

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Analýza časových a frekvenčných záznamov koľajových
vozidiel pomocou dvojramenného interferometru a seizmickej
stanice Gaia 2T**

**Analysis of the time and frequency domain records of the rail
vehicles by the two-armed interferometer and Gaia 2T seismic
station**

2020

Patrik Burdiak

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Patrik Burdiak**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Analýza časových a frekvenčních záznamů kolejových vozidel pomocí dvouramenného interferometru a seismické stanice Gaia 2T**
Analysis of the Time and Frequency Domain Records of the Rail Vehicles by the Two-Armed Interferometer and Gaia 2T Seismic Station.

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Bakalářská práce se zaměřuje na porovnání výsledků získaných dvouramenným interferometrem a seismickou stanicí Gaia 2T (ViGeo2) v oblasti kolejové dopravy. Student získá základní poznatky z oblasti vláknové optiky a prakticky navrhne dvouramenný interferometrický senzor založený na fázové modulaci světla. Provedena budou praktická měření průjezdů kolejových vozidel, základním výstupem bude analýza zaznamenaných signálů (v časové a frekvenční doméně). Získané poznatky mohou sloužit jako základ pro rozvoj využití koncepce vláknové optických senzorů pro seismické aplikace.

Zadání práce:

1. Proveďte rešerši o vláknově optických senzorech využívající interference světla v optických vláknech, které lze využít pro kolejovou dopravu.
2. Sestavte prototyp vybraného dvouramenného interferometrického senzoru, vyspecifikujte frekvenční rozsah senzoru.
3. Realizujte praktická měření vozidel pomocí Vámi vytvořeného senzoru a přístroje Gaia 2T.
4. Statisticky vyhodnoťte provedená měření. Vyspecifikujte soubor frekvencí, které charakterizují kolejová vozidla.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Krohn, D., [Fiber optic sensors: fundamentals and applications], Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC (1992).
- [2] López-Higuera, J.M. [Handbook of Optical Fibre Sensing Technology], J.Wiley and Sons, New York, 227-245 (2002).


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Nedoma, Ph.D.**

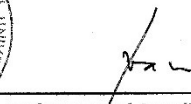
Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020




prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.

vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.

děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne zdroje a publikácie z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: *13. mája 2020*


podpis študenta

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som rád pod'akoval za podporu všetkým, vďaka ktorým mohla táto práca vzniknúť. Vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Janovi Nedomovi Ph.D., za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnety k zlepšeniu kvality práce. Rád by som pod'akoval mojej rodine a priateľom za trpezlivosť a podporu.

Abstrakt

Bakalárska práca sa zameriava na porovnávanie výsledkov získaných najjednoduchšou konštrukciou dvojramenného Mach-Zehnderova interferometru a konvenčne používanou seizmickou stanicou typu Gaia 2T (ViGeo2) v oblasti koľajovej dopravy. Seizmické stanice sa v koľajovej doprave používajú pre sledovanie vplyvu dopravy na okolité stavby a horninových masív, interferometrický senzor by mohol byť využitý ako lacnejšia alternatíva k seizmickej stanici. Cieľom tejto práce je popísať základne poznatky z oblasti vláknovej optiky a prakticky navrhnúť a zostrojiť funkčný vzor vybraného typu interferometrického senzoru založeného na fázovej modulácii svetla. V praktickej časti práce sú popísané prevedené porovnávacie merania realizované v rámci praktického merania v koľajovej doprave mesta Ostrava, kde základným výstupom je analýza zaznamenaných signálov v časovej a frekvenčnej doméne. Získané poznatky môžu slúžiť ako základ pre rozvoj využitia konceptu vláknovo optických senzorov pre seizmické aplikácie.

Kľúčové slová

Mach-Zehnder interferometer; Gaia 2T; Vláknovo optický senzor; Interferometer; Optické vlákna; Seizmická stanica

Abstract

Bachelor thesis focuses on the comparison of the results provided by the simplest construction of the two-armed Mach-Zehnder interferometer and a normally used seismic station type Gaia 2T (ViGeo2) in the field of rail transport. Seismic stations are used in the rail transport to monitor the influence of the traffic on the surrounding buildings and rock massif, interferometric sensor could be used as an inexpensive alternative to the seismic station. The aim of this thesis is to describe the basic knowledge from the field of fiber optics and, in practice, to design and construct a functioning sample of the chosen type of interferometric sensor based on phase modulation of light. In the practical part of the thesis are described performed comparative measurements realized as a part of the practical measurements of the rail transport in the town Ostrava and the fundamental output is an analysis of recorded signals in the time and frequency domain. Obtained findings could serve as a foundation for the development of utilization of the fiber optic sensor conception for seismic application.

