

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**Nedestruktivní optovláknový senzorový
systém pro měření rychlosti v dopravním
provozu**

DISERTAČNÍ PRÁCE

2017

Ing. Jan Nedoma

Nedestruktivní optovláknový senzorový systém pro měření rychlosti v dopravním provozu

Nondestructive fiber optic sensor system for measurement of traffic speed

Doktorská disertační práce

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra telekomunikační techniky

Doktorský studijní program: P1807 - Informatika, komunikační technologie a aplikovaná matematika

Studijní obor: 2601V018 - Komunikační technologie

Autor: Ing. Jan Nedoma

Školitel: prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.

Ostrava

Listopad 2017

Prohlášení studenta

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

V Ostravě dne:
27. listopadu 2017

.....
podpis studenta

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval za podporu všem, díky kterým mohla tato práce vzniknout. Vedoucímu disertační práce panu prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc., za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat rodině, přátelům za podporu a toleranci, zvláště při dokončování této disertační práce. A dále také vědeckým grantům: CZ.1.07/2.3.00/20.0217, SP2015/130, SP2016/149, SP2017/79, TA03020439, TA04021263, VI2VS/444, VI20152020008, FV20581 a FV 10396 díky kterým mohla tato práce vzniknout.

Abstrakt

Disertační práce popisuje návrh, realizaci a otestování nového způsobu detekce a měření rychlosti vozidel s primárním zaměřením na silniční provoz do rychlosti 100km/h, který lze využít v koncepci SMART Cities. Uvedené výsledky v této práci potvrzují, že podobný přístup lze využít rovněž pro monitorování tramvajového provozu, provozu metra a vlakových souprav na železnici. Popsaný měřicí systém je založen na využití interference v optických vláknech. Základem řešení je sériové zapojení sensorických jednotek na bázi Mach-Zehnderova interferometru pracujících s jednovidovými telekomunikačními optickými vlákny standardu G.652.D a G.653, vlnovou délkou 1550nm a nároky na výkon zdroje záření v řádech jednotek mW. Řešení popsaná v této disertační práci jsou v současné době chráněna autorským osvědčením (patent číslo 306992). Základem tohoto řešení je imunita vůči elektromagnetickým interferencím (EMI) a jednoduchá implementace, protože sensorické jednotky není nutné instalovat destruktivně do vozovky nebo kolejiště. Vzhledem k masivnímu rozšíření optických kabelů podél silnic a železničních tratí, které zabezpečují telekomunikační a bezpečnostní služby, je významnou výhodou i možnost přímého napojení sensorů na stávající infrastrukturu a možnost vzdáleného vyhodnocení. Měřicí systém byl dlouhodobě testován v reálném provozu a je charakterizován chybou v toleranci $\pm 3\text{km/h}$ udávané u úsekových měřicích systémů do rychlosti 100km/h v České republice.

Klíčová slova

Interferometr, Rychlost, Detekce, Sensor, Měření rychlosti, Vlákno optický senzor

Abstract

My dissertation thesis describes a design, implementation, and testing of a new way of vehicles detection and speed measurement primarily used in the road transport with the speed limit up to 100kph, which can be utilized in the concept of SMART Cities. Results published in this thesis confirm that a similar approach can be also used for the monitoring of tram, underground and railway transport. The proposed measuring system is based on the interference in optical fibers. The key condition is that sensory units are connected in series on the basis of Mach-Zehnder interferometer working with single-mode optical fibers of G.652.D. and G.653 standards, with the wavelength of 1550nm and demands on the radiation source output in the range of mW. Solutions described in this dissertation thesis are currently protected by copyright (the patent No.306992). The basis of this solution lies in electromagnetic interference immunity (EMI) and simple implementation as the sensory units do not need to be installed destructively into the roadway or railway. With regard to a massive use of optical fibers along roads and railway tracks, which provides telecommunications and security services, the important advantage is also the possibility of direct connections of sensors to existing infrastructure and the possibility of remote evaluation. The measuring system was tested in real traffic over a long period and is characterized by an error with the tolerance of ± 3 kph which is given by sectional speed measuring systems up to 100kph in the Czech Republic.

Keywords

Interferometer, Speed, Detection, Sensor, Speed measurement, Fiber-optic sensor

Obsah

Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	10
Seznam ilustrací.....	13
Seznam tabulek.....	15
1 Úvod.....	16
2 Interference světla	18
2.1 Popis interference světla pomocí intenzity záření.....	18
2.2 Koherence	19
2.2.1 Časová koherence.....	20
2.2.2 Prostorová koherence	21
2.3 Mechanické vlnění.....	22
2.3.1 Popis vzniku mechanické vlnění.....	22
2.3.2 Popis interference mechanického vlnění pomocí amplitudového skládání vln	24
2.3.3 Popis šíření vlnění v prostředí.....	25
3 Snímání vlnění	28
3.1 Vláknově optické senzory	28
3.2 Optovláknové interferometry.....	29
3.3 Vláknově optická interferometrie	30
4 Přehled dosavadního stavu techniky	34
4.1 ITS (Inteligentní dopravní systémy).....	34
4.2 Rešeršní hledání v oblasti silničních vozidel.....	35
4.2.1 Konvenční senzory	35
4.2.2 Indukční smyčky a magnetické senzory	35
4.2.3 Pneumatické senzory	36
4.2.4 Piezoelektrické senzory	37
4.2.5 Mikrovlnné senzory	37
4.2.6 Technologie CCTV (Closed Circuit Television)	38
4.2.7 Technologie RFID (Radio Frequency Identification).....	38
4.2.8 Akustické senzory	38
4.2.9 Vláknově optické a optické senzory	39

4.2.10	Optické senzory a aktivní infračervené senzory	39
4.2.11	Technologie DAS (Distributed Acoustic Sensor)	39
4.2.12	Technologie FBG (Fiber Bragg Grating).....	40
4.2.13	Technologie POTDR (Polarization Optical Time Domain Reflectometry).....	40
4.2.14	Senzory detekce mikroohybů v optickém vlákně.....	40
4.2.15	Technologie WIM (Weigh-in-Motion)	40
4.2.16	Interferometrické senzory	41
4.3	Rešeršní hledání v oblasti kolejových vozidel.....	46
4.3.1	Konvenční senzory	46
4.3.2	Technologie kolejových obvodů.....	46
4.3.3	Detektory kol a čítače náprav	47
4.3.4	System ECTS (European Train Control System).....	47
4.3.5	Vláknově optické a optické senzory	48
4.3.6	Technologie LIDAR (Light Detection And Ranging)	48
4.3.7	Distribuované senzory	49
4.3.8	Výkonové (intenzitní) senzory	50
4.3.9	Optické senzory a aktivní infračervené senzory	51
4.3.10	Senzory detekce mikroohybů v optickém vlákně.....	51
4.3.11	Technologie FBG (Fiber Bragg Grating).....	51
4.3.12	Interferometrické senzory	54
5	Cíle disertační práce.....	58
6	Úvod do praktické části disertační práce.....	60
7	Návrh a realizace měřicího senzoru	62
7.1	Realizace měřicího senzoru.....	62
7.1.1	Výběr vhodných materiálů pro uložení referenčního vlákna.....	62
7.1.2	Výběr vhodných materiálů pro uložení měřicího vlákna.....	63
7.1.3	Vytvoření I/O rozhraní senzoru	66
7.2	Testování frekvenčního rozsahu senzoru	67
7.3	Finální prototyp pro praktická měření.....	68
8	Praktická měření detekce vozidel	70
8.1	Měřicí schéma pro detekci vozidel	70
8.2	Software pro vyhodnocení detekce průjezdu vozidel	72

8.3	Praktická měření detekce automobilových vozidel	74
8.4	Praktická měření detekce kolejových vozidel	79
8.4.1	Tramvajová vozidla.....	80
8.4.2	Měření metro souprav	82
8.5	Závěr z provedených měření detekce vozidel	84
9	Návrh sensorového systému pro měření rychlosti v dopravním provozu	86
9.1	Software pro vyhodnocení dat	87
9.2	Reference pro měření rychlosti.....	90
9.3	Měření rychlosti automobilových vozidel	92
10	Návrh metod číslicové filtrace signálu.....	98
11	Závěr a přínosy práce	104
	Literatura	107
	Publikační činnost	119

Seznam symbolů, veličin a zkratk

Zkratka	Význam
BNC	Bayonet Neill-Concelman
BOTDA	Brillouinova časově optická analýza
CACS	Komplexní systém řízení automobilové dopravy
CCTV	Uzavřený televizní okruh
CW	Kontinuální vlna
DAS	Distribuovaný akustický snímač
DFB	Rozprostřená zpětná vazba
ECTS	Evropský systém řízení vlaků
FBG	Vláknově optická mřížka
FC/APC	Vláknový konektor: úhlový jednomódový
FIR	Filtr s konečnou impulzní odezvou
FMCW	Frekvenčně modulovaná kontinuální vlna
FTDM	Multiplex s frekvenčním dělením
IR	Infračervená oblast
IIR	Filtr s nekonečnou impulzní odezvou
ITS	Inteligentní dopravní systémy
LEU	Traťová elektronická jednotka
LIDAR	Světelná detekce a měření vzdáleností
NI	National Instruments
PBSE	Polycrystalline lead Selenide
POTDR	Optická polarizační časová reflektomie
POTV	Prostor ohrožení trakčního vedení
RBC	Rádiové blokové centrum
RMS	Efektivní hodnota
SPIE	Mezinárodní společnost pro optiku a fotoniku
USB	Univerzální sériová sběrnice
UMTS	Univerzální systémy řízení provozu
WDM	Vlnový multiplex
WIM	Vážení v pohybu

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A	-	Amplituda
A ₁	-	Amplituda vlnění
A ₂	-	Amplituda vlnění
a	-	Okamžitá hodnota
c	m/s	Rychlost světla
d	m	Dráhový rozdíl
E	J	Velikost Energie
E _{oed}	-	Oedometrický modul
E _y	Pa	Youngův modul pružnosti

f	Hz	Frekvence
G	Pa	Smykový modul pružnosti
g	m.s ²	Gravitační zrychlení
I	W.m ⁻²	Intenzita
I₀	W.m ⁻²	Střední signálová hodnota
I₁	W.m ⁻²	Intenzita vlnění
I₂	W.m ⁻²	Intenzita vlnění
I_{max}	W.m ⁻²	Maximální intenzita
I_{min}	W.m ⁻²	Minimální intenzita
K	Pa	Objemový modul
k	m ⁻¹	Vlnové číslo
L_c	m	Koherenční délka
L₁	m	Délka ramene interferometru
L₂	m	Délka ramene interferometru
L	m	Délka
M	-	Konstanta
m	kg	Hmotnost
n	-	Index lomu prostředí
R	m	Koherenční šířka
r	m	Poloměr
s	m	Dráhový rozdíl
T	s	Perioda
t	s	Čas
V	-	Viditelnost
V₁	-	Interference vlnění
V₂	-	Interference vlnění
v	m/s	Rychlost vlnění
v_{vozidla}	m/s	Rychlost vozidel
v_p	m/s	Rychlost šíření podélných vln
v_s	m/s	Rychlost šíření příčných vln
y₁	-	Interferenční maximum
y₂	-	Interferenční minimum
y	-	Rovnice postupné vlny
α	-	Přenosové ztráty
β	rad	Konstanta šíření
γ̂	-	Komplex. stupeň koherence
γ	kN.m ³	Objemová tíha
δ	-	Diferenciální rozdíl
Δ	-	Rozdíl
ε	A/W	Citlivost fotodetektoru

λ	nm	Vlnová délka
μ	-	Poissonovo číslo
π	3,14	Konstanta pí
ρ	kg.m ⁻³	Hustota materiálu
ϱ	A/m ²	Proudová hustota
τ	s	Doba vlnění
Φ	rad	Výsledná fázová změna
Φ_r	rad	Fázový posuv v referenčním rameni interferometru
Φ_s	rad	Fázový posuv v měřicím rameni interferometru
φ	rad	Fáze
φ_1	rad	Fáze vlny
φ_2	rad	Fáze vlny
ω	rad/s	Úhlová rychlost

Seznam ilustrací

Obrázek 2.1: Znázornění konstruktivní a destruktivní interference světla.....	19
Obrázek 2.2: Koherentní vlnění (a); nekoherentní vlnění (b).	20
Obrázek 2.3: Zdroj vyzařující záření o vlnové délce v intervalu $\lambda + \Delta\lambda$	21
Obrázek 2.4: Znázornění koherenční šířky.	21
Obrázek 2.5: Grafické znázornění vzniku postupného vlnění.....	23
Obrázek 2.6: Grafické znázornění vzniku postupného vlnění.....	23
Obrázek 2.7: Grafické znázornění odvození rovnice postupné vlny.....	24
Obrázek 2.8: Grafické znázornění interference mechanického vlnění.....	24
Obrázek 3.1: Evoluce publikovaných článků na téma optické a vláknově optické senzory (zdroj databáze: Scopus).	28
Obrázek 3.2: Bodový senzor (a); distribuovaný senzor (b); kvazi-distribuovaný senzor (c).	29
Obrázek 3.3: Zjednodušené schéma zapojení senzoru s M-Z interferometrem.	31
Obrázek 4.1: Princip implementace a funkce indukční smyčky v praxi.	36
Obrázek 4.2: Princip implementace pneumatického detektoru v praxi, převzato z [28].	36
Obrázek 4.3: Princip implementace piezoelektrického senzoru v praxi, převzato z [31].	37
Obrázek 4.4: Videodetekce automobilů v praxi, převzato z [39].	38
Obrázek 4.5: Měření rychlosti založené na dvou optických snímačích umístěných podél vozovky. ...	39
Obrázek 4.6: Schéma základní struktury senzoru z článku [60] a uložení měřicího a referenčního ramene interferometru.	41
Obrázek 4.7: Schéma distribuovaného vláknově optického senzoru s Fabry-Perot interferometrem...	42
Obrázek 4.8: Schéma komplexního distribuovaného informačního systému detekce vozidel.....	42
Obrázek 4.9: Schéma umístění distribuovaného informačního systému detekce vozidel ve vozovce..	43
Obrázek 4.10: Schéma zapojení detekčního systému v rámci jedné jednotky.....	43
Obrázek 4.11: Schéma zapojení senzoru pro monitorování dopravního provozu.....	44
Obrázek 4.12: Schéma zapojení senzoru uvedené v patentovém spisu, převzato z [69].	45
Obrázek 4.13: Schéma detekčního systému pro monitorování rychlosti vozidel.....	45
Obrázek 4.14: Eurobalízy umístěné v ose mezi kolejemi, převzato z [83].	48
Obrázek 4.15: Měření profilu kolejové soupravy, převzato [85].	49
Obrázek 4.16: Implementace optického vlákna na kolejnice, převzato z [89].	50
Obrázek 4.17: Vyhodnocení rychlosti založené na dvou optických snímačích umístěných podél trati.	51
Obrázek 4.18: Simulace deformace kolejnice při průjezdu vlakové soupravy, převzato z [106].	52
Obrázek 4.19: Umístění tenzometrů: na stojně ($T1$) a na patce podélně $T2$, na spodku kolejnice příčně ($T3$) a podélně ($T4$).	52
Obrázek 4.20: Úroveň deformačních sil v rámci různých poloh tenzometrických senzorů. Na ose x je zobrazena síla [kN], na ose y je zobrazena úroveň deformačních sil [μ strain].	53
Obrázek 4.21: Různé typy instalace Braggových senzorů na kolejnice, převzato [112].	53
Obrázek 4.22: Principiální schéma zapojení a implementaci na kolejnici.	55
Obrázek 4.23: Principiální schéma zapojení a implementace vlákna na kolejnici.....	55
Obrázek 5.1: Zjednodušené schéma měření a základní idea detekce vozidel.	58
Obrázek 7.1: Schéma testování rezonančních podložek.	65
Obrázek 7.2: Fotografie jednoho z testovaných typů rozhraní senzoru ukončené po 30cm optickými SC konektory.....	67
Obrázek 7.3: Fotografie vytvořeného rozhraní senzoru pomocí FC/APC konektorů s ochranami.....	67
Obrázek 7.4: Schéma měření frekvenčního rozsahu senzoru.....	68

Obrázek 7.5: Analyzovaná frekvenční charakteristika senzoru.	68
Obrázek 7.6: Finální prototyp senzoru.	69
Obrázek 7.7: Podélný řez finálního prototypu sensorické jednotky.	69
Obrázek 8.1: Schéma zapojení pro měření detekce vozidel.	71
Obrázek 8.2: Zjednodušené schéma detekční části senzoru.	72
Obrázek 8.3: Úvodní obrazovka monitorovací aplikace.	74
Obrázek 8.4: Metodika měření detekce automobilů.	75
Obrázek 8.5: Fotografie z měření detekce automobilů.	75
Obrázek 8.6: Časový záznam reprezentující průjezd osobního vozidla (a); frekvenční spektrum reprezentující průjezd osobního vozidla (b).	76
Obrázek 8.7: Ukázka signálu charakterizující průjezd osobního vozidla a vozidla nad 3,5 tuny.	78
Obrázek 8.8: Grafické znázornění typického nefiltrovaného průběhu získaného první (S1) měřicí jednotkou vůči typickému průběhu získaného finálním (S2) prototypem.	79
Obrázek 8.9: Fotografie z přípravy praktického měření tramvajových vozidel.	80
Obrázek 8.10: Časový záznam reprezentující průjezd tramvajového vozidla (a); frekvenční spektrum reprezentující průjezd tramvajového vozidla (b).	81
Obrázek 8.11: Fotografie z měření detekce metro souprav.	83
Obrázek 8.12: Časový záznam reprezentující průjezd metro soupravy (a); frekvenční spektrum reprezentující průjezd metro soupravy (b).	84
Obrázek 9.1: Navržené schéma zapojení pro měření rychlosti vozidel.	87
Obrázek 9.2: Časový záznam vozidla nad 3,5 tuny při měření rychlosti vozidla.	88
Obrázek 9.3: Úvodní obrazovka monitorovací aplikace.	89
Obrázek 9.4: Umístění reference v podobě laserové brány.	90
Obrázek 9.5: Schéma zapojení referenční laserové brány.	91
Obrázek 9.6: Odchylna měření v závislosti na vzdálenosti laserů.	91
Obrázek 9.7: Metodika měření rychlosti automobilů.	92
Obrázek 9.8: Ukázka detekce jednotlivých maxim časového záznamu průjezdu vozidla při vyhodnocení rychlosti.	93
Obrázek 9.9: Fotografie z praktického měření automobilových vozidel.	94
Obrázek 9.10: Modifikované schéma zapojení systému pro měření rychlosti.	95
Obrázek 10.1: Grafické znázornění relevantní polohy užitečné informace pro stanovení rychlosti vozidel.	98
Obrázek 10.2: Přímá struktura IIR filtru použitá v disertační práci.	100
Obrázek 10.3: Konfigurace optimálního filtru typu Butterworth v prostředí LabVIEW.	101
Obrázek 10.4: Příklad konfigurace různých filtrů při extrakci měřitelného maxima.	101
Obrázek 10.5: Ukázka časového záznamu průjezdu vozidla při vyhodnocení rychlosti (a) před číslicovou filtrací (b) po číslicové filtraci.	102

Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Shrnutí o využití vláknově optické technologie v silniční dopravě.	46
Tabulka 4.2: Shrnutí využití vláknově optické technologie v železniční dopravě.	56
Tabulka 7.1: Shrnutí provedených měření skleněných rezonančních podložek.....	66
Tabulka 8.1: Shrnutí provedených měření detekce.	77
Tabulka 8.2: Shrnutí provedených měření detekce ve vzdálenosti 1,25m od krajnice vozovky.....	78
Tabulka 8.3: Shrnutí provedených měření detekce ve vzdálenosti 1m od krajnice vozovky.....	79
Tabulka 8.4: Shrnutí provedených tramvajových vozidel.....	81
Tabulka 8.5: Shrnutí provedených měření.	83
Tabulka 9.1: Sumarizace z provedených měření rychlosti vozidel.	93
Tabulka 9.2: Naměřená data pomocí paralelního zapojení pro vzdálenost senzorů 1m od sebe.	96

1 Úvod

Moderní dopravní systémy 21. století by měly být obohaceny o prvky zvyšující informovanost, bezpečnost a plynulost účastníků dopravního provozu. Toho lze obecně dosáhnout za pomoci ITS (Inteligentních Dopravních Systémů), které tvoří jádro „chytré dopravy“. Tyto systémy obsahují celou řadu senzorů, měřidel nebo kamerových zařízení snímajících stav požadovaných veličin. Sofistikované analytické systémy v reálném čase detekují vzory a činí rozhodnutí, jejichž výsledkem je optimalizace kapacity, zlepšení zážitku cestujících a zvýšení bezpečnosti. Dopravní detektory jsou zařízení snímající vstupní data a informace pro ITS. Detektory mohou využívat různých fyzikálních principů, kdy data jsou obvykle získávána za jízdy vozidel, bez omezení plynulosti dopravního provozu. Získané údaje se využívají pro následné zpracování klíčových dopravně-inženýrských veličin, mezi které patří i detekce vozidel a jejich rychlost. Systémy, které řeší problematiku měření rychlosti vozidel lze dle základního provozního určení rozdělit na stacionární, tedy pevná zařízení přímo spojená s komunikací (např. indukční smyčky, pneumatické detektory apod.) nebo jsou součástí jiných zařízení (např. kamerový systém mýtných bran) a systémy mobilní pro konkrétní situace (např. selhání systémů stacionárních). Další kritérium pro dělení je použitý princip detekce vozidel, mezi nejvíce využívané lze zařadit detektory dotykové, ultrazvukové, elektromagnetické se stacionárním polem nebo elektromagnetické se světelným polem. Dle instalačního postupu pak dělíme detektory na tzv. destruktivní a nedestruktivní. Destruktivní detektory zasahují svými konstrukčními prvky do vozovky nebo jejího povrchu a narušují celistvost vozovky. Do nedávna patřily destruktivní detektory mezi majoritně používaný typ detektorů. Dnes je s rozvojem výpočetní techniky a nových technologií například v oblasti vláknové optiky snahou přejít k využití nedestruktivních metod instalace detektorů a měření vybraných parametrů v dopravním provozu. Tato disertační práce popisuje dva základní sledované parametry dopravního (automobilového i kolejového) provozu pomocí nového optovláknového systému. Jedná se o detekci vozidel (na základě které lze stanovit hustotu provozu) a měření rychlosti vozidel.

V případě detekce a monitorování rychlosti železničních vozidel na rozdíl od stávajících nepřímých systémů je níže navrhovaný způsob založen na přímém monitorování interakcí vyvolaných hmotností fyzických těles, které jsou představovány pohyby kolejových vozidel. Tento nový způsob detekce a monitorování rychlosti železničních vozidel je v reálných podmínkách téměř imunní vůči ovlivnění falešnými vlivy. Aktuální problematikou konvenčních elektrických a elektromagnetických systémů je funkční spolehlivost, která se objevuje s nástupem nových trakčních technologií do hnacích vozidel. Důvodem je značné zvýšení elektromagnetického rušení v těsné blízkosti moderních hnacích vozidel a rušení, které se nese kolejnicemi na zpětných trakčních proudcích. Dalším současným problémem

elektrických detekčních systémů je malá odolnost proti ovlivnění, nebo proti poškození atmosférickým výbojem do/nebo poblíž železničního zařízení. U zařízení s metalickým propojením se pak přes tyto elektricky vodivé okruhy uzavírají nežádoucí vodivé smyčky, které se proti nežádoucímu ovlivnění nebo poškození velmi obtížně ošetřují. Navrhovaný systém detekce a monitorování rychlosti vozidel pomocí optických vláken by měl uvedené problémy eliminovat. V případě detekce a monitorování rychlosti automobilových vozidel se systém vyznačuje vůči velké většině stávajících senzorů nedestruktivní povahou vůči vozovce a jednoduchostí v oblasti implementace.

Vláknově optické senzory byly pro tuto práci zvoleny ze tří základních důvodů. Prvním je necitlivost těchto senzorů vůči elektromagnetickým interferencím, která je dána samotným materiálem, ze kterého jsou optická vlákna vyrobena. Druhým je možnost oddělit místo měření od místa napájení a vyhodnocení a to na vzdálenosti až jednotek km díky precizní technologii výroby optických vláken (útlum 0,2dB/km). Třetím je fakt, že samotná snímací část je ryze pasivního charakteru a odpadá tak nutnost v místě měření napájení elektrickou energií. Mezi další výhody optických vláken lze zařadit jejich flexibilitu a rozměry, senzor lze účinně minimalizovat z hlediska velikosti a při vhodném uspořádání nabízí velmi vysokou citlivost, která je předností nedestruktivních senzorů umístěných na vozovce nebo kolejišti. Masivní rozšíření optických kabelů podél silnic a železnic v rámci telekomunikačních a bezpečnostních potřeb představuje možnost napojení senzorů na stávající vláknově optické sítě.

Úvod disertační práce je zaměřen na teoretický popis a pochopení problematiky vláknově optických dvojranných interferometrů včetně rozboru a řešení stávajících senzorů, na základě kterých byly zvoleny cíle této práce. V praktické části je popsán návrh a realizace měřicího senzoru, dále popis vytvořeného optovláknového systému pro detekci a měření rychlosti vozidel, implementovaný software, metodika zpracování dat a jednotlivá praktická měření automobilových i kolejových vozidel včetně statistického vyhodnocení. Následuje kapitola obsahující frekvenční analýzu naměřených dat, na základě které byl proveden návrh metod číslicové filtrace signálů, umožňující vyhodnocení rychlosti vozidel včetně nejistot a také zlepšení poměru odstupu signálu od šumu.

Cíle, věcná náplň a výsledky této práce korespondují a jsou využity ve třech aktuálně řešených projektech pod záštitou ministerstva průmyslu a obchodu a ministerstva vnitra s cílem navýšit bezpečnost v automobilové a vlakové dopravě. Projekty jsou zaměřeny na detekci a signalizaci kolizních stavů pro zvýšení traťové dopravy a využití vláknově optických senzorů pro monitorování vybraných parametrů jako je detekce, rychlost, směr jízdy apod. v silničním a kolejovém provozu. V průběhu řešení této práce byla podána přihláška na úřad průmyslového vlastnictví s cílem získat osvědčení užitného vzoru a patentové licence. Při finalizaci této práce bylo na uvedené téma získáno osvědčení na úrovni užitného vzoru i patentové licence.

2 Interference světla

Interference světla v optických vláknech a snímání vibrací, respektive mechanického vlnění tvoří principálně základ činnosti senzorů, které jsou popsány v této práci. Z tohoto důvodu je úvodní kapitola teoretické části věnována této problematice, stejně tak pojmu koherence světla, která jak je uvedeno níže s interferencí světla úzce souvisí. Interference světla je jev, který je typický pro vlnění. Základním kritériem pro rozdělení vlnění je jeho fyzikální podstata a způsob vzniku. Na základě tohoto kritéria můžeme rozdělit vlnění do dvou kategorií a to vlnění mechanické a vlnění elektromagnetické. U mechanického vlnění se při skládání sčítají amplitudy okamžitých výchylek, u elektromagnetického vlnění se sčítají okamžité hodnoty elektrické intenzity a magnetické indukce. O objasnění interference světla se zasloužil hlavně anglický fyzik Thomas Young (1773–1829), který vycházel z představy, že světlo je vlnění a tuto skutečnost prezentoval na svém pokusu blíže definovaném, viz odkaz [1-3].

Interference je výrazným projevem vlnových vlastností světla (zejména u světla monochromatického) a lze ji definovat jako skládání různých příspěvků vlnění v daném místě. K interferenci vlnění dochází, jsou-li současně splněny dvě podmínky. Vlnění musí mít stejnou frekvenci a fázový rozdíl vlnění se s časem nemění (konstantní).

2.1 Popis interference světla pomocí intenzity záření

Při aplikaci interference v interferometrických aplikacích je důležité vědět, jak se definují jednotlivé intenzity interferujících vlnění a jak lze definovat tzv. interferenční rovnici, která charakterizuje celkovou intenzitu. Protože v práci uvažujeme využití dvouramenného typu interferometru, popsána je interference dvou vlnění. Intenzita optického pole vzniklého superpozicí dvou vlnění není obecně součtem intenzit jednotlivých vln. Důvodem je právě vzniklá interference mezi vlnami. V nejjednodušším případě interference dvou vlnění lze první vlnění popsat vztahem:

$$V_1 = \sqrt{I_1} \cos(\varphi_1), \quad (2.1)$$

kde I_1 je intenzita vlny a (φ_1) je její fáze. Druhá vlna je popsána obdobně:

$$V_2 = \sqrt{I_2} \cos(\varphi_2), \quad (2.2)$$

kde I_2 je intenzita vlny a (φ_2) je její fáze. Celková intenzita je charakterizována tzv. interferenční rovnicí, která je popsána vztahem:

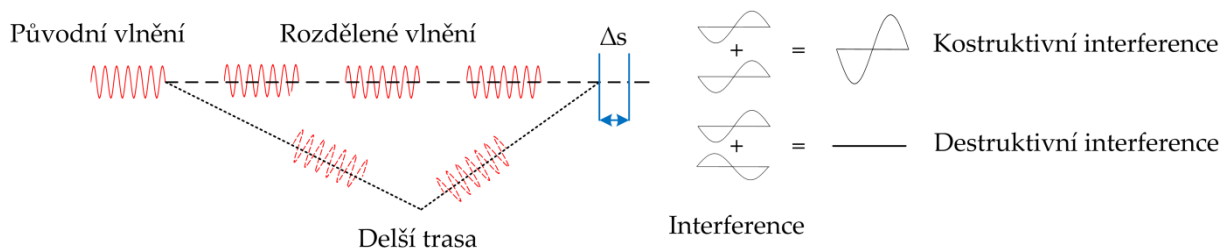
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (2.3)$$

kde $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ charakterizuje fázový rozdíl obou vlnění.

V případě, že velikosti intenzit jednotlivých vlnění jsou stejné ($I_1 = I_2 = I_0$) dostaneme z interferenční rovnice vztah:

$$I = 2I_0 (1 + \cos \varphi). \quad (2.4)$$

Kromě součtu intenzit obou vln ($I_1 + I_2$) zde existuje třetí člen příslušný interferenci mezi oběma vlnami, viz rovnice (2.3). Nastat mohou dva případy znázorněné na obrázku 2.1. V prvním případě, kdy je tento člen kladný, se jedná o tzv. konstruktivní interferenci (interferenční maximum), místo, kde se nachází dvě vlnění ve fázi. V druhém případě, kdy je tento člen záporný, dochází k tzv. destruktivní interferenci (interferenční minimum), místo, kde se nachází dvě vlnění v proti fázi [1-4].



Obrázek 2.1: Znázornění konstruktivní a destruktivní interference světla.

Pokud se dráhový rozdíl Δs rovná lichému počtu půlvln a interferující vlnění jsou v proti fázi, lze destruktivní interferenci vyjádřit matematickým vztahem:

$$\Delta s = \frac{\lambda}{2} (2k + 1) \quad (2.5)$$

Pokud se dráhový rozdíl Δs rovná sudému počtu půlvln a interferující vlnění jsou ve fázi, lze konstruktivní interferenci vyjádřit matematickým vztahem:

$$\Delta s = 2k \times \frac{\lambda}{2} \quad (2.6)$$

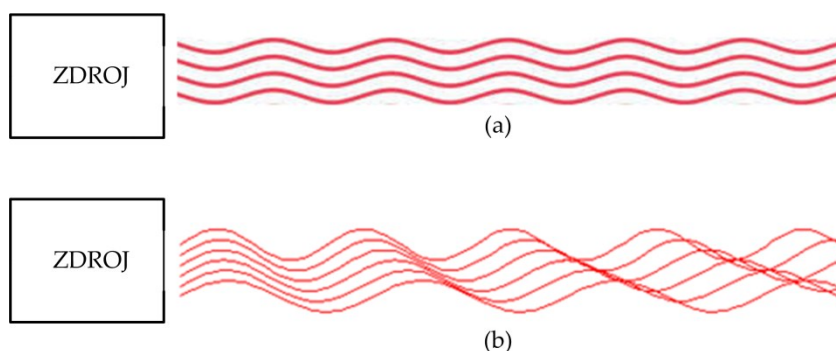
Platí podmínka, že dráhový rozdíl (Δs) nesmí nabývat vyšších hodnot, které jsou vázány na koherenci zdroje záření. Prakticky lze na tuto podmínku pohlížet následovně. Rozdělená vlnění postupují po rozdílné dráze (viz obrázek 2.1). Vlnění postupující po delší dráze dorazí do společného bodu opožděně. Pokud nebude zdroj záření ideálně koherentní, tak v případě delší trasy nedojde ke vzniku interference (je porušena podmínka koherence). Následující podkapitola blíže vysvětluje a popisuje, jak koherence souvisí s interferencí světla [1-4].

2.2 Koherence

Jak bylo uvedeno výše, k interferenci vlnění dochází, jsou-li současně splněny dvě podmínky. Vlnění musí mít stejnou frekvenci a fázový rozdíl vlnění se s časem nemění. Vlnění tohoto typu se nazývají tzv. koherentní vlnění.

Koherence tedy definuje uspořádanost a definovanost světla. Přírozené zdroje světla nelze považovat za koherentní zdroje záření z důvodu, že doba, po kterou je fázový rozdíl konstantní, je velmi krátká. Abychom mohli pozorovat výraznější interferenci světla, je nutné využít koherentní zdroj záření, např. laser. Koherentní zdroj záření je definován tím, že vlnění má shodnou frekvenci, probíhá ve shodném směru kmitání a má stejnou fázi. Světlo z laseru je vyzařováno ve formě úzkého svazku a na rozdíl od světla přirozených zdrojů je koherentní a monochromatické. Z tohoto důvodu je jako základní zdroj záření v této práci využít laser.

Koherence světla je definována tzv. komplexním stupněm koherence $\hat{\gamma}$, jehož modul je kvantitativní parametr, který nabývá hodnot 0 až 1. Komplexní stupeň koherence je dán ve své podstatě tím, jak dokonale či nedokonale se vlny mohou vzájemně vyrušit. Maximum (hodnota 1) vyjadřuje plně koherentní záření, minimum (hodnota 0) reprezentuje absolutně nekoherentní záření. Zdroj světla dále charakterizujeme z hlediska časové stability (časová koherence) a prostorového šíření (prostorová koherence). Na obrázku 2.2(a) je znázorněno koherentní vlnění, obrázek 2.2(b) znázorněno vlnění nekoherentní [5-6].



Obrázek 2.2: Koherentní vlnění (a); nekoherentní vlnění (b).

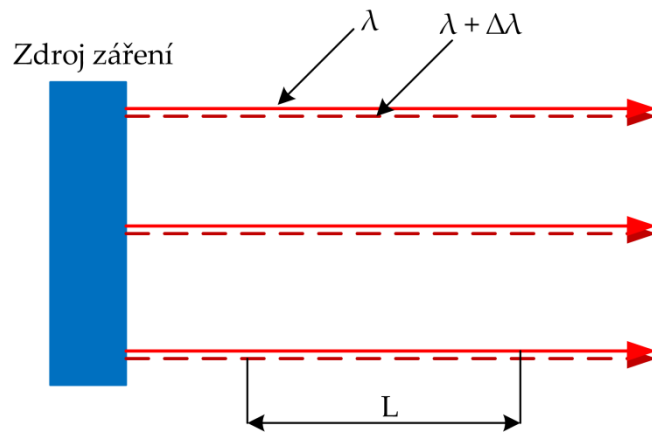
2.2.1 Časová koherence

Časová koherence charakterizuje korelace vlny ve dvou různých časech, tedy jak dobře vlna interferuje sama se sebou. Velmi dobře lze časovou koherenci vysvětlit pomocí obrázku 2.3. Uvažován je zdroj záření, který generuje záření s konečnou šířkou spektrální čáry, kdy se vlnová délka nachází v intervalu $\lambda + \Delta\lambda$. V tomto případě bude docházet při interferenci vlnění o vlnové délce $\lambda + \Delta\lambda$ s vlněním o vlnové délce λ k tzv. záněm a to ve směru šíření generovaného záření.

Vzdálenost vzniklých záněm lze definovat jako koherenční délku L_c a matematicky je definována vztahem:

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta f} \quad (2.7)$$

kde Δf popisuje změnu frekvence zdroje záření (v intervalu vlnových délek $\lambda + \Delta\lambda$) a c je rychlost šíření generovaného záření.

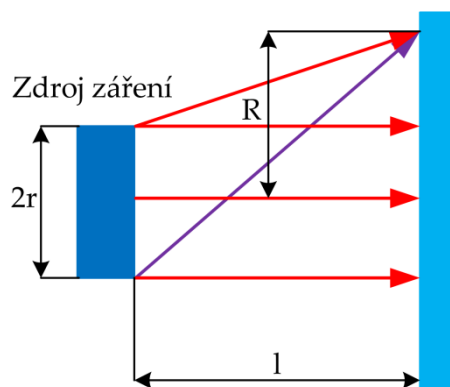


Obrázek 2.3: Zdroj vyzařující záření o vlnové délce v intervalu $\lambda + \Delta\lambda$.

Kvalitní interferenční obrazce lze získat pouze superpozicí takových paprsků, u kterých se optické dráhy (myšleno od zdroje záření) od sebe příliš neliší, respektive jejich dráhový rozdíl musí být podstatně menší, než je koherenční délka L_c . Koherenční délka tak udává největší dráhový rozdíl, při kterém je světlo daného zdroje schopno interference a jedná se o velmi důležitý parametr u zdroje záření, který je zvolen v této práci (světelný zdroj s úzkou spektrální čarou je charakterizován dlouhou koherenční dobou). Pokud je optické záření nekoherentní, je charakterizováno koherenční délkou, která se blíží nule a nedochází tak k interferenci. Pokud je optické záření plně koherentní, je charakterizováno nekonečnou koherenční délkou a interference nastává vždy [5-7].

2.2.2 Prostorová koherence

Prostorová koherence popisuje korelaci vlny ve dvou různých místech, tedy jak uniformní je vlna v prostoru. Prostorovou koherenci lze velmi dobře popsat pomocí tzv. koherenční šířky R , viz obrázek 2.4. Koherenční šířka R popisuje vzdálenost mezi osou vlnění a mezním místem, ve kterém interferují vlnění, která se šíří od okraje monochromatického zdroje záření.



Obrázek 2.4: Znázornění koherenční šířky.

Koherenční šířku lze matematicky vyjádřit vztahem:

$$\frac{\lambda}{2} = \sqrt{l^2 + (R + r)^2} - \sqrt{l^2 + (R - r)^2}, \quad (2.8)$$

kde λ vyjadřuje vlnovou délku zdroje záření, parametr l je vzdálenost stínítka od zdroje záření a parametr r značí $\frac{1}{2}$ příčné velikosti zdroje označené jako $2r$.

Výsledný matematický vztah lze zjednodušit (v praxi bývá vzdálenost stínítka od zdroje záření dostatečně větší než hodnoty zdroje $2r$):

$$\frac{\lambda}{2} = \left[l + \frac{(R + r)^2}{2l} \right] - \left[l + \frac{(R - r)^2}{2l} \right]. \quad (2.9)$$

Na základě matematických lze vyjádřit koherenční šířku R vztahem:

$$R = a \frac{\lambda}{4r}. \quad (2.10)$$

Koherenční šířka R zjednodušeně řečeno popisuje rozměr plochy, na které na stínítku lze pozorovat interferenci vlnění a opět se jedná o důležitý parametr u zdroje záření, který je zvolen v této práci [5-7].

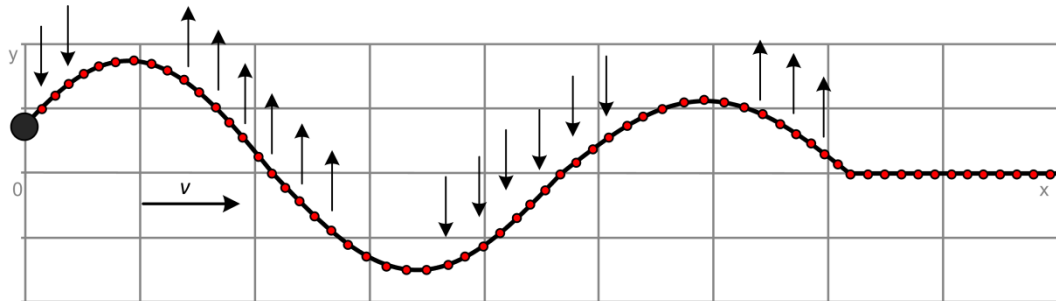
2.3 Mechanické vlnění

Základem této práce je snímání vibrací, respektive mechanického vlnění (nizkých kmitočtů v řádu jednotek až desítek Hz) senzorem při průjezdu vozidel po vozovce kolem senzoru. Mechanické vlnění je definováno jako přenos kmitání určitým prostředím. Šíření vlnění není spojeno s přenosem látky, vlněním se ale přenáší energie pomocí kmitavého pohybu. Charakter samotných vibrací vlivem dopravního provozu je závislý zejména na hmotnosti vozidel, rychlosti a způsobu jízdy vozidel, na směru pohybu vozidel, na zrychlování nebo brždění vozidel. Dalším neméně důležitým parametrem je i rovinnost jízdní dráhy, míněno kvalita povrchu silniční vozovky, směrové a výškové vyrovnaní kolejové dráhy, způsob upevnění kolejnic případně skladba podkladních vrstev vozovky atd. Kromě parametrů vibrací ve zdroji má na velikost a šíření vibrací vliv i složení prostředí na cestě od zdroje k měřicímu senzoru [8-10]. Monitorování dopravního provozu představuje řešení komplexního problému, jehož rozsah a náročnost přesahuje tuto disertační práci. Proto se tato zabývá pouze vybranými charakteristikami a parametry ovlivňující monitorování vozidel.

2.3.1 Popis vzniku mechanického vlnění

Mechanické vlnění vzniká v látkách všech skupenství. Příčinou jeho vzniku je existence vazeb mezi částicemi prostředí, kterým se vlnění šíří. Dochází tak ke stavu, kdy kmitání jedné částice se vzájemnou vazbou přenáší na jinou částici. Zároveň dochází i k přenosu energie kmitavého pohybu.

