu reťazcov
17 subplot(length(car_str),1,i);
18 hold on;
19 %Vykreslenie dát
20 plot(car_num{i},'-k');
21 %Výpočet a vykreslenie obrysu signálu
22 env = envelope(car_num{i},envelope_smoothing(i),'peak');
23 plot(env(1:end-4),'-r');
24 %Obmedzenie x osi
25 xlim([1 length(car_num{i})]);
26 end
27
28 grid on;
```

Výpis A.2: Prijaté dáta z indukčnej slučky v Matlabe.

```

1 %osobné auto car1
2 car1_str = '000000000000000000000000001000200050009001
3 2002f006a00ad00d100d800e700020126012901210119010e01fa
4 00e400d000be00a0006e003a001b0013000d000a00090005000400';
5 %nákladné auto car2
6 car2_str = '080011001d002a003d00460052005f0069006b006
7 f0072007300750078007d008c00a200b300c500cc00cc00ca00c9
8 00c800c900ca00c200b200a700a0009c0095008c0089008300730
9 05f004f00460040003f003e003d003d003e0042004a0050005400
10 55005600560055004f00470041003d003c003b003800370038004
11 200460047004600410040004000410046004700460041003e003e
12 003f004400450044003e003c003b003a003900380037003700370
13 03700370034002a00200019001400130010000d000a0009000700
14 0600050004000300020002000200020001000100010001000
15 10001000100';
16 %nákladné auto car3
17 car3_str = '000000000000000000000000001000100010002000
18 2000300040005000d00150028002f003e004900550064006a006c
19 006d00710072007300770080009200a700ba00c600c700c600c50
20 0c400c500c600c500b600a600a0009c00970090008b0087007a00
21 670054004a0043003e003d003c003b003c003e0045004d0052005
22 4005500550054005100490041003d003c003b003a00380038003e
23 00440045004500410040003f00400045004600460042003f003e0
24 03f0043004400440040003c003b003a0039003800370036003600
25 3600360035002f0024001c001700140012000e000c000a0007000
26 60005000400';

```

B Spracovanie dát z vážiacich senzorov v prostredí Matlab

Výpis B.1: Spracovanie dát z vážiacich senzorov v Matlabe.

```
1 clc;
2 clear;
3 close all;
4
5 % csv subory s datami a nastavenia plotu pre quartz
6 sensor_files = {'quartz_0.csv', 'quartz_1.csv',
7 'quartz_2.csv', 'quartz_3.csv',
8 'quartz_4.csv', 'quartz_5.csv'};
9 sensor_names = {'piezoelektrický_1', 'piezoelektrický_2',
10 'piezoelektrický_3', 'piezoelektrický_4',
11 'piezoelektrický_5', 'piezoelektrický_6'};
12 freq = 1e3;
13 Y = [-1000 1e4];
14 % plot quartz
15 plot_sensor(sensor_files, sensor_names, freq, Y);
16
17 % csv subory s datami a nastavenia plotu pre tenzo
18 sensor_files = {'tenzo_0.csv', 'tenzo_1.csv', 'tenzo_2.csv',
19 'tenzo_3.csv', 'tenzo_4.csv', 'tenzo_5.csv'};
20 sensor_names = {'tenzometrický_1', 'tenzometrický_2',
21 'tenzometrický_3', 'tenzometrický_4', 'tenzometrický_5',
22 'tenzometrický_6'};
23 freq = 1e3;
24 Y = [-.5 8] * 1e5;
25 %plot tenzo
26 plot_sensor(sensor_files, sensor_names, freq, Y);
```

Výpis B.2: Funkcia na vykreslenie dát z väziacich senzorov.

```
1 function plot_sensor(sensor_files,sensor_names,freq,Y)
2 % pre kazdy subor
3 for i = 1:length(sensor_files)
4 % precitaj subor
5 sensor_data = csvread(sensor_files{i});
6
7 % vykreslenie
8 figure(i);
9 pl=stem((0:length(sensor_data)-1)/freq,sensor_data,'-k');
10 % bez znaciek
11 set(pl,'Marker','none');
12 % zarovnanie
13 ylim(Y);
14 xlim([0 (length(sensor_data)-1)/freq]);
15
16 grid on
17 title(sensor_names{i});
18 xlabel('t[s]')
19
20 set(gcf,'units','normalized');
21 set(gcf,'position',[.1,.1,.7,.5]);
22 end
23 end
```

C Program prepočítania času prejazdu

Výpis C.1: Program na prepočítanie času prechodu vozidla pre indukčné slučky.

```
1 clc; clear; close all;
2 load('data.mat')
3 s = zeros(size(inputData));
4 m = zeros(size(inputData));
5 h = zeros(size(inputData));
6 for i = 1:length(inputData)
7     tmpstr = eraseBetween(inputData(i), 16, 21);
8     tmp = split(tmpstr, ':');
9     h(i) = str2double(tmp(1));
10    m(i) = str2double(tmp(2));
11    s(i) = str2double(tmp(3)) - deltaT(i);
12    if s(i) < 0
13        s(i) = 60 - s(i); m(i) = m(i) - 1;
14        if m(i) < 0
15            m(i) = 60 - m(i); h(i) = h(i) - 1;
16        end
17    end
18 end
19 s_h = num2str(h);
20 s_m = num2str(m);
21 s_s = num2str(s);
22
23 for i = length(s_h)
24     if s_h(i, 1) == ' '
25         s_h(i, 1) = '0';
26     end
27 end
28 newTime = num2str(h)+":"+num2str(m)+":"+num2str(s);
```

D Obsah elektronickej prílohy

```
/.....koreňový adresár priloženého archívu
├── VaziaceSenzory.....kódy pre vážiace senzory
│   ├── plot_matlab.m
│   └── plot_sensor.m
├── FMCW.....data a program FMCW
│   ├── PorovnanieFMCW_IL.xlsx
│   ├── program.....program
│   │   ├── data.mat
│   │   ├── programCas.m
│   │   └── dataIL.xlsx
└── IndukcneSlucky.....program spracovania dat indukcných sluciek
    └── IL_matlab.m
```