Key words

Mach-Zehnder interferometer; Gaia 2T; Fiber optic sensor; Interferometer; Fiber optic; Seismic station

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
U	V	Napětí
I	A	Prúd
n	-	Index lomu
c	m/s	Rýchlost' svetla
φ	$\pi, ^\circ$	Fáza
π	3,14	Konštanta pi
ω	rad/s	Uhlová rýchlost'
λ	nm	Vlnová dĺžka

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
CVD	Chemical Vapor Deposition
MZI	Mach-Zehnderov Interferometer
GPS	Global Positioning System
MZ	Mach-Zehnder
PVC	Polyvinyl chloride
DFB	Distributed Feedback Laser
PbSe	Plycrystalline Lead Selenide
IR	InfreRed
USB	Universal Serial Bus
SNR	Signal to Noise Ratio

Obsah

Úvod.....	- 12 -
1 Optické vlákno	- 13 -
1.1 Čo je to svetlo.....	- 13 -
1.2 Index lomu.....	- 13 -
1.3 Snellov zákon	- 13 -
1.4 Prenos svetla skrz optické vlákno	- 14 -
1.5 História optického vlákna.....	- 15 -
1.6 Výroba a konštrukcia optických vlákien	- 16 -
1.7 Typy optických vlákien.....	- 17 -
1.7.1 Mnoho vidové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu (MMF SI)....	- 17 -
1.7.2 Gradientné vlákna s plynulou zmenou indexu lomu (MMF GI).....	- 17 -
1.7.3 Jednovidové vlákna (SMF).....	- 18 -
2 Interferometer.....	- 19 -
2.1 Princíp funkcie	- 19 -
2.2 Rozdelenie interferometrov	- 20 -
3 Vláknovo optické interferometre	- 21 -
3.1 Michelsonov interferometer	- 21 -
3.2 Sagnacov interferometer	- 21 -
3.3 Fabry-Perotov interferometer.....	- 22 -
3.4 Mach-Zehnder Interferometer	- 23 -
3.4.1 Obecný popis.....	- 23 -
3.4.2 Vláknovo optický Mach-Zehnder interferometer.....	- 24 -
3.4.3 Rešerše vláknovo optického MZI interferometra v doprave	- 25 -
4 Seizmická stanica	- 28 -
4.1 Seizmické vybavenie Gaia 2T.....	- 28 -
5 Úvod do konštrukcie interferometra a do praktickej časti práce	- 29 -
6 Konštrukcia Interferometra	- 30 -
6.1 Realizácia meracieho senzoru	- 30 -
6.2 Špecifikácia frekvenčného rozsahu senzoru.....	- 33 -

7	Praktické porovnávacie merania	- 34 -
7.1	Postup merania	- 34 -
7.2	Vyhodnotenie praktických meraní	- 36 -
7.3	Druhy električkových súprav	- 37 -
7.4	Frekvenčná analýza súpravy Vario LFR.....	- 37 -
7.5	Frekvenčná analýza súpravy CKD T3.....	- 38 -
7.6	Časová analýza súprav Vario LFR, CKD T3	- 39 -
	Záver	- 41 -
	Použitá literatúra	- 42 -

Úvod

Železničná doprava tvorí už po niekoľko storočí neodmysliteľnú súčasť dopravnej infraštruktúry v rozsahu od krajských miest až po štáty. Železničnú dopravu využívajú viac a viac cestujúcich, prepravcovia rôznych palív, poštové služby a tak ďalej. Pri takomto rapidnom náraste tohto druhu dopravy je potrebné aby sme poznali negatívne následky ktoré táto doprava prináša. Jedným z negatívnych javov sú vibračno-akustické odozvy traťových súprav. Tieto odozvy môžu mať negatívny efekt napríklad na naše stavby, ako je poškodenie oporných múrov budovy, tým je myslené ich popraskanie od vibrácií. Takéto poškodenie môže viesť až k poškodeniu stability budovy a následnému zrúteniu celého objektu. Takýto existenčný problém nemusia mať len budovy v bezprostrednej blízkosti k trati ale aj tie vzdialenejšie. Samozrejme táto skutočnosť sa odvíja od frekventovanosti prechodu súprav na danom úseku. Za účelom merania týchto vibrácií sú využívané seizmické stanice. Cieľom tejto bakalárskej práce je dokázať že vláknovo optický Mach-Zehnder interferometer môže slúžiť ako náhrada k týmto seizmickým staniciam. Nespornou výhodou vláknovo optických interferometrov oproti je imunita voči elektromagnetickému rušeniu, elektrická pasivita. Cena seizmickej stanice sa pohybuje radovo v tisíckach amerických dolárov pričom cena interferometra môže byť až o rád nižšia. Ďalšiu nespornú výhodu interferometrov vidíme v oddelení miesta merania a miesta napájania, vďaka dnes relatívne nízkej hodnote útlmu optických vlákien (0,2 db/km). Táto vlastnosť nám dovoľujú využiť optické vlákna, realizovať vzdialené vyhodnocovanie v rade jednotiek kilometrov (napríklad napojenie senzoru na vlákna pozdĺž koľajových tratí).