V případě, že první částice vychýlíme ve směru osy y a necháme ji volně kmitat, postupně začnou kmitat i ostatní částice, viz obr. 2.5. Dochází tak k postupnému vlnění, kdy kmitání postupuje konstantní rychlostí v ve směru osy x .



Obrázek 2.5: Grafické znázornění vzniku postupného vlnění.

Vychýlená první částice vykonala jeden kmit (perioda kmitání) za dobu $t = T$. Perioda T značí dobu, za kterou se vlnění rozšířilo do vzdálenosti λ (vlnová délka), viz obr. 2.6. Tato vzdálenost je definována vztahem:

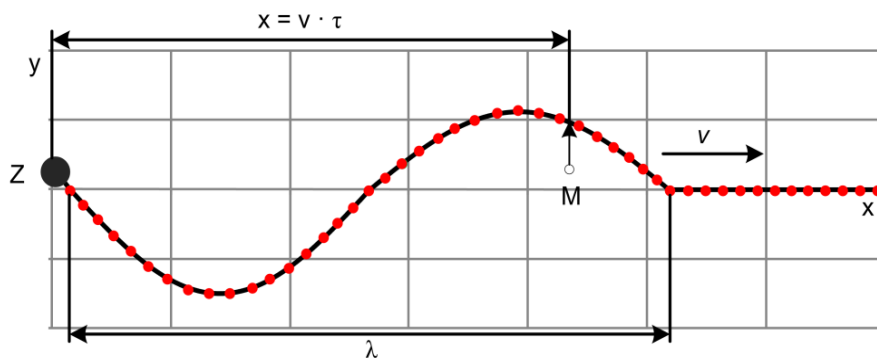
$$\lambda = v \times T = \frac{v}{f}, \quad (2.11)$$

kde veličina f je frekvence kmitání, veličina T je perioda kmitání, veličina v je rychlost vlnění a λ značí vlnovou délku.



Obrázek 2.6: Grafické znázornění vzniku postupného vlnění.

Vzdálenost dvou nejbližších bodů (kmitajících se stejnou fází) označujeme jako vlnová délka λ . Pro získání rovnice postupného vlnění se využije okamžitá výchylka kmitajícího bodu. Tato odchylka je dána funkcí času $y = y_m \sin \omega t$. Obrázek 2.7 reprezentuje grafické znázornění odvození rovnice postupné vlny, kde τ značí dobu, za kterou dospěje vlnění od zdroje Z do bodu M .



Obrázek 2.7: Grafické znázornění odvození rovnice postupné vlny.

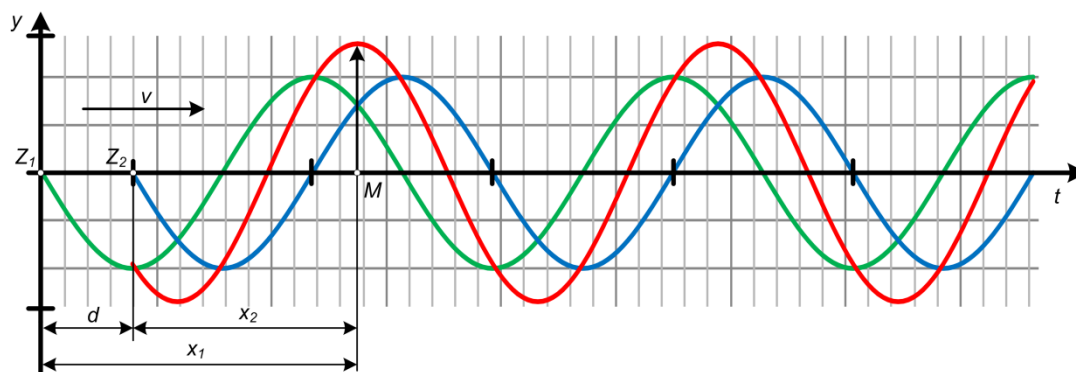
Rovnice postupné vlny pro podélné a příčné vlnění v homogenním prostředí získáme upravením rovnice pro kmitání částice v bodě M , viz obrázek 2.7.

$$y = y_m \sin \omega(t - \tau) = y = y_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \quad (2.12)$$

Uvedené veličiny popisující vlnění jsou funkcemi souřadnice (polohy) bodu, kterým vlnění prochází i funkcemi času [8-10].

2.3.2 Popis interference mechanického vlnění pomocí amplitudového skládání vln

Na obrázku 2.8 je znázorněna interference mechanického vlnění. Lze pozorovat, že v místech, kde se vlny překrývají, má amplituda jednotlivých vln různou velikost. Různá amplituda překrývajících se vlnění je důsledkem skládání (interference) jednotlivých vlnění. Výsledný kmitavý pohyb hmotných bodů prostředí zobrazený na obrázku 2.8 je dán superpozicí kmitání, které je způsobeno první a druhou vlnou [10-12].



Obrázek 2.8: Grafické znázornění interference mechanického vlnění.

Jednotlivé složky vlnění lze definovat vzhledem k bodu M pomocí vztahů:

$$y_1 = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right), \quad (2.13)$$

$$y_2 = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right). \quad (2.14)$$

Výsledný fázový rozdíl dvou vlnění je dán rovnicí:

$$\Delta\phi = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) - 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 - x_2) = \frac{2\pi}{\lambda} d, \quad (2.15)$$

kde veličina d značí dráhový rozdíl uvedených vlnění a je dána vztahem $d = x_1 - x_2$.

Interferenční maximum je poté rovno součtu jednotlivých složek amplitud a lze jej vyjádřit vztahem:

$$y_m = y_{m1} + y_{m2}. \quad (2.16)$$

Interferenční minimum je rovno absolutní hodnotě rozdílu amplitud a lze jej vyjádřit vztahem:

$$y_m = |y_{m1} - y_{m2}|. \quad (2.17)$$

2.3.3 Popis šíření vlnění v prostředí

Parametry modelu pro stanovení projevů šíření vlnění prostředím vycházejí z obecných zákonitostí pro šíření zemním prostředím. Ze vztahů pro stanovení rychlostí šíření podélných v_p a příčných v_s vln zemním prostředím uvedeným níže:

$$v_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}, \quad (2.18)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)} = \frac{4}{3}(G + K), \quad (2.19)$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g}, \quad (2.20)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2.21)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (2.22)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}, \quad (2.23)$$

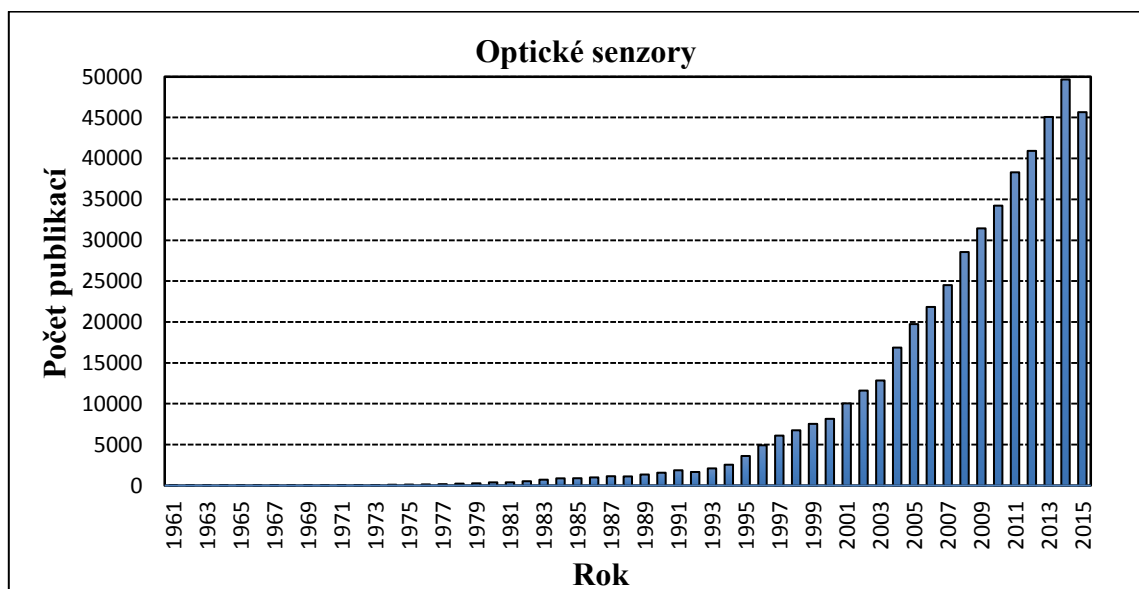
plyne, že mezi nejzákladnější parametry determinující šíření vln prostředím patří hustota materiálu prostředí ρ a jeho tuhost, daná primárně modulem pružnosti E (popř. Oedometrickým modulem E_{oed} respektive smykovým modulem pružnosti G) a Poissonovým číslem μ . Případně je třeba pro zohlednění materiálového tlumení zadat tzv. Rayleighovy parametry tlumení alfa a beta. Materiálové tlumení vyplývá především z viskózních vlastností, tření a vývoje plasticity. Veličina γ značí objemovou tíhu, g značí gravitační zrychlení.

Dále je nutné brát v potaz i zvodnatělé zemní prostředí, kde dochází k větší či menší změně všech výše uvedených základních determinujících parametrů šíření vln prostředím. Zeminová zrna jsou v oblasti pod hladinou podzemní vody nadlehčována vodou, snižuje se tedy objemová tíha zeminy. Vzduch v zeminových pórech je vytlačován a je nahrazován

vodou, což vzhledem k prakticky nulové stlačitelnosti vody povede ke zvýšení objemového modulu K . Z uvedených fyzikálních zákonitostí plyne, že přítomnost vody v pórech zvyšuje rychlosti šíření vln zeminovým prostředím, a to dominantně především rychlost podélných vln v_p [10-12]. Je tedy patrné, že při reálné aplikaci senzorů bude nutné brát v potaz i podloží senzoru, jak to které se nachází v místě měření tak i prostředí mezi místem měření a místem uložení senzoru.

3 Snímání vlnění

Konvenční přístroje, které jsou schopny detekovat mechanické vlnění, respektive vibrace z okolního prostředí, musí být uzpůsobeny zejména konstrukčně v závislosti na přenosovém médiu (prostředí), ve kterém se mechanické vlnění šíří. Tato práce analyzuje a popisuje využití vláknově optického senzoru, jehož základním konstrukčním prvkem je optické vlákno. Charakteristické výhody plynoucí z použití optických vláken popsané výše sloužily jako podnět pro vznik této práce. Evoluce publikovaných článků na téma optické a vláknově optické senzory zobrazená na obrázku 3.1 potvrzuje výše uvedené tvrzení a správně zvolený směr této disertační práce (zdroj databáze Scopus).

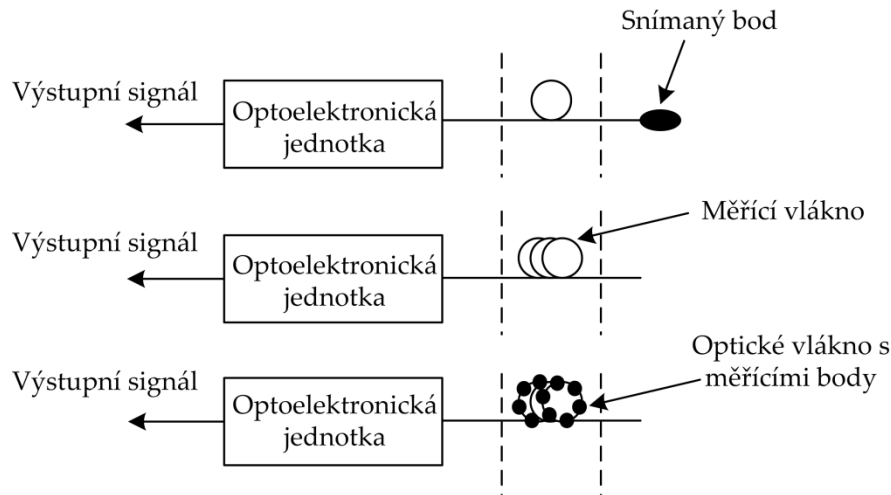


Obrázek 3.1: Evoluce publikovaných článků na téma optické a vláknově optické senzory (zdroj databáze: Scopus).

3.1 Vláknově optické senzory

Vláknově optické senzory jsou jednou z dynamicky se rozvíjejících oblastí fotoniky a fotonických aplikací. Tato oblast dnes, ale i s výhledem do budoucnosti patří ke klíčovým technologiím, a to z mnoha důvodů daných primárně materiálem, ze kterého jsou optická vlákna vyrobena a vlastnostmi, které nabízí. Vláknově optické senzory jsou velmi citlivé, plně pasívní z hlediska napájení elektrickou energií a imunní vůči elektromagnetickému rušení, respektive elektromagnetickým interferencím. Jejich rozhraní je při vhodné konstrukci přímo připojitelné na stávající bezpečnostní a telekomunikační vláknově optické sítě. Vláknově optické senzory lze popsat jako systém, který se skládá ze snímacího zařízení, komunikačního kanálu a subsystému pro generování a detekování signálu. Hlavním kritériem pro rozdělení je dělení v závislosti na povaze přeměny převodu veličiny. Existují dvě základní skupiny - intrinzitní (senzory, kde optické vlákno slouží jako detektor požadované veličiny) a extrinzitní (senzory, kde optické vlákno slouží pouze k přenosu

definované informace). Důležité je také rozdělení podle prostorového uspořádání. Bodový senzor umožňuje měření určité veličiny pouze v určitém místě. Distribuovaný senzor umožňuje měřit požadovanou veličinu podél celé vlastní délky optického vlákna a kvazi-distribuovaný senzor informace o měřené veličině získává v určitých a předem definovaných měřicích bodech, viz obrázek 3.2. Základem pro tuto práci je využití optického vlákna jako senzoru, níže popsaný sensorický systém tedy patří do skupiny intrinzičních senzorů.



Obrázek 3.2: Bodový senzor (a); distribuovaný senzor (b); kvazi-distribuovaný senzor (c).

V závislosti na typu modulace, která je použita pro modulaci optického záření lze intrinziční vláknově optické senzory rozdělit do čtyř nejpoužívanějších skupin:

- Intenzitní (amplitudová modulace)
- Polarimetrické (polarizační modulace)
- Interferometrické (fázová modulace)
- Spektroskopické (frekvenční modulace)

3.2 Optovláknové interferometry

V dnešní době lze mezi nejcitlivější vláknově optické senzory zařadit interferometry. Interferometrické senzory fungují na principu fázové modulace interferujícího vlnění šířícího se uvnitř optického vlákna a umožňují vzdálené oddělení místa měření od místa vyhodnocení. Důvod je zřejmý, světlo prochází přes vlákno s malým útlumem (dnešní jednovidová vlákna se vyznačují hodnotou útlumu kolem 0,2dB/km) ve srovnání s elektrickými kabely s kovovými vodiči. Mezi další výhody vláknově optických interferometrů lze zařadit velký dynamický rozsah, jejich odolnost vůči elektrostatickému a elektromagnetickému rušení a fakt, že jsou relativně málo ovlivněny stárnutím komponent, ze kterých se skládají [13]. Snímání fyzikálních nebo chemických veličin se projevuje změnou fáze přijatého světelného paprsku. Tento typ senzorů vyžaduje koherentní zdroj záření, jednovidová optická vlákna a nabízí možnost dosažení nejvyšší citlivosti v rámci optovláknových senzorů. Lze dosáhnout změny citlivosti řádově o 10^{-8} (vlnová délka světla v optickém vlákne je kolem $1\mu\text{m}$).

Zásadním problémem vláknové interferometrie je návrh referenčního ramena interferometru. Zapojení musí být navrženo takovým způsobem, aby došlo k maximální eliminaci nežádoucích signálů. Signál pozadí (šum) má původ v mechanických změnách, tepelných jevech případně ve změnách indexu lomu daného materiálu. Dále je třeba vzít v potaz změnu indexu lomu vzorkovacího média a nespécifické reakce (chemické a fyzikální reakce, které nechceme detekovat). Je žádoucí, aby referenční rameno bylo umístěno co nejbližší k měřicímu rameni, aby mělo stejnou strukturu, délku a i ostatní vlastnosti. Jediným rozdílem musí být citlivost na danou specifickou veličinu, kterou chceme detekovat [13-16].

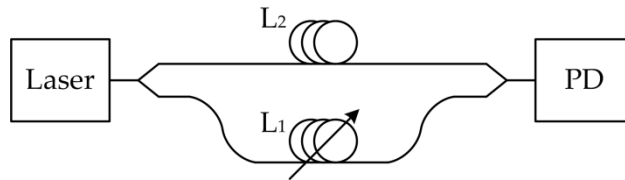
Mezi základní používané typy lze zařadit interferometry typu Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot a Sagnac. V praxi je nejvíce používán výše zmíněný Mach-Zehnderův interferometr, který je i základem pro řešení této práce a blíže je popsán v kapitole 3.3.

3.3 Vláknově optická interferometrie

Jak bylo uvedeno výše, jevu interference využívají optické přístroje zvané interferometry. Výsledky disertační práce jsou založeny na dvouramenných interferometrech, které detekují intenzity superpozic dvou vln, které urazily různé vzdálenosti a mají různou fázi. Fázový posuv vzniká v samotném interferometru. Detekovat lze tři parametry, které ovlivní optický svazek šířící se podél optické dráhy a to změnu délky trasy, změnu vlnové délky λ a změnu rychlosti šíření. Pokud nastane změna některé z uvedených veličin, dochází i ke změně fáze vlny ϕ . Ta je dle rovnice závislá na délce dráhy L , indexu lomu n a na vlnové délce λ .

$$\phi = 2\pi L \frac{n}{\lambda} \quad \phi = kLn. \quad (3.1)$$

Veličina k charakterizuje velikost vlnového vektoru, který je dán matematickým vztahem $(2\pi/\lambda)$. Níže jsou uvedeny příslušné matematické vztahy, které se vztahují k použitému interferometru typu Mach-Zehnder (dále M-Z), který je základem této práce. Tento typ interferometru využívá porovnání fáze světelné vlny šířící se měřicím optickým vláknem a světelné vlny šířící se vláknem referenčním. Využívá se zde tzv. homodynní detekce vlny (interferují laserové svazky se stejnou optickou frekvencí) popřípadě heterodynní detekce (interferují laserové svazky s odlišnými optickými frekvencemi). Ramena interferometru (L_1, L_2 - označena na obrázku 3.3) jsou tvořena jednovláknovými optickými vlákny. Jako zdroj světla je využíván úzkospektrální koherentní laser. Fotodetektor (PD) registruje signál vzniklý následkem interference optických paprsků z referenčního a měřicího ramene a mění jej na měřitelný elektrický proud. V měřicím rameni vzniká modulace fáze optického signálu působením snímané fyzikální veličiny na průřez, délku a index lomu jádra použitého optického vlákna. Zjednodušené schéma vláknově optického Mach-Zehnderova interferometru používaného v této práci se zdrojem světla ve formě laseru a přijímačem ve formě fotodetektoru je znázorněno na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Zjednodušené schéma zapojení senzoru s M-Z interferometrem.

Pro vyhodnocení míry interference interferometru je zavedena veličina V (kontrast, viditelnost) a matematicky ji lze vyjádřit vztahem:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (3.2)$$

Velikost míry interference interferometru, respektive viditelnost interferometru závisí na relativní intenzitě signálového a referenčního paprsku, jejich relativních stavech polarizace a vzájemné koherenci. Největší viditelnosti je dosaženo, jsou-li jednotlivé intenzity stejné velikosti a mají-li stejnou fázi.

Velichina I_{max} definuje maximální pozorovatelnou intenzitu pro vlny polarizované lineárně ve stejném směru:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2A_1A_2. \quad (3.3)$$

Velichina I_{min} definuje minimální pozorovatelnou intenzitu pro vlny polarizované lineárně ve stejném směru:

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2A_1A_2. \quad (3.4)$$

kde I_1, I_2 charakterizují intenzity interferujících vln a A_1, A_2 charakterizují jejich maximální amplitudy.

Intenzity jednotlivých vlnění lze vyjádřit dle vztahů:

$$I_1 = I_0[1 - V \cos(\phi_r - \phi_s)], \quad (3.5)$$

$$I_2 = I_0[1 + V \cos(\phi_r - \phi_s)], \quad (3.6)$$

kde I_0 charakterizuje střední signálovou hodnotu, ϕ_r charakterizuje fázi referenčního paprsku a ϕ_s charakterizuje fázi signálového paprsku.

Výstupní intenzita použitého typu interferometru je dána vztahem:

$$I = 2I_0 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} n (L_1 - L_2) \right] \right\}, \quad (3.7)$$

kde L_1 a L_2 značí délky měřicího a referenčního ramene interferometru.

Fázový rozdíl mezi jednotlivými rameny interferometru je dán vztahem:

$$\phi = \phi_r - \phi_s = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} n (L_1 - L_2), \quad (3.8)$$

kde ϕ_r charakterizuje vzniklý fázový posuv v referenčním rameni a ϕ_s charakterizuje vzniklý fázový posuv v měřicím rameni interferometru.

Intenzita výstupu z interferometru je převedena na elektrický proud pomocí tzv. optického přijímače (fotodetektoru). Diferenciální kombinace výše uvedených intenzit vytváří výstup:

$$i = \varepsilon \cdot I_0 \cdot \alpha \cdot \cos(\phi_d + \phi_s \cdot \sin \omega t), \quad (3.9)$$

kde ε charakterizuje citlivost fotodetektoru, α charakterizuje přenosové ztráty a může nabývat hodnot v rozsahu 0-1, kdy 1 značí nulové ztráty, ϕ_d charakterizuje měnící se fázový posun, ϕ_s charakterizuje dobu trvání amplitudy a ω charakterizuje frekvence působící na interferometr, respektive jeho měřící rameno. V kapitole 8 je podrobněji popsáno signálové zpracování a fyzické zapojení měřicího schéma [17-20].

4 Přehled dosavadního stavu techniky

Zde je uvedena provedená literární a patentová rešerše v oblasti stávajících dopravních senzorů pro měření rychlosti vozidel, a to v silničním i kolejovém provozu, dále popis a shrnutí jejich vlastností. Rešeršní hledání v rámci automobilové i kolejové dopravy jsou zaměřena na aktuální trend a směr ITS (Inteligentní dopravní systémy), který představuje spojení informačních a komunikačních technologií s vozidly a dopravními sítěmi. Provedená rešeršní hledání v rámci automobilové dopravy jsou rozdělena do tří podskupin se zaměřením na implementaci v rámci konvenčních senzorů, vláknově optických a optických senzorů a interferometrických senzorů. Rešeršní hledání v rámci vlakové dopravy jsou rozdělena opět do tří podskupin se zaměřením na obecné přístupy a implementaci v kolejové dopravě (využití konvenčních senzorů, vláknově optických a optických senzorů a interferometrických senzorů).

4.1 ITS (Inteligentní dopravní systémy)

Počátky ITS (Intelligent Transport Systems) lze datovat do 70. let 20. století. V Japonsku (1973) tehdy vznikl první projekt s názvem CACS (Comprehensive Automobile Traffic Control System) [21], jehož základním úkolem bylo dynamicky řídit provoz na komunikacích. Z technického hlediska se jednalo o antény zabudované v povrchu vozovky, které fungovaly jako komunikační linka mezi vozidly a infrastrukturou. Dalšího rozmachu se ITS dočkaly s nástupem výkonných výpočetních a telekomunikačních systémů, kdy byly realizovány významné pilotní projekty jako UTMS (Universal Traffic Management Systems) [22], PROMETHEUS [23] v Evropě a další.

ITS v moderní době představují spojení komunikačních a informačních technologií s vozidly a dopravními sítěmi. Zdokonalením stavu výpočetní techniky se tyto systémy a služby uplatnily na různých úrovních dokonalosti po celém světě. Hlavní prioritou ITS je optimalizovat dopravní toky, zvýšit tak plynulost dopravy i bezpečnost provozu a snížit dopad jeho vlivů na životní prostředí [24]. Úkolem ITS je tedy pomoci cestujícím, řidičům, správcům dopravní infrastruktury, provozovatelům dopravy, veřejné správě i bezpečnostním složkám a spojit jejich potřeby do jednoho výsledného systému. Optimalizací dopravy zároveň dojde k její vyšší efektivitě. Pro úspěšnou aplikaci ITS je nutno vytvořit odpovídající infrastrukturu. Její hlavní částí jsou dopravní senzory. Součástí technické infrastruktury je dále komunikační prostředí a informační technologie.

Dopravní senzory jsou zařízení zjišťující vstupní data a informace pro ostatní systémy dopravní telematiky. Senzory se umísťují vedle komunikace, nad komunikaci, do nebo na povrch vozovky či kolejiště. Mezi základní parametry, které lze měřit patří rychlost dopravního prostředku, klasifikace vozidla, rozvor a počet náprav, celková hmotnost dopravního prostředku, nápravové zatížení vozovky, identifikace zastavení automobilového

vozidla nebo řazení vozidla do dopravního pruhu či směru jízdy a obsazenost, která vypovídá o kvalitě dopravního proudu. Sensory dělíme na destruktivní a nedestruktivní z pohledu, zda je nutné je zabudovat do vozovky či kolejiště (destruktivní) nebo nikoliv (nedestruktivní).

4.2 Rešeršní hledání v oblasti silničních vozidel

Tato práce je zaměřena na rozvoj nové oblasti, kterou je využití vláknově optických interferometrů pro monitorování silniční dopravy. Vhodnými metodami zpracování lze tak analyzovat a monitorovat parametry jako je rychlost a počet (detekce) silničních vozidel. Fakt, že se jedná o relativně novou a neprobádanou oblast, dokládá níže provedená patentová a literární rešerše. Pro aplikace v silniční dopravě se jedná o zcela nový přístup, unikátnost navrhovaného řešení v rámci této práce, výběr a použití konkrétních optických technologií a zpracování signálů ukazuje na zajímavý technologický posun a poskytuje reálnou šanci na praktické nasazení v silničním provozu.

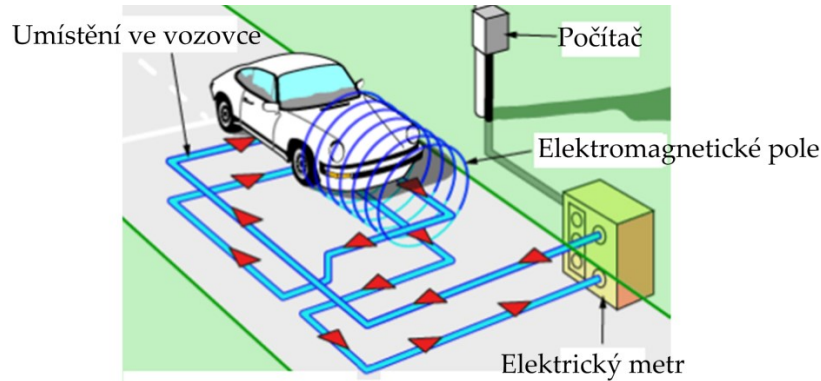
4.2.1 Konvenční senzory

4.2.2 Indukční smyčky a magnetické senzory

Pracují na principu změny indukce v elektromagnetickém poli. Dnes patří mezi nejpoužívanější senzory v dopravních systémech ITS, viz obr. 4.1. Indukční smyčky jsou elektromagnetické detektory se stacionárním polem, které se umísťují pod povrch vozovky. Vzhledem ke své jednoduchosti a spolehlivosti se řadí k nejčastěji používaným detektorům. Indukční detektor se skládá z indukční smyčky, vlastního detektoru a analytické jednotky. Ve vozovce se v hloubce cca 25-65mm nachází kabelový vodič vytvářející indukční smyčku, kolem které je vytvořeno magnetické pole. Toto pole je přítomností automobilu (kovové karoserie vozidla) narušeno a výsledné změny jsou následně zaznamenávány detektorem. Tento systém je použitelný nejen pro měření rychlosti, ale i pro klasifikaci dopravního proudu, sběr dopravních dat a průzkumů, apod. [25-26]. Výhodou řešení je jeho snadná instalace, přesnost a spolehlivost. Nevýhodou je jejich omezená možnost použití v místě železobetonových konstrukcí, vyšší náklady na odstraňování poruch vzhledem k instalaci uvnitř vozovky a náchylnost k přetržení vlivem těžké dopravy.

Magnetické senzory využívají jevu, který spočívá ve změně elektrického odporu velmi tenké vrstvy magnetického materiálu při jeho vložení do podélného magnetického pole. Magnetické senzory reagují na podélné horizontální siločáry a nerozlišují jejich směr. Uvedený typ senzoru tedy není závislý na směru magnetického pole. Měřena je hustota siločar magnetického pole země, kdy kovová masa vozidla v prostoru senzoru zvýší hustotu siločar magnetického pole a dochází k detekci změny v hustotě siločar magnetického pole (detekována je přítomnost vozidla). Změna odporu nastává již při velmi malých hodnotách magnetické indukce pohybující se v řádech mT . Sensory mají vysokou citlivost a rychlou

reakční dobu. Účinnost funkce senzoru může být snížena silným vnějším magnetickým polem, které by zničilo vnitřní uspořádání. Stejně jako indukční smyčky je nutné tento typ senzoru zabudovat do vozovky, v případě duality zapojení lze monitorovat rychlost vozidel [27].



Obrázek 4.1: Princip implementace a funkce indukční smyčky v praxi.

4.2.3 Pneumatické senzory

První typ tohoto dopravního automobilového detektoru byl postaven již v roce 1920. Jedná se o přenosnou technologii s velmi snadnou instalací. Princip činnosti spočívá v měření změny tlaku v trubce položené na vozovce, viz obr. 4.2. Pneumatické detektory mohou být použity k měření intenzity provozu, obsazenosti jednotlivých jízdních pruhů případně rychlosti vozidel (je nutné použít dva detektory). Konstrukčně je nutné využít ochranný kryt na nízko profilové pneumatické detektory při měření ve více jízdních pruzích (pevný, ale ohebný kryt), propojovací kabel mezi senzorem a měřicí elektronikou, řídicí jednotku a napájení. Průjezd vozidla způsobí tlak na použitou trubičku obsahující vzduch a dochází k zvýšení tlaku v trubičce a následnému sepnutí tlakového senzoru na konci trubičky. Problém technologie je, že nelze dobře rozpoznat stojící nebo pomalu se pohybující vozidla a nepřesné počítání náprav při vyšších intenzitách dopravy, dále citlivost na změny teploty. Tento typ senzorů se nepoužívá ve zhoršených klimatických podmínkách, jako jsou např. sníh, déšť [28-30].



Obrázek 4.2: Princip implementace pneumatického detektoru v praxi, převzato z [28].

4.2.4 Piezoelektrické senzory

Tyto typy senzorů fungují na principu stlačení měřicí sondy, které je způsobeno nápravou projíždějícího vozidla. Napětí generované senzorem je úměrné síle nebo váze (kola, případně nápravy vozidla), která působí na sensor. Elektrické napětí je vytvářeno nábojem opačné polarity, který se objeví při stlačení na protilehlých površích piezoelektrického zařízení. Senzory se umísťují do podélné drážky vyfrézované do vozovky (viz obr. 4.3) a zalévají se epoxidem, dále je nutný propojovací kabel mezi senzorem a měřicí elektronikou, řídicí jednotka a napájení. V porovnání s indukčními smyčkami je tento typ senzoru citlivý na instalaci, respektive zarovnání jeho polohy s vozovkou. Piezoelektrický efekt má dynamický charakter, to znamená, že elektrický náboj se generuje pouze při změně vnějších sil působících na umístěný sensor ve vozovce. Nevýhodou použitého typu řešení při měření rychlosti je, že minimální měřitelná rychlost je kolem 20km/h, proto není vhodné ho použít v oblastech, kde je pomalá doprava. Některé piezoelektrické materiály jsou také citlivé na teplotu, účinnost senzoru při nižších teplotách značně klesá [31-34].



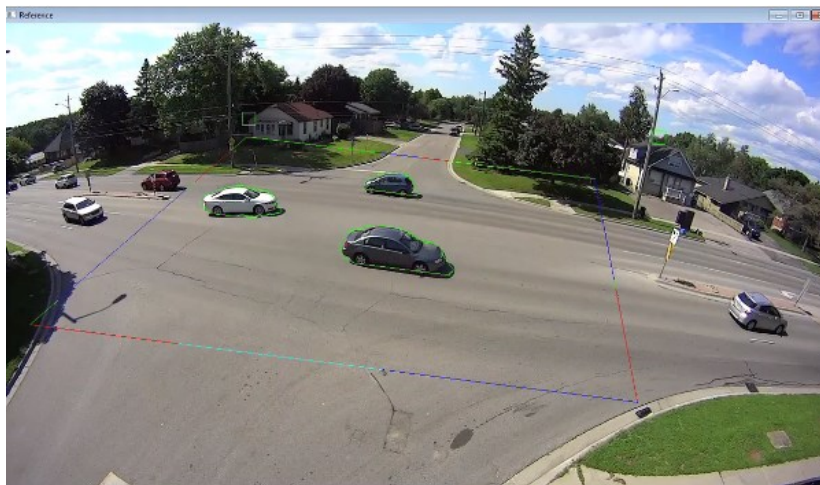
Obrázek 4.3: Princip implementace piezoelektrického senzoru v praxi, převzato z [31].

4.2.5 Mikrovlnné senzory

Pracují na principu šíření elektromagnetických vln. Rychlost se měří pomocí Dopplerova jevu s využitím odražených radiových vln v mikrovlnném pásmu. Paprsek vysílaný parabolickou anténou se odráží od karoserie projíždějících vozidel zpět k radaru, je zachycen anténou a zesílen. Zpracováním odraženého signálu složitými elektronickými obvody je vypočtena rychlost projíždějícího vozidla. Radar využívá CW (Continuous wave) s konstantní frekvencí v čase nebo FMCW (Frequency-Modulated Continuous-Wave) s proměnnou frekvencí. Mikrovlnné detektory lze používat jako stacionární nebo mobilní zařízení. Stacionární detektory se nejčastěji umísťují nad jízdní pruh proti pohybu dopravního proudu. Nevýhodou řešení je náchylnost na elektromagnetické interference, protože radarové vlny se odrážejí od kovových částí karosérie a některých terénních překážek, jako jsou například svodidla, sloupy veřejného osvětlení, železné, či betonové konstrukce [35-36].

4.2.6 Technologie CCTV (Closed Circuit Television)

Princip činnosti je založen na digitalizaci statického obrazu, kdy průjezd vozidla změní hodnoty barev a jasu, viz obr. 4.4. Součástí systému je soubor jedné či více propojených videokamer a výkonný počítač pro zpracování a analýzu dat. Videodetekci lze použít pro detekci všech vozidel. Systém kamer je schopný evidovat i státní poznávací značky (SPZ) [37] a na základě doby průjezdu vozidla měřeným úsekem a známé vzdálenosti mezi bodem vjezdu a výjezdu vypočítá rychlost vozidla. Zařízení se nedá oklamat změnou jízdního pruhu, jelikož kamery monitorují všechny jízdní pruhy a jsou vzájemně propojeny [38-39].



Obrázek 4.4: Videodetekce automobilů v praxi, převzato z [39].

4.2.7 Technologie RFID (Radio Frequency Identification)

Radiofrekvenční systém identifikace je technologie identifikace objektů pomocí radiofrekvenčních vln. V rámci dopravních systémů je tvořen RFID čtečkou a štítky. Štítky se dělí se na aktivní/pasivní, v případě aktivního štítku lze využít rádiový dosah až stovky metrů. Štítek je tvořen anténou a pamětí pro čtení/uložená dat. Výhodou systému je velmi rychlé a přesné zpracování informací a okamžitý přenos načtených dat k následnému zpracování. Tento systém se využívá pro efektivní řízení dopravy, v rámci kterého lze měřit i rychlost vozidel [40-42].

4.2.8 Akustické senzory

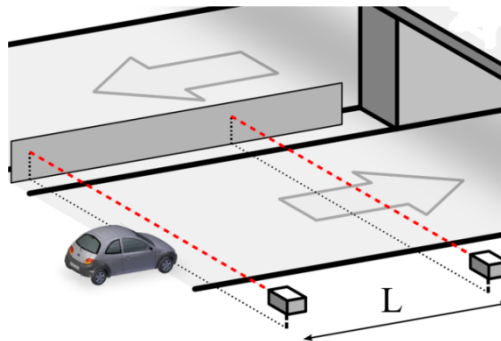
Zapojeny do uzlů bezdrátových sensorových sítí umožňují pomocí distribuovaných systémů sledovat a monitorovat provoz. Každá akustická aktivita způsobená odrazem od automobilu je snímána citlivým mikrofonom a pomocí vyhodnocovací jednotky zpracována. Při využití více uzlů a pevně stanovené vzdálenosti lze stanovit i rychlost automobilového vozidla [43-45].

4.2.9 Vláknově optické a optické senzory

Senzory využívají optických vláken a pracují na různých principech činnosti [46-47]. Nabízí řadu nezanedbatelných výhod, jako je spolehlivost, přesnost, vysoká citlivost, elektromagnetická a chemická odolnost nebo široký teplotní rozsah, a proto se jeví jako velmi vhodná alternativa pro specifické aplikace ITS [48]. Největší potenciál jejich využití je v oblasti hybridních sítí, kde se kombinuje použití optického vlákna pro přenos datových informací a použití optického vlákna jako senzoru citlivého na požadovanou veličinu.

4.2.10 Optické senzory a aktivní infračervené senzory

Pracují na principu vysílání a příjmu optického paprsku (laserového nebo infračerveného) mezi dvěma referenčními body (tvořeny vysílačem a přijímačem), viz obr. 4.5. Dva vhodně umístěné senzory v definované vzdálenosti lze použít pro měření rychlosti vozidel. Případně lze zdroj i detektor umístit vedle sebe a detekovat odražené paprsky projíždějících vozidel [49-51]. Tento typ měření rychlosti je přenositelného nebo stacionárního charakteru, jeho využití v praxi spíše ustupuje.



Obrázek 4.5: Měření rychlosti založené na dvou optických snímačích umístěných podél vozovky.

4.2.11 Technologie DAS (Distributed Acoustic Sensor)

Umožňuje do vzdálenosti až 40km s prostorovým rozlišením až 1m detekovat zvuk podél optického vlákna. DAS technologie vyhodnocuje Rayleighův rozptyl. Každá akustická aktivita vytváří akustickou energii, která je absorbována molekulami v jádře vlákna. To způsobuje fázový posuv ve zpětně rozptýleném světle, který je detekován vyhodnocovací jednotkou a následně analyzován. Aplikace této technologie jak popisují autoři [52-53] je možná v automobilové dopravě a při použití jednoho optického vlákna lze monitorovat více dopravních veličin jako je detekce, směr, rychlost apod. Výhodou pro dopravní provoz je především fakt, že lze jako detekční vlákna využít standardní jednovláknová optická vlákna v již položených telekomunikačních trasách.

4.2.12 Technologie FBG (Fiber Bragg Grating)

Představují technologii, kdy je do jádra optického vlákna vytvořena struktura podobná difrakční mřížce (pomocí změn hodnot indexu lomu). Pokud je mřížka podrobena průjezdu automobilu (mechanickému namáhání), dojde ke změně periody mřížkové struktury a odrazí se světlo jiné vlnové délky, které je následně vyhodnoceno. Pro měření rychlosti vozidla je nutné senzory tohoto typu zabudovat do vozovky v pevně definované vzdálenosti například kolmo ve směru jízdy vozidla jak uvedli autoři článku [54-55].

4.2.13 Technologie POTDR (Polarization Optical Time Domain Reflectometry)

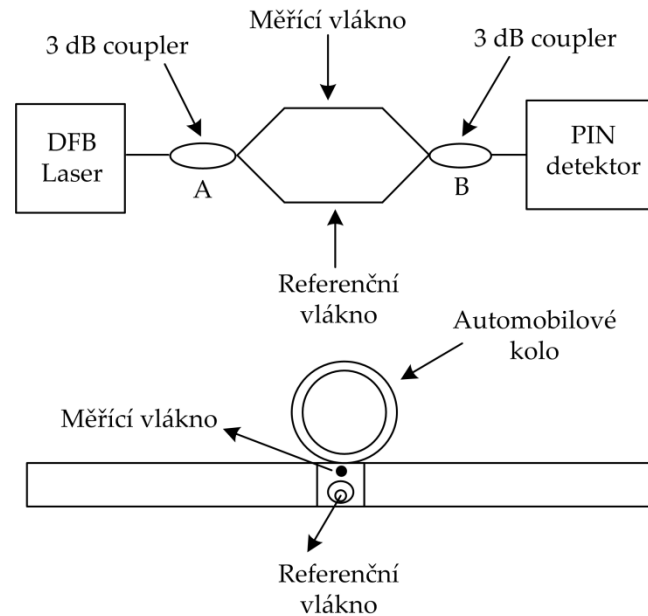
Článek [56] popisuje použití senzoru s využitím principu měření POTDR. Autorský kolektiv popisuje použití distribuovaných intrinzičních optických senzorů. Systém slouží k monitorování silničního provozu v reálném čase při využití velkého dosahu a s vysokým rozlišením. Jednou z výstupních možností by mohla být i realizace měření rychlosti vozidel, praktickou realizaci ovšem autoři nepopisují.

4.2.14 Senzory detekce mikroohybů v optickém vlákne

Princip činnosti je založen na detekci hodnoty výstupního výkonu, respektive jeho srovnání vůči hodnotě vstupního výkonu. Vlákno je uloženo do speciální ochrany a zabudováno do vozovky. Průjezd automobilu přes zabudovaný senzor způsobí mikrodeformaci ve vlákne - dochází k vyzáření optického výkonu do pláště vlákna. Článek [57] popisuje zabudování dvou senzorů v pevně definované vzdálenosti. Pomocí detekovaných průjezdů od náprav automobilů lze poté vypočítat rychlost automobilu.