Úvod bakalárskej práce je venovaný teoretickému rozboru svetla, privedenia svetlených lúčov do optického vlákna, známe druhy optických vlákien, rozboru interferencie, získaniu poznatkov o jednotlivých druhoch interferometrov tak aby bola čo najlepšie pochopená problematika interferometrov. Praktická časť sa zaoberá konštrukciou interferometru, postupom meraní a vyhodnoteniu výsledkov.

1 Optické vlákno

Optické vlákna tvoria neodmysliteľnú súčasť moderného prenosu dát. Tvoria základ chrbticových sietí po celom svete hlavne pre ich rýchlosť a výhody oproti metalickým alebo bezdrôtovým médiám pre prenos dát. Využívajú sa taktiež v optických senzoroch ako sú interferometre pre meranie vzdialenosti, indexu lomu svetla a tak ďalej. V ďalších kapitolách si tuto skutočnosť priblížime viac, tak aby boli zrejmé všetky náležitosti pre pochopenie funkcie vláknovo optických interferometrov a ich možné aplikácie v železničnej doprave.

1.1 Čo je to svetlo

Človek vníma svetlo ako viditeľnú časť elektromagnetického spektra a to s vlnovými dĺžkami od 380 nm do 780 nm. Avšak v optických komunikáciách zahrňujeme aj spektrum ktoré nie je pozorovateľné ľudským okom. Svetlo môžeme popísať niekoľkými spôsobmi.

- Geometricky popis - uvažujeme že svetlo sa šíri od bodového zdroja všetkými smermi vo forme lúčov, ktoré sa v homogénnom prostredí šíri priamočiario. Tento popis ale nepopíše všetky chovania svetla napr. difrakciu.
- Vlnový popis - uvažujeme že svetlo sa šíri vo forme elektromagnetických vln, ktoré sú popísané Maxwellovými rovnicami.
- Kvantový . uvažujeme o svetle ako o skupine fotónov ktoré majú nulovú kludovú hmotnosť [1]

1.2 Index lomu

Rýchlosť svetla v rôznych prostrediach môžeme vyjadriť pomocou indexu lomu. Najväčšiu rýchlosť svetla môžeme namerať vo vákuu. V ostatných prostrediach sa svetlo šíri pomalšie a to môžeme vyjadriť vzťahom:

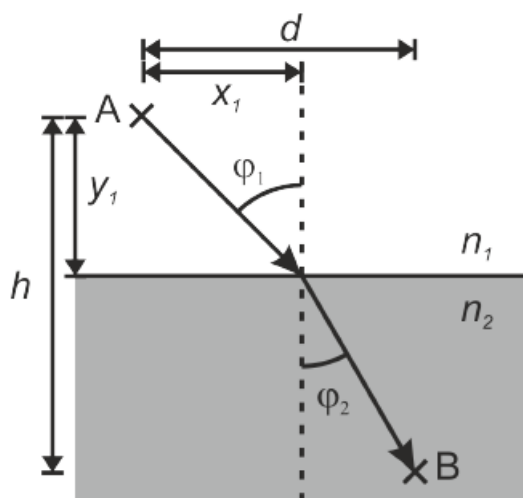
$$n = \frac{c_0}{c} \quad (1.1)$$

Teda index lomu je v inom prostredí ako vo vákuu väčší než 1. V prípade že by sme porovnávali dve optické prostredia tak svetlo ktoré sa v jednom prostredí šíri pomalšie, tak toto prostredie môžeme nazvať opticky hustejším. V opačnom prípade je takéto prostredie opticky redšie. [1]

1.3 Snellov zákon

Pokiaľ dopadá svetelný lúč na rozhranie dvoch prostredí dochádza k odrazu časti svetla späť do prostredia odkiaľ prišlo. Tento jav popisuje odrazivosť rozhrania, ktorá je daná ako pomer odrazeného výkonu k výkonu dopadajúcemu. Ďalej je tento jav závislý na uhle dopadu daného lúča na rozhranie, na indexe lomu oboch prostredí a na polarizácii svetla. Vyjadrenie Snellovho zákona podľa rovnice:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2 \quad (1.2)$$



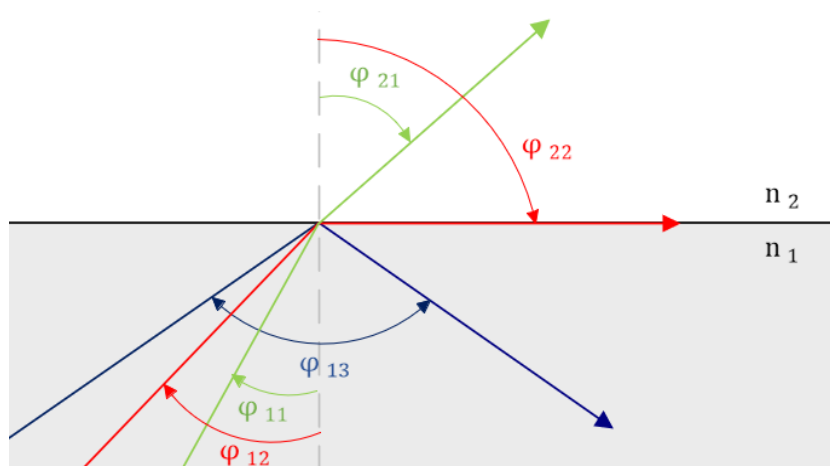
Obrázok 1.1: Rozhranie dvoch optických prostredí, prebraté z [1].