4.2.15 Technologie WIM (Weigh-in-Motion)

Snímače zatížení náprav vozidel se využívají pro monitorování zatížení kol a náprav vozidel pohybujících se ve více jízdnicích pruzích, stejně jako několik dalších důležitých parametrů, jako je například rychlost automobilů, vzdálenost mezi nápravami, šířka vozidel, apod. Článek [58] prezentuje výsledky z experimentálních měření se speciálním optickým vláknem se dvěma jádry. Vlákno slouží jako WIM senzor a lze měřit i rychlost automobilů. Články [59-62] popisují detekci náprav vozidel pomocí vláknově optických senzorů zabudovaných do vozovky na bázi různých typů interferometrů. Autoři popisují různé možnosti využití jako například klasifikaci vozidel a monitorování provozu. Obrázek 4.6 znázorňuje měřicí schéma a implementaci, tak jak uvádí autorský kolektiv článku [60] s využitím dvojramenného Mach-Zehnderova interferometru.

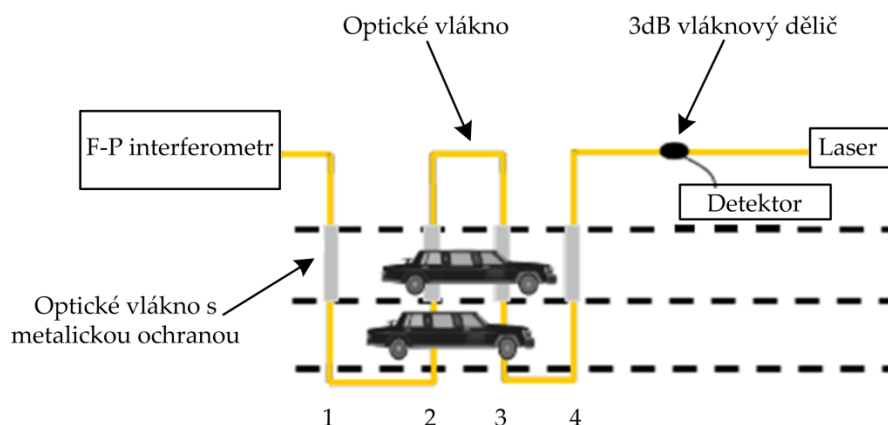


Obrázek 4.6: Schéma základní struktury senzoru z článku [60] a uložení měřícího a referenčního ramene interferometru.

4.2.16 Interferometrické senzory

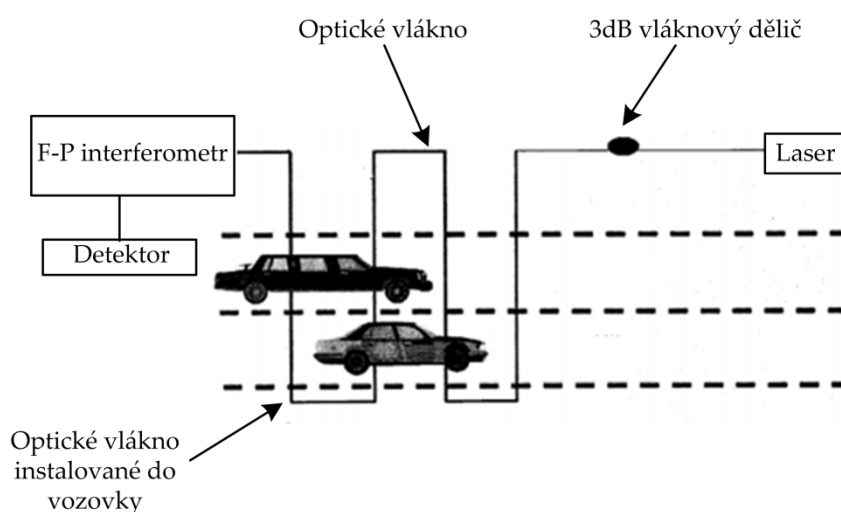
Interferometrické senzory využívají výhod optických vláken a patří mezi nejcitlivější vláknově optické senzory. Princip funkce je založen na fázové modulaci světelné vlny šířící se uvnitř optického vlákna. Pro zjištění požadované rychlosti objektu [63] lze využít pevně stanovené vzdálenosti mezi dvěma interferometry a časového odstupu mezi nimi nebo detekci náprav automobilu. Tuto skutečnost potvrzují níže popsání metody měření rychlosti.

Článek [64] popisuje distribuovaný vláknově optický senzor v zapojení s interferometrem typu Fabry-Perot, který se používá pro sběr základních informací o silničních vozidlech a provozu, viz obr. 4.7. Měření bylo ověřeno v reálném provozu, byla ověřena schopnost detekce parametrů jako rychlost, klasifikace vozidla, hmotnost nebo plynulost provozu. Jako snímací médium bylo použito optické vlákno. Snímací optické vlákno bylo navrženo a uloženo ve speciálním metalické ochraně a instalováno na povrch vozovky. Provedená experimentální měření prokázaly, že není nutné instalovat vlákno do vozovky, ale přesto je nutná implementace na povrch vozovky včetně zajištění vhodného uchycení vláken. Metoda nebyla testována v delším časovém intervalu. Je tedy možné, že v delším časovém horizontu lze očekávat únavu použitého ochranného materiálu pro měřící optické vlákno a s tím spojené problémy s nutnou opětovnou instalací.



Obrázek 4.7: Schéma distribuovaného vláknově optického senzoru s Fabry-Perot interferometrem.

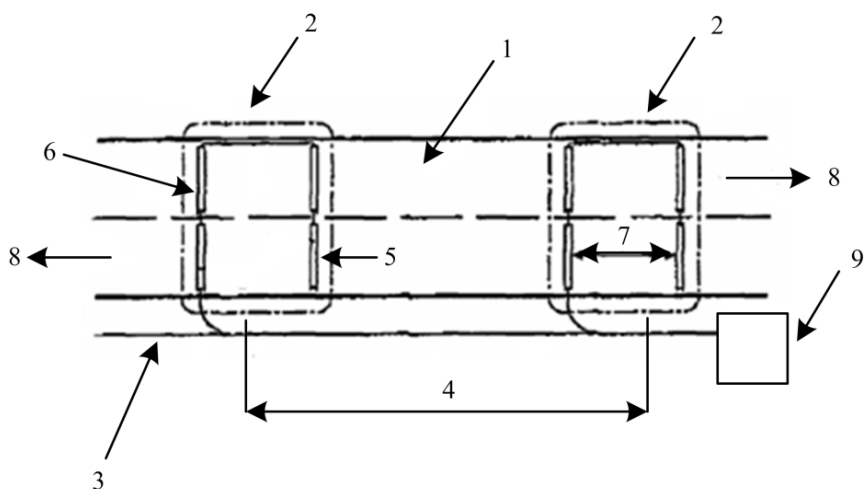
Užitný vzor [65] se týká komplexního informačního systému se zaměřením na snímání rychlosti a hmotnosti vozidel. Pro vyhodnocení je využito interferometr typu Fabry-Perot. Interferometr i vyhodnocovací jednotku lze umístit mimo vozovku, optické vlákno je nutné zabudovat do vozovky, viz obr. 4.8. Ochrana optického vlákna je tvořena speciálním materiálem, který je vhodný pro instalace do vozovky. Průjezd automobilu přes zabudované optické vlákno ve vozovce způsobí změnu fáze přenášené světelné vlny, tyto interferenční obrazce se následně vyhodnocují. Pro výpočet rychlosti je nutné zabudování dvou optických vláken, na základě časového intervalu průjezdu mezi vlákny lze stanovit rychlost vozidel.



Obrázek 4.8: Schéma komplexního distribuovaného informačního systému detekce vozidel.

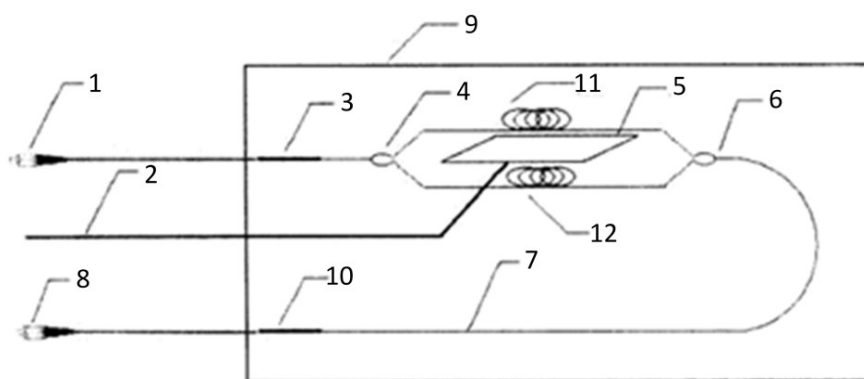
V patentovém spise s názvem *Road traffic monitoring system* [66] je popsán systém detekce projíždějících vozidel. Pro detekci se využívá optický interferometr a optické vlákno zabudované ve vozovce. Monitorovací dopravní systém obsahuje alespoň jedno sensorické čidlo (označeno číslem 2 na obrázku 4.9) umístěné ve vozovce pro detekci vozidla. V případě měření rychlosti je nutné zabudování dvou vláken (označeno číslem 5 na obrázku 4.9) v rámci jednoho sensorického čidla nebo kombinace více sensorických čidel (2), kde lze využít pevně definované vzdálenosti. Při průjezdu vozidla přes vlákno dojde působením

tlaku vozidla ke změně fáze světelné vlny, vzniklý fázový posuv se dále vyhodnotí a na základě post-zpracování je stanovena rychlost projíždějících vozidel.



Obrázek 4.9: Schéma umístění distribuovaného informačního systému detekce vozidel ve vozovce.

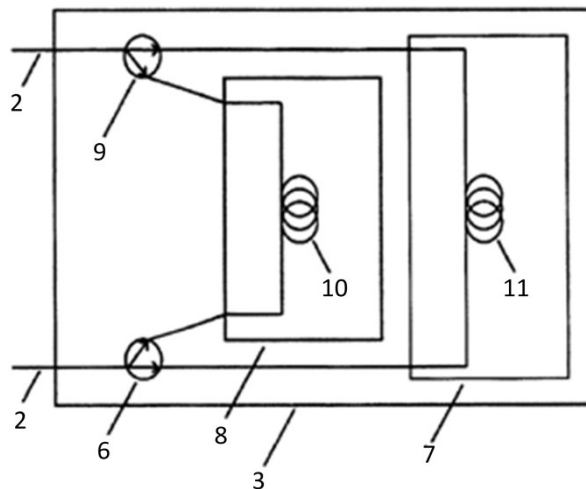
Užitný vzor [67] se týká detekce a měření rychlosti projíždějících vozidel za použití dvou vláknově optických interferometrů typu Mach-Zehnder. Měřicí (11) i referenční větev (12) je o délce 5,5m a je v kruhu zabudována do vozovky v ochranném kovovém krytu (3 a 10) se speciální plastovou výplní o průměru 80mm, viz obr. 4.10. Vztahové značky dále popisují konektory (1 a 8), vláknové děliče (4 a 6) a úložný box (9). Při průjezdu vozidla dochází vlivem tlaku od pneumatik ke změně fáze světelné vlny v zabudovaném měřicím vlákně ve vozovce. Detekční systém vyhodnocuje změny v interferenčních obrazcích a na základě post-zpracování dat je stanovena rychlost projíždějících vozidel.



Obrázek 4.10: Schéma zapojení detekčního systému v rámci jedné jednotky.

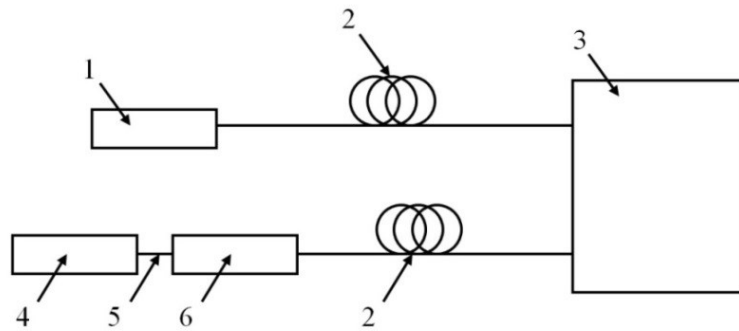
Užitný vzor [68] popisuje optovláknový interferometrický senzor pro monitorování dopravního provozu, viz obr. 4.11. Vztahové značky popisují konektory (2), vláknové děliče (9 a 6), měřicí část interferometru (11), referenční část interferometru (10), uložení měřicí části

(7), uložení referenční části (8) a úložný box (3). Autoři testovali schopnost detekce průjezdu vozidel a to bez nutnosti implementace optického vlákna na/do vozovky. V rámci patentového spisu ale nebyla provedena žádná statistika vyjadřující míru schopnosti detekce, taktéž není definována vzdálenost pro umístění senzoru od krajnice vozovky. Senzor využívá známého zapojení Mach-Zehnderova interferometru. Autorský kolektiv se v rámci uvedeného řešení zmiňuje o možném rozšíření aplikačních možností o měření rychlosti, případně měření hmotnosti projíždějících vozidel. Tato možnost ovšem v rámci uvedené přihlášky nebyla prakticky testována, a není ani uvedena v rámci vynálezových nároků spisu [68].



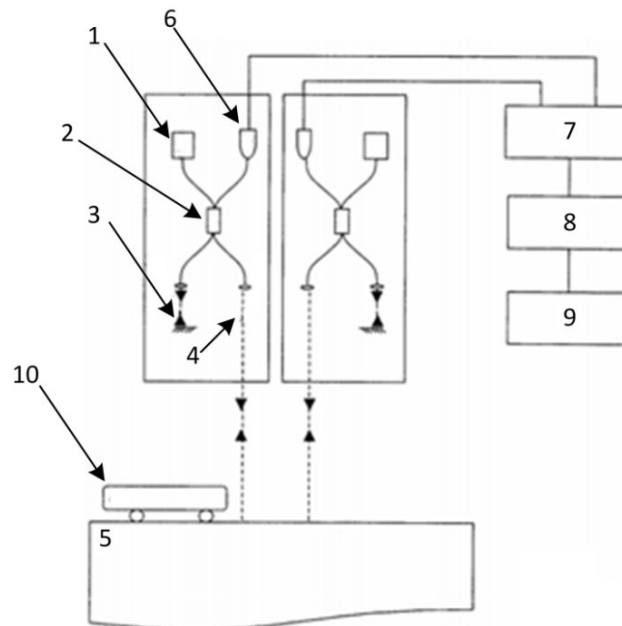
Obrázek 4.11: Schéma zapojení senzoru pro monitorování dopravního provozu.

V patentovém spise [69] je popsán optovláknový interferometrický senzor pro monitorování automobilového dopravního provozu a pro analýzu typu projíždějícího motorového vozidla z hlediska zařazení kategorie osobní nebo nákladní automobil na základě spektrální analýzy dat z jednoho použitého interferometrického senzoru na bázi Mach-Zehnderova interferometru, viz obr. 4.12. Autorský kolektiv v rámci spisu uvádí, že je možné rozšířit aplikační možnosti vynálezu na měření hmotnosti nebo rychlosti. Tato skutečnost ale nebyla prakticky ověřena, není ani uvedena v patentových nárocích v rámci představeného spisu. Uvedené řešení obsahuje senzor s laserovým zdrojem světla (1) propojeným přes optické vlákno (2) se senzorem (3), ze kterého vede optické vlákno (2) do fotodetektoru (6). Fotodetektor je dále propojen přes datový kabel (5) se zařízením pro zpracování signálu (4).



Obrázek 4.12: Schéma zapojení senzoru uvedené v patentovém spisu, převzato z [69].

V patentovém spise s názvem *Road vehicle running speed detecting method and device* [70] je popsáno řešení pro analyzování rychlosti silničních vozidel za použití dvou interferometrů typu Michelson, viz obr. 4.13. Z předem dané vzdálenosti interferometrických senzorů a časového intervalu průjezdu vozidla mezi interferometry lze analyzovat rychlost vozidla. Jedná se o nedestruktivní senzor interferometrického zařízení pro určení rychlosti vozidel, kde optické vlákno slouží pouze k přenosu informace a vlastní detekce vozidla probíhá mimo senzor (extrinziční senzor). U tohoto systému autorský kolektiv uvádí, že vzhledem k nepříznivým vlivům počasí a možné detekci jiných proměnných (např. chodec, protijedoucí vozidlo) může docházet ke snížení účinnosti tohoto zařízení.



Obrázek 4.13: Schéma detekčního systému pro monitorování rychlosti vozidel.

Tabulka 4.1 shrnuje dnes aktuálně používané vláknově optické technologie, respektive senzory v rámci automobilové a přilehlého silniční infrastruktury.

Tabulka 4.1: Shrnutí o využití vláknově optické technologie v silniční dopravě.

	Umístění senzoru	Fixace senzoru	Měřicí dosah	Měřená veličina
Braggovské mřížkové senzory	instalace do vozovky, na vozovku	lepení, mechanické úchyty a jiné ochrany	téměř fyzický kontakt se snímaným tělesem	axiální deformace (namáhání)
Distribuované systémy	podél silnic, do vozovky	lepení, mechanické úchyty a jiné ochrany	téměř fyzický kontakt se snímaným tělesem	axiální deformace (namáhání), akustická a vibrační odezva
Interferometrické systémy	instalace do vozovky, na vozovku, podél silnic	lepení, mechanické úchyty a jiné ochrany	jednotky metrů od snímaného tělesa	akustická a vibrační odezva, detekce odrazu

4.3 Rešeršní hledání v oblasti kolejových vozidel

Porovnání navrhovaného řešení se současnými známými funkčními řešeními nebo patentovými spisy z oblasti vláknové optiky ukazuje, že žádný ze systémů není primárně konstruován jako zdroj informací a signálů pro řízení a zabezpečení dopravy, respektive měření dílčích parametrů jako je detekce či rychlost kolejových vozidel. Ve své podstatě se jedná víceméně o diagnostické a sledovací systémy. Konvenční dostupné systémy s parametry měřicího systému popsaného v této práci se prozatím na trhu nevyskytují. Přesto některé výzkumné a vývojové organizace se této oblasti usilovně věnují (např. Polytechnika Hongkong, ZG Optique, Frauscher, ESIN Group, Hanning and Kahl atd.). Ve světě se pro monitorování provozu na železnicích začaly aktivněji systémy pracující s optickými vlákny používat před cca 3-5 lety [71-74]. Relevantní uvedená řešení níže jsou založena na odlišných principech funkčnosti a specifikována jsou i dle použitého typu technologie.

4.3.1 Konvenční senzory

4.3.2 Technologie kolejových obvodů

Pro monitorování volnosti či obsazení tratí se dnes typicky využívají tzv. kolejové obvody. Tato technologie pracuje na principu, kdy trať, respektive kolejnice je po předem

stanovených úsecích rozdělena a elektricky izolována. Projíždějící kolejová souprava způsobí uzavření obvodu mezi dvěma pevně stanovenými body (kolejnicemi) a tím dochází k detekci kolejové soupravy. Nedostatky uvedeného řešení jsou zřejmé, systém je závislý na vytvoření kvalitního vodivého spojení mezi dvěma pevně stanovenými body (kolejnicemi), kdy zejména při náročných klimatických podmínkách může být toto řešení kompromitováno. Dále problematikou konvenčních elektrických a elektromagnetických systémů je fakt, že mají s nástupem nových trakčních technologií do hnacích vozidel problémy s funkční spolehlivostí. Důvodem je značné zvýšení elektromagnetického rušení v těsné blízkosti moderních hnacích vozidel a rušení, které se nese kolejnicemi superponované na zpětných trakčních proudcích. Dalším současným problémem elektrických detekčních systémů je malá odolnost proti ovlivnění, nebo proti poškození atmosférickým výbojem, respektive úderem blesku do/nebo poblíž železničního zařízení. U zařízení s metalickým propojením se pak přes tyto elektricky vodivé okruhy uzavírají nežádoucí vodivé smyčky, které se proti nežádoucímu ovlivnění nebo poškození velmi obtížně ošetřují [75-77].

4.3.3 Detektory kol a čítače náprav

Alternativním řešením jsou tzv. detektory kol, respektive čítače náprav, které využívají okolku k mechanickému sepnutí několika kontaktů. Takto lze nejen detekovat kolejovou soupravu, případně rychlost ale i směr jízdy. Uvedené řešení ale z hlediska omezené mechanické výdrže představuje technologický problém, na základě kterého se dnes spíše stahuje z provozu. Pokročilejší zařízení využívají zejména magnetické indukce, zde ale opět vzniká problém s elektromagnetickými interferencemi [78-82].

4.3.4 System ECTS (European Train Control System)

Aktuální nasazované řešení v rámci tratí je tzv. ECTS systém. Systém ECTS je v dnešní době nejperspektivnější a nejvíce se rozvíjející kolejový zabezpečovací systém. Traťová část systému je tvořena několika částmi, konkrétně tzv. eurobalízami, traťovou elektronickou jednotkou LEU (Lineside Electronic Unit), eurosmyčkou (Euroloop), radioblokovou centrálou RBC (Radio Block Centre) a doplňkovým rádiovým obvodem (Radio in-fill Unit). Základním monitorovacím prvkem je eurobalíza, která slouží pro přenos informací na vozidlo. Samotné zařízení je napájeno při průjezdu kolejové soupravy. Rozlišujeme dva druhy - pevnou a přepínatelnou. Eurobalíza nedokáže rozlišit směr jízdy vlaku, proto se umísťují vždy do skupin o minimálním počtu dvou zařízení. Jedná se o pasivní řešení, které se umísťuje v ose mezi kolejnicemi, viz obr. 4.14. ECTS představuje jednotný evropský systém, který má postupně nahrazovat různorodé národní kolejové zabezpečovací systémy. Jeho hlavním přínosem má být celkové zefektivnění kolejové dopravy a má také přispět k mnohem větší bezpečnosti na kolejových tratích. Definovat lze takto různé parametry jako je např. směr a rychlost jízdy vlaku, kontrola délky traťového

úseku a jiné. Primárně je ale uvedené řešení navrženo pro předávání informací do kolejového vozidla a zajištění zefektivnění kolejové dopravy [83-84].



Obrázek 4.14: Eurobalizy umístěné v ose mezi kolejemi, převzato z [83].

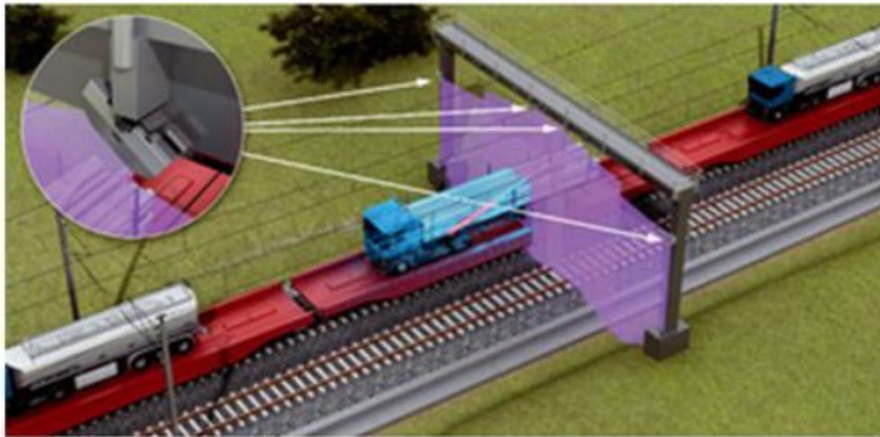
4.3.5 Vláknové optické a optické senzory

4.3.6 Technologie LIDAR (Light Detection And Ranging)

Technologie s názvem LIDAR se používá zejména pro měření vzdálenosti, ale využití nachází také při měření atmosférických jevů, mapování terénu, apod. Výsledkem metody je velké množství bodů, které lze zpracovat do podoby digitálního 3D modelu různých objektů a terénu. Při měření a pro stanovení požadované veličiny se využívá doby šíření pulsu laserového zdroje záření od analyzovaného objektu. Systém pracuje nejčastěji s vlnovou délkou světla v rozmezí hodnot 1060nm až 1540nm.

V rámci kolejové vlakové dopravy lze tuto technologii využít například pro monitorování bezprostřední blízkosti projíždějících vozidel a jejich detekce nebo pro monitorování kolejiště nacházející se pod soupravou. V tomto případě se senzory umísťují pomocí speciálních držáků přímo na vlakovou soupravu. Lze tak detekovat objekty v rozmezí od 0,2m do 10m. Rozlišovací schopnost systému LIDAR je závislá na rychlosti snímaného vozidla a počtu snímků.

V případě instalace v blízkosti železnice lze tento systém využít pro monitorování veličin jako přítomnost soupravy, rychlost soupravy, zakřivení kolejí apod. viz obr. 4.15. Systém umožňuje skenovat projíždějící soupravu a vyhodnocovat její přítomnost nebo délku. Princip funkce, respektive monitorování je velmi podobný výše uvedené technologii CCTV. Funkce systému LIDAR není ovlivněna změnou intenzitou slunečního záření, ale účinnost může být snížena při zhoršení klimatických podmínek, např. mlha [85-88].



Obrázek 4.15: Měření profilu kolejové soupravy, převzato [85].

4.3.7 Distribuované senzory

První způsob snímání využívá vláknově optického distribuovaného systému pro měření mechanického namáhání. Jeho podstata spočívá v měření Brillouinových frekvencí. Tyto frekvence jsou závislé na mechanické zátěži vlákna a současně na jeho tepelném namáhání. Výsledkem je prostorová specifikace namáhání po délce koleje. Využití je také možné v oblasti monitorování železničních mostů a tunelů. Měřené frekvence jsou současně závislé na mechanickém namáhání a teplotě a tyto vlivy nelze od sebe odlišit. Měření je přesné pouze v případě, pokud po celé délce koleje je zajištěna konstantní teplota, což může být velkým problémem. Měřené frekvence závisí na způsobu uchycení optického vlákna na kolej, viz obr. 4.16. Mají-li být výsledky reprezentativní, pak to znamená, že vrstva tmelu nebo jiného typu mechanického uchycení vlákna ke koleji musí být stejná a musí být dostatečně pevná s minimální pružností, jinak se deformace kolejnice přenesou nerovnoměrně na vlákno a tím se výrazně mění přesnost měření. Použít lze speciální typy optických vláken, ale vzhledem k cenové relaci standardního telekomunikačního optického vlákna je cca 100krát dražší. Celý systém je z hlediska vyhodnocení informací časově náročný a je vhodný spíše než pro měření rychlosti pro měření statických zátěží nebo kvazistatických zátěží, směru jízdy kolejové soupravy [89-95]. Autorský kolektiv článku [96] popisuje experimentální použití nelineárního rozptylu BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) v optických vláknech lepených na patu kolejnice. Pro měření se použilo vyhodnocení změn Brillouinových frekvencí vlivem deformací projíždějících vlaků. Problémem systému je, že je omezen na pomalé rychlosti jízdy vlaků, je více vhodný pro jejich identifikaci a identifikaci směru jízdy.



Obrázek 4.16: Implementace optického vlákna na kolejnici, převzato z [89].

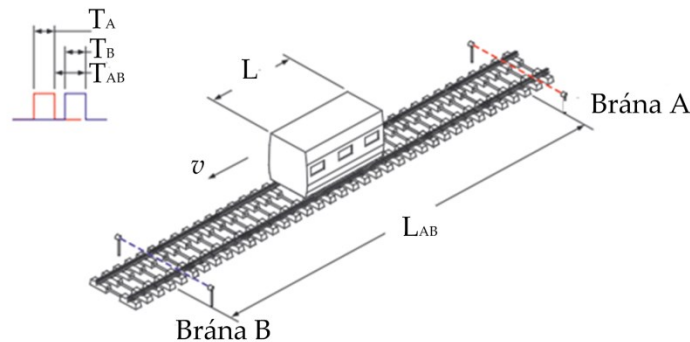
Druhý způsob snímání je založen na měření útlumu metodou OTDR. Jedná se o vyhodnocení zpětného Rayleighova rozptylu v optickém vlákne. Na rozdíl od předchozího přístupu jsou zde vyhodnocovány lineární rozptyly, což celý systém i finančně zlevňuje a lze i použít telekomunikační optická vlákna. Změna měřicího principu vede ke zvýšení dynamiky měření na cca 15-30 sekund. Měření je distribuované, což značí, že se získává informace o mechanickém namáhání působící podél celého vlákna. Měří se výkon, který se zpětně šíří optickým vláknem. Jeho úroveň je poměrně nízká, ale hlavním problémem je, že měření je citlivé na všechny vlivy, které vedou ke změnám výkonu podél vlákna. Tyto vlivy jsou: teplota, mechanické namáhání, ohyby, způsob uchycení optického vlákna ke koleji, které by mělo být stejné podél celého vlákna. Nevýhodou systému je také fakt, že pracuje na stejných vlnových délkách, které se používají pro komunikace po optických vláknech, což značí, že nelze použít existující provozovaná komunikační vlákna, která jsou použita pro přenos datových signálů. Systém lze využít pro monitorování rychlosti kolejových vozidel, jejich identifikaci a identifikaci směru jízdy, ale také celistvosti kolejí, které se např. vlivem teplotní roztažnosti deformují, a lze tak předcházet vážným nehodám [97-99].

4.3.8 Výkonové (intenzitní) senzory

Snímání je založené na relativním pohybu konců dvou vláken proti sobě. Využívá se senzoru, u kterého je vyhodnocován optický výkon, který se naváže z jednoho konce vlákna do druhého. Dynamika systému je v porovnání s předchozími uvedenými řešeními vyšší. Lze detekovat dynamické změny v jednotkách až několika desítkách kHz. Jedná se o bodové měření, na každé měřicí místo je vyžadován jeden snímač. Nevýhodou tohoto jednoduchého řešení je měření změn navázaného optického výkonu. Protože se jedná o optický výkon, je snímač citlivý na teplotní změny, má silně limitované rozkmity měřených vibrací, je zde rovněž limitovaný dynamický rozsah měřených změn, který je přibližně 1-2 řády. Výhodou je poměrně robustní řešení, sensor má elektrický výstup, což značí, že v místě měření musí být zdroj energie. Řešení lze využít například pro detekce kolejové soupravy, směru jízdy nebo monitorování rychlosti [100-101].

4.3.9 Optické senzory a aktivní infračervené senzory

Pracují na principu vysílání a příjmu optického paprsku (laserového nebo infračerveného) mezi dvěma referenčními body (tvořeny vysílačem a přijímačem) viz obr. 4.17. V případě umístění dvou senzorů v definované vzdálenosti analyzovat rychlosti projíždějících vozidel [102-103].



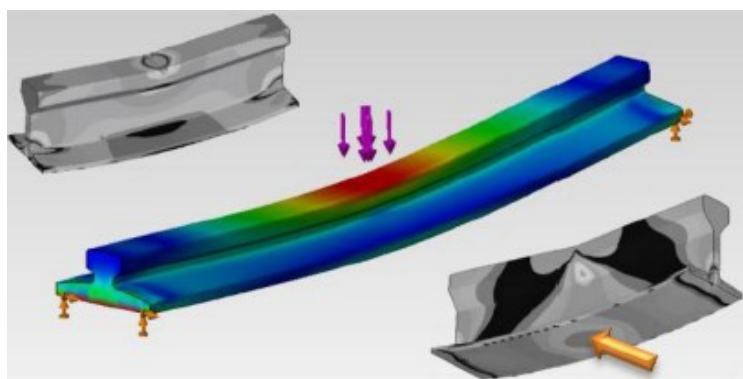
Obrázek 4.17: Vyhodnocení rychlosti založené na dvou optických snímačích umístěných podél trati.

4.3.10 Senzory detekce mikroohybů v optickém vlákne

Jeden z možných přístupů jak monitorovat parametry kolejového provozu popisují patentové spisy [104-105]. Uvedená řešení jsou založena na detekování mikroohybů v rámci struktury optického vlákna. Podstatou je detekování deformace optického vlákna deformačními elementy, které tvoří periodické zvlnění. Díky němu se procházející světlo vyvažuje z vlákna mimo něj a tyto ztráty jsou tím větší, čím je větší zátěž na deformační elementy, a tím i na optické vlákno. Vyhodnocuje se změna optického výkonu ve vlákne. Rovněž zde je snímač citlivý na další vlivy, které způsobují změnu vedeného optického výkonu, jedná se o příčné namáhání optického vlákna, na které je vlákno citlivé a je nutno pečlivě celý systém justovat. Hlavním problémem řešení je změna mechanické pevnosti vlákna při opakovaných deformacích, které silně zkracují jeho životnost. Systém je dostatečně rychlý, je schopen zachytávat dynamické změny ve stovkách Hz a lze tak monitorovat parametry jako je detekce nebo rychlost projíždějící kolejové soupravy.

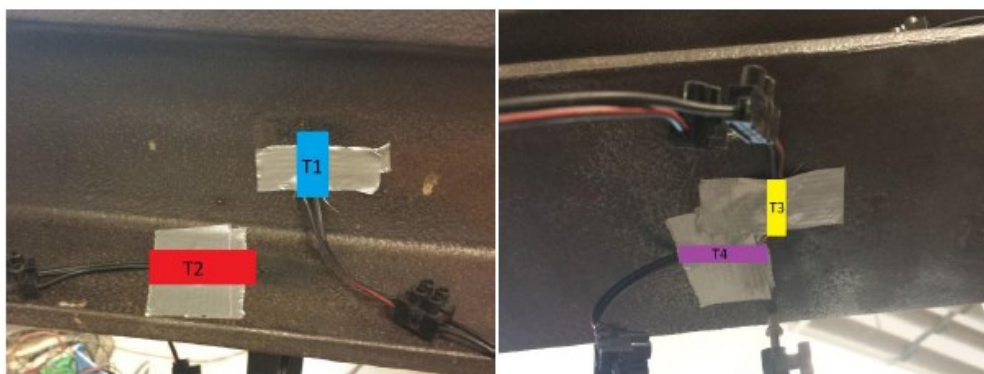
4.3.11 Technologie FBG (Fiber Bragg Grating)

Mezi dnes asi nejrozšířenější aplikace v rámci kolejové dopravy patří využití Braggových mřížek. Hmotnost vlaku vykazuje značnou sílu, respektive deformaci působící na koleje, kolejový pražec případně ostatní prvky, které slouží k uchycení kolejnice. Tato síla generuje deformační napětí, které se v kolejnici rozkládá a způsobuje místa s expanzí, neutrálním stavem nebo kompresí. Simulace modálního působení hmotnosti vlaku na kolejnici je zobrazena na obrázku 4.18. Na základě této simulace lze určit vhodná místa pro umístění jednobodových senzorů mechanického napětí.

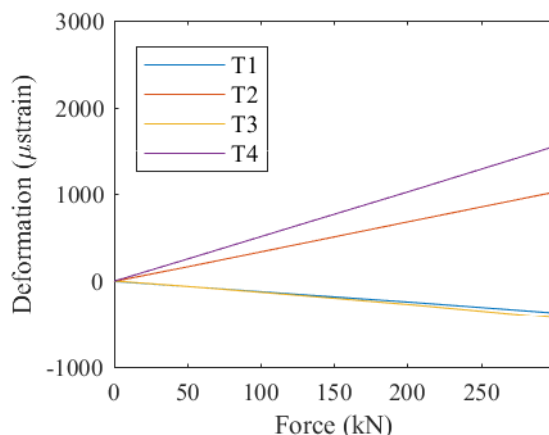


Obrázek 4.18: Simulace deformace kolejnice při průjezdu vlakové soupravy, převzato z [106].

Pro lepší pochopení a analýzu rozložená sil vztahujících se i k této práci byla provedena vlastní analýza, ověřující rozložení, respektive působení deformačních sil na kolejnici. Umístěny byly tenzometrické senzory, které se vlastnostmi a citlivostí blíží Braggovským sensorům (rozlišení na úrovni 1 μ strain). Umístění senzorů je znázorněno na obrázku 4.19. Kolejnice byla namáhána v rámci lisovacího stroje s maximálním zatížením 360kN. Úroveň deformačních sil vyjádřená v jednotkách μ strain v rámci různých poloh tenzometrických senzorů je zobrazena na obrázku 4.20.



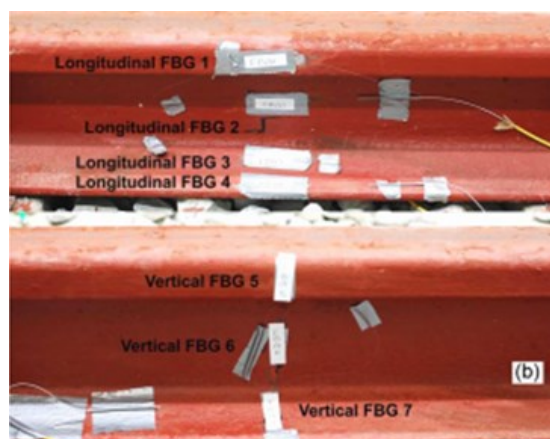
Obrázek 4.19: Umístění tenzometrů: na stojně ($T1$) a na patce podélně $T2$, na spodku kolejnice příčně ($T3$) a podélně ($T4$).



Obrázek 4.20: Úroveň deformačních sil v rámci různých poloh tenzometrických senzorů. Na ose x je zobrazena síla [kN], na ose y je zobrazena úroveň deformačních sil [μ strain].

Na základě výsledků je patrné, že největší deformace vznikají na spodku kolejnice v podélném uchycení ($T4$), případně na patce opět podélně ($T2$).

Experimentální výsledky ověřující využití Braggovských senzorů v rámci kolejové dopravy jsou popsány v publikacích [107-112]. Základem řešení jsou různé typy Braggovských mřížek o různých počtech, které jsou lepeny přímo na stojinu kolejnice nebo na patu kolejnice a to v různé formě zapouzdření, viz obr. 4.21. Při experimentech byly monitorovány různé vlakové soupravy, které se pohybovaly rychlostí od 40km/h do 300km/h. Na základě analýzy dat byly specifikovány parametry jako identifikovány směru a rychlosti jízdy, detekce soupravy, počet nebo zrychlení vlakových souprav.



Obrázek 4.21: Různé typy instalace Braggovských senzorů na kolejnice, převzato [112].

Autorský kolektiv článků [113-114] popisuje uložení Braggovských mřížek do elastomerových podložek pod patu kolejnice pro sledování stavu kolejového svršku, potažmo zvětšování rozchodu kolejnic v obloucích a detekci plochých kol vzniklých silným probržděním soupravy nebo na základě opotřebení materiálu v čase.

V rámci patentových spisů je známo řešením s názvem *Railway Monitoring System* [115]. Patentové nároky popisují využití Braggovských mřížek lepených na kolejnici. Jedná

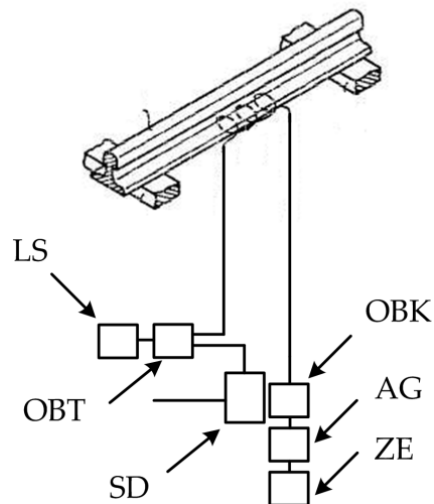
se o systém, který lze využít pro počítání náprav, měření rychlostí vlaků, identifikaci vlaků, detekci vlakových souprav.

4.3.12 Interferometrické senzory

Publikací a patentových spisů, které popisují využití interferometrických aplikací v kolejové dopravě, není z hlediska počtu mnoho. Autorský kolektiv článku [116] popisuje využití akustického optovláknového senzoru pro monitorování kolejové infrastruktury na velkou vzdálenost na bázi interferometrického zapojení. Každá akustická aktivita způsobená odrazem od kolejového vozidla je snímána citlivým interferometrickým senzorem a pomocí vyhodnocovací jednotky zpracována. Optovláknové interferometry lze principiálně využít při vhodné konfiguraci jako akustické senzory a jsou tedy pro tuto aplikaci vhodné. Zaznamenávat lze tak průjezd soupravy, v případě využití dvou senzorů i rychlost soupravy.

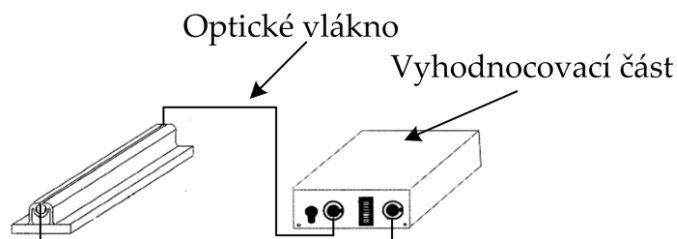
Publikace [117] popisuje implementaci optických snímačů na bázi Fabry-Perotova interferometru přímo při výrobě do předpjatých prefabrikovaných pražců z betonu a ocelových vláken, které jsou podepřeny betonovým nebo asfaltovým podkladem. Autoři otestovali implementaci několika senzorů do betonových pražců v rámci předvrtaných otvorů kolmo k sobě (podélně ve směru jízdy kolejového vozidla). Uložení senzorů bylo provedeno pomocí betonu s modulem pružnosti shodným s materiálem pražce. Při vzorkovací frekvenci 500S/s byly analyzovány deformace senzorů při průjezdech souprav, které se pohybovali v řádech desítek μ strain. Autoři uvádí, že senzory v dlouhodobém měřítku průjezdů kolejových vozidel nevykazovaly degradaci. Senzory lze využít pro kalkulaci počtu náprav, směru jízdy. v případě využití více senzorů pro kalkulaci rychlosti kolejové soupravy. Nutná je ale instalace přímo do pražce.

V patentovém spisu s názvem *Rail contacting device in railway systems, particularly for axle counting devices* [118] je popsán interferometrický senzor, který slouží pro detekci kolejových vozidel a pro kalkulaci náprav, tedy jako čítač náprav. Princip detekce je založen na snímání vibrační odezvy způsobené průjezdem vlakové soupravy. Sensorické část musí být fyzicky v kontaktu s kolejnicemi, referenční část je umístěna mimo koleje včetně vyhodnocovací části, viz obrázek 4.22. Schéma je složeno se zdroje záření (LS), vláknového děliče (OBT), referenční části (SD), vláknového děliče (OBK) a vyhodnocovací části (AG a ZE).



Obrázek 4.22: Principiální schéma zapojení a implementaci na kolejnici.

V patentovém spisu s názvem *Contact fiber optic impact sensor* [119] je popsán základní princip čítače náprav kolejového vozidla na bázi optovláknového interferometru. Měřící schéma obsahuje vyhodnocovací část složenou ze zdroje světla, detektoru a jednotky pro zpracování signálu. Měřící optické vlákno interferometru je fyzicky upevněno ke kolejnici, kdy je do hlavy kolejnice vložen úsek mnohavidového optického vlákna. Při změně geometrie optického vlákna působením tlaku na vlákno při průjezdu kolejového vozidla dochází ke změně Specklova obrazce měřícího vlákna. Mezi zdrojem záření a úsekem mnohavidového vlákna je umístěno polarizací zachovávajícího vlákno, které slouží pro eliminaci nežádoucích vlivů, jak uvádí autorský kolektiv, viz obrázek 4.23. Signál na výstupu je zpracováván v rámci vyhodnocovací části uvedeného řešení.



Obrázek 4.23: Principiální schéma zapojení a implementace vlákna na kolejnici.

Tabulka 4.2 shrnuje dnes aktuálně používané vláknově optické technologie, respektive senzory v rámci kolejové a přilehlého traťové infrastruktury.

Tabulka 4.2: Shrnutí využití vláknově optické technologie v železniční dopravě.

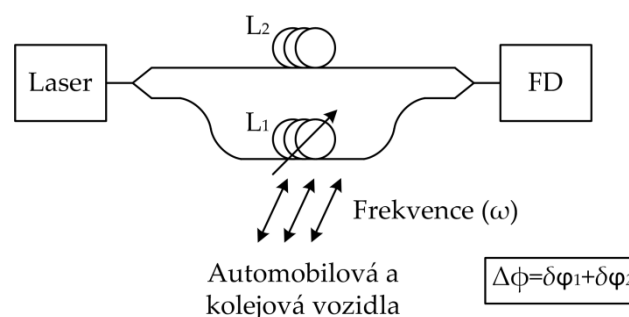
	Umístění senzoru	Fixace senzoru	Měřicí dosah	Měřená veličina
Braggovské mřížkové senzory	přímo na kolejnici	lepení, svařování, mechanické úchyty	téměř fyzický kontakt se snímaným tělesem	Axiální deformace (namáhání)
Distribuované systémy	přímo na kolejnici	lepení, mechanické úchyty	téměř fyzický kontakt se snímaným tělesem	Axiální deformace (namáhání)
Interferometrické systémy	přímo na kolejnici	lepení, mechanické úchyty, vrtání	jednotky metrů od snímaného tělesa	Akustická a vibrační odezva

5 Cíle disertační práce

Na základě provedené literární a patentové rešerše byly vymezeny jednotlivé dílčí úkony definované takto:

1. Optimalizace uspořádání a zapojení sensorických jednotek s cílem maximalizovat poměr odstup signálu od šumu.
2. Optimalizace vláknově optického sensorového systému pro měření rychlosti v dopravním provozu s cílem maximalizovat přesnost měření.
3. Návrh metod softwarové filtrace signálu a získaných dat, statistické zpracování a vyhodnocení.

Obecným cílem bylo vytvoření vláknově optického měřicího systému, který by splňoval výše uvedené cíle. Ty jsou představovány detekcí a měřením rychlosti vozidel v dopravním provozu včetně návrhu vstupně výstupních komponentů a vyhodnocení datových informací tak, aby byl vytvořen ucelený návrh. Interference světla v optických vláknech jako základní jev byla zvolena proto, že nabízí vysokou citlivost a schopnost monitorovat časové změny řádově v jednotkách Hz až jednotek kHz. Budeme-li vycházet ze schématu uvedeného v kapitole 3.3 na obrázku číslo 3.3 a přidáme do schéma projíždějící automobilové či kolejové vozidlo (obrázek 5.1 níže), průjezd tohoto vozidla způsobí odezvu skládající se z nízkých frekvencí (ω) v řádech jednotek až desítek Hz [120-129]. Tato vibrační a akustická odezva ovlivňuje měřicí vlákno interferometrického senzoru a způsobí změnu optické délky ramene (součin indexu lomu n a geometrické délky L). Výsledná fázová změna $\Delta\phi$ je dána fázovými změnami zdroje světla ($\delta\phi_1$) a současně fázovými změnami délky ramene a indexu lomu ($\delta\phi_2$). Fázové změny zdroje ($\delta\phi_1$) se projeví v obou ramenech interferometrického senzoru (referenční a měřicí) a navzájem se odečtou, přičemž fázové změny vlivem zdroje vibrací ($\delta\phi_2$), které v sobě nesou informace o měřených frekvencích (ω) způsobené průjezdem osobního nebo kolejového vozidla se projeví pouze v měřicím rameni interferometrického senzoru.



Obrázek 5.1: Zjednodušené schéma měření a základní idea detekce vozidel.

Výše uvedené fázové změny vyplývají z relace, která popisuje fázi vlny ϕ šířící se v optickém vlákne, viz matematický vztah:

$$\phi = 2\pi L \frac{n}{\lambda}, \quad (5.1)$$

kde veličina L značí délku použitého optického vlákna, veličina n index lomu jádra optického vlákna a λ značí vlnovou délku zdroje záření.

Změny jednotlivých parametrů (definovaných výše) určují výslednou fázovou změnu, kterou lze matematicky popsat:

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{n}{\lambda} \delta L + 2\pi \frac{L}{\lambda} \delta n - 2\pi n L \left(\frac{1}{\lambda^2} \right) \delta\lambda, \quad (5.2)$$

kde první a druhý člen popisuje fázové změny v měřicím rameni ($\delta\phi_2$), třetí člen popisuje fázové změny vlivem zdroje záření ($\delta\phi_1$).

Díky použití stabilního zdroje světla (laseru) se vlnová délka uvedená ve vzorci nemění. Referenční rameno pak musí být navrženo takovým způsobem, aby bylo co nejlépe odizolováno od vnějších vlivů, tak aby se neměnily zbylé dva parametry a to index lomu n a délka dráhy L . Tím dojde k minimalizaci fázových změn v referenčním rameni a maximalizaci citlivosti senzoru na měřenou veličinu působící na měřicí rameno. Z tohoto důvodu je úvod praktické části disertační práce věnován návrhu měřicí jednotky, respektive uložení referenčního a měřicího ramene interferometrického senzoru, která je schopna detekovat osobní a kolejová vozidla s maximální mírou přesnosti. V případě využití sériového zapojení dvou konstrukčně totožných jednotek v pevně definované vzdálenosti a na základě nové metodiky vyhodnocení časově posunutých signálů detekovaných sériovým zapojením dvou měřicích jednotek při průjezdu vozidel kolem senzorů lze s využitím vztahu (5.3) vypočítat a stanovit rychlost osobních či kolejových vozidel.

$$v_{\text{vozidla}} = \frac{S_{\text{vzdálenost mezi senzory}}}{t_{\text{čas průjezdu mezi senzory}}} * 3,6 [km/h]. \quad (5.3)$$

6 Úvod do praktické části disertační práce

Úvod disertační práce je zaměřen na teoretický popis a pochopení problematiky vláknově optických dvouramenných interferometrů včetně rozboru a rešerše stávajících senzorů, na základě které byly zvoleny cíle této práce. V kapitole 7 je popsán návrh a realizace měřicího senzoru. Kapitola 8 popisuje navržené schéma měření pro detekci vozidel, implementovaný software, respektive metodiku zpracování dat a jednotlivá praktická měření automobilových i kolejových vozidel včetně statistického vyhodnocení. V kapitole 9 jsou popsána praktická měření rychlosti vozidel včetně statistického vyhodnocení. Kapitola 10 obsahuje návrh metod číslicové filtrace signálu získaných dat umožňující vyhodnocení rychlosti vozidel a také zlepšení poměru odstupů signálu od šumu.

Veškeré jednotlivé dílčí úkony jsou v práci chronologicky popsány tak, jak byly provedeny v čase. Celkový návrh systému zohledňuje jednotlivé nároky plynoucí jednak z cílů této práce ale také z cílů a věcné náplně jednotlivých projektů, s kterými obsah této práce koresponduje. Základem je návrh systému nedestruktivního vůči vozovce a kolejišti, který využívá telekomunikační optická vlákna standardu G.652.D a G.653 a implementace hardwarově nenáročného signálového zpracování pro vyhodnocení požadované informace.

I na základě výše uvedeného tvrzení bylo provedeno experimentální měření s cílem ověřit, zda polarizaci zachovávající optická vlákna mají vliv na zvýšení citlivosti interferometru. Provedena byla analýza a praktická měření [130]. Z provedených testů lze konstatovat, že citlivost interferometru je vyšší vzhledem ke konvenčním jednovidovým optickým vláknům standardu G.652.D a G.653. Ale vzhledem ke stanoveným cílům této práce je poměr ceny a vzniklých užitných vlastností včetně zásadní problematiky napojení polarizaci zachovávajících vláken na stávající telekomunikační sítě spíše negativního charakteru. Na základě výše popsaných poznatků byl tak zvolen směr a vývoj měřicího systému, který pracuje pouze s vlákny standardu G. 652.D a G.653.

7 Návrh a realizace měřícího senzoru

Základní idea a úloha z oblasti fyzického sestavení senzoru je najít způsob implementace měřícího optického vlákna, uložení referenčního vlákna, vazebních členů, vytvoření vstupně-výstupního rozhraní a to vše tak, aby byl senzor kompaktní, minimalistický z hlediska velikosti, odolný vůči vnějším podmínkám a aby způsobené vibrační odezvy od projíždějících automobilových i kolejových vozidel byly s co nejvyšší mírou přesnosti detekovány.

7.1 Realizace měřícího senzoru

Konstrukční stavbu měřícího senzoru lze rozdělit do několika postupných kroků. Základem senzoru je uložení referenčního ramene interferometru a volba tzv. rezonanční podložky pro uložení měřícího ramene interferometru. V prvním případě se jedná o materiál, který dostatečně utlumí vnější vlivy působící na optická vlákna tvořící referenční část interferometru, v druhém případě se jedná se o materiál, na kterém je uloženo respektive uchyceno měřící rameno interferometru. Rezonanční podložka slouží jako vztyčná plocha s vozovkou a základním požadavkem na tento materiál je přenést vibrační odezvu od vozovky na optické vlákno. Dále uložení interferometru do krycího boxu odolného vůči vnějším podmínkám a vytvoření vstupně/výstupního rozhraní vhodného pro přímé napojení na přívodní jednovidová telekomunikační optická vlákna.

7.1.1 Výběr vhodných materiálů pro uložení referenčního vlákna

Výběr ideálního materiálu pro usazení referenčního vlákna interferometrického senzoru, respektive zvolená kritéria jsou definována níže. Pro usazení referenčního vlákna lze nalézt čtveřici předvídatelných požadavků pro materiály a konstrukce:

- a) Rychlost šíření mechanických frekvencí v něm by měla být co možná nejnižší.
- b) Mělo by se jednat o materiál, který ze své podstaty vibrace tlumí.
- c) Jeho přirozená rezonanční frekvence by měla ležet mimo obor měřených frekvencí.
- d) Měl by to být materiál běžný, cenově dostupný a technologicky snadno zpracovatelný.

V tomto případě jsou první dva požadavky a) a b) a částečně i požadavek c) nejlépe vyjádřitelné součinitelem pohltivosti vibrací, který udává zlomek vibračního výkonu pohlceného oproti celkovému výkonu vibrací, jimž je materiál vystaven a může být definován rovnicí (7.1), ve které μ představuje součinitel pohltivosti vibrací, P_a pohlcený výkon a P celkový výkon, kterému je materiál vystaven.

$$\mu = \frac{P_a}{P}. \quad (7.1)$$

Součinitel μ je ze své podstaty závislý na frekvenci vibrací, tloušťce materiálu a jeho charakteru (zrnatosti, pěnovitosti apod.), navíc je veličinou, která často nebývá měřena,

charakterizována ani tabelována. Nicméně úvodní odhad jeho hodnoty lze provést na základě měření, ke kterým dospěla stavební akustika [131]. Tato měření se specializují na akustické vlny a jejich tlumení z podstaty věci však koeficient zvukové pohltivosti bude úměrný a bude odpovídat součiniteli pohltivosti vibrací. V tomto ohledu není překvapivé, že nejlepší budou materiály s vláknitým, zrnitým nebo pěnovým charakterem [132].

Vzhledem k tomu, že u vláknitých a pěnových materiálů je přirozené rezonanční frekvence v podstatě nemožné v literatuře dohledat a vzhledem k tomu, že jejich koeficient pohltivosti bývá relativně vysoký, a tedy jejich přirozené rezonanční frekvence budou pravděpodobně tlumeny jejich pohlcováním, byl ve výběru materiálů zohledňován především požadavek kompatibility a konstrukční příznivosti. V tomto ohledu je pěnový polystyren a akustická pěna téměř ideálním materiálem. Přestože jejich součinitel tlumivosti hluku není příliš vysoký v tenkých vrstvách, bude jejich relativní tloušťka oproti referenčnímu vlákně vždy dostatečná pro odstínění proti vibracím o měřené intenzitě. Provedená laboratorní a experimentální měření z oblasti uložení a montáže jednotlivých optických vláken pomocí polystyrenu a akustické pěny ukázaly velmi obdobné pozitivní výsledky. Pro finální konstrukci senzoru byl zvolen vzhledem ke své malé teplotní vodivosti a schopnosti tlumit vyšší kmitočty pěnový polystyren. Testovaná minimální hodnota pro dostatečné utlumení přenosu vibrací na optické vlákno byla analyzována kolem hodnoty 5cm, a to vzhledem k citlivosti a frekvenčnímu rozsahu interferometrického senzoru, viz publikace a publikace autora [133-137].

7.1.2 Výběr vhodných materiálů pro uložení měřicího vlákna

Rezonanční podložka, na které je uloženo měřicí optické vlákno slouží jako vztyčná plocha s vozovkou a základním požadavkem na tento materiál je přenést vibrační odezvu od vozovky způsobenou při průjezdu vozidla kolem senzoru na měřicí optické vlákno interferometrického senzoru. Výběr ideálního materiálu pro usazení měřicího vlákna senzoru respektive kritéria jsou definovány níže obdobně jako u výběru tlumícího materiálu pro referenční část interferometrického senzoru.

Princip měření vibrací, jakož i konstrukční požadavky senzoru kladou na materiál, na němž má být usazeno měřicí vlákno, několik předvídatelných požadavků:

- a) Jeho přirozená rezonanční frekvence musí ležet mimo oblast měřených frekvencí (2-150Hz).
- b) Rychlost šíření mechanických frekvencí v něm by měla být co nejvyšší.
- c) Měl by být kompatibilní s materiálem měřicího vlákna i se spojovacím materiálem.
- d) Měl by to být materiál běžný, cenově dostupný a technologicky snadno zpracovatelný.

Optimalizovat materiál podle požadavku a), tedy odlehlost přirozené rezonanční frekvence od měřeného oboru, je obecně fyzikálně složité. Přirozená rezonanční frekvence záleží mimo jiné i na tvaru materiálu, a jeho rozměrech. U zařízení, které je navíc nutně

sestaveno z více materiálů, je třeba vzít v úvahu také rezonance vzniklé na spojích a stýcích materiálů, které ovšem složité teoreticky popsat bez znalosti konkrétních materiálových parametrů, často špatně dohledatelných a složité měřitelných [132], [138]. Nicméně odhad materiálu, který je v tomto směru vhodný, poskytnou údaje již získané při posuzování materiálů v jiných příbuzných oborech, například akustice. Lze říci, že rezonanční frekvence skleněných, keramických a některých kovových materiálů se v závislosti na geometrii pohybují bezpečně nad 150Hz horní mezí měření, tedy tyto materiály jsou z pohledu požadavku a) vhodné, naopak jako nevhodné materiály se jeví plasty [132], guma, dřevo, u kterých dochází k přirozené rezonanci velmi často v oboru měřených frekvencí.

O něco jednodušší je odhadnout optimální materiál podle požadavku b). Je beze sporu, že vyšší rychlost šíření vibrací v materiálu minimalizuje problém případných vnitřních interferencí ovlivňujících měření, stejně jako vyšší rychlost přenosu vibrací z materiálu na optické vlákno sníží pravděpodobnost dalších jevů vedoucích k obecným chybám měření. Jako dobrou vodící hodnotou je rychlost zvuku v daném materiálu. Rychlost zvuku (podélných vibrací) pak bude stejně jako rychlost obecných vibrací (s podélnou i stříhovou složkou) úměrná druhé mocnině poměru Youngova modulu pružnosti a hustoty, jak je schematicky popsáno v rovnici (7.2). Symbol v charakterizuje rychlost šíření vibrací, E_y Youngův modul pružnosti a ρ hustotu materiálu. Rozdíl mezi rychlostí šíření zvuku a obecné vibrace bude dána korekcí čitatele nebo jmenovatele zlomku o hodnotu jednoho nebo dvojnásobku Poissonova zlomku přičteného nebo odečteného od čísla 1 v závislosti na různých směrech šíření vibrací a jejich charakteru, což ovšem z podstaty věci nemůže řádově ovlivnit hodnotu vlastní rychlosti. Výhodou také je, že jak Youngův modul pružnosti, tak hustota jsou materiálové konstanty velmi často tabelované pro většinu materiálů

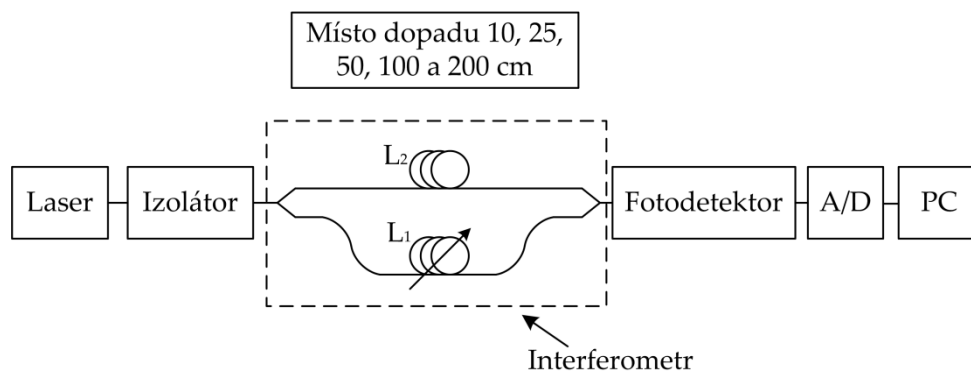
$$v \approx \sqrt{\frac{E_y}{\rho}}. \quad (7.2)$$

Hledáme tedy materiál s optimálním poměrem Youngova modulu pružnosti a hustoty. V tomto ohledu je zcela optimálním materiálem dle všech parametrů diamant (je to materiál s jednou z nejvyšších hodnot Youngova modulu pružnosti a relativně průměrnou hustotou), ve kterém by rychlost šíření vibrací měla při ideální geometrii odpovídat řádově 10^5 ms^{-1} . Nicméně i vzhledem k obtížné pozici diamantu vzhledem k požadavkům c) a d), má smysl uvažovat dále o skle, ve kterém budou rychlosti šíření vibrací v řádu 10^4 ms^{-1} podobné hodnoty lze očekávat u některých keramických materiálů a tvrdých minerálů, o řád níže (10^3 ms^{-1}) se budou nacházet rychlosti šíření vibrací ve většině kovů a slitin. Všechny ostatní uvažované materiály se pohybují o jeden či několik řádů níže.

Podle požadavků c) a d), které lze shrnout jako požadavky technické a posuzovat je tedy zároveň, lze vyloučit materiály, které by neúměrně zvýšily cenu nebo naopak

neúměrně zkomplikovaly konstrukci celého senzoru. Takto lze vyloučit většinu ušlechtilých kompozitních materiálů, některých pokročilých kovových slitin i diamantu. Z posouzení podle předchozích požadavků tedy vyplývá, že optimálními materiály mohou být skla a keramické materiály. Oba materiály mají jednu jasně predikovatelnou nevýhodu, a tou je jejich vnitřní napětí, které při intenzitě vibrací nad určitou energetickou (tlakovou) mez může vést k jejich praskání, což nutně povede k omezené životnosti senzoru. V tomto ohledu je chování skel, která mají spojitou strukturu o něco lepší, než chování keramických materiálů, které mají zrnitý charakter. Proto bylo vybráno sklo (sodnovápenaté) jako ideální materiál pro usazení měřicího vlákna. Provedena byla série laboratorních měření s cílem ověřit jaký vliv má tloušťka skla na samotný přenos vibrací na optické vlákno.

Laboratorní testování skleněných rezonančních podložek o různé tloušťce bylo provedeno na základě vyhodnocení úspěšnosti detekce dopadu testovacího předmětu z definované konstantní výšky do definovaných bodů ve vzdálenosti 10, 25, 50, 100 a 200 cm od senzoru respektive skleněné podložky. Přestože byl zvolený pouze jeden rozměr a jedna hmotnost testovacího předmětu, dávají tyto výsledky dobrou představu o optimální tloušťce rezonátoru a jeho schopnosti zachytu vybraných kategorií vozidel. Měřící vlákno bylo uloženo na skleněné rezonanční podložce, referenční vlákno bylo uloženo do polystyrenové pěny. Vyhodnocení úspěšnosti detekce vyjádřené v % je založené na softwarovém vyhodnocení, které je popsáno v podkapitole 8.2, tedy že detekovaný signál vykazoval dostatečnou úroveň odstup signál šum, která je považována za hodnotu minimálně 3dB. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 7.1. Pro každou vzdálenost a každou tloušťku skleněné podložky bylo provedeno 500 měření v časovém intervalu 12 hodin. Celkem bylo provedeno 20000 měření.



Obrázek 7.1: Schéma testování rezonančních podložek.

Tabulka 7.1 zobrazuje výsledky všech provedených měření rezonančních podložek. Hodnoty uvedené v tabulce vyjadřují úspěšnost míry detekce dopadu testovaného předmětu v procentech.

Tabulka 7.1: Shrnutí provedených měření skleněných rezonančních podložek.

Vzdálenost [cm]	Tloušťka podložky [cm]							
	0,25	0,50	0,75	1	1,25	1,50	1,75	2
10	100	100	100	100	100	100	100	100
25	100	100	100	100	100	100	100	100
50	99,1	99,2	99,3	99,5	99,4	99,4	99,3	99,3
100	98,4	98,6	98,7	98,9	98,9	98,7	98,6	98,5
200	92,8	93,1	93,6	93,7	93,7	93,4	93,3	93,2

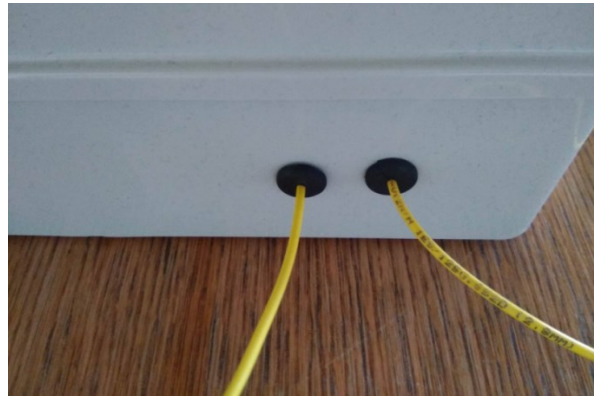
Celkový rozměr rezonanční desky má přímý vliv na rezonanční frekvenci, kterou je schopen rezonátor zachytit. Z tohoto důvodu byl zvolen rozměr 50x50cm jako kompromis mezi schopností zachytit vibrace od projíždějících vozidel a jejich skutečné frekvence, kdy pro dosažení maximální citlivosti na nízkých frekvencích (řádově jednotek Hz) by bylo potřeba větších rozměrů rezonanční skleněné podložky.

Na základě statistického zpracování výsledků z provedených měření lze pozorovat minimální vliv tloušťky jednotlivých rezonátorů (skleněných podložek) na samotný přenos vibrací na optické vlákno. Z tohoto důvodu byla zvolena kompromisní tloušťka podstavce rezonanční podložky 1cm. Tato hodnota byla zvolena jako výchozí pro konstrukci finálního prototypu senzoru.

7.1.3 Vytvoření I/O rozhraní senzoru

Znečištění je velice významný zdroj útlumu v optických sítích. Nečistota na jádře vlákna je příčinou velkého zpětného odrazu, zvýšeného útlumu a může vést až k rozpadu spojení. Proto bylo nutné vytvořit rozhraní senzoru tak, aby vnitřní uspořádání senzoru bylo stabilně zapojeno a nebylo nutné s ním dále pracovat a naopak vnější část byla co nejlépe připojitelná k přívodnímu optickému kabelu, respektive optickým sítím. Realizováno bylo celkem 6 rozdílných přístupů, na základě praktického testování bylo zvoleno výsledné rozhraní senzoru pomocí dvou optických spojek typu FC/APC s keramickým spojovacím členem uvnitř adaptéru. Spojka je šroubovacího charakteru a je tak vytvořen stabilní spoj. Finální realizace spojovací rozhraní senzoru byla vytvořena přímo jako součást senzoru, viz obrázek 7.3. Tento typ se jevil z hlediska kompaktnosti i eliminaci nečistot jako nejlepší volba. Pro zajištění voděodolnosti spoje byl využit voděodolný tmel.

Na obrázku 7.2 je zobrazen příklad jednoho z původních rozhraní tvořené průchodkami, které bylo po 30cm ukončeno optickými konektory typu FC/APC. Negativem v tomto případě je nutnost dodatečného využití optických spojek, opětovného čištění stejně tak možnosti poškození přívodních optických vláken k senzoru.



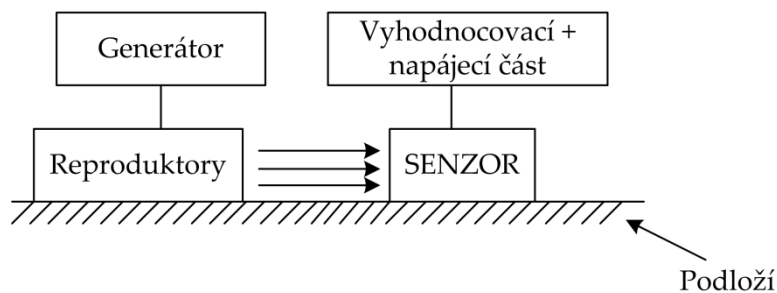
Obrázek 7.2: Fotografie jednoho z testovaných typů rozhraní senzoru ukončené po 30cm optickými SC konektory.



Obrázek 7.3: Fotografie vytvořeného rozhraní senzoru pomocí FC/APC konektorů s ochranami.

7.2 Testování frekvenčního rozsahu senzoru

Jedním ze základních parametrů je znalost rozsahu frekvenční charakteristiky senzoru z důvodu implementace parametrů předzesilovače a filtrů v rámci měřící karty než dojde k digitalizaci signálu. Uspořádání měřící soustavy pro analyzování frekvenčního rozsahu je zobrazeno na obrázku 7.4. Pro generování signálu byl využit generátor harmonického signálu (HMF 55), pro buzení dva reproduktory s rozsahem od 2Hz do 1kHz. Amplituda harmonického signálu byla po celou dobu měření konstantní. Pro zajištění co nejvěrohodnějších podmínek byla metodika laboratorní měření provedena tak, že membrány reproduktorů směřovali na podloží. Podloží bylo vytvořeno vrstvou asfaltu pro simulaci co nejvěrohodnějších podmínek.

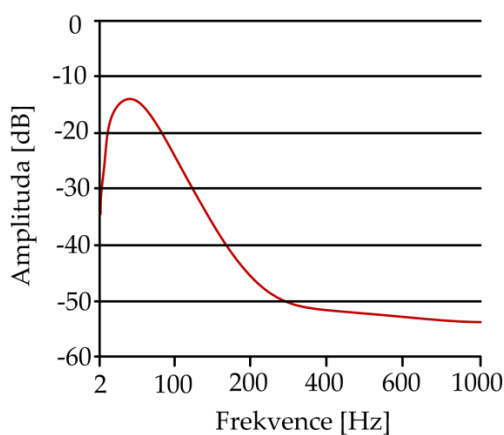


Obrázek 7.4: Schéma měření frekvenčního rozsahu senzoru.

Pro odfiltrování stejnosměrné složky (nízkých kmitočtů pod 1Hz a vlivu teploty) je při praktických měřeních využíván filtr typu horní propust 1. řádu tvořený RC článkem s mezní frekvencí 2Hz, podrobněji je rozepsáno v podkapitole 8.2. Jak bylo uvedeno výše, frekvenční spektrum charakterizující průjezd automobilových i kolejových vozidel se pohybuje v řádu jednotek až desítek Hz. Na základě této skutečnosti byla kmitočtová charakteristika změřena v následujících krocích 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400, 500 a dále po kroku 250Hz. Měřený signál je vyjádřen jako napětí [V] v závislosti na frekvenci [Hz], pro přepočet na poměrovou logaritmickou jednotku decibel [dB] je využit vztah:

$$20 * \log U2 / U1. \quad (7.3)$$

Na obrázku 7.5 je zobrazen analyzovaný frekvenční rozsah měřicího senzoru vyjádřený v dB. Nejvyšší citlivosti je dosaženo v rozsahu kolem 2 až 150Hz, přičemž principálně nejvyšší citlivosti dosahuje senzor na frekvencích od 25Hz do 85Hz. Z hlediska vyšších kmitočtů se intenzita naměřených signálů blíží velmi malým hodnotám, které při reálných měřeních mohou být ztraceny v šumovém pozadí interferometrického senzoru.



Obrázek 7.5: Analyzovaná frekvenční charakteristika senzoru.

7.3 Finální prototyp pro praktická měření

Finální prototyp, který byl využit pro praktická měření automobilových a kolejových vozidel je zobrazen na obrázku 7.6 a jeho fyzické zapojení dále vychází ze zkušeností a

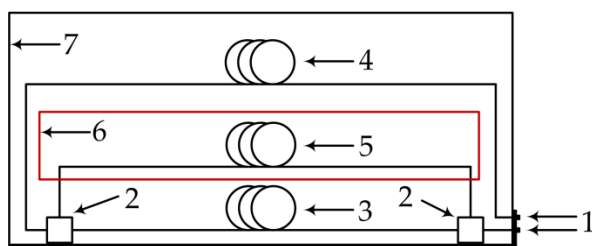
postupného vývoje během tří roků doktorského studia autora, viz publikace autora [135-137] a [139-146], které vzhledem ke svému rozsahu nebyly v této práci uvedeny. Testovány byly různé variace a metodiky uložení vláken, děličů, úchytných a krycích materiálů, rezonančních podložek, ochran optických vláken apod. Finální prototyp byl využit pro všechny provedená měření detekce vozidel. Pro praktická měření rychlosti vozidel byl vytvořen a použit druhý konstrukčně totožný typ senzoru. Vnitřní uspořádání senzoru je umístěno do voděodolného boxu s odnímatelným vnějším krytem pro případné úpravy, kdy vlastní rezonanční frekvence boxu jsou mimo měřené pásmo frekvencí. Na uvedený prototyp byl vytvořen v rejstříku informací o výsledcích RVVI podán ochranný záznam jako druh výsledku PROTOTYP, FUNKČNÍ VZOREK [147] a MODEL senzoru optovláknového interferometrického monitoru provozu [148].



Obrázek 7.6: Finální prototyp senzoru.

Průřez prototypu je zobrazen na obrázku 7.7 níže. Jednotlivé vztahové značky na obrázku značí:

1. Rozhraní vstup/výstup.
2. Vazební děliče.
3. Měřicí část interferometru
4. Konvenční optické vlákno standardu G.652.D nebo G.653.
5. Referenční část interferometru.
6. Tlumící část referenčního ramene.
7. Ochranný voděodolný box.



Obrázek 7.7: Podélný řez finálního prototypu senzorické jednotky.

8 Praktická měření detekce vozidel

V této kapitole jsou popsány praktická měření detekce automobilů na základě vyhodnocení úspěšnosti detekce. Dále je popsán a analyzován vliv umístění, respektive vzdálenosti senzoru za krajnicí vozovky na úspěšnost detekce vozidel a chybovost senzoru.

8.1 Měřicí schéma pro detekci vozidel

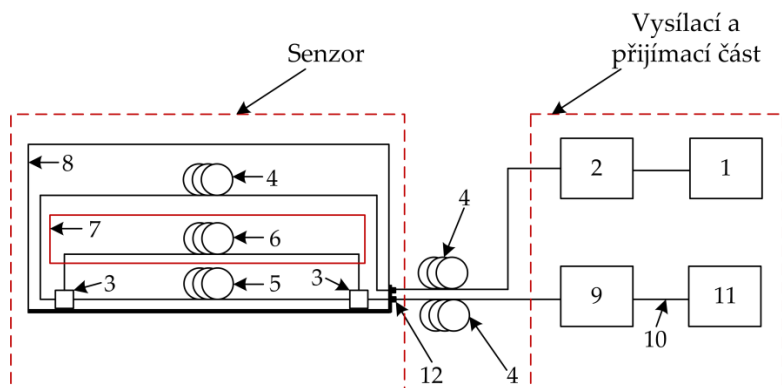
Navržené měřicí schéma určené pro detekci vozidel je zobrazeno na obrázku 8.1. Měřicí sestava je charakterizována následující prvky:

Laserový zdroj (1) byl testován s hodnotami výstupního výkonu v rozmezí 1-10mW při dostatečné stabilitě a koherentní délce. Uvedené výsledky z praktických měření detekce všech typů vozidel odpovídají referenčnímu výkonu o hodnotě 1mW. Pomocí propojovacího optického kabelu (4), který reprezentuje konvenční jednovidové optické vlákno standardu G.652.D nebo G.653 je přes izolátor (2) připojen ke vstupně/výstupnímu rozhraní (12) měřicí jednotky. Maximální testovaná délka kabelu (4) byla 2500m, tato hodnota nijak neovlivnila funkci měřicího systému. Vazební členy (3) jsou vláknové děliče s dělicím poměrem 50:50 s tolerancí +/- 5%. Sensory jsou zapojeny a uloženy v ochranném voděodolném boxu (8), kdy vlastní rezonanční frekvence boxu jsou mimo měřené pásmo frekvencí. Fotodetektor (9) registruje signál vzniklý následkem interference optických paprsků z referenčního (6) uloženého v tlumící části (7) a měřicího (5) ramene a mění jej na měřitelný elektrický proud. Pomocí koaxiálního kabelu (10) je propojen se zařízením pro zpracování signálu (11), které využívá filtr typu horní propust s mezí frekvencí 2Hz, zesilovač a analogově digitální převodník ve formě měřicí karty od firmy National Instruments s označením NI USB 6210. Tato karta byla zvolena pro své parametry a také z důvodu kompatibility, protože software pro vyhodnocení signálů je vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW. Dále byl použit počítač (PC) pro zpracování a vyhodnocení provedených experimentálních měření.

Seznam vztahových značek (platí pro obrázek 8.1):

1. Laserový zdroj záření.
2. Izolátor.
3. Vazební dělič.
4. Konvenční optické vlákno standardu G.652.D nebo G.653.
5. Měřicí část interferometru.
6. Referenční část interferometru.
7. Tlumící část referenčního ramene.
8. Ochranný voděodolný box.
9. Fotodetektor.
10. Koaxiální kabel.
11. Část signálového zpracování.

12. Rozhraní vstup/výstup.



Obrázek 8.1: Schéma zapojení pro měření detekce vozidel.

Odůvodnění jednotlivých prvků měřícího schéma je blíže vysvětleno níže:

Typ laseru DFB (Distributed FeedBack) s šířkou spektrální čáry 0,01nm o výstupním výkonu v rozsahu 1-10mW a vlnové délce 1550nm je tvořen naleptanou difrakční mřížkou, která plní roli optického rezonátoru. Difrakční mřížka působí jako optický filtr, zpět do aktivní oblasti je odraženo úzké spektrum vlnových délek ($\ll 1\text{nm}$). Jak bylo uvedeno výše, s koherenční délkou úzce souvisí spektrální šířka laseru. Proto je tento typ laseru vhodný pro interferometrické aplikace. Po celou dobu praktických měření detekci vozidel bylo pracováno s referenčním výkonem o hodnotě 1mW. Výstupní výkon laseru, respektive doporučený rozsah uvedený v této práci 1-10mW je závislý na délce, útlumu použitých optických vláken a vazebních členů a metodikou uložení přívodních optických kabelů.

Izolátor je součástka, která byla vřazena do uvedeného schéma měření, protože zajišťuje šíření laserového signálu jen v jednom směru a přispívá tak ke stabilitě výstupního signálu.

Vazební členy jsou pasivní prvky, které slouží ke sloučení nebo spojení optického výkonu z/do jednoho optického vlákna. Vazební členy se dělí podle několika kritérií, ale základní dělení je na jednomódové a multimódové. Jednomódové vazební členy se dále dělí na výkonově dělené a WDM (Wavelength-Division Multiplexing) děliče, které jsou schopny rozdělit nebo sloučit určité vlnové délky světla. Pro tuto práci jsou využity výkonově dělené, které výkon rozdělí podle určitého dělicího poměru mezi všechny výstupní vlákna. Zvolená varianta je 1:2 s dělicím poměrem 50:50 a 2:1 opět s dělicím poměrem 50:50. Tolerance udávaná výrobcem byla v rozmezí $\pm 5\%$. Volba tohoto poměru vyplývá z provedených experimentálních měření, protože interference světla má největší kontrast právě v tom případě, kdy je splněna podmínka, že intenzity obou vlnění jsou stejné.

Fotodetektor je optoelektronický prvek, který převádí dopadající záření (světlo) na elektrický signál (napětí, proud). Detekční část je tvořena fotodetektorem typu PbSe (Polycrystalline Lead Selenide). PbSe detektory jsou fotovodivé senzory jejichž odpor se

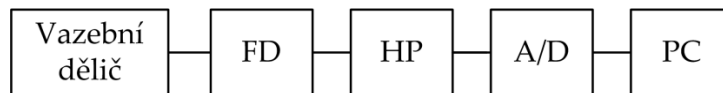
snižuje s rostoucí intenzitou dopadajícího IR (InfraRed) záření. Mohou pracovat při pokojové teplotě nebo chlazené termoelektrickým článkem. Spektrální oblast použitého typu fotodetektoru byla v rozmezí od 1,5 μm do 4,8 μm , maximální citlivost kolem hodnoty 4,1 μm .

Dále byl sestaven a použit filtr typu horní propust tvořený RC článkem s hodnotou mezní frekvence $F_0=2\text{Hz}$ pro odfiltrování stejnosměrné složky (pomalá změna fáze s frekvencí o 1 řád nižší než nejnižší frekvence užitečného signálu) a vlivu teploty.

Měřicí karta s označením NI USB-6210 byla využita pro své parametry a také z důvodu kompatibility, protože software pro vyhodnocení signálů je vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW. Měřicí karta slouží jako A/D převodník, tedy k převodu analogového napěťového signálu získaného z fotodetektoru do diskrétní (digitální) podoby signálu, který lze dále počítačově zpracovávat. Karta využívá USB datovou sběrnici, napěťový rozsah je až 20V, obsahuje 8 digitálních I/O vstupů a 6 analogových vstupů (16bit). Vzorovací kmitočet byl po celou dobu všech měření stanoven na hodnotu 10kHz, tato hodnota je dána jako kompromis, který se jevil dostačující pro tuto disertační práci a zpracovávaný frekvenční rozsah a zároveň neklade vyšší nároky na zpracování signálu například v případě instalace vyhodnocovací jednotky v místě měření.

8.2 Software pro vyhodnocení detekce průjezdu vozidel

Sensor je složen z několika optických a elektrických bloků propojených dohromady. Na obrázku 8.2 níže je zobrazeno zjednodušené schéma detekční části sensoru. Budicí část obsahující laserový zdroj a dělič je vynechána, jelikož nemá vliv na detekci a sběr dat.



Obrázek 8.2: Zjednodušené schéma detekční části sensoru.

Optické signály z referenčního ramene a sensorického (měřicího) ramene interferometru se slučují v děliči s dělicím poměrem 2:1, jehož výstup je napojen na fotodetektor (FD). Výsledná intenzita optického záření dopadající na fotodetektor je úměrná velikosti změny fáze mezi světelnými svazky šířícími se rameny interferometru. Výstupem fotodetektoru je napětí (úměrné celkovému výkonu zachyceného světla – tj. fázi), které lze popsat jako součet dvou signálů:

$$u(t) = p(t) + e(t), \quad (8.1)$$

kde $p(t)$ je užitečný signál (vibrační a částečně i akustická odezva) zachycený interferometrem a $e(t)$ je chybový signál způsobený nestabilitou polarizace vedeného světla a vnějšími vlivy (teplota). Chybový signál lze popsat jako pomalou změnu fáze s frekvencí o 1 řád nižší než nejnižší frekvence užitečného signálu $p(t)$. Díky tomuto rozdílu lze pro oddělení $e(t)$ od $p(t)$ použít výše uvedený filtr typu horní propust (HP) 1. řádu s mezní

frekvencí 2Hz. Použití analogového filtru před A/D převodníkem s uvedenými parametry se jevílo jako neoptimálnější volba, jelikož zlepšuje dynamický rozsah měření a prakticky tak dojde k odstranění stejnosměrné složky (signál $e(t)$ od měřeného signálu $p(t)$).