Ako môžeme vidieť na obrázku 1.1 z priebehu trajektórie svetelného lúča, tak lúč sa nešíril priamočiarno ale nastal lom svetla ku kolmici. Pri prechode svetelného lúča z opticky redšieho prostredia do prostredia opticky hustejšieho dochádza k lomu lúča smerom ku kolmici. V opačnom prípade teda keď svetelný lúč prechádza z opticky hustejšieho do opticky redšieho prostredia dochádza k lomu lúča smerom od kolmice.

Zo Snellovho zákona tiež plynie že pokiaľ sa svetlo odrazí späť do pôvodného prostredia tak uhol dopadu sa rovná uhlu odrazu.[1]

1.4 Prenos svetla skrz optické vlákno

Pri prenose svetla v optickom vlákne sa musí využiť princíp úplného odrazu. To znamená že lúč neprejde skrz rozhranie ale odrazí sa od rozhrania do pôvodného prostredia.



Obrázok 1.2: Rozdelenie lúčov na rozhraní dvoch optických prostredí.

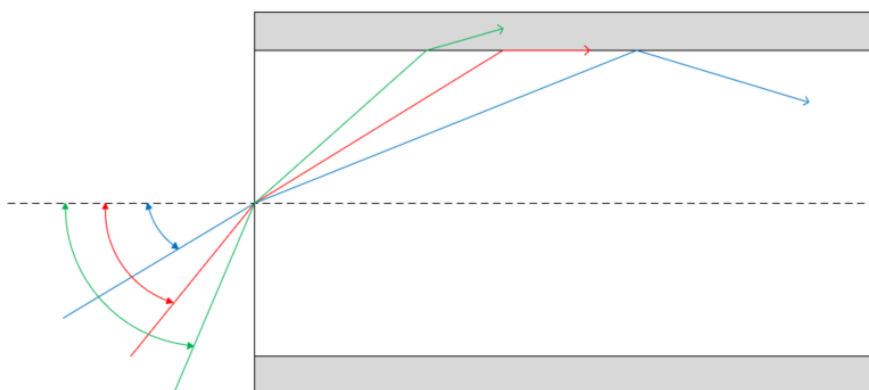
Pri prechode svetla z opticky hustejšieho do opticky redšieho prostredia, lúč ktorý prechádza cez rozhranie týchto prostredí, mení svoju trajektóriu smerom od kolmice (zelený lúč) teda $n_2 < n_1$. Pre dosiahnutie úplného odrazu potrebujeme najskôr nájsť taký dopadový uhol φ_{12} pri ktorom sa lúč zlomí práve do rozhrania (červený lúč). V tomto prípade sa bude φ_{22} rovnat' pravému uhlu a to $\frac{\pi}{2}$. Tento poznatok dosadíme do vzťahu:

$$n_1 \sin(\varphi_{12}) = n_2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (1.2)$$

$$n_1 \sin(\varphi_{12}) = n_2 \quad (1.3)$$

$$\sin(\varphi_{12}) = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4)$$

Pri predpoklade že je splnená podmienka $n_2 < n_1$ a nájdeme kritický uhol φ_{12} tak pri zväčšovaní tohto nášho kritického uhla nastane odraz nášho lúču do pôvodného prostredia (modrý lúč). [1]



Obrázok 1.3: Privedenie lúča do optického vlákna.

Na princípe úplného odrazu je založený aj prenos v optickom vlákne. A to tak že sa lúč odráža od jednotlivých optických rozhraní ako môžeme vidieť na obrázku.