Pro A/D převod je použita standardní měřicí karta NI USB 6210 od National Instruments (NI) se vzorkovací frekvencí 10kHz a rozlišením 16 bitů. Karta je připojena ke klasickému počítači (PC), na kterém běží monitorovací aplikace zajišťující vyhodnocení dat z měřicí karty. Aplikace nepřetržitě vyčítá vzorky signálu z měřicí karty (použitím standardních DAQmx knihoven) a ukládá je do paměti. Zaznamenané vzorky signálu není potřeba převádět z napětí na výkon, protože monitorovací aplikace vyhodnocuje relativní změny v úrovni amplitudy namísto absolutních hodnot. Data z paměti jsou zpracovávána po blocích vyhodnocovacím algoritmem, který provádí dynamické průměrování šumového pozadí a vyhledává amplitudové špičky větší než uživatelem zadaná mez. Výsledky vyhledávání a naměřený signál jsou zobrazovaný uživateli na obrazovku.

Algoritmus detekování projíždějícího vozidla je založen na vyhodnocování užitečného signálu, který produkuje projíždějící vozidlo. Když se vozidlo přibližuje k senzoru, vytváří vibrační a akustickou odezvu, jejíž intenzita roste, s tím jak se přibližuje a pak opět klesá, jak se od něj vzdaluje. Maximální intenzity signálu je dosaženo v době, kdy je vozidlo na úrovni senzoru. Algoritmus hledá první amplitudové maximum způsobené průjezdem přední nápravy vozidla nad nastavenou rozhodovací úrovní, která je stanovena s ohledem na šumové pozadí. Toto maximum je poté naměřeno na výstupu z fotodetektoru a jeho poloha udává čas průjezdu vozidla. První amplitudové maximum je základní charakteristickou pro všechny vozidla. V případě osobních vozidel je charakteristické jedno maximum. Tato skutečnost je dána rozlišovací schopností senzoru, kdy kombinace rychlosti vozidla a blízkého umístění přední a zadní nápravy způsobí odezvu ve formě jednoho charakteristického maxima. V případě vozidel nad 3,5 tuny lze při nižších rychlostech a délce vozidla nad 10m lze zaznamenat i více maxim charakterizující jednotlivé nápravy.

Pro vylepšení odolnosti senzoru vůči vnějším vlivům (šumu) vyskytujícího se v okolí senzoru je každý blok naměřených dat převeden z absolutní hodnoty na relativní úroveň L_{noise} , která je vztažena k šumu pozadí:

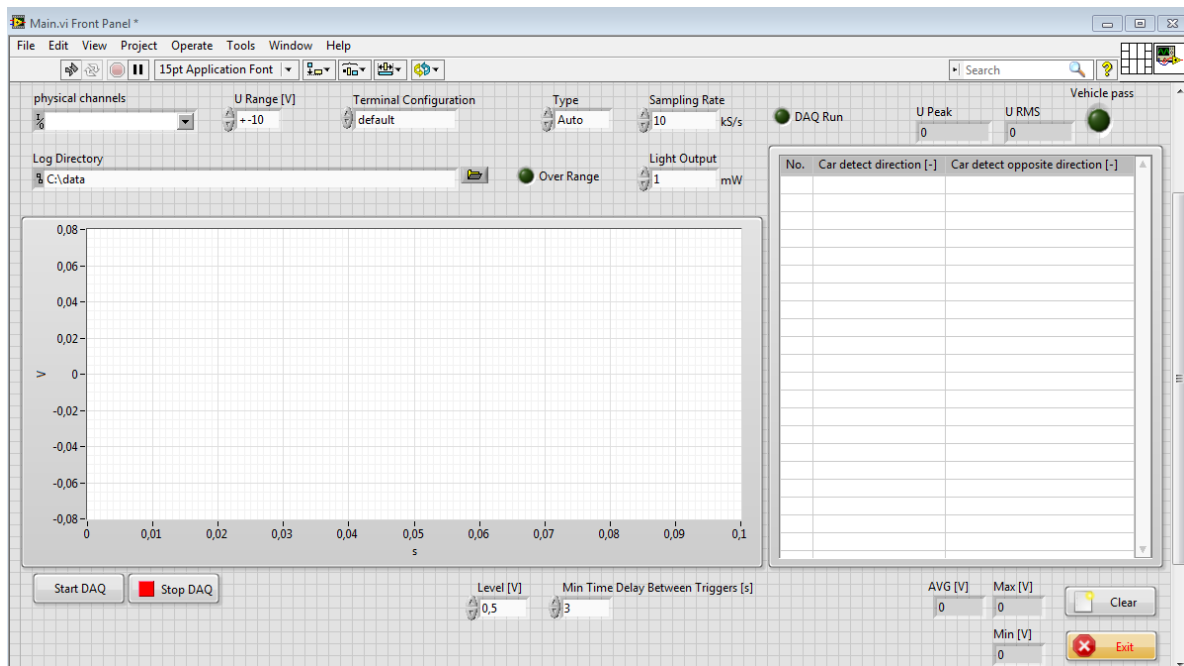
$$L_{noise} = 10 \log \left(\frac{P_{noise}}{P_0} \right), \quad (8.2)$$

kde P_{noise} je aktuální RMS hodnota vypočtená z bloku signálu $u(t)$ na výstupu za filtrem a P_0 je průměrná RMS hodnota šumu. Hodnota P_0 je vypočítávána jako plovoucí průměr za periodu T :

$$P_0 = \frac{\sum_{t=0}^T \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[n]^2}}{T}. \quad (8.3)$$

Velikost bloku, ve kterém jsou prováděny výpočty, závisí na počtu vzorků agregovaných během výpočtu RMS hodnoty P_{noise} . Výchozí hodnotou je 100ms, čím větší blok je, tím odolnější je algoritmus vůči šumu z okolí za cenu horší přesnosti detekce času průjezdu a celkové snížení citlivosti.

Monitorovací aplikace (obrázek 8.3) dále vyhodnocuje úroveň L_{noise} s přednastavenými limity zajišťující dostatečný odstup užitečného signálu od šumu (minimálně 3dB) a když je úroveň vibrační odezvy vyšší než tato limitní hodnota, systém indikuje projíždějící auto. Použitím relativní úrovně místo absolutní zvyšuje odolnost systému proti falešné detekci vozidla způsobenou šumem z okolního prostředí.



Obrázek 8.3: Úvodní obrazovka monitorovací aplikace.

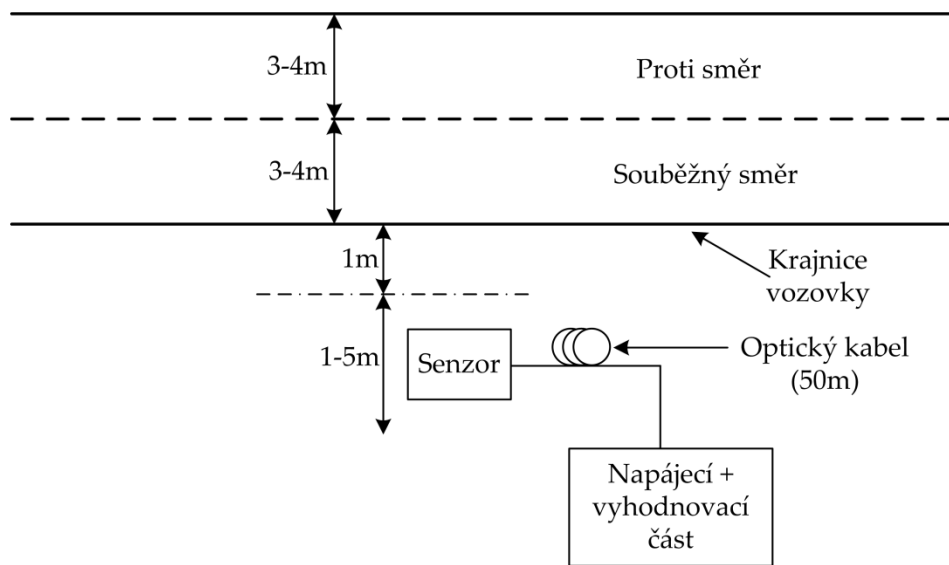
Na uvedený software byl vytvořen v rejstříku informací o výsledcích RVVI podán ochranný záznam jako druh výsledku SOFTWARE [149].

8.3 Praktická měření detekce automobilových vozidel

Praktická měření detekce automobilů byla provedena na základě vyhodnocení úspěšnosti detekce průjezdu vozidel. Analyzován byl vliv umístění, respektive vzdálenosti senzoru za krajnicí vozovky na úspěšnost detekce vozidel. Při praktických měřeních bylo důležité najít kompromis mezi dosažením co nejvyšší schopnosti detekce vozidel v souběžném jízdním pruhu, ale zároveň minimalizovat nežádoucí detekci vozidel v protijedoucím pruhu.

Pro praktickou instalaci je z hlediska bezpečnosti možné umístit senzor minimálně 1m za krajnicí vozovky. Podkladová vrstva byla tvořena stejným materiálem jako vozovka, kdy je předpoklad s využitím převážně v městské zástavbě. Z tohoto důvodu byla

provedena metodika měření založená na analyzování úspěšnosti detekce a zároveň chybovosti detekce v rozsahu 1 až 5 metrů po kroku 50cm. Každá sada měření pro jednu vzdálenost obsahovala kolem 1000 průjezdů různými automobily (osobní i nákladní vozidla charakteru do 3,5 ale i nad 3,5 tuny), viz tabulka 8.1 a tabulka 8.2. Praktická měření byly realizovány ve městě Ostrava na ulici Studentská, Průběžná, dále na ulici 17. Listopadu směr Děhylov a na ulici Celní směr Hlučín. Rozsah rychlostí měřených vozidel lze vymežit od 20 do 110km/h dle limitace dopravního značení. Celková doba provedených měření byla rozdělena do 42 měřicích dnů. Na obrázku 8.4 je znázorněna metodika měření. Statistická analýza vyhodnocení úspěšnosti detekce a chybovosti detekce v závislosti na vzdálenosti senzoru od krajnice vozovky je založena na 9836 měřeních respektive průjezdech vozidel.



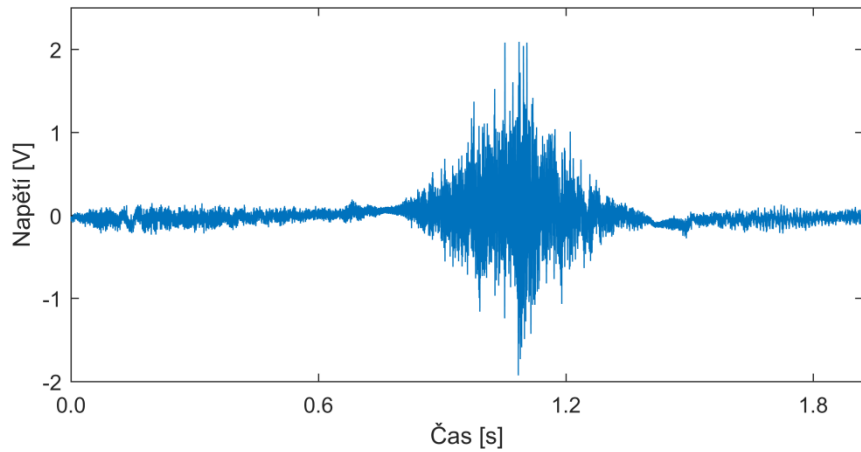
Obrázek 8.4: Metodika měření detekce automobilů.

Na obrázku 8.5 je zobrazena fotografie z měření vozidel prototypem senzoru. Dobře patrné je umístění senzoru 1m za krajnicí vozovky. Přívodní optické vlákno (standard G.652.D) využití při všech měřeních detekce mělo délku 50m.

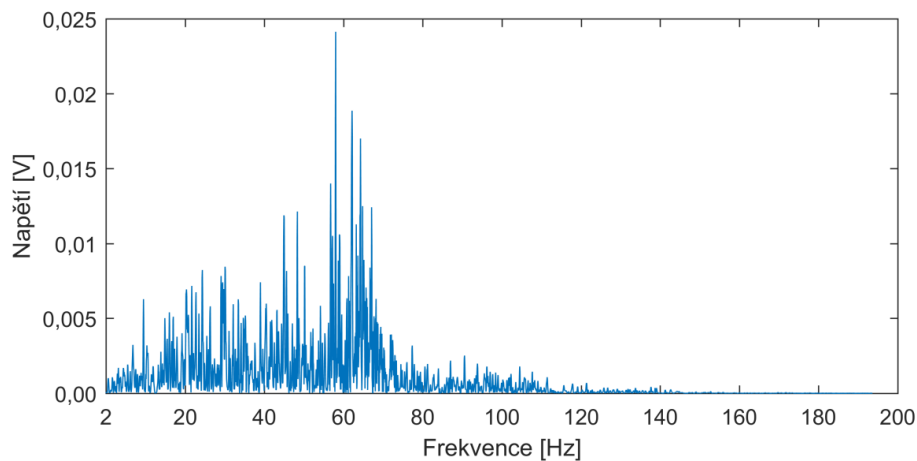


Obrázek 8.5: Fotografie z měření detekce automobilů.

Typický záznam naměřeného průjezdu osobního vozidla je zobrazen na obrázku 8.6. Zobrazen je časový záznam reprezentující průjezd osobního vozidla kolem senzoru ve vzdálenosti 1m (8.6(a)) a jeho frekvenční spektrum (8.6(b)).



(a)



(b)

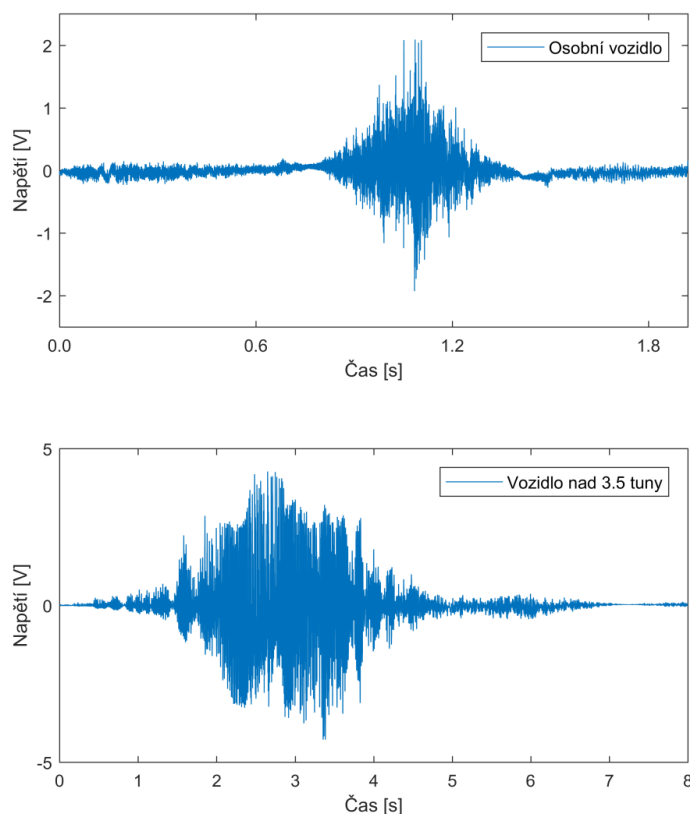
Obrázek 8.6: Časový záznam reprezentující průjezd osobního vozidla (a); frekvenční spektrum reprezentující průjezd osobního vozidla (b).

Kolísání šumového pozadí je způsobeno vnějšími vlivy venkovního prostředí, které působilo na senzor a zadávalo vzniku nežádoucích interferencí. V kapitole 10 věnována pozornost, jak lze číslicově minimalizovat vliv šumového pozadí a docílit tak lepšího odstupu signálu od šumu. Shrnutí provedených měření úspěšnosti detekce v souběžném jízdním pruhu a shrnutí provedených měření chybovosti detekce vozidel v protijedoucím pruhu je zobrazeno v tabulce 8.1.

Tabulka 8.1: Shrnutí provedených měření detekce.

Vzdálenost [cm]	Počet průjezdů [-] směr / protisměr	Úspěšnost detekce [%]	Chybná detekce [%]
100	487 / 512	98,92	2,89
150	493 / 478	92,04	1,95
200	468 / 503	85,37	1,27
250	508 / 497	73,14	0,71
300	491 / 503	54,46	0,46
350	516 / 502	36,28	0,23
400	474 / 498	16,74	0,12
450	463 / 501	7,82	0,04
500	516 / 502	2,86	0,01

Z výsledku je patrné, že nejvyšší procentuální detekce 98,92% je docíleno při umístění senzoru ve vzdálenosti 1m za krajnicí vozovky. Při této vzdálenosti ze statistického hlediska míra chybně detekovaných vozidel v protijedoucím směru dosahuje hodnoty 2,89%, kdy 100% těchto chybně detekovaných vozidel tvořily vozidla nad 3,5 tuny, jejichž charakter odezvy (intenzita) vůči osobním automobilům je při stejné rychlosti až 2krát vyšší, viz obr. 8.7. Patrný je značný vliv vzdálenosti průjezdu automobilu kolem senzoru na jeho detekční schopnost, tato skutečnost může být dána nedokonalou manuální konstrukcí, vnějšími vlivy prostředí, stejně tak různými parametry vozidel a je patrné, že pro další vývoj měřicího systému bude nutné se zaměřit na tyto oblasti. Na základě provedených měření je i patrný určitý vliv prostředí, který koresponduje s teoretickými předpoklady popsány v úvodní části této práce, kdy složení podkladové vrstvy pro senzor a různá prostředí ve kterých se šíří vlnění od zdroje k senzoru se chovají jako frekvenční filtr a je tedy v následujícím výzkumu nutné se na tuto oblast zaměřit a provést podrobnější analýzu. Pro minimalizování chybovosti detekce je možné využít druhý senzor umístěný v protisměru, tak aby se senzory navzájem neovlivňovaly (na základě provedených měření je doporučená minimální vzdálenost senzorů 15m od sebe).



Obrázek 8.7: Ukázka signálu charakterizující průjezd osobního vozidla a vozidla nad 3,5 tuny.

Za účelem snížení chybovosti detekce byla provedena sada měření ve vzdálenosti 1,25m od krajnice vozovky. Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce 8.2. Patrné je snížení chybovosti detekce o 0,36%, ale zároveň došlo ke snížení schopnosti detekce o hodnotu 2,3%.

Tabulka 8.2: Shrnutí provedených měření detekce ve vzdálenosti 1,25m od krajnice vozovky.

Vzdálenost [cm]	Počet průjezdů [-] směr / protisměr	Úspěšnost detekce [%]	Chybná detekce [%]
125	453 / 471	96,62	2,53

Pro následující praktická experimentální měření detekce a rychlosti v případě pilotního testovací nasazení systému do praktického provozu v rámci projektové činnosti byla jako kompromisní vzdálenost doporučena hodnota 1m nebo 1,25m za krajnicí vozovky. Částečné výsledky byly publikovány na konferenci SPIE v roce 2016 a 2017 [143] a [150].

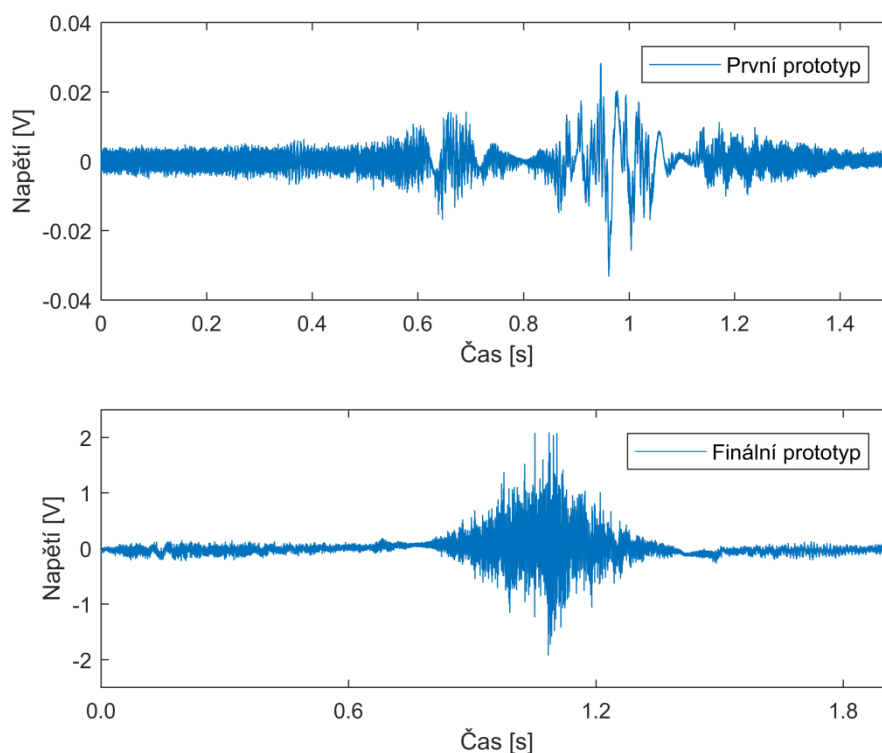
Na závěr této podkapitoly je vloženo grafické a statistické porovnání prvního prototypu měřicí jednotky vůči finálnímu prototypu, aby bylo možné lépe prezentovat postupný vývoj popsany v této disertační práci (celkem bylo postaveno a testováno 9 měřících jednotek). Provedena byla série tří měřících dní, kdy bylo zaznamenáno celkem 865

vozidel ve vzdálenosti 1m od krajnice vozovky. Měření probíhalo současně v rámci obou typů senzorů, kdy první prototyp je označen jako S1 a finální prototyp jako S2, viz tab. 8.3.

Tabulka 8.3: Shrnutí provedených měření detekce ve vzdálenosti 1m od krajnice vozovky.

Typ senzoru	Počet průjezdů [-] směr / protisměr	Úspěšnost detekce [%]	Chybná detekce [%]
S1	418 / 447	62,43	0,52
S2	418 / 447	98,91	2,88

Velmi dobře je patrná nedostatečná citlivost prvního prototypu senzoru, kdy úspěšnost detekce vozidel je o 36,48% nižší vůči finálnímu prototypu jednotky. Grafické znázornění typického průběhu získaného první měřicí jednotkou vůči typickému průběhu získaného finálním prototypem je zobrazeno na obrázku 8.8. Postupným vývojem a optimalizací uspořádání byl tak při stávajících konstrukčních prvcích maximalizován poměr odstup signálu od šumu.



Obrázek 8.8: Grafické znázornění typického nefiltrovaného průběhu získaného první (S1) měřicí jednotkou vůči typickému průběhu získaného finálním (S2) prototypem.

8.4 Praktická měření detekce kolejových vozidel

Praktická měření detekce kolejových vozidel byla provedena stejnou metodikou jako u automobilových vozidel tedy na základě vyhodnocení úspěšnosti detekce průjezdu. Analogicky byl analyzován vliv umístění respektive vzdálenosti senzoru na jeho detekční

schopnost. Vzdálenost umístění senzoru od kolejíště je dána tzv. prostorem ohrožení trakčního vedení (POTV) ve smyslu ČSN 34 1500ed.2 z roku 2011 [151]. Tato norma vymezuje prostor 3000mm na každou stranu od svislé osy koleje na úroveň temene kolejnic. Z tohoto důvodu byla zvolena výchozí vzdálenost umístění senzoru 3m.

8.4.1 Tramvajová vozidla

Praktická měření detekce tramvajových souprav byla provedena v reálném provozu v Ostravské části Dubina a Hrabůvka po dohodě a školení ze strany dopravního podniku Ostrava respektive správou Energo-dispečinku, který zabezpečuje provoz tramvajových vozidel.

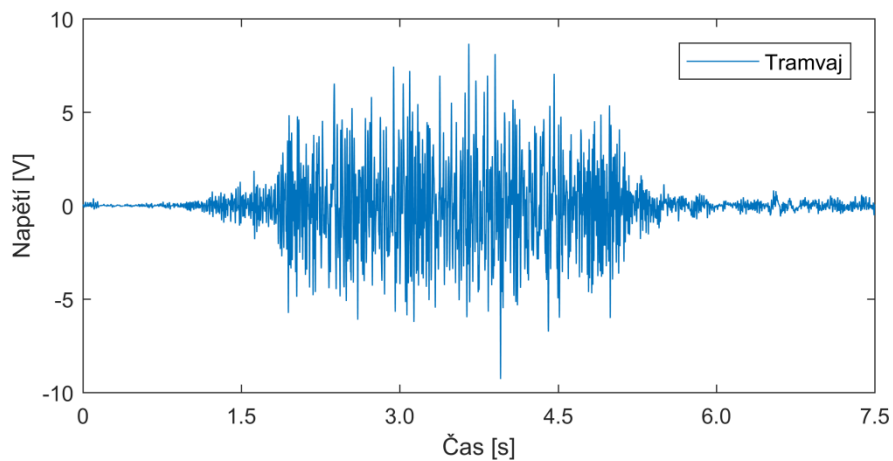
V rámci tramvajových vozidel byla provedena série 23 měřících dnů po úseku 4 hodinových měření. Fotografie z přípravy praktického měření tramvajových vozidel je zobrazena na obrázku 8.9.



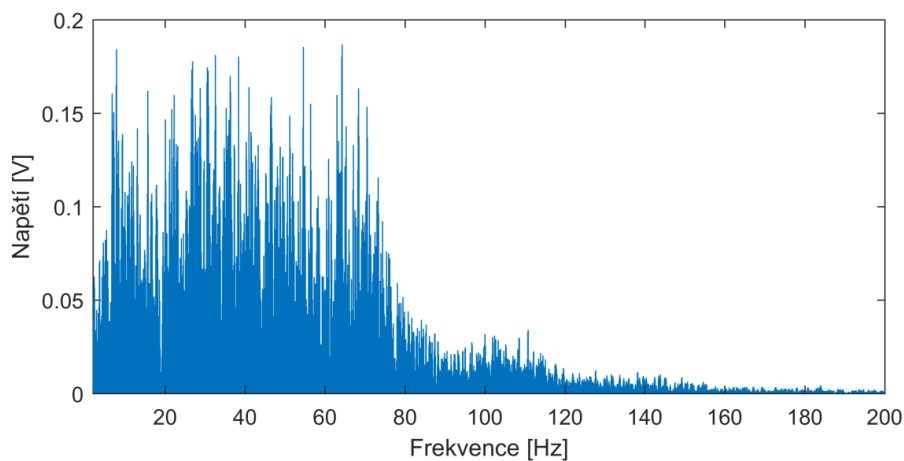
Obrázek 8.9: Fotografie z přípravy praktického měření tramvajových vozidel.

Rozsah vzdáleností senzoru pro tramvajová vozidla byl zvolen a testován od hodnoty 3m až po hodnotu 8m po kroku 1m, kdy podkladová vrstva senzoru byla tvořena štěrkovým násypem typickým pro kolejový svršek a zeminou bez lokálních úprav. V rámci povolených míst měření bylo možné analyzovat vzdálenost se štěrkovým násypem maximálně po hodnotu 4m od svislé osy koleje. Hodnota 8m byla zvolena na základě doporučení [151]. Statistická analýza vyhodnocení úspěšnosti detekce a chybovosti detekce v závislosti na vzdálenosti senzoru od krajnice vozovky je založena na 859 měřeních respektive průjezdech vozidel. Menší počet zaznamenaných vozidel z hlediska statistického vyhodnocení je dán menší hustotou provozu vůči automobilovému provozu.

Typický záznam naměřeného průjezdu tramvajového vozidla je zobrazen na obrázku 8.10. Zobrazen je časový záznam (8.10(a)) reprezentující průjezd vozidla kolem senzoru ve vzdálenosti 3m od svislé osy koleje a jeho frekvenční spektrum (8.10(b)).



(a)



(b)

Obrázek 8.10: Časový záznam reprezentující průjezd tramvajového vozidla (a); frekvenční spektrum reprezentující průjezd tramvajového vozidla (b).

Shrnutí provedených měření úspěšnosti detekce tramvajových vozidel v souběžném jízdním pruhu a shrnutí provedených měření chybovosti v protijedoucím pruhu je zobrazeno v tabulce 8.4.

Tabulka 8.4: Shrnutí provedených tramvajových vozidel.

Vzdálenost [m]	Počet průjezdů [-] směr / protisměr	Úspěšnost detekce [%] štěrkový násyp / zemina	Chybná detekce [%] štěrkový násyp / zemina
3	55 / 52	100 / 100	100 / 100
4	51 / 50	100 / 100	100 / 100
5	53 / 57	- / 100	- / 100
6	56 / 55	- / 100	- / 100
7	53 / 56	- / 100	- / 100
8	54 / 57	- / 100	- / 100

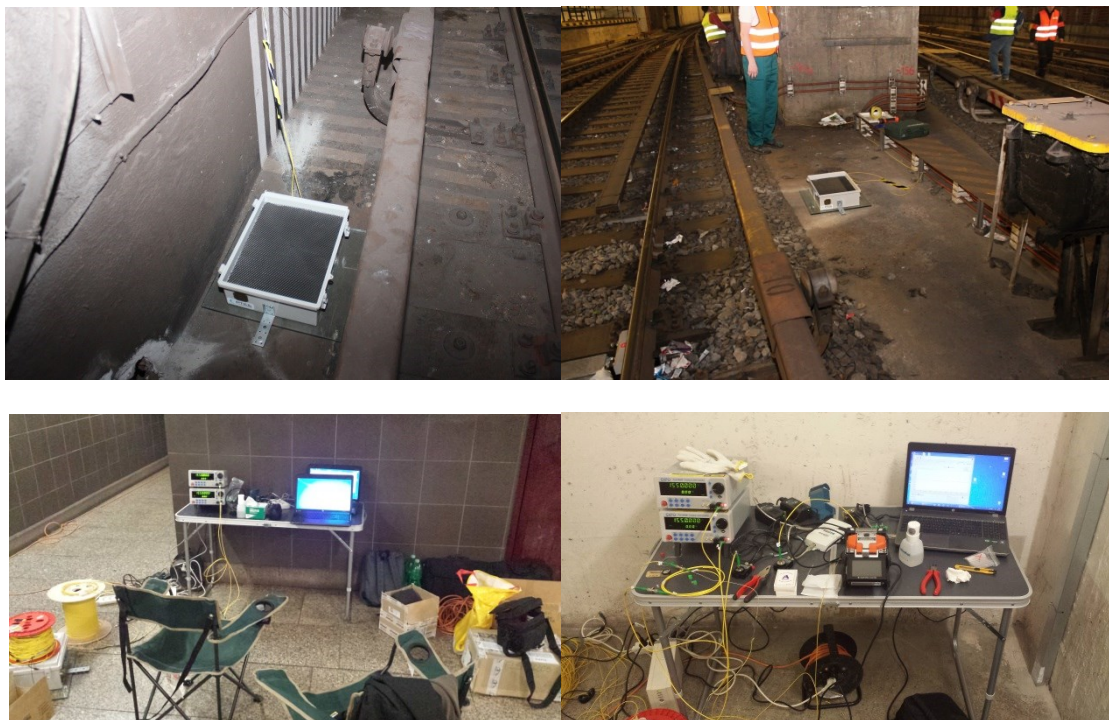
Z výsledku je patrné, že nejvyšší procentuální detekce 100% je docíleno při všech umístěních senzoru v celkové testované vzdálenosti 3 až 8metrů od svislé osy koleje. Pro všechny uvedené vzdálenosti platí, že míra chybně detekovaných vozidel v protijedoucím směru dosahuje hodnoty 100%. Pro minimalizování této chybné detekce vozidel je možné využít druhý senzor umístěný v protisměru tak, aby se senzory navzájem neovlivňovaly (na základě provedených měření je doporučená minimální vzdálenost senzorů 30m od sebe). Doporučit lze i přístup ve formě snížení citlivosti senzoru, kdy lze analyzovat a využít jiné materiály pro konstrukci senzoru včetně jiných přístupů uložení optických vláken opět s cílem najít kompromis mezi úspěšností detekce [%] a chybnou detekcí [%]. Došlo by tak k vytvoření dvou typů senzorů, kdy každý je vhodný pro jiný typ vozidel (automobilová a kolejová).

Fakt, že nebyl zaznamenán vliv vzdálenosti průjezdu vozidel kolem senzoru na jeho detekční schopnost i chybovost je charakterizován především silnější vibrační a akustickou odezvou vozidel, která je dána zejména jejich hmotností. U vlivů jako různé typy tramvajových souprav, případně počet vagónů nebyl zaznamenán negativní dopad na korektnost vyhodnocení.

Na základě výše provedených měření a analýzy lze předpokládat, že z hlediska detekce vlakových souprav budou dosaženy velmi podobné výsledky. Městské vlakové soupravy se vyznačují charakteristikami velmi obdobnými, jako mají tramvajové soupravy, stejně tak kolejová infrastruktura je podobná. Výsledky byly publikovány na konferenci SPIE v roce 2016 [141].

8.4.2 Měření metro souprav

Měření detekce kolejových metro souprav v reálném provozu bylo provedeno v Pražském metru a to v tunelových úsecích: I.P. Pavlov-Vyšehrad, Radlická-Smíchovské nádraží, Hůrka-Lužiny a Florenc C-Vltavská. Měření byla provedena po dohodě a školení ze strany dopravního podniku Praha. Provedena byla série 4 měřících dní v dopolední dopravní špičce od 7 do 9 hodin a v odpolední dopravní špičce od 16 do 18 hodin, detekováno bylo celkem 256 souprav. Vzhledem ke striktním pravidlům definujícím prostor a možnosti manipulace v kolejišti bylo defaultní umístění senzoru zvoleno z hlediska bezpečnosti ve vzdálenosti 1m od paty kolejnice, viz fotografie na obrázku 8.11. Podkladová vrstva je tvořena betonem, stejně jako celý tunel pro metro soupravy. Díky striktním normám a unifikaci ražby a stavby tunelů má tato hodnota 1m vypovídající charakter. Obecně charakter staveb metro tunelů definuje, že pro každou samostatnou kolej je ražen i samostatný tunel. Není tak nutné sledovat vliv protijedoucích souprav a metodika měření byla zaměřena na analyzování schopnosti detekci na souběžné kolejnici.



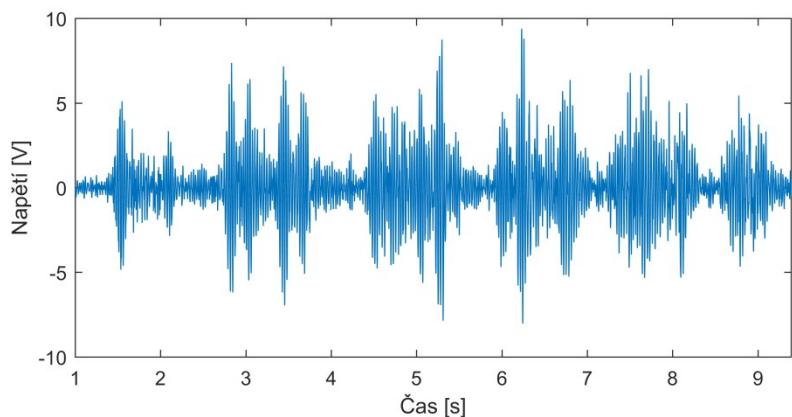
Obrázek 8.11: Fotografie z měření detekce metro souprav.

Shrnutí provedených měření úspěšnosti detekce v souběžném jízdním pruhu pro konstantní vzdálenost 1m je zobrazeno v tabulce 8.5.

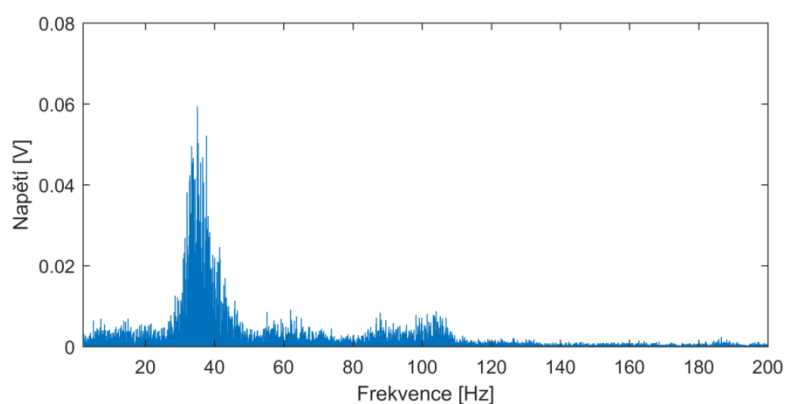
Tabulka 8.5: Shrnutí provedených měření.

Umístění senzoru	Počet souprav [-]	Úspěšnost detekce [%]
Florenc	64	100
I. P. Pavlova	64	100
Hůrka	64	100
Smíchovské nádraží	64	100

Z výsledku je patrné, že bylo dosaženo maximální možné detekce 100% pro všechny kolejové soupravy. Pro interferometrické aplikace se jeví tunelové prostředí jako vyhovující, je to dáno především silnou odezvou průjezdu masivní soupravy, která je umocněna betonovým ostěním tunelu. Typický záznam naměřeného průjezdu metro soupravy je zobrazen na obrázku 8.12. Zobrazen je časový záznam reprezentující průjezd vozidla kolem senzoru (obrázek 8.12(a) a jeho frekvenční spektrum na obrázku 8.12(b)). Pozorovat lze více amplitudových maxim, tato skutečnost je dána umístěním senzoru u nesvařeného spoje kolejnic, kdy průjezd každé nápravy přes toto spojení vytvořil patrná amplitudová maxima. Této skutečnosti lze využít například pro kalkulaci jednotlivých náprav vozidel bez nutnosti filtrace signálu.



(a)



(b)

Obrázek 8.12: Časový záznam reprezentující průjezd metro soupravy (a); frekvenční spektrum reprezentující průjezd metro soupravy (b).

8.5 Závěr z provedených měření detekce vozidel

Získané výsledky publikované v této disertační práci potvrzují teoretické předpoklady o vhodnosti interferometrických měření a jejich časového zpracování pro detekci projíždějících vozidel. Výše uvedené výsledky a analýza provedených měření je dále využita v kapitole 9, která je zaměřená na měření rychlosti vozidel. V obou případech detekce vozidel (automobilových i kolejových) je patrná různá citlivost a chybovost senzoru, která je definována analýzou vlivu vzdálenosti průjezdu vozidel kolem senzoru na jeho detekční schopnost.

Praktická měření také potvrdily teoretické předpoklady uvedené v úvodní části této práce, kdy byl zaznamenán vliv různorodého charakteru vibrací od dopravy, který je závislý zejména na hmotnosti vozidel, rychlosti a způsobu jízdy vozidel, na směru pohybu vozidel, na zrychlování nebo brždění vozidel a řadě dalších. Dalším neméně důležitým parametrem je i rovinnost jízdní dráhy, směrové a výškové vyrovnání kolejové dráhy, způsob upevnění kolejnic případně skladba podkladních vrstev vozovky. Kromě výše uvedených vlivů bylo

potvrzeno, že má na velikost a šíření vibrací vliv i složení prostředí na cestě od zdroje k měřicímu senzoru. Lze tak konstatovat, že pro využití všech vlastností měřicího systému bude nutné znát vliv okolního prostředí a z tohoto důvodu budou následující výzkumné práce orientovány na tuto problematiku.

9 Návrh sensorového systému pro měření rychlosti v dopravním provozu

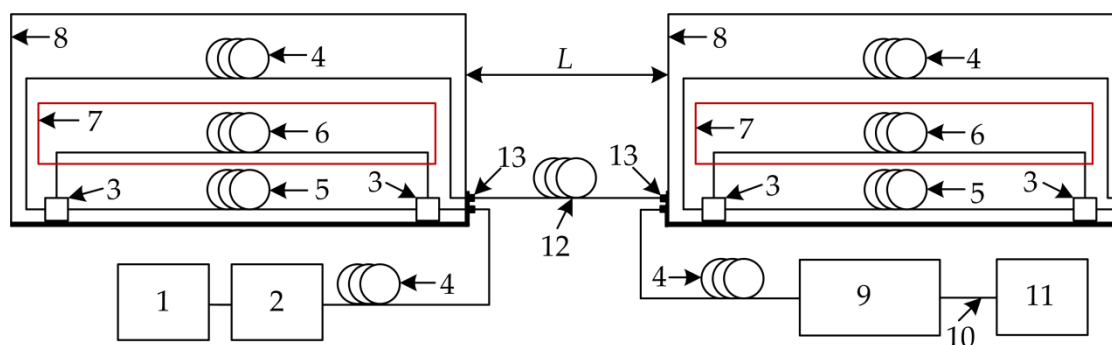
Kapitola 7 a 8 této práce popisuje návrh měřicí jednotky, která je schopna detekovat osobní a kolejová vozidla s maximální mírou přesnosti a její ověření v reálném provozu. V případě využití sériového zapojení dvou konstrukčně totožných jednotek v pevně definované vzdálenosti a na základě inovativní metodiky vyhodnocení časově posunutých signálů detekovaných sériovým zapojením dvou měřících jednotek při průjezdu vozidel kolem sensorů lze s využitím vztahu (9.1) vypočítat a stanovit rychlost osobních či kolejových vozidel.

$$v_{\text{vozidla}} = \frac{S_{\text{vzdálenost mezi senzory}}}{t_{\text{čas průjezdu mezi senzory}}} * 3,6 \text{ [km/h]}. \quad (9.1)$$

Popis navrženého schéma měření a zapojení sensorických jednotek včetně vstupně výstupních komponentů tak, aby tvořil ucelený systém pro měření rychlosti vozidel je zobrazen na obrázku 9.1. Níže je uveden seznam vztahových značek platný pro obrázek 55. Na ucelený systém pro měření rychlosti vozidel byla podána ochrana duševního vlastnictví na úřad průmyslového vlastnictví, užitný vzor (vzor číslo 30137) byl získán v roce 2016 [152] a patentová licence (licence číslo 306992) potvrzující novost řešení byla získána v roce 2017 [153].

Seznam vztahových značek (platí pro obrázek 9.1):

1. Laserový zdroj záření.
2. Izolátor.
3. Vazební dělič.
4. Konvenční optické vlákno standardu G.652.D. nebo G.653.
5. Měřicí část interferometru.
6. Referenční část interferometru.
7. Tlumící část referenčního ramene.
8. Ochranný voděodolný box.
9. Fotodetektor.
10. Koaxiální kabel.
11. Část signálového zpracování.
12. Konvenční optické vlákno pro spojení sensorových jednotek.
13. Rozhraní vstup / výstup.



Obrázek 9.1: Navržené schéma zapojení pro měření rychlosti vozidel.

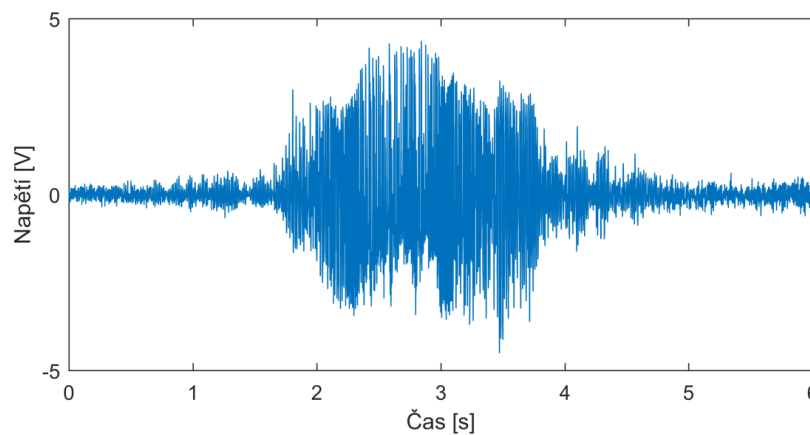
Laserový zdroj (1) byl testován s hodnotami výstupního výkonu v rozmezí 1-10mW při dostatečné stabilitě a koherentní délce. Uvedené výsledky z praktických měření rychlosti vozidel odpovídají referenčnímu výkonu o hodnotě 1mW. Pomocí propojovacího optického kabelu (4), který reprezentuje konvenční jednovláknové optické vlákno standardu G.652.D nebo G.653 je přes izolátor (2) zdroj záření laser (1) připojen ke vstupně/výstupnímu rozhraní (13) měřicí jednotky. Maximální testovaná délka kabelu (4) byla 2500m, tato hodnota neovlivnila funkci měřicího systému. Vztahová značka (12) označuje propojovací kabel pro spojení sensorových jednotek standardu G.652.D nebo G.653, kdy vzdálenost při stávající metodice filtrace a vyhodnocení dat je 2,77m vzhledem k rozlišovací schopnosti systému. Vazební členy (3) jsou vláknové děliče s dělicím poměrem 50:50 s tolerancí +/- 5%. Sensory jsou zapojeny a uloženy v ochranném voděodolném boxu (8), kdy vlastní rezonanční frekvence boxu jsou mimo měřené pásmo frekvencí. Fotodetektor (9) registruje signál vzniklý následkem interference optických paprsků z referenčního (6) uloženého v tlumící části (7) a měřicího (5) ramene a mění jej na měřitelný elektrický proud. Pomocí koaxiálního kabelu (10) je propojen se zařízením pro zpracování signálu (11), které využívá filtr typu horní propust s mezní frekvencí 2Hz, zesilovač a analogově digitální převodník ve formě měřicí karty od firmy National Instruments s označením NI USB 6210. Tato karta byla zvolena pro své parametry a také z důvodu kompatibility, protože software pro vyhodnocení signálů je vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW. Dále byl použit počítač (PC) pro zpracování a vyhodnocení provedených experimentálních měření. Jednotlivé prvky měřicího schéma byly blíže popsány v podkapitole 8.1.

9.1 Software pro vyhodnocení dat

Aplikace pro vyhodnocení rychlosti vychází z výše uvedeného závěru v podkapitole 8.2. Základem pro stanovení rychlosti je využití sériového zapojení dvou konstrukčně totožných měřicích senzorů, kdy detekované signály průjezdu vozidla mají téměř identický průběh. Algoritmus monitorovací aplikace hledá první maxima amplitud u dvou časově posunutých signálů získaných průjezdem přední nápravy vozidla kolem dvou senzorů. Jejich poloha udává dvě časově posunuté značky průjezdu vozidla. Odchylka při stanovení maxima jednotlivých naměřených signálů odpovídá rozlišení časové základny (0,0001s),

kteřá vychází ze vzorkovacího kmitočtu 10kHz. Na základě předem známé vzdálenosti umístění senzorů od sebe a získaných dvou časových značek lze stanovit rychlost vozidla. Měřitelný rozsah rychlostí systému byl stanoven a testován v městském i mimoměstském provozu od rychlosti 30km/h po hodnotu 100km/h. Specifikace rozsahu je zvolena na základě vzdálenosti senzorů od sebe a minimálního časového intervalu průjezdu vozidla mezi senzory, který zajišťuje korektní rozlišení obou maxim časově posunutých signálů. Hodnota 10kHz vzorkovacího kmitočtu byla zvolena jako kompromis dostačující pro zpracování signálu, vyšší vzorkovací kmitočet je charakterizován vyššími nároky na zpracování, což by mohlo negativně ovlivnit dobu výpočtu respektive získání výsledné informace o rychlosti vozidla (například v případě instalace vyhodnocovací jednotky v místě měření).

Na základě velkého počtu provedených měření v kapitole 8 lze ze statistického hlediska konstatovat, že délka záznamu detekovaného vozidla v časové doméně se pohybuje v rozsahu hodnot od 0,3s až po hodnotu 3,5s v závislosti na rychlosti a povaze vozidla (osobní/nákladní), jen v ojedinělých případech byl naměřen i delší interval způsobený například kombinací nadměrné délky vozidla a nízké rychlosti. Při využití sériového zapojení dvou měřících jednotek může nastat případ, kdy dochází k překrývání jednotlivých signálů a nelze zajistit korektní rozlišení dvou maxim časově posunutých signálů, viz obrázek 9.2 charakterizující průjezd vozidla nad 3,5tuny.



Obrázek 9.2: Časový záznam vozidla nad 3,5 tuny při měření rychlosti vozidla.

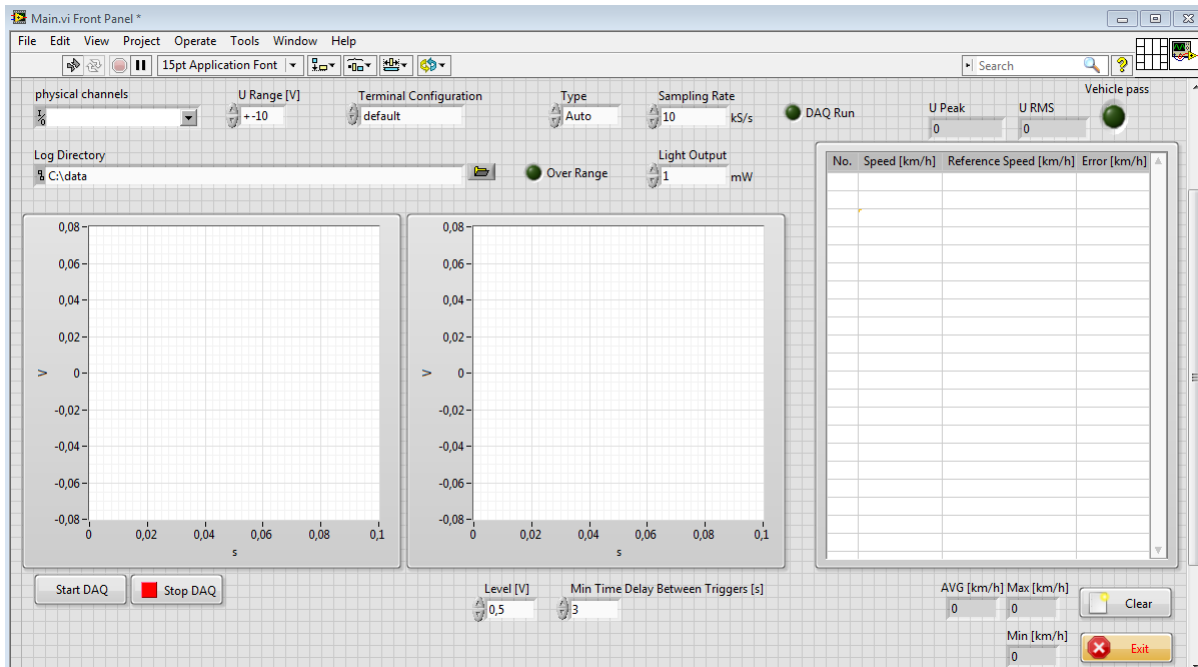
Je tak nutné najít kompromis mezi vzdáleností senzorů, rozsahem měření rychlosti a schopností senzorů měřit rychlost pouze jednoho vozidla. Bude-li tato vzdálenost senzorů od sebe velká tak bude řešen problém (překrývání) signálů od jednotlivých senzorů, získáme možnost měřit vyšší rychlosti, ale zároveň se ztrácí schopnost senzoru rozlišit individuální vozidla (nutnou podmínkou pro úspěšné měření je, aby se mezi oba senzory vešlo pouze jedno vozidlo).

Nutné tak bylo využít číslicové filtrace signálu, na základě které došlo k filtraci nežádoucích složek signálu (vyšší akustických složek v řádu 20Hz a výše). Tím lze stanovit

polohu maxima signálu s přesností na setinu sekundy, viz kapitola 10. Pro korektní vyhodnocení obou maxim od senzorů byl na základě provedené číslicové filtrační analýzy reálných dat stanoven minimální časový interval (včetně rezervy) mezi záznamy na 0,1s.

Časový interval 0,1s značí, že při rychlosti jedoucích vozidel 100km/h, která má být detekována je vyžadovaný rozestup mezi senzory 2,77m. Tato hodnota je v dobrém souladu s délkou téměř všech vozidel, s kterými je dnes možné se na silnici setkat (bezpečná vzdálenost mezi vozidly je stanovena zákonem č. 361/2000Sb., o silničním provozu a vyhláškou č. 30/2001Sb, která říká, že vozidla by měla mezi sebou udržovat vzdálenost, kterou urazí při dané rychlosti za dvě sekundy - což je na suché vozovce při rychlosti 50km/h – 28m, při rychlosti 90km/h - 50m a při rychlosti 130km/h až 72m). Výše uvedené také značí, že změna kteréhokoliv z uvedených tří parametrů (rychlost, rozestup, délka časového intervalu) vyžaduje současně úpravu zbylých dvou parametrů. Měřicí systém je nejcitlivější na délku časového intervalu 0,1s, která nemůže být kratší než tato hodnota (ale může být delší) proto aby byla korektně detekována jednotlivá maxima.

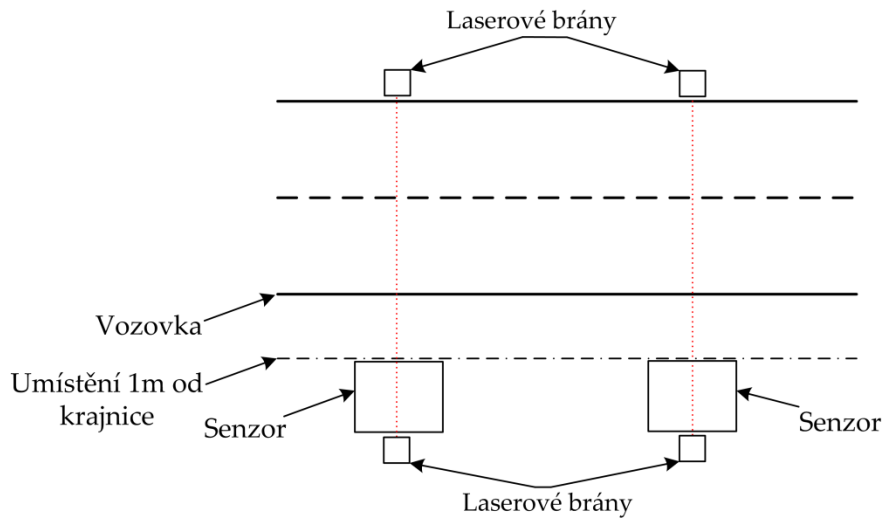
Implementováno bylo rozšíření měřicí aplikace o možnost připojení reference pomocí BNC konektorů, která jak je uvedeno níže v podkapitole 9.2, byla vytvořena pomocí dvou laserových bran. Výslednou rychlost vozidla, respektive chybu měření aplikace stanovuje na základě porovnání získaných dat ze senzorů a laserové referenční brány. Uživatelský interface aplikace je zobrazen na obrázku 9.3.



Obrázek 9.3: Úvodní obrazovka monitorovací aplikace.

9.2 Reference pro měření rychlosti

Aby měla měření rychlosti vypovídající hodnotu, bylo nutné porovnat naměřená data vůči referenci. Reference byla vytvořena pomocí dvou laserových bran umístěných symetricky za senzorem, viz obrázek 9.4.



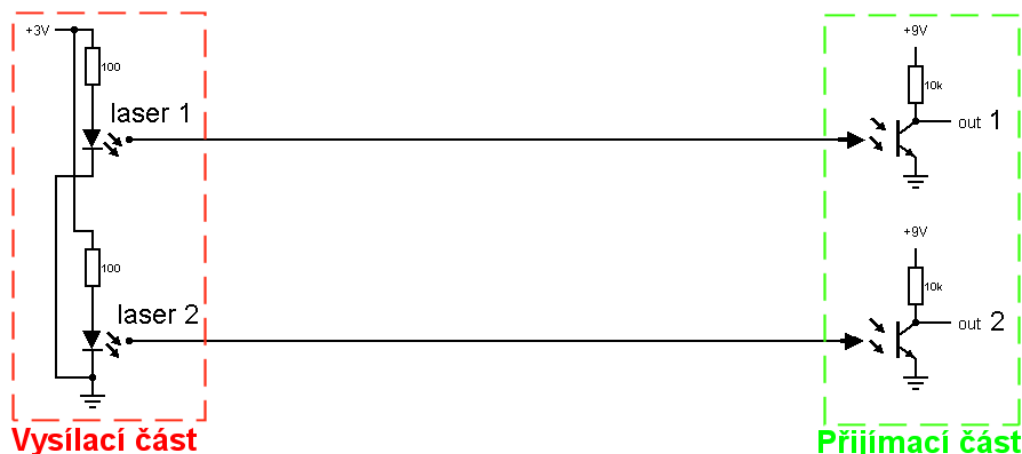
Obrázek 9.4: Umístění reference v podobě laserové brány.

Funkce je založena na dvou souběžných laserových paprscích v přesně definované vzdálenosti. Projíždějící auto přeruší nejprve jeden paprsek, což spustí čítač impulzů. Po přerušení druhého paprsku se čítač zastaví a tím je určen čas, který byl potřeba pro projetí brány. Rychlost je pak vypočtena jako:

$$v = (s/t) * 3,6 \text{ [km/h]}, \quad (9.2)$$

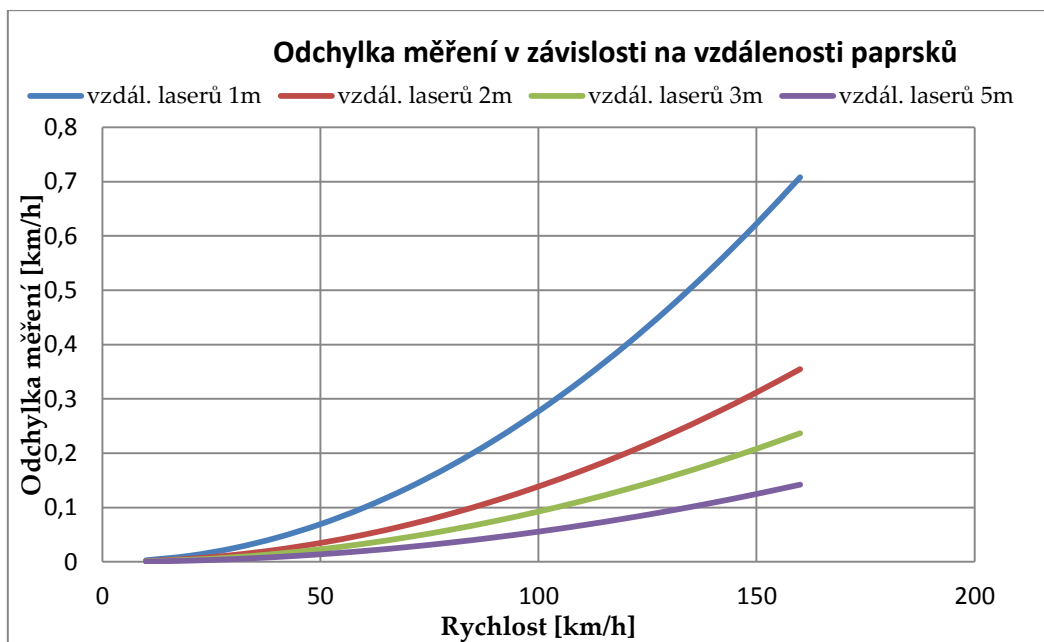
kde s značí vzdálenost laserů v metrech a t je čas [s], který uplynul, než došlo k přerušení druhého paprsku.

Vysílací část brány tvoří dva 4mW lasery, které osvětlují dva fotodetektory osazené fototranzistory typu SHF309-5 na přijímací části brány. Vysílací i přijímací části jsou vybaveny vlastním zdrojem napájení. Toto řešení je zde především z důvodu nezávislosti vysílací části brány, která je umístěna na protější straně vozovky bez možnosti propojení na zbytek systému. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 9.5.



Obrázek 9.5: Schéma zapojení referenční laserové brány.

Vzhledem k relativně nízké frekvenci bylo nutno vhodně zvolit vzdálenosti laserových paprsků. Pokud budou jednotlivé brány příliš blízko, dochází k omezení chybných měření (např. pokud pojednou velmi blízko za sebou), ale narůstá odchylka měření. V následujícím grafu (obr. 9.6) jsou vyneseny odchylky měření pro různé vzdálenosti paprsků.



Obrázek 9.6: Odchylka měření v závislosti na vzdálenosti laserů.

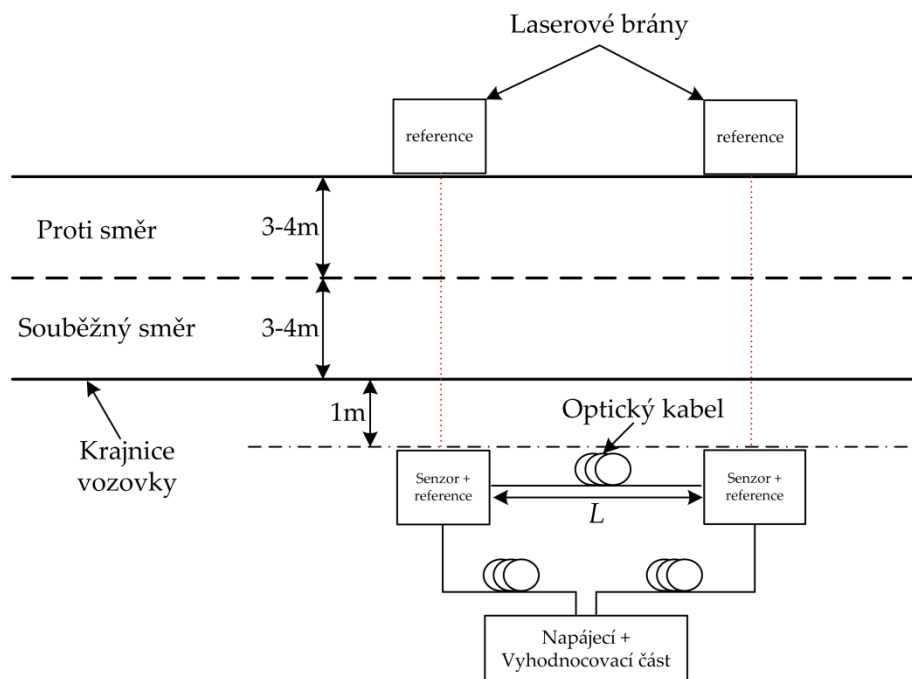
Odchylka měření je vypočtena pomocí hodnoty času, která při dané rychlosti a vzdálenosti odpovídá rozlišení časové základny (0,0001s). Pro výpočet pak tedy vycházíme ze vzorce:

$$\Delta v = \left(v - \frac{sL \cdot nS}{\frac{sL \cdot nS}{v} + 1} \right) * 3,6 \text{ [km/h]}, \quad (9.3)$$

kde v je naměřená rychlost [m/s], s_L je vzdálenost mezi laserovými paprsky v metrech a n_s je vzorkovací frekvence (10kHz).

9.3 Měření rychlosti automobilových vozidel

Praktická měření rychlosti vozidel v reálném provozu byla realizována ve městě Ostrava na ulici Studentská, kde průměrná rychlost projíždějících vozidel dosahovala hodnoty 26km/h, dále na ulici Průběžná, kde průměrná rychlost projíždějících vozidel dosahovala hodnoty 48km/h, na ulici 17. Listopadu směr Děhylov, kde průměrná rychlost vozidel dosahovala hodnot 71km/h a na ulici Celní směr Hlučín, kde průměrná rychlost vozidel dosahovala hodnot 101km/h. Metodika měření je znázorněna na obr. 9.7, kdy proběhlo celkem 20 měřících dní, během kterých byla zaznamenána rychlost u 4821 vozidel. Každý měřící den obsahuje data ze všech výše uvedených lokalit měření. Pro kontrolu průjezdu a korelaci dat byl využit kamerový záznam. Sensory byly umístěny ve vzdálenosti 1m od krajnice vozovky ve vzdálenosti 2,77m od sebe včetně referenční laserové brány. Přívodní optické vlákno standardu G. 652.D využité při všech měřeních rychlosti mělo délku 50m.



Obrázek 9.7: Metodika měření rychlosti automobilů.

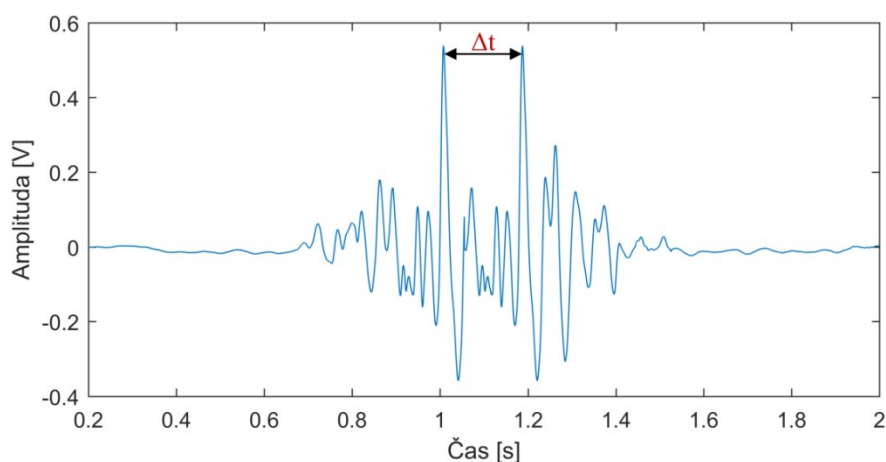
Přesnost měřicího zařízení je v České republice definována zákonem č. 505/1990 Sb., o metrologii a jeho prováděcí vyhlášky. Všechny měřicí zařízení musí být schváleny a navíc musí procházet pravidelnými kontrolami. Kalibrovány jsou s odchylkou ± 3 km/h do rychlosti vozidel 100km/h. Odchylka měření je vypočtena opět pomocí hodnoty času, která při dané rychlosti a vzdálenosti odpovídá rozlišení časové základny (0,0001s). Pro výpočet pak analogicky vycházíme ze vzorce uvedeného výše:

$$\Delta v = \left(v - \frac{s_L \cdot n_S}{\frac{s_L \cdot n_S}{v} + 1} \right) * 3,6 \text{ [km/h]}, \quad (9.4)$$

kde v je rychlost [m/s], s_L je vzdálenost mezi senzory v metrech a n_S je vzorkovací frekvence (10kHz).

Odchyška měření pro rychlost 30km/h je definována hodnotou 0,01 km/h, pro maximální testovanou rychlost 100km/h hodnotou 0,1km/h.

Na obrázku 9.8 je zobrazen příklad detekce jednotlivých maxim respektive časové rozdílu mezi nimi u průjezdu vozidla při vyhodnocení rychlosti získaného stávající metodikou filtrace a vyhodnocení dat. Jedná se o průjezd osobního automobilu při rychlosti 58,2km/h. Tabulka 9.1 zobrazuje shrnutí z měření rychlosti vozidel.



Obrázek 9.8: Ukázka detekce jednotlivých maxim časového záznamu průjezdu vozidla při vyhodnocení rychlosti.

Tabulka 9.1: Sumarizace z provedených měření rychlosti vozidel.

Měřicí den [-]	Počet průjezdů [-]	Maximální chyba [km/h]	Minimální chyba [km/h]	Průměrná chyba [km/h]
1	304	1,4	0,7	1,1
2	308	1,1	0,6	0,9
3	294	1,6	0,7	0,9
4	297	1,2	0,8	1
5	301	0,9	0,5	0,8
6	308	1,7	0,9	1,2
7	318	2,1	1,2	1,1
8	324	1,9	0,8	1,3
9	274	1,8	0,8	1,2
10	298	2,3	1,4	1,3
11	265	1,7	0,7	1,2
12	311	1,5	0,8	1,3

13	357	1,3	0,7	1,1
14	269	1,8	0,8	1,3
15	288	2,4	1,1	1,4
16	305	2,2	1,1	1,3

Tabulka 9.1 zobrazuje jednotlivé měřicí dny, kdy je zobrazena minimální, maximální a průměrná chyba naměřených rychlostí vozidel v daný den vůči referenci tvořené laserovými bránami s výše specifikovanou chybovostí. Patrné je, že ve všech měřicích dnech se chyba pohybovala v toleranci $\pm \frac{3km}{h}$ udávané u měřicích systémů do 100km/h v České republice. Malé odchylky v chybovosti měření mohou být způsobeny jednak různými lokalitami měření (rovinnost jízdní dráhy, kvalita povrchu silniční vozovky, směrové a výškové vyrovnání vozovky), ale i vlivem vzdálenosti průjezdu vozidel kolem senzorů, hmotností vozidel, rychlostí a způsoby jízdy vozidel. Dalším parametrem je i vliv okolního prostředí. Během všech testovacích dní se teploty pohybovaly v rozmezí od 13 do 32°C, od slunečného počasí po mírný déšť v 15 den měření, kdy bylo dosaženo nejvyšší maximální i průměrné chyby měření. Je tak patrné, že vliv okolního prostředí je natolik značný, že bude vyžadovat další výzkum.

Fotografie z praktického měření je zobrazena na obrázku 9.9.

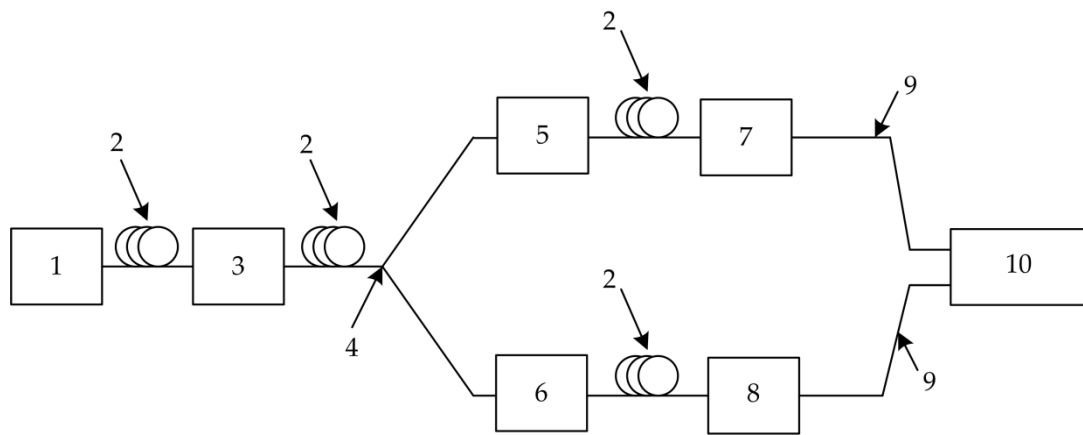


Obrázek 9.9: Fotografie z praktického měření automobilových vozidel.

Při finalizaci této disertační práce byl analyzován modifikovaný přístup, který eliminuje v praxi případy, kdy hodnota rozestupů vozidel není dodržena (je pod uvedenou úrovní 2,77m) a může dojít k selhání měřicího systému. Zároveň tento modifikovaný přístup umožňuje navýšení měřicího rozsahu systému nad 100km/h bez nutnosti navýšení vzorkovacího kmitočtu. Návrh měřicího schéma je zobrazen na obrázku 9.10.

Seznam vztahových značek (platí pro obrázek 9.10):

1. Laserový zdroj záření.
2. Konvenční optické vlákno standardu G.652.D nebo G.653.
3. Izolátor.
4. Vazební dělič.
5. Měřicí senzor číslo 1.
6. Měřicí senzor číslo 2.
7. Fotodetektor číslo 1.
8. Fotodetektor číslo 2
9. Koaxiální kabel.
10. Část signálového zpracování.



Obrázek 9.10: Modifikované schéma zapojení systému pro měření rychlosti.

Změna vůči výše popsanému schéma pro měření rychlosti spočívá ve využití paralelního zapojení měřících jednotek. Každá měřící jednotka navíc obsahuje samostatný fotodetektor. Pro vyhodnocení se využívá jedna měřící karta, zapojeny jsou dva měřící kanály. Mírně upraven byl software pro vyhodnocení dat. Takto lze vyhodnotit signál z jednotlivých měřících jednotek nezávisle na sobě, docíleno je tím zkrácení umístění jednotek na úroveň jednotek metrů.

Laserový zdroj (1) byl testován s referenčním výkonem o hodnotě 2mW při dostatečné stabilitě a koherentní délce, tak aby každý senzor pracoval s výkonem 1mW a mohlo dojít k porovnání s výše uvedeným sériovým zapojením senzorů. Pomocí propojovacího optického kabelu (2), který reprezentuje konvenční jednovidové optické vlákno standardu G.652.D nebo G.653 je přes izolátor (3) zdroj záření laser (1) připojen ke vazebnímu děliči (4) s dělicím poměrem 50:50 a tolerancí $\pm 5\%$. Rozdělený výkon je směřován do dvou měřících ramen, kdy první rameno obsahuje senzor číslo 1 (5), který je přes konvenční jednovidové optické vlákno standardu G.652.D (2) propojen s fotodetektorem (7) a dále přes koaxiální kabel (9) připojen na část signálového zpracování (10). Druhé rameno obsahuje senzor číslo 2 (6), který je přes konvenční jednovidové optické vlákno standardu G.652.D nebo G.653 (2) propojen s fotodetektorem (8) a dále přes koaxiální kabel (9) připojen na část signálového

zpracování (10). Část signálového zpracování (10) je téměř totožná jako u sériového zapojení včetně filtru horní propusti (HP) s mezní frekvencí 2Hz, upraven je pouze software pro vyhodnocení dat. Dále byl použit počítač (PC) pro zpracování a vyhodnocení provedených experimentálních měření.

Pro ověření byla provedena série jednoho měřicího dne, celkový počet zaznamenaných vozidel byl 347. Testovaná vzdálenost mezi senzory byla 1m. Tabulka 9.2 obsahuje zpracované výsledky z měření.

Tabulka 9.2: Naměřená data pomocí paralelního zapojení pro vzdálenost senzorů 1m od sebe.

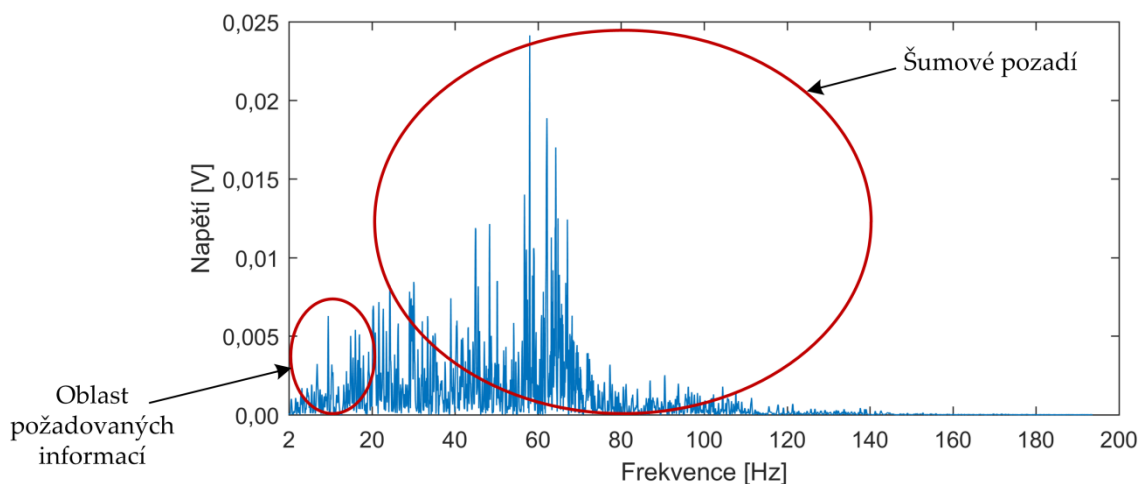
Měřicí den [-]	Počet průjezdů [-]	Minimální chyba [km/h]	Minimální chyba [km/h]	Průměrná chyba [km/h]
1	347	1,1	0,5	0,8

Z výsledku je patrné, že bylo dosaženo téměř shodných parametrů jako u sériového zapojení. Díky zkrácení rozsahu jednotek na 1m také byla minimalizována chyba, která může nastat při nedodržení dostatečné vzdálenosti vozidel od sebe.

Na základě výše provedených měření lze předpokládat analogické nasazení výše popsané metodiky na kolejové soupravy. Vzhledem k hmotnostem kolejových vozidel, která výrazně převyšuje hmotnosti silničních vozidel lze očekávat silnější odezvy a tím i snadnější detekci. Výsledky byly publikovány v recenzovaném časopise v roce 2016 [139].

10 Návrh metod číslicové filtrace signálu

V rámci provedených měření je jedna z možných cest jako docílit lepšího odstupu signálu od šumového pozadí (hluk dopravy, vnější jevy – počasí, lidský faktor, apod.) při detekci vozidel provedení číslicové filtrace (např. frekvenčně selektivní filtry typu IIR nebo FIR, vlnkové transformace, apod.) měřených signálů. Užitečný signál získaný průjezdem vozidel je složen z vibrační a akustické odezvy v řádu jednotek až desítek Hz v závislosti převážně na rychlosti a typu vozidla. Frekvenční analýzou experimentálních dat bylo zjištěno, že užitečná informace pro stanovení rychlosti se nachází přibližně v intervalu od 2 do 20 Hz, viz znázornění na obrázku 10.1, který představuje typické frekvenční spektrum průjezdu vozidla.



Obrázek 10.1: Grafické znázornění relevantní polohy užitečné informace pro stanovení rychlosti vozidel.

Je tedy zřejmé, že pro korektní výpočet rychlosti vozidla, je nutné provést číslicovou filtraci, neboť bylo prakticky ověřeno, že použitý senzor vykazuje pracovní oblast v rozsahu od 2 Hz do 150 Hz, přičemž principálně dosahuje nejvyšší citlivosti na frekvencích od 25 Hz do 85 Hz. Z pohledu uplatnění interferometrických senzorů v reálných aplikacích je největší nevýhodou to, že frekvenční charakteristika senzoru není lineární, viz Obr. 7.5 uvedený v podkapitole 7.2. Provedená číslicová filtrace také umožnila snížit vzdálenost umístění senzorů od sebe na hodnotu 2,77 m, protože bylo možné zajistit korektní rozlišení jednotlivých maxim dvou signálů od dvou sériově zapojených senzorů. Bez použití filtrace může dojít v časové oblasti k překrývání jednotných signálů způsobených průjezdem automobilu.

Pro získání požadované informace je využito lineární filtrace, která tvoří i základ dnes nepoužívanějších metod zpracování číslicových signálů. Existují dva základní typy lineárních filtrů, kdy kritériem pro rozdělní je délka impulsní odezvy daného číslicového filtru. Filtr typu FIR (Finite Impulse Response) s konečnou impulsní odezvou a filtr typu IIR

(Infinite Impulse Response) s nekonečnou impulsní odezvou. V této práci je bližně popsán druhý zmíněný typ, tedy IIR filtr, který se svými parametry jevil jako nejvíce vyhovující, protože je vyžadováno malé zpoždění při zpracování vstupního signálu a malá náročnost na samotné zpracování informace [154-155]. IIR filtr reaguje na změny vstupního signálu s menším zpožděním, protože využívá pro stejnou aproximaci dané frekvenční charakteristiky podstatně nižší řád filtru vůči filtru typu FIR. Důsledkem jsou menší nároky na paměť pro ukládání stavových proměnných a koeficientů. Nevýhodou FIR filtrů vyššího řádu je zpoždění signálů, které by výrazně zkomplikovalo použitou metodu měření rychlosti, respektive by mělo za následek nutnost použití větší vzdálenosti senzorů od sebe a zároveň by kladlo vyšší výpočetní nároky na vyhodnocovací jednotku v případě instalace v místě měření.

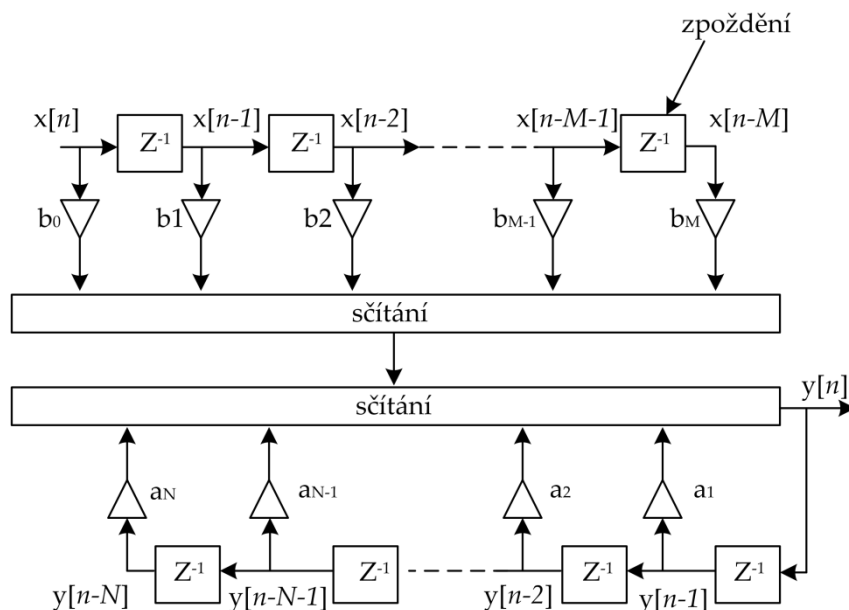
Filtr IIR může být realizován pomocí tří základních operací, respektive tří základních bloků (součtového členu, jednotkového zpoždění a členu násobícího konstantou). Pro přenosovou funkci existuje více různých realizačních struktur (přímá, paralelní, kaskádní a duální), volba jednotlivých struktur je definována i různými nároky na výpočetní rychlost [155-156].

V této disertační práci je uvedena tzv. přímá struktura, která z hlediska výpočetní rychlosti představuje nejmenší náročnost a z hlediska filtrace požadované informace se jeví jako dostačující.

Vstupní hodnoty pro filtr jsou charakterizovány jednotlivými vzorky $x[n]$, výstup filtru je označen $y[n]$. Koeficienty filtru, které jsou předmětem návrhu filtru a charakterizují jeho vlastnosti, jsou označeny b_0, b_1, \dots, b_n (viz obrázek 10.2) a lze je definovat pomocí diferenční rovnice:

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] + \sum_{k=1}^N a_k y[n-k], \quad (10.1)$$

kde a_k a b_k představují konstantní koeficienty a musí platit podmínka $M \leq N$. Symboly $x[n-k]$ a $y[n-k]$ charakterizují vzorky vstupního $x[n]$ a výstupního signálu $y[n]$, posunutá doprava (zpožděná) o i -kroků diskrétního času.



Obrázek 10.2: Přímá struktura IIR filtru použitá v disertační práci.

Samotný přenos IIR filtrů je tvořen podílem polynomů (racionální lomenou funkcí), kdy řád filtru odpovídá vyššímu stupni ze stupňů obou polynomů vyjádřených v kladných mocninách z .