1.5 História optického vlákna

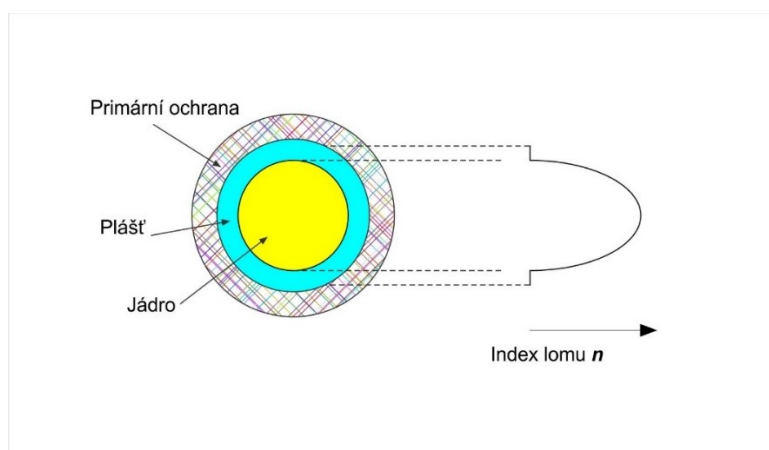
História optického vlákna siaha až do 19. storočia v tej dobe Daniel Colladon, profesor univerzity v Ženeve, kde na svojich prednáškach demonštroval vedenie slnečného svetla prúdom vody vytekajúcej z vodnej nádrže. Tak ako optické vlákno poznáme teraz je spojené s držiteľom Nobelovej ceny pre fyziku Charlesa Kuena Kaa. Tento skvelý vynálezca a priekupník v rámci optických komunikácií vo svojom článku v roku 1966 súhrne popísal problematiku prenosu svetla v optických komunikáciách. Došiel k záveru že kremíkové sklo je pre vedenie

svetla tou najlepšou voľbou a už vtedy správne odhadol prípustnú hodnotu pre optický útlm a to bola hodnota 20dB/km. Taktiež odhadol maximálny obsah nečistôt čo nesmelo presiahnuť jednotky ppm. [2]

1.6 Výroba a konštrukcia optických vlákien

Optické vlákno sa skladá z troch základných častí a to:

- Jadro - táto časť je tvorená sklom alebo oxidom kremičitým ako už bolo spomenuté obidva tieto materiály samozrejme vedú svetlo.
- Plášť - obaľuje jadro aby sa svetlo nerozšírilo do okolia a teda aby nastal úplný odraz od rozhrania jadro-plášť čo je základom pre prenos svetla skrz vlákno.
- Primárna Ochrana - poskytuje ochranu plášťu a jadru ktoré sú veľmi krehké, teda chráni nám vnútornú časť vlákna. Niektoré vlákna obsahujú aj sekundárnu ochranu.



Obrázok 1.4: Konštrukcia optického vlákna, prebraté z[3].

Výroba optického vlákna sa skladá z dvoch častí príprava preformy a ťahaním samotného vlákna. Preforma je sklenená tyčka môžeme ho nazvať aj polotovar pre ťahanie vlákna. Z dôvodu požadovaného útlmu musí byť preforma vyrobená z veľmi čistého materiálu. Preto sa používajú postupy CVD tým je myslená depozícia z plynnej formy. Tento postup znamená spaľovanie niekoľkých základných látok pre výrobu skla. Tieto látky sa veľmi dobre čistia destiláciou a tým dosiahneme potrebnej čistoty. Sklo sa pripravuje po jednotlivých vrstvách čím získame požadovanú štruktúru v podobe jemných profilov indexov lomu.

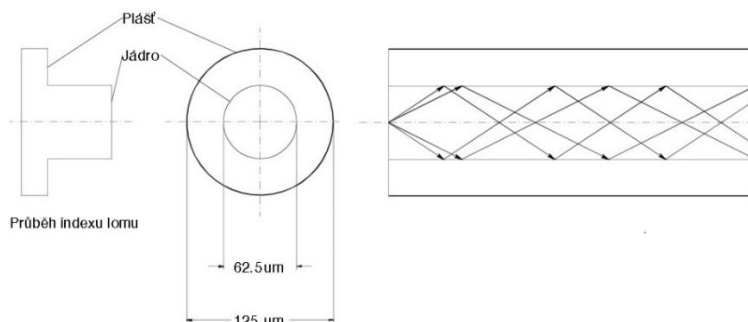
V druhom kroku výroby sa hotová preforma zavesí do pece pre ťahanie optických vlákien a po rozohriatí na teplotu 2 000 °C z nej odkvapne kvapka a z tejto kvapky sa ťahá samotné vlákno. Táto kvapka je uchopená do navíjacieho zariadenia, ktoré kontroluje priemer vlákna čo je veľmi podstatné pre ďalšie využitie vlákna. Aby sa zabránilo krehkosti vlákna musí byť na vlákno nanášaná vrstva polyméru. Vrstva polyméru nám umožní že vlákno je ohybné a chráni ho pred vlhkosťou a vonkajšími mechanickými vplyvmi. [3,4]

1.7 Typy optických vlákien

Vlákna môžeme rozdeliť podľa počtu šírených lúčov (vidov) :

- Jedno vidová - využívajú sa pre väčšie vzdialenosti teda desiatky až stovky kilometrov, prenáša jeden vid skoro priamočiaro.
- Mnoho vidová . využíva sa v budovách, teda takmer u užívateľa , prenáša niekoľko vidov, používa sa na kratšie vzdialenosti .