Lze tak konstatovat, že v prostoru obrazů Z -transformace odpovídá diferenční rovnice uvedená výše přenosové funkci ve tvaru racionální lomené funkce, výslednou relaci lze definovat pomocí vztahu:

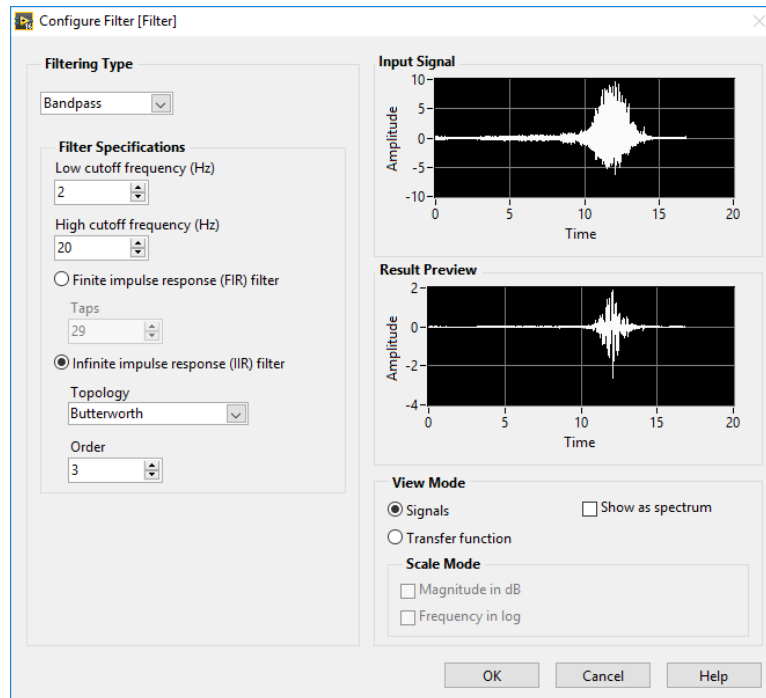
$$H(z) = \frac{C(z)}{D(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} = \frac{b_0 \prod_{\mu=1}^M (1 - z_{0\mu} z^{-1})}{\prod_{\nu=1}^N (1 - z_{\infty\nu} z^{-1})}, \quad (10.2)$$

kde $C(z)$ resp. $D(z)$ charakterizují jednotlivé koeficienty polynom, parametry z_0 resp. z_{∞} charakterizují nulové body a póly. Při návrhu filtru je snahou nalézt koeficienty polynomů $C(z)$ a $D(z)$ nebo jejich příslušných nulových bodů $z_{0\mu}$ a z_0 ve tvaru, kdy bude splněno tzv. kmitočtové toleranční schéma [156-157]. Pro zajištění kauzality celého navrženého systému musí platit, že $M \leq N$, tedy že polynom v čitateli přenosové funkce musí být nejvýše stejného řádu jako je polynom ve jmenovateli [156-157]. Pro schéma uvedené na obrázku 66 bude platit výsledný vztah:

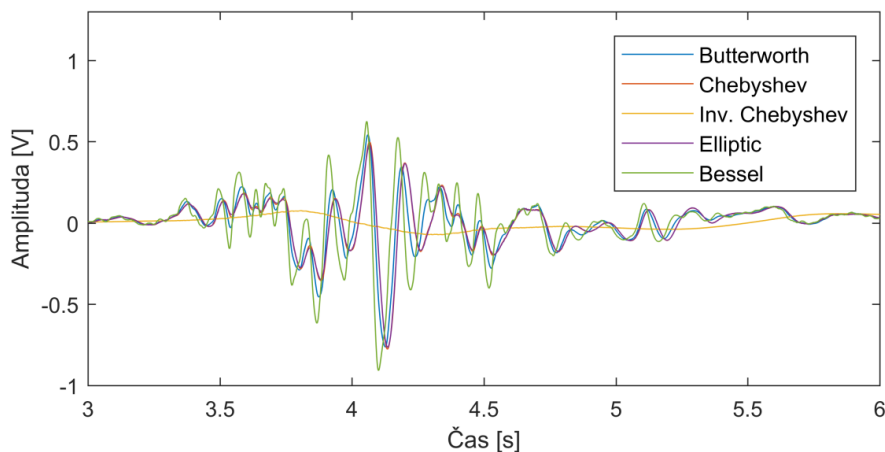
$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - \dots - a_N z^{-N}}. \quad (10.3)$$

Pro realizaci filtrace byly tedy využity primárně filtry s nekonečnou impulzní odezvou s využitím vývojového prostředí LabVIEW, ve kterém je vytvořen i kompletní software pro zpracování signálů z měřicích jednotek a vyhodnocení rychlosti vozidla. S využitím IIR filtru lze provést vyhodnocení a číslicovou filtraci, kdy výstupem je okamžitá

informace o rychlosti vozidla bez nutnosti post procesování dat. Pro extrakci měřitelného maxima se jako nejvhodnější konfiguracejevilo využití systému 3. řádu typu pásmová propust s mezními frekvencemi dle tolerančního schématu od 2 do 20Hz. Pro filtraci byl zvolen filtr typu Butterworth, viz obrázek 10.3. Empiricky byly zkoumány i další typy filtrů včetně různých filtračních specifikací, např. Chebyshev, Inverzní Chebyshev, Eliptický filtr, Besselův filtr apod, viz obrázek 10.4.



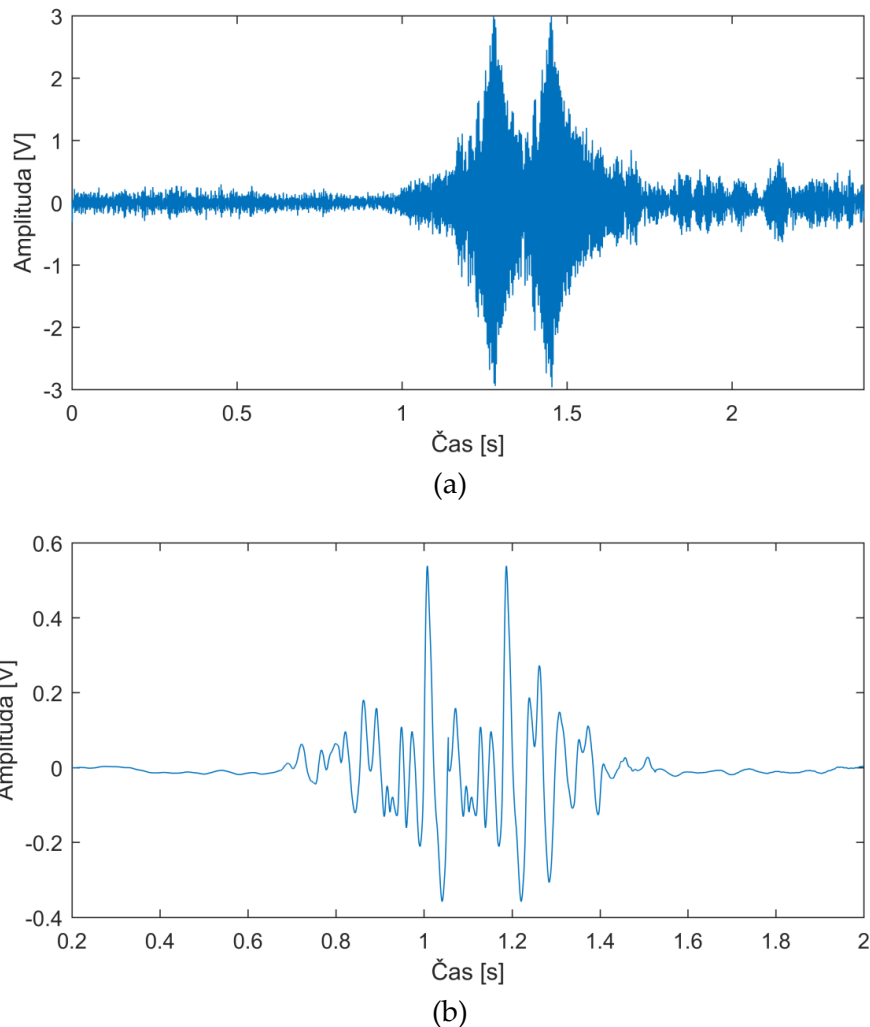
Obrázek 10.3: Konfigurace optimálního filtru typu Butterworth v prostředí LabVIEW.



Obrázek 10.4: Příklad konfigurace různých filtrů při extrakci měřitelného maxima.

Na obrázku 10.5(a) je zobrazen příklad naměřeného časového záznamu ze dvou měřících jednotek při průjezdu osobního vozidla kolem senzorů. S využitím systému 3. řádu typu pásmová propust (typu Butterworth) s mezními frekvencemi dle tolerančního

schématu od 2 do 20Hz získáme výsledný signál zobrazený na obrázku 10.5(b). Tato konfigurace umožňuje bezpečně extrahovat jednotlivá maxima s přesností 0,0001 sekundy a docílit tak stanovení rychlosti vozidla a snížení vzdálenosti senzorů na hodnotu 2,77m. Zároveň jsou minimalizovány vlivy okolního prostředí.



Obrázek 10.5: Ukázka časového záznamu průjezdu vozidla při vyhodnocení rychlosti (a) před číslicovou filtrací (b) po číslicové filtraci.

V případě měření rychlosti kolejových vozidel respektive číslicové filtrace signálu bude nutné opět nalézt vhodné typy filtrů pro extrakci maxima signálů. Případně bude nutné se zaměřit na jiné vhodné markery pro stanovení rychlosti kolejových vozidel.

11 Závěr a přínosy práce

Optická vlákna se stala nenahraditelnou součástí celosvětových komunikačních tras díky jejich přenosovým kapacitám a vlastnostem. Aktuální využití je stále zaměřeno pro komunikační účely, ale pozorovat lze narůstající trend, kdy mnoho celosvětových institucí ať už výzkumných organizací nebo společností se zaměřuje na oblast využití optických vláken v sensorických aplikacích pro snímání různých fyzikálních veličin v dopravním provozu [158]. Základní motivací jsou výhody, které vláknově optické senzory nabízí - malá hmotnost a s tím související rozměry, vysoká citlivost, odolnost proti elektrostatickému a elektromagnetickému rušení a elektrická pasivita.

Z těchto důvodů vznikla i tato disertační práce, která popisuje návrh a využití vláknově optických senzorů v dopravních aplikacích. Diskutován a prakticky ověřen byl komplexní optovláknový systém využívající sériového nebo paralelního zapojení dvou interferometrických senzorů, který využívá časového posuvu blízkých signálů ze dvou interferometrů pro detekci a monitorování rychlosti automobilových a kolejových vozidel.

Naměřená data byla zpracována frekvenční analýzou, převedena do číslicového formátu a dále zpracována metodami číslicové filtrace. Toto zpracování umožnilo zlepšení poměru odstupů signálu od šumu a v případě sériového zapojení senzorů i vyhodnocení rychlosti vozidel. Publikované výsledky v této disertační práci potvrzují teoretické předpoklady o vhodnosti interferometrických měření a jejich časového zpracování pro detekci a měření rychlosti projíždějících vozidel. Měřicí systém je na základě dlouhodobých praktických měření rychlosti v reálném provozu charakterizován chybou v toleranci $\pm 3\text{km/h}$ udávané u úsekových měřicích systémů do rychlosti 100km/h v České republice. Tato chyba byla specifikována na základě měření časového intervalu průjezdů vozidel mezi dvěma laserovými závorami. Dále je charakterizován vysokou mírou schopnosti detekce díky dostatečnému odstupům signálu od šumového pozadí, která se pohybuje u automobilových vozidel na hodnotě až $98,92\%$, u kolejových vozidel na hodnotě 100% v závislosti na umístění senzoru od krajnice vozovky respektive kolejíště. Tímto byly splněny cíle disertační práce.

Hlavní přínos práce v případě monitorování kolejových vozidel spočívá v přímém monitorování interakcí vyvolaných hmotností fyzických těles, které jsou představovány pohyby kolejových vozidel. Tento nový způsob detekce a monitorování rychlosti kolejových vozidel je v reálných podmínkách téměř imunní vůči ovlivnění falešnými vlivy. S nástupem nových trakčních technologií do hnacích vozidel se objevují problémy s funkční spolehlivostí kvůli značnému zvýšení elektromagnetického rušení v těsné blízkosti moderních hnacích vozidel a rušení vlivem zpětných trakčních proudů, které se nesou kolejnicemi. Dalším současným problémem elektrických detekčních systémů, které tato práce řeší je malá odolnost proti ovlivnění, nebo proti poškození atmosférickým výbojem, respektive úderem

blesku do/nebo poblíž železničního zařízení. U zařízení s metalickým propojením se pak přes tyto elektricky vodivé okruhy uzavírají nežádoucí vodivé smyčky, které se proti nežádoucímu ovlivnění nebo poškození velmi obtížně ošetřují. Pomocí navrhovaného systému, který pracuje s optickými vlákny lze uvedené problémy eliminovat, protože optická vlákna jsou ze své podstaty dielektrikum.

V případě detekce a monitorování rychlosti automobilových vozidel se systém vyznačuje vůči velké většině stávajících senzorů nedestruktivní povahou vůči vozovce a jednoduchostí v oblasti implementace.

V obou výše uvedených případech lze využít možnosti napojení na stávající telekomunikační síť bez nutnosti využití dodatečných převodníků. Celý systém využívá klasická telekomunikační optická vlákna standardu G.652.D nebo G.653, která jsou základem dnešních telekomunikačních sítí.

V případě měření rychlosti u sériového zapojení je navržený koncept při stávající metodice a vyhodnocení dat limitován vlastnostmi použité číslicové filtrace, která umožňuje snížení vzdálenosti senzorů mezi sebou na hodnotu 2,77m. Limitovány jsou tak na minimum případy selhání měřicího systému, kdy jsou detekovány dvě vozidla nedodržující dostatečný odstup od sebe. Specifikováno je omezení z hlediska maximální měřitelné rychlosti a to 100km/h, které je dáno použitou číslicovou filtrací definující minimální interval 0,1s pro korektní rozlišení dvou maxim signálu od dvou sériově zapojených senzorů.

V případě měření rychlosti u paralelního zapojení se využívají dva samostatné měřicí kanály pro každou měřicí jednotku. Tento přístup umožňuje jednak snížení vzdálenosti senzorů (prakticky bylo ověřena hodnota 1m) a zároveň navýšit i měřicí rozsah rychlosti, protože signály jsou vyhodnoceny nezávisle na sobě.

Výsledky této práce poukazují i na dílčí aspekty ovlivňující citlivost měřicího systému, na které je nutno se v budoucím vývoji zaměřit. Je patrné, že charakter vibrací od dopravního provozu snímaný senzory je závislý na hmotnosti vozidel, rychlosti a způsobu jízdy vozidel, dále na směru pohybu vozidel, na zrychlování nebo brždění vozidel. Dalším neméně důležitým parametrem je i rovinnost jízdní dráhy, kvalita povrchu silniční vozovky, směrové a výškové vyrovnaní kolejové dráhy, způsob upevnění kolejnic případně skladba vrstev vozovky a řada dalších. Kromě výše uvedených vlivů má na citlivost měřicího systému vliv i složení prostředí na cestě od zdroje k měřicímu senzoru a zaznamenán byl i určitý vliv okolního prostředí, který lze účinně minimalizovat pomocí číslicové filtrace.

Pro detailnější analýzu a lepší pochopení problematiky vnějších vlivů jako je počasí a jiných vybraných parametrů byl navržen a instalován polygon pro získání dlouhodobých časových řad.

Z experimentů provedených v této disertační práci také plyne, že v případě měření kolejových souprav bude nutné snížit citlivost měřicího systému. Toho lze dosáhnout

analýzou a využitím jiných materiálů pro konstrukci senzoru včetně jiných typů uložení optických vláken s cílem najít kompromis mezi úspěšností detekce [%] a chybnou detekcí [%].

Cíle, věcná náplň a výsledky této práce korespondují a jsou využity ve třech aktuálně řešených projektech pod záštitou Ministerstva průmyslu a obchodu a Ministerstva Vnitra s cílem navýšit bezpečnost v automobilové a vlakové dopravě. Projekty jsou zaměřeny na detekci a signalizaci kolizních stavů pro zvýšení traťové dopravy a využití vláknově optických senzorů pro monitorování vybraných parametrů jako je detekce, rychlost, směr jízdy apod. v silničním a kolejovém provozu. Při finalizaci této práce bylo na uvedené téma získáno osvědčení na úrovni užitného vzoru (vzor číslo 30137) i patentové licence (patent číslo 306992).

Aktuálně se s kolejovými dopravci řeší možnost pilotního nasazení a dlouhodobé testování systému v praktických podmínkách zkušebního centra VUZ (Výzkumný Ústav Železniční) Velim, které disponuje vhodným zkušebním a technologickým zázemím.

Literatura

- [1] BORN, Max a Emil WOLF. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 6th ed. Pergamon, 1980. ISBN 978-0-08-026482-0.
- [2] BORN, Max a Emil WOLF. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 7th ed. New York: Cambridge University Press, 1999. ISBN 05-216-4222-1.
- [3] KIPNIS, Nahum. *History of the Principle of Interference of Light*. Basel: Birkhäuser Basel, 1991. ISBN 978-303-4886-529.
- [4] GUNDERSEN, P. Erik. *The handy physics answer book*. Detroit, MI: Visible Ink Press, 1999. ISBN 15-785-9058-2.
- [5] HECHT, Eugene. *Optics*. 3rd ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1998. ISBN 02-018-3887-7.
- [6] WOLF, Emil. *Introduction to the theory of coherence and polarization of light*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0521822114.
- [7] GHAFOURI-SHIRAZ, H. *Distributed feedback laser diodes and optical tunable filters*. Chichester: Wiley, 2003. ISBN 978-047-0856-185.
- [8] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 2008. ISBN 80-901-9362-5.
- [9] FAHY, Frank a David THOMPSON. *Fundamentals of Sound and Vibration*. 2nd ed. New York: CRC Press, 2015. ISBN 04-155-6210-4.
- [10] OHAYON, R. a Christian SOIZE. *Structural acoustics and vibration: mechanical models, variational formulations and discretization*. San Diego: Academic Press, 1998. ISBN 978-012-5249-454.
- [11] Bernat, Petr. *Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu* [online]. 2009 [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm.
- [12] FAHY, Frank a John WALKER. *Fundamentals of Noise and Vibration*. CRC Press, 1998. ISBN 978-0419227007.
- [13] RAO, Y. J. a D. A. JACKSON. Principles of Fiber-Optic Interferometry. In: *Optical Fiber Sensor Technology*. Boston: Springer, 2000, s. 167-191. DOI: 10.1007/978-1-4757-6081-1_5. ISBN 978-1-4419-4983-7.
- [14] UDD, Eric. a William B. SPILLMAN. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-12684-4.
- [15] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky*. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 80-858-6305-7.
- [16] LÓPEZ-HIGUERA, José Miguel. *Handbook of optical fibre sensing technology*. New York: Wiley, 2002. ISBN 04-718-2053-9.
- [17] GOODWIN, Eric G. a JAMES C. WYANT. *Field guide to interferometric optical testing*. Bellingham: SPIE, c2006. ISBN 978-081-9465-108.
- [18] WILSON, Jon S. *Sensor technology handbook*. Boston: Elsevier, c2005. ISBN 978-0750677295.

- [19] WANG, Lutang a Nian FANG. Applications of Fiber-Optic Interferometry Technology in Sensor Fields. *Optical Interferometry*. InTech, 2017. DOI: 10.5772/66276. ISBN 978-953-51-2955-4.
- [20] ANDERSSON, P. O., G. EDWALL, A. PERSSON a L. THYLÉN. Fiber Optic Mach-Zehnder Interferometer Based on Lithium Niobate Components. *Integrated Optics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985, s. 26-28. DOI: 10.1007/978-3-540-39452-5_7. ISBN 978-3-662-13571-6.
- [21] TOTANI, S. Development and current status of CACS (comprehensive automobile traffic control system). In: *30th IEEE Vehicular Technology Conference*. IEEE, 1980, s. 336-341. DOI: 10.1109/VTC.1980.1622831.
- [22] AOYAMA, K.-I. Universal traffic management system (UTMS) in Japan. In: *Proceedings of VNIS'94 - 1994 Vehicle Navigation and Information Systems Conference*. IEEE, 1994, s. 619-622. DOI: 10.1109/VNIS.1994.396778. ISBN 0-7803-2105-7.
- [23] DIEBOLD, John. *Transportation infrastructures: the development of intelligent transportation systems*. Westport, Conn.: Praeger, 1995. ISBN 978-0275951566.
- [24] GHOSH, Sumit a Tony S. LEE. *Intelligent transportation systems: smart and green infrastructure design*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2010. ISBN 14-398-3518-7.
- [25] LU, Xiao-Yun, Pravin VARAIYA, Roberto HOROWITZ, Zhaomiao GUO a Joe PALEN. Estimating Traffic Speed with Single Inductive Loop Event Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2012, 2308, s. 157-166. DOI: 10.3141/2308-17. ISSN 0361-1981.
- [26] CHERRETT, T., H. BELL a M. MCDONALD. Estimating vehicle speed using single inductive loop detectors. *Transport*. 2001, 147(1), s. 23-32. DOI: 10.1680/tran.147.1.23.40491. ISSN 0965-092x.
- [27] MARKEVICIUS, Vytautas, Dangirutis NAVIKAS, Mindaugas ZILYS, Darius ANDRIUKAITIS, Algimantas VALINEVICIUS a Mindaugas CEPENAS. Dynamic Vehicle Detection via the Use of Magnetic Field Sensors. *Sensors*. 2016, 16(1), s. 78-. DOI: 10.3390/s16010078. ISSN 1424-8220.
- [28] ZHENG, Pengjun a McDonad MIKE. An Investigation on the Manual Traffic Count Accuracy. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012, 43, s. 226-231. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.04.095. ISSN 18770428.
- [29] MCGOWEN, Patrick a Michael SANDERSON. Accuracy of Pneumatic Road Tube Counters. In: *Institute of Transportation Engineers (ITE). Western District Annual Meeting, 2011*. Institute of Transportation Engineers (ITE), 2011, s. 1-17. ISBN 01491364.
- [30] *Traffic Monitoring Guide*. New Jersey: U. S. Department of Transport, 2013.
- [31] GUIDO, Giuseppe, Vincenzo GALLELLI, Daniele ROGANO a Alessandro VITALE. Evaluating the accuracy of vehicle tracking data obtained from Unmanned Aerial Vehicles. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2016, 5(3), s. 136-151. DOI: 10.1016/j.ijtst.2016.12.001. ISSN 20460430.

- [32] XU, Dongyu, Shifeng HUANG, Qin LEI a Xin CHENG. Preparation, properties and application research of piezoelectric traffic sensors. *Procedia Engineering*. 2012, 27, s. 269-280. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.453. ISSN 18777058.
- [33] BHALLA, S. a S.K. DEB. A Cost-Effective Approach for Traffic Monitoring using Piezo-Transducers. *Experimental Techniques*. 2011, 35(5), s. 30-34. DOI: 10.1111/j.1747-1567.2010.00645.x. ISSN 07328818.
- [34] ZHANG, Wenbin, Chunguang SUO a Qi WANG. A Novel Sensor System for Measuring Wheel Loads of Vehicles on Highways. *Sensors*. 2008, 8(12), s. 7671-7689. DOI: 10.3390/s8127671. ISSN 1424-8220.
- [35] HEIDE, P., R. SCHUBERT, V. MAGORI a R. SCHWARTE. A high performance multisensor system for precise vehicle ground speed measurement. *Microwave Journal*. 1996, 1996, s. 22+.
- [36] NGUYEN, Van Cuong, Duy Khanh DINH, Van Anh LE a Van Duc NGUYEN. Length and speed detection using microwave motion sensor. In: *2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2014)*. IEEE, 2014. s. 371-376. DOI: 10.1109/ATC.2014.7043414. ISBN 978-1-4799-6956-2.
- [37] ZHANG, Di, Jiazhong HE, Van Anh LE a Van Duc NGUYEN. Super-resolution reconstruction of low-resolution vehicle plates: A comparative study and a new algorithm. In: *2014 7th International Congress on Image and Signal Processing*. IEEE, 2014. s. 359-364. DOI: 10.1109/CISP.2014.7003806. ISBN 978-1-4799-5835-1.
- [38] RAHIM, H. A., U. U. SHEIKH, R. B. AHMAD, A. S. M. ZAIN a W. N. F. W. ARIFFIN. Vehicle speed detection using frame differencing for smart surveillance system: A comparative study and a new algorithm. In: *10th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA 2010)*. IEEE, 2010. s. 630-633. DOI: 10.1109/ISSPA.2010.5605422. ISBN 978-1-4244-7165-2.
- [39] HSIEH, Cheng-You a Yu-Shuen WANG. Traffic situation visualization based on video composition. *Computers*. 2016, 54, s. 1-7. DOI: 10.1016/j.cag.2015.07.007. ISSN 00978493.
- [40] REDDY, G S Ajay Kumar, S. V. Jagadesh CHANDRA, B. Naresh Kumar REDDY, A. S. M. ZAIN a W. N. F. W. ARIFFIN. Developing the fabricated system of automatic vehicle identification using RFID based poultry traceability system: A comparative study and a new algorithm. In: *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*. IEEE, 2014. s. 1-6. DOI: 10.1109/ICICES.2014.7034186. ISBN 978-1-4799-3834-6.
- [41] SARBINI, M Adi M, Syed Bilal HASSAN, Tan Soon JIANN, PM Nazri PH AHMAD a W. N. F. W. ARIFFIN. Design of a RFID-based speed monitoring system for road vehicles in Brunei Darussalam: A comparative study and a new algorithm. In: *2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*. IEEE, 2014. s. 219-223. DOI: 10.1109/I4CT.2014.6914178. ISBN 978-1-4799-4555-9.
- [42] CHATTARAJ, A., S. BANSAL a A. CHANDRA. An intelligent traffic control system using RFID. *Computers*, 2016, 54, s. 1-7. DOI: 10.1109/MPOT.2009.932094. ISSN 00978493.
- [43] BARNWAL, Shubhranshu, Rohit BARNWAL, Rajesh HEGDE, Rita SINGH a Bhiksha RAJ. Doppler based speed estimation of vehicles using passive sensor: A comparative study and a

- new algorithm. In: *2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW)*. IEEE, 2013. s. 1-4. DOI: 10.1109/ICMEW.2013.6618278. ISBN 978-1-4799-1604-7.
- [44] CEVHER, V., R. CHELLAPPA a J.H. MCCLELLAN. Vehicle Speed Estimation Using Acoustic Wave Patterns. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(1). s. 30-47. DOI: 10.1109/TSP.2008.2005750. ISBN 10.1109/MPOT.2009.932094. ISSN 1053-587x.
- [45] PEREZ-GONZALEZ, F., R. LOPEZ-VALCARCE, C. MOSQUERA, Rita SINGH a Bhiksha RAJ. Road vehicle speed estimation from a two-microphone array: A comparative study and a new algorithm. In: *IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*. IEEE, 2002, II-1321-II-1324. DOI: 10.1109/ICASSP.2002.5744046. ISBN 0-7803-7402-9.
- [46] SOLOMAN, Sabrie. *Sensors handbook*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-007-1605-700.
- [47] FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 4th ed. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-6466-3.
- [48] MELLER, Scott A., Marten J. DE VRIES, Vivek ARYA, Richard O. CLAUS, Noel ZABARONICK, Pushkin KACHROO, Kaan OZBAY a Alan C. CHACHICH. Advances in optical fiber sensors for vehicle detection. In: *Proceedings of SPIE 3207*, 1998. s. 318-322. DOI: 10.1117/12.300853.
- [49] AI, Hong a Yuning ZHENG. Characterization of a Traffic Management System Using Pyroelectric Infrared Sensors. *Instrumentation Science and Technology*. 43 (3), 2015. s. 319-333. DOI: 10.1080/10739149.2014.1002040.
- [50] RIVAS-LOPEZ, Moises, Carlos A. GOMEZ-SANCHEZ, Javier RIVERA-CASTILLO, Oleg SERGIYENKO, Wendy FLORES-FUENTES, Julio C. RODRIGUEZ-QUINONEZ a Pedro MAYORGA-ORTIZ. Vehicle detection using an infrared light emitter and a photodiode as visualization system. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2015. s. 972-975. DOI: 10.1109/ISIE.2015.7281603.
- [51] IMAZU, K. a Y. MITA. Range-measurement-type optical vehicle detector. In: *Pacific Rim TransTech Conference. 1995 Vehicle Navigation and Information Systems Conference Proceedings. 6th International VNIS. A Ride into the Future*. IEEE, 1995, 2308, s. 48-53. DOI: 10.1109/VNIS.1995.518817. ISBN 0-7803-2587-7.
- [52] HILL, David. Distributed Acoustic Sensing (DAS): Theory and Applications. In: *Frontiers in Optics 2015*. Washington, D.C: OSA, 2015, 2308. DOI: 10.1364/FIO.2015.FTh4E.1. ISBN 978-1-943580-03-3.
- [53] DUCKWORTH, Gregory. Distributed Sensing Applications of Rayleigh Scattering in Fiber Optic Cables. In: *Imaging and Applied Optics*. Washington, D.C: OSA, 2013, 2308. DOI: 10.1364/AIO.2013.AM3B.3. ISBN 978-1-55752-975-6.
- [54] KUNZLER, Marley, Robert EDGAR, Eric UDD, et al. Fiber grating traffic monitoring systems. In: *Proc. SPIE 4696*, 2002. DOI: 10.1117/12.472559.
- [55] KUNZLER, Marley, Eric UDD, Tad TAYLOR a Wesley KUNZLER. Traffic monitoring using fiber optic grating sensors on the I-84 freeway and future uses in WIM. In: *Proceedings of SPIE 5278*, 2003. s. 122-127. DOI: 10.1117/12.544456.

- [56] HLAVAC, M. Distributed fiber optic sensing for traffic monitoring purposes. In: *Proceedings of SPIE 6619*, 2007. DOI: 10.1117/12.738666.
- [57] SUOAJAERVI, Pekka, Riku PENNALA, Mikko HEIKKINEN, et al. Fiber optic sensors for traffic monitoring applications. In: *Proc. SPIE 3325*, 1998. DOI: 10.1117/12.310611.
- [58] MALLA, Ramesh B., Amlan SEN a Norman W. GARRICK. A Special Fiber Optic Sensor for Measuring Wheel Loads of Vehicles on Highways, *Sensors*, 2008. 8 (4). s. 2551-2568. DOI: 10.3390/s8042551.
- [59] MELLER, Scott A., Noel ZABARONICK, I. GHOREISHIAN, J. ALLISON, Vivek ARYA, Marten J. DE VRIES, Richard O. CLAUS a Alan C. CHACHICH. Performance of fiber optic vehicle sensors for highway axle detection. in: *Proc. of SPIE 2902*, 1997. s. 168-174. DOI: 10.1117/12.267142.
- [60] WANG, Ying, Yan SUN, Jianping CHEN, Qifeng WU, Mudi XIONG, Sang Bae LEE, Ian H. WHITE a Rongxi HE. A new vehicle axle detector for roadways based on fiber optic Mach-Zehnder interferometer. In: *Proceedings of SPIE 6019*, 2005. DOI: 10.1117/12.634102. ISBN 10.1117/12.634102.
- [61] DONLAGIC, Denis, Daniele INAUDI, Eric UDD a Marjan HANC. Vehicle axle detector for roadways based on fiber optic interferometer. In: *Proceedings of SPIE 5050*, 2003. s. 317-321. DOI: 10.1117/12.484261.
- [62] DONLAGIC, D. a M. HANC. A simple fiber-optic vehicle axle detector for roadways. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 52 (2), s.401-405. DOI: 10.1109/TVT.2003.808754.
- [63] KRAUTER, K. G., G. F. JACOBSON, J. R. PATTERSON, J. H. NGUYEN a W. P. AMBROSE. Single-mode fiber, velocity interferomet. *Review of Scientific Instruments*, 2011. 82 (4). DOI: 10.1063/1.3574797.
- [64] FENG, Li Li, Yun Tao WANG, Chi RUAN a Sheng TAO. Road Vehicle Information Collection System Based on Distributed Fiber Optics Sensor. *Advanced Materials Research*. 2014, 1030-1032, s. 2105-2109. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1030-1032.2105. ISSN 1662-8985.
- [65] *Distributed optical fiber vehicle comprehensive information detecting system*. CN201498105 U Užitený vzor. Uděleno 2.6.2010.
- [66] *Road traffic monitoring system*. US20040067004 A1 Patent. Uděleno 8.4.2004.
- [67] *Novel optical fiber vehicle detector*. CN 200962255 Y Užitený vzor. Uděleno 17.10.2007.
- [68] *Optovláknový interferometrický senzor pro monitorování dopravního provozu*. 2015-30823 Užitený vzor. Uděleno 19.5.2015.
- [69] *Optovláknový interferometrický senzor pro monitorování dopravního provozu*. 2015-154 Patent. Uděleno 20.4.2016.
- [70] *Road vehicle running speed detecting method and device*. CN1641359 (A) Patent. Uděleno 20.7.2005.
- [71] KOUROUSSIS, Georges, Christophe CAUCHETEUR, Damien KINET, Georgios ALEXANDROU, Olivier VERLINDEN a Véronique MOEYAERT. Review of Trackside Monitoring Solutions: From Strain Gages to Optical Fibre Sensors. *Sensors*. 2015, 15(8), s. 20115-20139. DOI: 10.3390/s150820115. ISSN 1424-8220.

- [72] Final Report Summary - ACEM RAIL (Automated and cost effective maintenance for railway). *CORDIS*[online]. 2014 [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: http://cordis.europa.eu/result/rcn/141730_en.html.
- [73] Optical sensor technology – revolutionising train monitoring. *Railway Technology* [online]. 2017 [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/features/featureoptical-sensor-technology-revolutionising-train-monitoring-4192849/>.
- [74] TANG, Qing, Laksono KURNIANGGORO a Kang-Hyun JO. Statistical and geometrical features for LiDAR-based vehicle detection. In: *2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE, 2016, s. 192-197. DOI: 10.1109/SII.2016.7843997. ISBN 978-1-5090-3329-4.
- [75] MARSHALL, John. *A biographical dictionary of railway engineers*. North Pomfret, Vt.: David, 1978. ISBN 978-071-5374-894.
- [76] Microtrax Coded Track Circuits ESM-07-03. *ARTC - Extranet - Engineering* [online]. Australian Rail Track Corporation Limited, 2012 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: <https://extranet.artc.com.au/docs/eng/signal/procedures/maintenance/ESM-07-03.pdf>.
- [77] Dealing with a train accident or train evacuation. *RSSB* [online]. RSSB, 2015 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: <https://www.rssb.co.uk/rgs/rulebooks/GERT8000-M1%20Iss%203.pdf>.
- [78] NIELSEN, J. C. O. a A JOHANSSON. Out-of-round railway wheels-a literature survey. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2005, 214(2), s. 79-91. DOI: 10.1243/0954409001531351. ISSN 0954-4097.
- [79] JARDINE, Andrew K.S., Daming LIN a Dragan BANJEVIC. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006, 20(7), s. 1483-1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012. ISSN 08883270.
- [80] NGIGI, R W, C PISLARU, A BALL a F GU. Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics. In: *Journal of Physics: Conference Series*. 2012, 364, s. 012016-. DOI: 10.1088/1742-6596/364/1/012016. ISSN 1742-6596.
- [81] BARKE, D. a W. K. CHIU. Structural Health Monitoring in the Railway Industry: A Review. *Structural Health Monitoring: An International Journal*. 2016, 4(1), s. 81-93. DOI: 10.1177/1475921705049764. ISSN 1475-9217.
- [82] DONATO, Patricio G., Jesús UREÑA, Manuel MAZO, Carlos DE MARZIANI a Alberto OCHOA. Design and signal processing of a magnetic sensor array for train wheel detection. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2006, 132(2), s. 516-525. DOI: 10.1016/j.sna.2006.02.043. ISSN 09244247.
- [83] European Train Control System (ETCS). *Mobility Siemens* [online]. 2017 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/interurban-mobility/rail-solutions/rail-automation/train-control-system/european-train-protection-system/pages/european-train-control-system.aspx>.
- [84] Implementing the European Train Control System ETCS - Opportunities for European Rail Corridors. *International union of railways* [online]. International union of railways, 2003 [cit.

- 2017-10-19]. Dostupné z: http://uic.org/cdrom/2003/ertms_conference_2003/docs/etcs_report_1.pdf.
- [85] Measurement of the train profile. *Sensor Intelligence* [online]. Sensor Intelligence, 2017 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: <https://www.sick.com/de/en/industries/traffic/rail/solutions-for-traffic-safety-at-railways/measurement-of-the-train-profile/c/p329737>.
- [86] JWA, Y. a G. SONH. Kalman Filter Based Railway Tracking from Mobile Lidar Data. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015, II-3/W5, s. 159-164. DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-159-2015. ISSN 2194-9050.
- [87] LESLAR, Michael, Perry GORDON a Keith MCNEASE. Using mobile lidar to survey a railway line for asset inventory. In: *ASPRS 2010 Annual Conference*. San Diego, 2010.
- [88] ANDANI, Masood, Taheri a A. MOHAMMED a A. JAIN. Application of LIDAR technology for rail surface monitoring and quality indexing. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717727200>.
- [89] KLUG, Ferdinand, S. LACKNER a W. LIENTHART. Monitoring of Railway Deformations using Distributed Fiber Optic Sensors. In: *Joint International Symposium on Deformation Monitoring*. Vienna, 2016.
- [90] LÓPEZ-HIGUERA, José M., Julian D. C. JONES, Manuel LÓPEZ-AMO, et al. Distributed optical fiber sensors for integrated monitoring of railway infrastructures. In: *Proc. of SPIE 9157*. 2014, s. 91575W-. DOI: 10.1117/12.2059082.
- [91] YOON, Hyuk-Jin, Kwang-Yong SONG, Chanyong CHOI, Hee-Seoung NA a Jung-Seok KIM. Real-Time Distributed Strain Monitoring of a Railway Bridge during Train Passage by Using a Distributed Optical Fiber Sensor Based on Brillouin Optical Correlation Domain Analysis. *Journal of Sensors*. 2016, 2016, s. 1-10. DOI: 10.1155/2016/9137531. ISSN 1687-725x.
- [92] Distributed Train Control System. *Amit-Transportation* [online]. Amit, 2017 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: <https://www.amit-transportation.com/en/product/distributed-control-system/>.
- [93] PENG, Fei, Ning DUAN, Yun-Jiang RAO a Jin LI. Real-Time Position and Speed Monitoring of Trains Using Phase-Sensitive OTDR. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2014, 26(20), s. 2055-2057. DOI: 10.1109/LPT.2014.2346760. ISSN 1041-1135.
- [94] YOON, Hyuk-Jin, Kwang-Yong SONG, Jung-Seok KIM a Dae-Sang KIM. Longitudinal strain monitoring of rail using a distributed fiber sensor based on Brillouin optical correlation domain analysis. *NDT*. 2011, 44(7), s. 637-644. DOI: 10.1016/j.ndteint.2011.07.004. ISSN 09638695.
- [95] MINARDO, Aldo, Giuseppe PORCARO, Daniele GIANNETTA, Romeo BERNINI a Luigi ZENI. Real-time monitoring of railway traffic using slope-assisted Brillouin distributed sensors. *Applied Optics*. 2013, 52(16), s. 3770-3776. DOI: 10.1364/AO.52.003770. ISSN 0003-6935.
- [96] ZENI, Luigi, Aldo MINARDO, Giuseppe PORCARO, Daniele GIANNETTA a Romeo BERNINI. Monitoring railways with optical fibers. *SPIE Newsroom*. 2013. DOI: 10.1117/2.1201311.005246. ISSN 18182259.

- [97] TIMOFEEV, Andrey V. a Dmitry V. EGOROV. The Rail Traffic Management with Usage of C-OTDR Monitoring Systems. In: *ICCAR 2015 : 17th International Conference on Control, Automation and Robotics*. Zurich, 2015.
- [98] PAPP, Adam, Christoph WIESMEYR, Martin LITZENBERGER, Heinrich GARN a Walter KROPATSCH. Train Detection and Tracking in Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) Signals. In: *Pattern Recognition*. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 320-331. DOI: 10.1007/978-3-319-45886-1_26. ISBN 978-3-319-45885-4.
- [99] LÓPEZ-HIGUERA, José M., Julian D. C. JONES, Manuel LÓPEZ-AMO, et al. Field test for real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR). In: *OFS2014 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors*. 2014, s. 91577A-. DOI: 10.1117/12.2059188.
- [100] SOKOŁOWSKI, Kamil, Andrzej W. DOMANSKI, Tomasz R. WOLINSKI a Ryszard S. ROMANIUK. Intensity-based fiber optic bend sensor for potential railway application. In: *Proc. of SPIE 5484*. 2004, s. 417-420. DOI: 10.1117/12.568927.
- [101] CHOI, Sang-Jin, Young-Chon KIM, Minho SONG a Jae-Kyung PAN. A Self-Referencing Intensity-Based Fiber Optic Sensor with Multipoint Sensing Characteristics. *Sensors*. 2014, 14(7), s. 12803-12815. DOI: 10.3390/s140712803. ISSN 1424-8220.
- [102] BOWNESS, D., A. C. LOCK, W. POWRIE, J. A. PRIEST a D. J. RICHARDS. Monitoring the dynamic displacements of railway track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2016, 221(1), s. 13-22. DOI: 10.1243/0954409JRRT51. ISSN 0954-4097.
- [103] ROVERI, N., A. CARCATERRA a A. SESTIERI. Infrared Thermography Sensor for Temperature and Speed Measurement of Moving Material. *Sensors*. 2017, 17(5), 1157. DOI: 10.3390/s17051157. ISSN 1424-8220.
- [104] LAU, Siu. *System and process for monitoring railway tracks*. EP1582430 A1 Patent. Zapsáno 5.10.2005.
- [105] KRAMER, Dennis A. *Pressure sensor utilizing microbending of a fiber optic cable woven through a ladder shaped structure*. US5193129 A Patent. Zapsáno 27.3.1993.
- [106] RAILWAY MONITORING APPLICATIONS. *Polytec* [online]. Polytec, 2017 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Faseroptische_Sensorik/documents/PH_TFT_APPNOTE_-_Railway.pdf.
- [107] ROVERI, N., A. CARCATERRA a A. SESTIERI. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015, 60-61, s. 14-28. DOI: 10.1016/j.ymsp.2015.01.003. ISSN 08883270.
- [108] ROVERI, Nicola, Antonio CARCATERRA a Aldo SESTIERI. Real time monitoring and wear estimation of railway track with FBG sensors. In: *2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*. IEEE, 2014, s. 1-6. DOI: 10.1109/MESA.2014.6935619.
- [109] ROVERI, Nicola, Antonio CARCATERRA a Aldo SESTIERI. Remote condition monitoring of railway track using FBG sensors. In: *Proceedings of ISMA 2014 - International Conference on*

- Noise and Vibration Engineering and USD 2014 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics*. KU Leuven, 2014, s. 3527-3542. ISBN 9789073802919.
- [110] FILOGRANO, M. L., P. CORREDERA GUILLEN, A. RODRIGUEZ-BARRIOS, S. MARTIN-LOPEZ, M. RODRIGUEZ-PLAZA, Álvaro ANDRES-ALGUACIL a M. GONZALEZ-HERRAEZ. Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors. *IEEE Sensors Journal*. 2012, 12(1), s. 85-92. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2135848. ISSN 1530-437x.
- [111] WEI, Chuliang, LAI, Chuncheung, LIU, Shunyee, et al. Rail Expansion Devices Monitored by FBG sensors on an Urban Railway Viaduct. *Photonic Sensors*. 2014, vol. 4(2) s. 173–179. ISSN 1674-9251. DOI: 10.1007/s13320-014-0163-6.
- [112] WEI, Chuliang, LAI, Chuncheung, LIU, Shunyee, et al. A fiber Bragg grating sensor system for train axle counting. *IEEE Sensors Journal*. 2010, vol. 10(12) s. 1905–1912. ISSN 1530437X. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2049199.
- [113] ROVERI, Nicola, CARCATERRA, Antonio, SESTIERI, Aldo. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015, 60, s. 14–28. ISSN 08883270. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.01.003.
- [114] WOSCHITZ, Helmut. Development of a rail-strain-pad using FBG sensors. In: *5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*. Cancun, Quintana Roo, 2011, s. 1–10.
- [115] HWA YAW TAM, SIU LAU HO, MICHAEL SHUN YEE LIU. *Railway Monitoring System*. Patent, US20080019701 A1. Uděleno: 24.1.2008.
- [116] UDD, Eric. Fiber optic sensors for infrastructure applications. *Oregon State Library* [online]. 1998 [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: http://www.oregon.gov/ODOT/TD/TP_RES/ResearchReports/FiberOpticSensors.pdf.
- [117] CRAIL, Stephanie, REICHEL, D., et al. Strain monitoring of a newly developed precast concrete track for high speed railway traffic using embedded fiber-optic sensors. In: *Proc. of SPIE 4694*, 2002, 4694, s. 259–264. ISSN 0277786X. DOI: 10.1117/12.472627.
- [118] SIEMENS AG. *Rail contacting device in railway systems, particularly for axle counting devices*. Patent, DE3537588 A1. Uděleno: 23.4.1987.
- [119] BLEDDIN; ANTHONY G. *Contact fiber optic impact sensor*. Patent, US6144790 A. Uděleno: 7.11.2000.
- [120] LÓPEZ-PACHECO, M. G., SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, L. P., MOLINA-LOZANO, H. M. A method for environmental acoustic analysis improvement based on individual evaluation of common sources in urban areas. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469, s. 724–737. ISSN 00489697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.085.
- [121] CLARENCE, W. D. S. *Vibration: Fundamentals and Practice*. 2nd ed. CRC Press, 2006. ISBN 9780849319877.
- [122] PASCHOTTA, R. *Field Guide to Laser Pulse Generation*. SPIE Press, 2008. ISBN 9780819472489.
- [123] SMITH, S. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Elsevier, 2002. ISBN 978-0750674447.