1.7.1 Mnoho vidové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu (MMF SI)

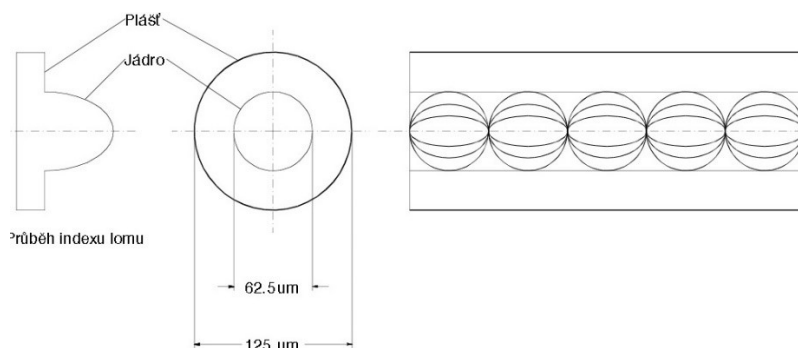


Obrázok 1.5: MMF SI vlákno, prebraté z [5].

Priemer tohto typu vlákna je typicky 50/125 μm , 60/125 μm je to pomer jadra a plášťa. Šírenie je založené na úplnom odraze teda index lomu jadra je väčší ako index lomu plášťa. Každý vid je navedený pod iným uhlom do samotného vlákna. Tento druh vlákien sa avšak nevyužíva kvôli vidovej disperzii. Tento úkaz vzniká kvôli rôznym dráham vidov teda každý vid príde v inom čase do cieľa. To spôsobí rozšírenie impulzov pri digitálnych systémoch a fázové posuny pri analógových systémoch.[5]

1.7.2 Gradientné vlákna s plynulou zmenou indexu lomu (MMF GI)

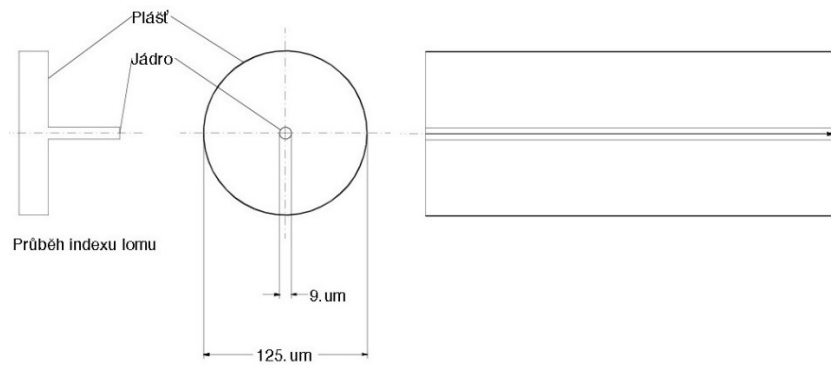
Na základe problémov pri prenose u vlákien so skokovou zmenou indexu lomu boli vyvinuté takzvané Gradientné vlákna. Gradientné vlákna vyriešili problém s vidovou disperziou. To bolo dosiahnuté premenným indexom lomu v jadre, ktorý sa smerom k obalu postupne znižuje a smerom od obalu zase znižuje. Týmto spôsobom dochádza k neustálemu ohybu svetla.



Obrázok 1.6: MMF GI, prebraté z [5].

1.7.3 Jednovidové vlákna (SMF)

Pri tomto type vlákna sa prenáša len jeden vid a práve tento sa šíri priamočiarno. Jadro tohto vlákna je $9\ \mu\text{m}$ čo je omnoho menšie jadro než pri mnoho vidových vláknoch. Z dôvodu prenosu len jedného vidu nevzniká vidová disperzia. Jedno vidové vlákna preto dosahujú veľmi vysokú prenosovú rýchlosť a to až 25 Tbit/s. Ako nevýhodu môžeme chápať potrebu mať kvalitnejšiu techniku pri prevádzke tohto typu vlákna.[5]



Obrázok 1.7: SMF, prebraté z [5].

2 Interferometer

Optické interferometre sú prístroje ktoré majú princíp založený na interferencii svetla. Tieto zariadenia sú teda používané pre veľmi presné merania ako napríklad k meraniu tlaku a teploty plynov, k určeniu indexu lomu plynov alebo kvapalín, k meraniu magnetického a elektrického poľa a svoje miesto si taktiež našli aj v astronómii. Vďaka vysokej citlivosti je jedným z možných uplatnení aj doprava obecné, táto práca sa bližšie špecifikuje na železničnú dopravu.

2.1 Princíp funkcie

Ako už bolo spomenuté interferometre používajú interferenciu medzi dvoma alebo viacerými svetlenými lúčmi. Tieto lúče sa šíria rôznymi cestami jedného optického vlákna alebo vo dvoch rôznych vláknach. Tým pádom potrebujú tieto zariadenia komponenty pre rozdelenie svetleného lúča a spájanie dvoch rôznych lúčov. Jedna z optických trás by mala byť prispôbená tak aby bola ľahko ovplyvniteľná vonkajšími faktormi. Výsledná vlnová funkcia je súčtom jednotlivých vlnových funkcií. Pri tejto výslednej vlne sa skúma intenzita lúča. Výsledná intenzita sa ale nemusí rovnať súčtu intenzít vstupujúcich do interferencie. Podmienkou pre správnu interferenciu je koherencia vln. Takéto vlny majú konštantný fázový rozdiel a majú rovnakú frekvenciu. [6]

Berme v úvahu pre interferenciu dve monochromatické vlny, ktoré majú komplexné amplitúdy U_1 a U_2 , výsledná vlna bude taktiež monochromatická, s rovnakou frekvenciou a komplexnou amplitúdou:

$$U = U_1 + U_2 \quad (2.1)$$

Intenzitu môžeme vyjadriť vo vzťahu:

$$I = |U|^2 = |U_1 + U_2|^2 \quad (2.2)$$

Do tejto rovnice dosadíme za $U_1 = I_1^{1/2} \exp i\varphi_1$ a $U_2 = I_2^{1/2} \exp i\varphi_2$ kde $i\varphi_{1,2}$ sú fázy jednotlivých vln a $I_{1,2}$ sú intenzity príslušných vln, týmto krokom získame interferenčnú rovnicu:

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\varphi) \quad (2.3)$$

Výsledná fáza je výsledkom súčtu pôvodných dvoch fáz, teda $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$. Z posledného vzťahu uvedeného nižšie si môžeme všimnúť silnú závislosť medzi fázou a výslednou intenzitou. Teda pomocou výslednej intenzity môžeme vypočítať fázový posun vln, práve tento fakt využívajú optické interferometre.

Teraz si uvedieme najznámejšie interferometre a ich výpočet fázového rozdielu:

Michelsonov interferometer:

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) \quad (2.4)$$

Mach-Zehnder interferometer:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) \quad (2.5)$$

Sagnacov interferometer:

$$\varphi = \frac{8\pi\omega A}{c\lambda} \quad (2.6)$$

kde:

A - plocha interferometru, ω - uhlová rýchlosť rotácie, R - polomer kruhu, n - index lomu jadra, d_1 - dĺžka sensorického vlákna (ramena), d_2 - dĺžka referenčného vlákna (ramena), λ - vlnová dĺžka zdroja žiarenia [6]

2.2 Rozdelenie interferometrov

Vláknovo optické interferometre môžeme rozdeliť do troch skupín:

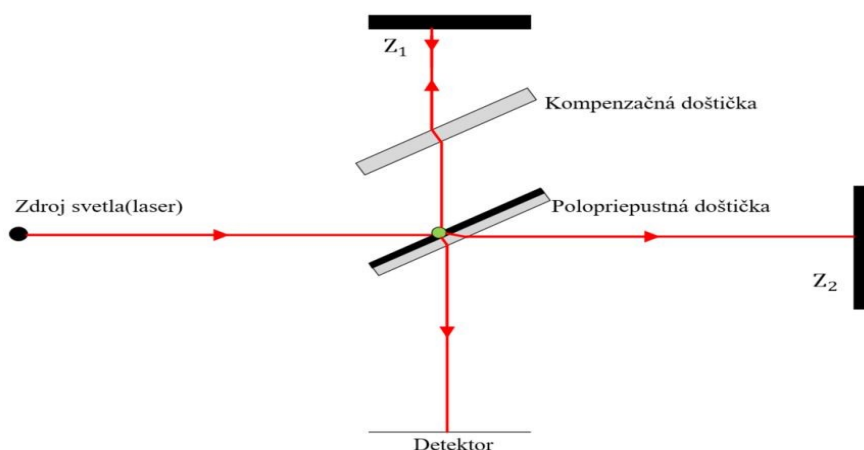
- Dvojamenný jednomódový interferometer (Mach - Zehnderov, Michelsonov) - využíva porovnanie fáz dvoch svetelných vln a to tej vlny ktorá sa šíri referenčným optickým vláknom a tej ktorá sa šíri v sensorovom optickom vlákne, teda to vlákno ktoré je citlivé na vonkajšie faktory.
- Jednovláknový interferometer s obojsmernou optickou väzbou (Sagnacov), porovnáva fázu dvoch vln idúcich proti sebe v cievke optického vlákna.
- Medzimódový interferometer využívajúci interferenciu dvoch alebo viac vln, ktoré sa šíria jedným optickým vláknom, výhodou je využitie mnoho vidových vlákien.[7]

3 Vlákno optické interferomtre

3.1 Michelsonov interferometer

Tento interferometer bol vynájdený Albertom Michelson v roku 1890 bol to prvý americký fyzik ktorý obdržal Nobelovu cenu v roku 1907 pre prácu v rámci optických komunikácii. Michelson a Morley používali tento interferometer v ich rade pokusov ktoré slúžili pre dokázanie existencie éteru. Do dnešnej doby je tento interferometer podstatnou súčasťou laboratórií, je používaný pre meranie vlnových dĺžok zdroja svetla a k meraniu extrémne malých vzdialenosti. [8]