- [124] MILNE, D. R., LE PEN, L. M., THOMPSON, D. J., POWRIE, W. Properties of train load frequencies and their applications. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 397, s. 123–140. ISSN 0022460X. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.03.006.
- [125] ZHANG, P., LI, H., JIA, L., JIN, M. Real-Time Vehicle Classification Based on Frequency Domain Energy Spectrum. In: *Proceedings of 2013 Chinese Intelligent Automation Conference*. 2013, s. 539–546. ISBN 978-3-642-38465-3. DOI: 10.1007/978-3-642-38466-0_60.
- [126] LI, R., JIA, L. On the layout of fixed urban traffic detectors: An application study. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2009, 1(2), s. 6–12. DOI: 10.1109/MITS.2009.933858.
- [127] WANG, Z., LIU, F. Automobile type of intelligent transportation systems based on genetic & BP algorithms. *Ind Control Comput*, 2007, 20(9), s. 77–79.
- [128] SU, D., WANG, L., MA, S. Vehicle detection method based on magnetoresistive sensors. *Comput Commun*, 2007, 3(25), s. 9–13.
- [129] JIA, L., DONG, H., The new traffic sensors, sensor networking optimization and data fusion of traffic state: final report. *Beijing Jiaotong University State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety*, 2009.
- [130] CUBIK, J., KEPAK, S., DORICAK, J., VASINEK, V., LINER, A., PAPES, M. Interferometric sensor based on the polarization-maintaining fibers. In: *18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. 2012, ISBN 978-081949481-8. DOI: 10.1117/12.2005893.
- [131] SIKORA, J., TURKIEWICZ, J., Sound Absorption Coefficients of Granular Materials. *Mechanics and Control*, 2010, 29(3), s. 149-157. ISSN 2300-7079.
- [132] ASHBY, M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. Pergamon Press, 2005. ISBN 0750661682.
- [133] CUBIK, J., KEPAK, S., DORICAK, J., VASINEK, V., et al. The usability analysis of different standard single-mode optical fibers and its installation methods for the interferometric measurements. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2013, 11(6), s. 535–542. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeec.v11i6.885.
- [134] KEPAK, S., CUBIK, J., DORICAK, J., VASINEK, V., LINER, A., SISKÁ, P., PAPES, M. The arms arrangement influence on the sensitivity of Mach-Zehnder fiber optic interferometer. In: *Optical Sensors 2013*. 2013, ISBN 978-081949576-1. DOI: 10.1117/12.2017305.
- [135] NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., et al. Analysis of the detection materials as resonant pads for attaching the measuring arm of the interferometer when sensing mechanical vibrations. In: *Optical Sensors 2017*. 2017, ISBN 978-151060963-1. DOI: 10.1117/12.2257321.
- [136] NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., et al. Impact of fixing materials on the frequency range and sensitivity of the fiber-optic interferometer. In: *Fiber Optic Sensors and Applications XIV 2017*. 2017, ISBN 978-151060917-4. DOI: 10.1117/12.2256717.
- [137] CUBIK, J., KEPAK, S., FAJKUS, M., et al. Fixing methods for the use of optical fibers in interferometric arrangements. In: *20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. 2016, ISBN 978-151060733-0. DOI: 10.1117/12.2257060.

- [138] FRENCH, A. P. In *Vino Veritas: A study of wineglass acoustics. American Journal of Physics*, 1982, 51(8), s. 688–694. DOI: 10.1119/1.13147.
- [139] NEDOMA, J., FAJKUS, M., BEDNAREK, L., VASINEK, V. Non-destructive fiber-optic sensor system for the measurement of speed in road traffic. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2016, 14(5), s. 602–608. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeec.v14i5.1857.
- [140] NEDOMA, J., FAJKUS, M., NOVAK, M., BEDNAREK, L., VASINEK, V. Frequency analysis of the new prototype of the security window sensor. In: *Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIII*. 2016, ISBN 978-151060392-9. DOI: 10.1117/12.2241241.
- [141] KEPÁK, S., CUBIK, J., ZAVODNÝ, P., HEJDUK, S., NEDOMA, J., DAVIDSON, A., VASINEK, V. Fibre optic portable rail vehicle detector. In: *20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. 2016, ISBN 978-151060733-0. DOI: 10.1117/12.2257061.
- [142] ZBORIL, O., NEDOMA, J., CUBIK, J., et al. Sensitivity distribution of a vibration sensor based on Mach-Zehnder interferometer designed inside the window system. In: *Optical Modelling and Design IV*. 2016, ISBN 978-151060134-5. DOI: 10.1117/12.2239548.
- [143] NEDOMA, J., ZBORIL, O., FAJKUS, M., et al. Fiber optic system design for vehicle detection and analysis. In: *Optical Modelling and Design IV*. 2016, ISBN 978-151060134-5. DOI: 10.1117/12.2239549.
- [144] NEDOMA, J., ZBORIL, O., FAJKUS, M., et al. Fiber optic interferometer as a security element. In: *Optical Sensing and Detection IV*. 2016, ISBN 978-151060144-4. DOI: 10.1117/12.2231089.
- [145] NEDOMA, J., FAJKUS, M., VASINEK, V. Influence of PDMS encapsulation on the sensitivity and frequency range of fiber-optic interferometer. In: *Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIII*. 2016, ISBN 978-151060392-9. DOI: 10.1117/12.2243170.
- [146] FAJKUS, M., NEDOMA, J., SISKÁ, P., BENAREK, L., ZABKA, S., VASINEK, V. Perimeter system based on a combination of a Mach-Zehnder interferometer and the bragg gratings. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2016, 14(3), s. 318–314. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeec.v14i3.1752.
- [147] VAŠINEK, Vladimír, Jakub ČUBÍK, Stanislav KEPÁK a Jan NEDOMA. *Optovláknový interferometrický monitor provozu*. 071/14-12-2015_F Funkční vzorek. Uděleno 2015.
- [148] VAŠINEK, Vladimír, Jakub ČUBÍK, Stanislav KEPÁK, Jan NEDOMA a Petr ZÁVODNÝ. *Model senzoru optovláknového interferometrického monitoru provozu*. Model. Uděleno 2016.
- [149] VAŠINEK, Vladimír, Petr ZÁVODNÝ, Jakub ČUBÍK, Jan NEDOMA a Stanislav KEPÁK. *Aplikace pro sběr a zpracování naměřených dat*. 043/14-12-2015_SW Software. 2015.
- [150] NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., MEC, P., NOVAK, M., JARGUS, J., VASINEK, V. Fiber-optic sensor for monitoring a density of road traffic. In: *Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV*. 2017, ISBN 978-151060392-9. DOI: 10.1117/12.2276560.

- [151] Elektro v praxi díl 4 doprava. [online]. 2017 [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: http://www.solidteam.cz/nabidka/dil_4_doprava.html.
- [152] VAŠINEK, Vladimír, Jan NEDOMA, Jakub ČUBÍK, Stanislav KEPÁK, Petr ZÁVODNÝ, Radek MARTINEK, Petr ŠIŠKA a Marcel FAJKUS. *Nedestruktivní systém pro měření rychlosti v dopravním provozu*. 2016-32601 Užitený vzor. Uděleno 21.12.2016.
- [153] VAŠINEK, Vladimír, Jan NEDOMA, Jakub ČUBÍK, Stanislav KEPÁK, Petr ZÁVODNÝ, Radek MARTINEK, Petr ŠIŠKA a Marcel FAJKUS. *Způsob měření rychlosti v dopravním provozu a nedestruktivní systém pro provádění tohoto způsobu*. 306992, Patent. Uděleno 20.9.2017.
- [154] NAJIM, Mohamed a Eric GRIVEL. Structures of FIR and IIR Filters. *Digital Filters Design for Signal and Image Processing*. London, UK: ISTE, 2006, s. 191-232. DOI: 10.1002/9780470612064.ch7. ISBN 9780470612064.
- [155] ALESSIO, Silvia Maria. IIR Filter Design. *Digital Signal Processing and Spectral Analysis for Scientists*. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 263-367. Signals and Communication Technology. DOI: 10.1007/978-3-319-25468-5_8. ISBN 978-3-319-25466-1.
- [156] REGALIA, Phillip A. *Adaptive IIR filtering in signal processing and control*. New York: M. Dekker, 1995. ISBN 978-0824792893.
- [157] THEDE, Les. *Practical analog and digital filter design*. Boston: Artech House, 2005. ISBN 978-1580539159.
- [158] Optical-fibre sensing technology offers double railway monitoring. *South China Morning Post* [online]. 2017 [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: <http://www.scmp.com/presented/news/topics/polyu-innovating-better-world/article/2065348/optical-fibre-sensing-technology>.

Publikační činnost

Kategorie (indexace Scopus, Web of Science)	Počet
Celkový počet indexovaných nebo přijatých publikací	76
z toho časopisecké výstupy	16
z toho impaktované výstupy	4
z toho impaktované výstupy v Q1 kvartilu	3
z toho konferenční výstupy	60
Celkový počet aplikovaných výstupů	9
z toho platné patenty	3
z toho platné užité vzory	6
Publikace v recenzním řízení	17
Patenty v recenzním řízení	2

Publikace související s disertační prací:

Kategorie (indexace Scopus, Web of Science)	Počet
Celkový počet indexovaných nebo přijatých publikací	12
z toho časopisecké výstupy	2
z toho impaktované výstupy	0
z toho impaktované výstupy v Q1 kvartilu	0
z toho konferenční výstupy	10
Celkový počet aplikovaných výstupů	5
z toho platné patenty	1
z toho platné užité vzory	1
z toho software	1
z toho prototyp, funkční vzorek, model	2

1. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., ZBORIL, O., BEDNAREK, L., NOVAK, M., WITAS, K., VASINEK, V. Analysis of the detection materials as resonant pads for attaching the measuring arm of the interferometer when sensing mechanical vibrations. In: Optical Sensors 2017. 2017, ISBN 978-151060963-1. DOI: 10.1117/12.2257321.
2. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., BEDNAREK, L., ZABKA, S., HRUBY, D., JAROS, J., VASINEK, V. Impact of fixing materials on the frequency range and sensitivity of the fiber-optic interferometer. In: Fiber Optic Sensors and Applications XIV 2017. 2017, ISBN 978-151060917-4. DOI: 10.1117/12.2256717.
3. NEDOMA, J., FAJKUS, M., BEDNAREK, L., VASINEK, V. Non-destructive fiber-optic sensor system for the measurement of speed in road traffic. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2016, 14(5), s. 602–608. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeec.v14i5.1857.

4. NEDOMA, J., ZBORIL, O., FAJKUS, M., ZAVONDY, P., KEPAK, S., BEDNAREK, L., MARTINEK, R., VASINEK, V. Fiber optic system design for vehicle detection and analysis. In: Optical Modelling and Design IV. 2016, ISBN 978-151060134-5. DOI: 10.1117/12.2239549.
5. NEDOMA, J., ZBORIL, O., FAJKUS, M., et al. Fiber optic interferometer as a security element. In: Optical Sensing and Detection IV. 2016, ISBN 978-151060144-4. DOI: 10.1117/12.2231089.
6. NEDOMA, J., FAJKUS, M., VASINEK, V. Influence of PDMS encapsulation on the sensitivity and frequency range of fiber-optic interferometer. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIII. 2016, ISBN 978-151060392-9. DOI: 10.1117/12.2243170.
7. NEDOMA, J., FAJKUS, M., NOVAK, M., BEDNAREK, L., VASINEK, V. Frequency analysis of the new prototype of the security window sensor. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIII. 2016, ISBN 978-151060392-9. DOI: 10.1117/12.2241241.
8. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., MEC, P., NOVAK, M., JARGUS, J., VASINEK, V. Fiber-optic sensor for monitoring a density of road traffic. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV. 2017, ISBN 978-151060392-9. DOI: 10.1117/12.2276560.
9. CUBIK, J., KEPAK, S., FAJKUS, M., ZBORIL, O., NEDOMA, J., DAVIDOSN, A., VASINEK, V. Fixing methods for the use of optical fibers in interferometric arrangements. In: 20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics. 2016, ISBN 978-151060733-0. DOI: 10.1117/12.2257060.
10. KEPAK, S., CUBIK, J., ZAVODNY, P., HEJDUK, S., NEDOMA, J. DAVIDSON, A., VASINEK, V. Fibre optic portable rail vehicle detector. In: 20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics. 2016, ISBN 978-151060733-0. DOI: 10.1117/12.2257061.
11. ZBORIL, O., NEDOMA, J., CUBIK, J., NOVAK, M., BEDNAREK, L., FAJKUS, M., VASINEK, V. Sensitivity distribution of a vibration sensor based on Mach-Zehnder interferometer designed inside the window system. In: Optical Modelling and Design IV. 2016, ISBN 978-151060134-5. DOI: 10.1117/12.2239548
12. FAJKUS, M., NEDOMA, J., SSKA, P., BENAREK, L., ZABKA, S., VASINEK, V. Perimeter system based on a combination of a Mach-Zehnder interferometer and the bragg gratings. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2016, 14(3), s. 318–314. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeee.v14i3.1752.

Aplikované výstupy související s disertační prací:

1. VAŠINEK, V., J. NEDOMA, J. ČUBÍK, S. KEPÁK, P. ZÁVODNÝ, R. MARTINEK, P. ŠIŠKA a M. FAJKUS. Způsob měření rychlosti v dopravním provozu a nedestruktivní systém pro provádění tohoto způsobu. 306992, Patent. Uděleno: 20.9.2017.
2. VAŠINEK, V., J. NEDOMA, J. ČUBÍK, S. KEPÁK, P. ZÁVODNÝ, R. MARTINEK, P. ŠIŠKA a M. FAJKUS. Nedestruktivní systém pro měření rychlosti v dopravním provozu. 2016-32601 Užitený vzor. Uděleno: 21.12.2016.
3. VAŠINEK, V., J. ČUBÍK, S. KEPÁK a J. NEDOMA. Optovláknový interferometrický monitor provozu. 071/14-12-2015_F Funkční vzorek. Uděleno: 2015.
4. VAŠINEK, V., J. ČUBÍK, S. KEPÁK, J. NEDOMA a P. ZÁVODNÝ. Model senzoru optovláknového interferometrického monitoru provozu. Model. Uděleno: 2016.
5. VAŠINEK, V., P. ZÁVODNÝ, J. ČUBÍK, J. NEDOMA a S. KEPÁK. Aplikace pro sběr a zpracování naměřených dat. 043/14-12-2015_SW Software. Uděleno: 2015.

Publikace nesouvisející s disertační prací:

1. FAJKUS, M., NEDOMA, J., MARTINEK, R., VASINEK, V., NAZERAN, H., SISKA, P. A non-invasive multichannel hybrid fiber-optic sensor system for vital sign monitoring. *Sensors*, 2016, 17(1), ISSN 14248220. DOI: 10.3390/s17010111, IF:2.677 (Q1)
 2. MARTINEK, R., NEDOMA, J., FAJKUS, M., KAHANKOVA, R., KONECNY, J., JANKU, P., KEPAK, S., BILIK, P., NAZERAN, H. A phonocardiographic-based fiber-optic sensor and adaptive filtering system for noninvasive continuous fetal heart rate monitoring. *Sensors*, 2016, 17(1), ISSN 14248220. DOI: 10.3390/s17040890, IF:2.677 (Q1)
 3. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., NAZERAN, H., KONECNY, J., JEZEWSKI, J., JANKU, P., BILIK, P., ZIDEK, J., NEDOMA, J., FAJKUS, M. Non-invasive fetal monitoring: A maternal surface ECG electrode placement-based novel approach for optimization of adaptive filter control parameters using the LMS and RLS algorithms. *Sensors*, 2017, 17(5), ISSN 14248220. DOI: 10.3390/s17051154, IF:2.677 (Q1)
 4. NEDOMA, J., FAJKUS, M., KEPAK, S., CUBIK, J., KAHANKOVA, R., JANKU, P., VASINEK, V., NAZERAN, H., MARTINEK, R. Noninvasive fetal heart rate monitoring: Validation of phonocardiography-based fiber-optic sensing and adaptive filtering using the nlms algorithm. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2017, 15(3), s. 544-552. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeee.v15i3.2195.
 5. KAHANKOVA, R., JEZEWSKI, J., NEDOMA, J., JEZEWSKI, P., FAJKUS, M., KAWALA-JANIK, A., WEN, H., MARTINEK, R. The influence of gestation age on the performance of adaptive algorithms used for fetal ecg signal extraction. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2017, 15(3), s. 491-501. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeee.v15i3.2207.
-

6. NEDOMA, J., FAJKUS, M., NOVAK, M., STRBIKOVA, N., VASINEK, V., NAZERAN, H., VANUS, J., PERECAR, F., MARTINEK, R. Validation of a novel fiber-optic sensor system for monitoring cardiorespiratory activities during mri examinations. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2017, 15(3), s. 536-543. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeec.v15i3.2194.
 7. NEDOMA, J., FAJKUS, M., SISKA, P., MARTINEK, R., VASINEK, V. Non-invasive fiber optic probe encapsulated into PolyDiMethylSiloxane for measuring respiratory and heart rate of the human body. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2017, 15(1), s. 93-100. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeec.v15i1.1923.
 8. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., VASINEK, V. Non-invasive fiber-optic biomedical sensor for basic vital sign monitoring. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2017, 15(2), s. 336-342. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeec.v15i2.2131.
 9. FAJKUS, M., NEDOMA, J., BEDNAREK, L., FRNDA, J., VASINEK, V. Analysis of the applicability of singlemode optical fibers for measurement of deformation with distributed systems BOTDR. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2017, 14(4Special), s. 453-459. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeec.v14i4.1785.
 10. NEDOMA, J., FAJKUS, M., BEDNAREK, L., FRNDA, J., ZAVADIL, J., VASINEK, V. Encapsulation of FBG sensor into the PDMS and its effect on spectral and temperature characteristics. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2017, 14(4Special), s. 460-466. ISSN 13361376. DOI: 10.15598/aeec.v14i4.1786.
 11. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., NEDOMA, J., FAJKUS, M., NAZERAN, H. NOWAKOVA, J. Adaptive Signal Processing of Fetal PCG Recorded by Interferometric Sensor. In: 4th Euro-China Conference on Intelligent Data Analysis and Applications, ECC 2017, 2017, ISBN 978-331968526-7. DOI: 10.1007/978-3-319-68527-4_26.
 12. FAJKUS, M., NEDOMA, J., BEDNAREK, L., VASINEK, V., MARTINEK, R., BILIK, P., VANUS, J. Analysis usability of the energetically passive sensors for the load monitoring of production press machines. In: 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, ISBN 978-805533195-9. "
 13. MARTINEK, R., BILIK, P., VANUS, J., KOVAL, L., KAHANKOVA, R., FAJKUS, M., NEDOMA, J. Optimization of adaptive filter control parameters for shunt active power filter. In: 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, ISBN 978-805533195-9.
 14. MARTINEK, R., BILIK, P., VANUS, J., KOVAL, L., KAHANKOVA, R., FAJKUS, M., NEDOMA, J. The effect of the forgetting factor and filter length on the RLS adaptive control algorithm in shunt active power filter. In: 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, ISBN 978-805533195-9.
 15. FAJKUS, M., NEDOMA, J., KEPAK, S., VASINEK, V., MARTINEK, R., BILIK, P., VANUS, J. Energetically passive fiber-optic sensor system for the security windows of the buildings. In: 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, ISBN 978-805533195-9.
-

16. VANUJ, J., MACHAC, J., MARTINEK, R., BILIK, P., KOVAL, L., ZIDEK, J., FAJKUS, M., NEDOMA, J. Use of the software PI system within the concept of smart cities. In: 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, ISBN 978-805533195-9.
 17. VANUJ, J., SYKORA, J., MARTINEK, R., BILIK, P., KOVAL, L., ZIDEK, J., FAJKUS, M., NEDOMA, J. Design of an application for the monitoring and visualization of technological processes with pi system in an intelligent building for mobile devices. In: 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, ISBN 978-805533195-9.
 18. FAJKUS, M., NEDOMA, J., MARTINEK, R., WALENDZIUK, W. Comparison of the FBG sensor encapsulated into PDMS and FBG sensor glued on the plexiglass pad for respiratory and heart rate monitoring. In: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, ISBN 978-151061354-6, DOI: 10.1117/12.2280778
 19. NOVAK, M., NEDOMA, J., FAJKUS, M., JARGUS, J., VASINEK, V. Analysis of optical properties of special fibers of polydimethylsiloxane (PDMS) depending on the different methods of mixing PDMS and curing agent. In: Micro-Structured and Specialty Optical Fibres V, 2017, ISBN 978-151060965-5, DOI: 10.1117/12.2257064
 20. JARGUS, J., NEDOMA, J., FAJKUS, M., NOVAK, M., VASINEK, V. Study combination of luminophore and polydimethylsiloxane for alternative option of passive energy lighting. In: Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications IV, 2017, ISBN 978-151060919-8, DOI: 10.1117/12.2263559
 21. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., JARGUS, J., WITAS, K., VASINEK, V. Analysis of the impact of the deposition optical fibers on the deformation measurement with a distributed system BOTDR. In: Optical Sensors, 2017, ISBN 978-151060963-1, DOI: 10.1117/12.2257065
 22. JARGUS, J., NEDOMA, J., FAJKUS, M., NOVAK, M., BEDNAREK, L., VASINEK, V. Measurement of spectral characteristics and CCT mixture of PDMS and the luminophore depending on the geometric parameters and the concentration of the samples of the special optical fibers. In: Micro-Structured and Specialty Optical Fibres V, 2017, ISBN 978-151060965-5, DOI: 10.1117/12.2256833
 23. FAJKUS, M., NEDOMA, J., MARTINEK, R., NOVAK, M., JARGUS, J., VASINEK, V. Fiber optic sensor encapsulated in polydimethylsiloxane for heart rate monitoring. In: Fiber Optic Sensors and Applications XIV, 2017, ISBN 978-151060917-4, DOI: 10.1117/12.2256718
 24. JAROS, J., HRUBY, D., VASINEK, V., PERECAR, F., FAJKUS, M., NEDOMA, J., KAJNAR, T. Various optical fibers fixing methods for mechanical stress measurements. In: Fiber Optic Sensors and Applications XIV, 2017, ISBN 978-151060917-4, DOI: 10.1117/12.2262471
-

25. FAJKUS, M., NEDOMA, J., MARTINEK, R., NOVAK, M., JARGUS, J., VASINEK, V. Analysis encapsulation of fiber Bragg gratings into polydimethylsiloxane for the needs of dynamic weighing. In: *Optical Sensors*, 2017, ISBN 978-151060963-1, DOI: 10.1117/12.2260449
 26. FAJKUS, M., NEDOMA, J., MARTINEK, R., BEDNAREK, L., JAROS, J., HRUBY, D., PERECAR, F., VASINEK, V. Analysis of the impact of the deposition optical fibers on the deformation measurement with a distributed system BOTDR. In: *Fiber Optic Sensors and Applications XIV*, 2017, ISBN 978-151060917-4, DOI: 10.1117/12.2256720
 27. PERECAR, F., BEDNAREK, L., HAJEK, L., JAROS, J., FAJKUS, M., VANDERKA, A., NEDOMA, J., VASINEK, V. The influence of temperature loading on the optical fiber passive components. In: *Fiber Optic Sensors and Applications XIV*, 2017, ISBN 978-151060917-4, DOI: 10.1117/12.2262425
 28. HRUBY, D., KAJNAR, T., KEPAK, S., JAROS, J., NEDOMA, J., FAJKUS, M., PERECAR, F., VASINEK, V. Masonry moisture measurement using the distributed temperature sensing system. In: *Fiber Optic Sensors and Applications XIV*, 2017, ISBN 978-151060917-4, DOI: 10.1117/12.2262511
 29. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., NOVAK, M., ZBORIL, O., JARGUS, J., WITAS, K., PERECAR, F., VASINEK, V. Influence of different encapsulation types and shapes of polydimethylsiloxane on the temperature sensitivity of the FBG. In: *Fiber Optic Sensors and Applications XIV*, 2017, ISBN 978-151060917-4, DOI: 10.1117/12.2256716
 30. FAJKUS, M., NEDOMA, J., SISKÁ, P., VASINEK, V. FBG sensor of breathing encapsulated into polydimethylsiloxane. In: *Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIII*, 2016, ISBN 978-151060392-9, DOI: 10.1117/12.2241663
 31. BEDNAREK, L., HAJEL, L., VANDERKA, A., NEDOMA, J., FAJKUS, M., ZBORIL, O., VASINEK, V. The influence of thermal aging on the optical coupler. In: *Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications X*, 2016, ISBN 978-151060307-3, DOI: 10.1117/12.2236294
 32. BEDNAREK, L., POBORIL, R., VANDERKA, A., HAJEK, L., NEDOMA, J., VASINEK, V. Influence of load by high power on the optical coupler. In: *20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*, 2016, ISBN 978-151060733-0, DOI: 10.1117/12.2256824
 33. FAJKUS, M., NEDOMA, J., KEPAK, S., JAROS, J., CUBIK, J., ZBORIL, O., NOVAK, M., VASINEK, V. Effect of the geometric deformations on the Brillouin scattering in the standard single-mode optical fiber. In: *Optical Modelling and Design IV*, 2016, ISBN 978-151060134-5, DOI: 10.1117/12.2239550
 34. FAJKUS, M., NEDOMA, J., KEPAK, S., RAPANT, L., MARTINEK, R., BEDNAREK, L., NOVAK, M., VASINEK, V. Mathematical model of optimized design of multi-point sensoric measurement with Bragg gratings using wavelength division multiplex. In: *Optical Modelling and Design IV*, 2016, ISBN 978-151060134-5, DOI: 10.1117/12.2239551
-

35. BEDNAREK, L., MARCINKA, O., PERECAR, F., PAPES, M., HAJEK, L., NEDOMA, J., VASINEK, V. The ageing process of optical couplers by gamma irradiation. In: Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications IX, 2015, ISBN 978-162841752-4, DOI: 10.1117/12.2187044
 36. FAJKUS, M., NEDOMA, J., MARTINEK, R., ZAVADIL, J., VASINEK, V. Fetal Heart Rate Processing Based on Adaptive Least Mean Squared Algorithm. In: 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2017, Publikace přijata.
 37. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., KEPAK, S., CUBIK, J., ZABKA, S., VASINEK, V. Comparison of BCG, PCG and ECG Signals in Application of Heart Rate Monitoring of the Human Body. In: 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2017, Publikace přijata.
 38. NEDOMA, J., MARTINEK, R., KOUDELKA, P., VANUS, J., KONECNY, J., FAJKUS, M., KAHANKOVA, R. The Effect of Matched Filtering with Programmable Root Raised Cosine Filter on Error Vector Magnitude of M-QAM Broadband over Visible Light. In: 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2017, Publikace přijata.
 39. VANUS, J., BELESOVA, J., MARTINEK, R., NEDOMA, J., FAJKUS, M., BILIK, P., ZIDEK, J. MONITORING OF THE DAILY LIVING ACTIVITIES IN SMART HOME CARE. Human-centric Computing and Information Sciences, 2017, SJR 2016: 0.615, Publikace přijata.
 40. PERECAR, F., LATAL, J., BEDNAREK, L., HAJEK, L., HRUBY, D., VASINEK, V., NEDOMA, J., JAROS, J. The behavior of the geometrical parameters of optical beam of optical passive components under the long time thermal load. In: Photonics Prague, 2017, Publikace přijata.
 41. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R. Measurement of electric current using optical fibers: A Review. Przegląd Elektrotechniczny, 2017, DOI:10.15199/48.2017.11.30, Publikace přijata.
 42. MARTINEK, R., NEDOMA, J., FAJKUS, M., KAHANKOVA, R. Fiber-optic Bragg sensors for the rail applications. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2017, Publikace přijata.
 43. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., BILIK, P., NEDOMA, J., FAJKUS, M. Speech Signal Processing using Microphones NI 9234 and LabVIEW. In: 7th International Conference on Intelligent Computing and Applications, 2018, Publikace přijata.
 44. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., NEDOMA, J., FAJKUS, M. Comparison of the LMS, NLMS, RLS, and QR-RLS algorithms for vehicle noise suppression. In: 7th International Conference on Intelligent Computing and Applications, 2018, Publikace přijata.
 45. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., NEDOMA, J., FAJKUS, M. Fetal ECG Preprocessing Using Wavelet Transform. In: 7th International Conference on Intelligent Computing and Applications, 2018, Publikace přijata.
-

46. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., BILIK, P., NEDOMA, J., FAJKUS, M. Speech Quality Assessment Based on Virtual Instrumentation. In: 7th International Conference on Intelligent Computing and Applications, 2018, Publikace přijata.
 47. FAJKUS, M., NEDOMA, J., KEPAK, S., CUBIK, J., JARGUS, J., ZBORIL, O., MARTINEK, R., VASINEK, V. Fiber optic sensor system for entrance areas monitoring. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2278222
 48. FAJKUS, M., NEDOMA, J., MEC, P., CUBIK, J., KEPAK, S., JARGUS, J., NOVAK, M., MARTINEK, R., VASINEK, V. Bragg grating sensors for the monitoring load of production press machines. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2278223
 49. FAJKUS, M., NEDOMA, J., MEC, P., NOVAK, M., KAJNAR, T., MARTINEK, R., JAROS, J., HRUBY, D., VASINEK, V. Monitoring of the structural loads of tunnels using a distributed optical system BOTDR. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2278226
 50. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., CUBIK, J., KEPAK, S., VANUS, J., ZBORIL, O., VASINEK, V. Analysis of the influence location of the fiber optic sensor on the measurement and determination the heart rate of the human body. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2276702
 51. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., KEPAK, S., CUBIK, J., VASINEK, V. Characterization and visual illustration of the consequences motion of human body for the determination of heart rate. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2276768
 52. ZBORIL, O., CUBIK, J., KEPAK, S., NEDOMA, J., FAJKUS, M., ZAVODNY, P., VASINEK, V. Noninvasive encapsulated fiber optic probes for interferometric measurement. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2277923
 53. JARGUS, J., NEDOMA, J., FAJKUS, M., NOVAK, M., CUBIK, J., CVEJN, D., VASINEK, V. Device for the alternative option of temperature measurement. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2277928
 54. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., VASINEK, V. Analysis of non-invasive FBG sensor for monitoring patient vital signs during MRI. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2277399
 55. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., JARGUS, J., ZBORIL, O., VASINEK, V. Analysis of the use of fiber optic technology for the monitoring heart rate of the pregnant and fetus. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2276616
-

56. NEDOMA, J., FAJKUS, M., MARTINEK, R., MEC, P., NOVAK, M., BEDNAREK, L., VASINEK, V. Fiber optic sensor based on Mach-Zehnder interferometer for securing entrance areas of buildings. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2277108
57. FAJKUS, M., NEDOMA, J., MARTINEK, R., VASINEK, V. Processing of fetal heart rate through non-invasive adaptive system based on recursive least squares algorithm. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2278231
58. NOVAK, M., NEDOMA, J., JARGUS, J., BEDNAREK, L., CVEJN, D., VASINEK, V. The methodology of preparing the end faces of cylindrical waveguide of polydimethylsiloxane. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2277527
59. ZBORIL, O., CUBIK, J., NEDOMA, J., FAJKUS, M., NOVAK, M., JARGUS, J., STRATIL, T., VASINEK, V. Analysis of creating an innovative micro-lens made of polydimethylsiloxane polymer on the end of the optical fibers. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2277927
60. FAJKUS, M., NEDOMA, J., NOVAK, M., MARTINEK, R., VANUS, J., MEC, P., VASINEK, V. Monitoring system of hydraulic lifting device based on the fiber optic sensors. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2278229
61. JARGUS, J., NEDOMA, J., FAJKUS, M., NOVAK, M., MEC, P., CVEJN, D., BUJDOS, D., VASINEK, V. Analyzing of using PDMS polymer as the sensors of the pressure or weight. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2277544.
62. CUBIK, J., KEPAK, S., NEDOMA, J., FAJKUS, M., ZBORIL, O., NOVAK, M., JARGUS, J., VASINEK, V. Fiber optic perimeter system for security in smart city. In: Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIV, 2017, DOI: 10.1117/12.2278148
63. FAJKUS, M., NEDOMA, J., MEC, P., HRUBESOVA, E., MARTINEK, R., VASINEK, V. Analysis of the highway tunnels monitoring using an optical fiber implemented into primary lining. Journal of Electrical Engineering, 2017, 68(5), ISSN 1335-3632. DOI: 10.1515/jee-2017-0068. IF: 0.483.
64. TOMIS, M., MARTINEK, R., KOUDELKA, P., MICHALEK, L., DVORSKY, M., KAHANKOVA, R., ZIDEK, J., NEDOMA, J., FAJKUS, M. A Novel Non-Stationary Multipath Fading Channel Model Based on Propagation Measurements Using SDR and FPGA. In: 7th International Conference on Intelligent Computing and Applications, 2018, Publikace přijata.

Aplikované výstupy nesouvisející s disertační prací:

1. VAŠINEK, V., J. NEDOMA, J. ZBOŘIL, O. a T. KAJNAR. Optovláknový a dotykový senzor pro zabezpečení vybraných prostor. 305969, Patent. Uděleno: 13.4.2016.
2. VAŠINEK, V., J. NEDOMA, J. FAJKUS, M. a R. MARTINEK. Optovláknový měřicí systém pro monitorování vitálních funkcí lidského těla. 306857, Patent. Uděleno: 28.6.2017.
3. VAŠINEK, V., J. NEDOMA, J. FAJKUS, M. a R. MARTINEK. Zařízení pro monitorování základních vitálních funkcí lidského těla. 29832, Užitený vzor. Uděleno: 27.9.2016.
4. VAŠINEK, V., J. NEDOMA, J. ZBOŘIL, O. a T. KAJNAR. Optovláknový a dotykový senzor pro zabezpečení vybraných prostor. 28684, Užitený vzor. Uděleno: 6.10.2015.
5. VAŠINEK, V., K., WITAS a J. NEDOMA. Zapojení časovacího obvodu optického reflektometru. 30649, Užitený vzor. Uděleno: 9.5.2017.
6. VAŠINEK, V., K., WITAS a J. NEDOMA. Zapojení detekční jednotky pro vyhodnocení Ramanova rozptylu. 30551, Užitený vzor. Uděleno: 3.4.2017.
7. VAŠINEK, V., J. JARGUS, J. VITASEK, M. NOVAK, O. ZBORIL, J. NEDOMA a M. FAJKUS. Svítidlo se zdrojem budícího záření a luminiscenční vrstvou. 30081, Užitený vzor. Uděleno: 29.11.2016.

Publikace v recenzním řízení:

1. NEDOMA, J., FAJKUS, M., VASINEK, V., HEJDUK, S., ZAVODNY, P., CVEJN, D., MARTINEK, R., NAZERAN, H. Hybrid fiber-optic sensor system for monitoring traffic in the SMART Cities. *Sensors*, IF: 2,677. Publikace v recenzním řízení.
2. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., JEZEWSKI, J., JAROS, R., MOHYLOVA, J., FAJKUS, M., NEDOMA, J., JANKU, P., NAZERAN, H. Comparative Effectiveness of ICA and PCA in Extraction of fECG from aECG Signals: Towards Multichannel Non-Invasive fHR Monitoring. *Sensors*, IF: 2,677. Publikace v recenzním řízení.
3. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., BORIS, M., NEDOMA, J., FAJKUS, M., NAZERAN, H. A Novel Modular Fetal ECG STAN and HRV Analysis: Towards Robust Hypoxia Detection. *Sensors*, IF: 2,677. Publikace v recenzním řízení.
4. NEDOMA, J., FAJKUS, M., STOLARIK, M., PINKA, M., HRUBESOVA, E. Use analysis of fiber-optic sensors for the monitoring of vibration response of railway rolling stock for the needs of civil engineering. In: 12th fib International PhD-Symposium in Civil Engineering. Publikace v recenzním řízení.
5. FAJKUS, M., MEC, P., NEDOMA, J., HRUBESOVA, E., VASINEK, V. Standard optical cables for the distributed load monitoring of concrete structures using BOTDR. In: 12th fib International PhD-Symposium in Civil Engineering. Publikace v recenzním řízení.
6. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., CUBIK, J., KEPAK, S., FAJKUS, M., NEDOMA, J., JARGUS, J., NOVAK, M. Pre-processing and Extraction Techniques for Vital Signs Analysis

from Phonocardiographic-Based Interferometric Fiber Optic Sensor. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

7. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., FAJKUS, M., NEDOMA, J., JARGUS, J., NOVAK, M. Fiber-optic Bragg Grating Sensors Signal Processing for Vital Signs Monitoring. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

8. MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., NEDOMA, J., FAJKUS, M., JARGUS, J., NOVAK, M. Advanced Methods for Fiber-Optic Sensor Signal Processing. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

9. NEDOMA, J., FAJKUS, M., JARGUS, J., NOVAK, M., MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., VASINEK, V. Analysis of encapsulation the fiber Bragg sensors for biomedical applications. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

10. NEDOMA, J., FAJKUS, M., JARGUS, J., NOVAK, M., MARTINEK, R., KAHANKOVA, R., VASINEK, V. Sensor system based on the Mach-Zehnder interferometer for the rail transport. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

11. JARGUS, J., NEDOMA, J., FAJKUS, M., NOVAK, M., MARTINEK, R., VASINEK, V. Alternative fiber detector of vibrations. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

12. JARGUS, J., FAJKUS, M., NEDOMA, J., NOVAK, M., MARTINEK, R., VASINEK, V. Detection of magnetic field with use of optical sensors. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

13. JARGUS, J., NOVAK, M., FAJKUS, M., NEDOMA, J., MARTINEK, R., VASINEK, V. Temperature sensor with using of optical fibers. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

14. NOVAK, M., JARGUS, J., FAJKUS, M., NEDOMA, J., MARTINEK, R., VASINEK, V. Analysis of transmission properties of optical couplers made from the polydimethylsiloxane (PDMS). In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

15. NOVAK, M., JARGUS, J., FAJKUS, M., NEDOMA, J., MARTINEK, R., VASINEK, V. Analysis of the attenuation characteristics of cylindrical waveguides made from the polydimethylsiloxane (PDMS) polymer. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

16. FAJKUS, M., NEDOMA, J., NOVAK, M., JARGUS, J., MARTINEK, R., VASINEK, V. FBG strain sensor mounted on plastic carrier. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

17. FAJKUS, M., NEDOMA, J., NOVAK, M., JARGUS, J., MARTINEK, R., VASINEK, V. Standard optical fibers for load measuring of concrete structures using BOTDR. In: Fiber Optic Sensors and Applications XV. Publikace v recenzním řízení.

Seznam projektů

FV20581	Zařízení pro měření a zpracování biosignálů s využitím optovláknových senzorů
SP2017/79	Nové typy fotonických systémů pro IoT
FV 10396	SIDAS - Systém inteligentní detekce a signalizace kolizních stavů pro zvýšení traťové bezpečnosti
SP2016/149	Nové typy fotonických systémů
VI2VS/444	Inteligentní technické textilie pro zvýšení bezpečnosti kritických infrastruktur
VI20152020008	Komplexní bezpečnost kritických infrastruktur a objektů řešená optovláknovými senzory s užitím moderních informačních systémů
SP2015/130	Výzkum stárnutí prvků optických sítí
EE2.3.20.0217	Rozvoj excelence vědeckovýzkumného týmu Telekomunikační techniky ve vazbě na zahraniční spolupráci
TA03020439	Bezpečnost optických přenosových sítí a vývoj opt. součástek pro silovou energetiku a energovody
TA04021263	Inteligentní moduly pro komunikace a osvětlování
HS4401510	T-Mobile, Vašinek, 5945
HS4401511	T-Mobile, Vašinek, 5945