Dvojzväzkový Michelsonov interferometer sa skladá z dvoch zrkadiel, kompenzačnej doštičky, polopriepustnej sklenenej doštičky ktorá rozdeľuje lúče, zdroja žiarenia a detektora pomocou ktorého sa meria samotná intenzita výsledného lúča. Kompenzačná a polopriepustná doštička sú umiestnené paralelne nad sebou, pod uhlom 45 stupňov. Teda aj lúč z lasera dopadá pod týmto uhlom. Pri dopade lasera na polopriepustnú doštičku sa dochádza k rozloženiu lúča na dva. Prvý lúč dopadne na zrkadlo Z_1 tam nastane úplný odraz a lúč sa odrazí naspäť do polopriepustnej doštičky. Medzi polopriepustnou doštičkou a zrkadlom Z_1 je umiestnená kompenzačná doštička ktorá slúži na to aby obidva lúče mali rovnaký priechod skleneným telesom. Nakoľko prvý lúč sa odrazí na hrane polopriepustnej doštičky zatiaľ čo druhý lúč prejde týmto skleneným telesom. Pri druhom lúči je to rovnaké, nastane úplný odraz od zrkadla a lúč sa odrazí do miesta kde bol pôvodný lúč rozdelený môžeme ho nazvať bod A. V tomto bode sa obidva lúče interferujú. Pokiaľ lúče urazia rovnakú dráhu bude medzi nimi fázový rozdiel konštantný. [8]

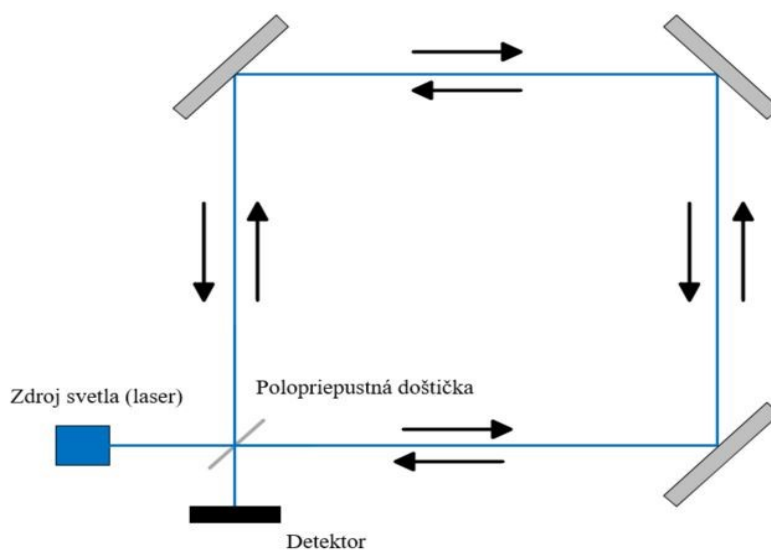


Obrázok 3.1: Michelsonov interferometer.

3.2 Sagnacov interferometer

Tento interferometer bol v roku 1913 vynájdený Francúzom Georgom Sagnacom, tento interferometer sa skladá z lasera teda zdroja, polopriepustnej doštičky, troch zrkadiel a samozrejme pre meranie intenzity na výstupe bude detektor. Tento interferometer slúži na

demonštráciu Sagnacovho efektu, ktorý úzko súvisí s teóriou relativity, základom tejto teórie je kruhová dráha lúča.[9]

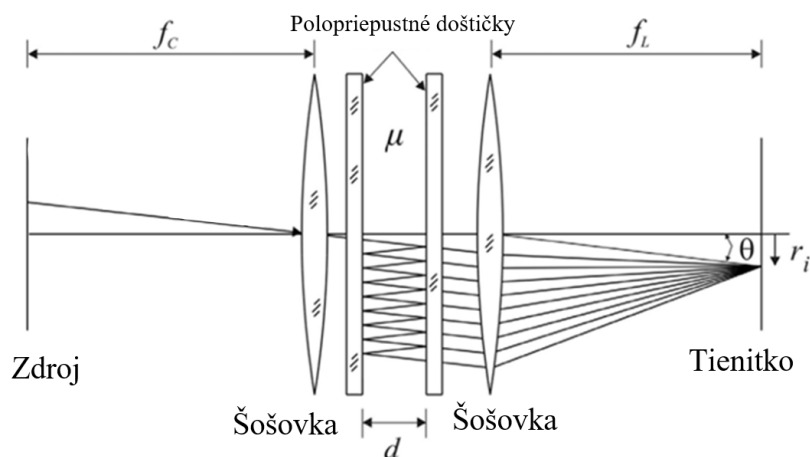


Obrázok 3.2: Sagnacov interferometer.

Lúč z laseru sa na polopriepustnej doštičke rozdelí na dva lúče. Obidva lúče sa budú pohybovať proti sebe do kruhu. Prvý lúč sa odráža do zrkadla na obrázku vľavo hore a odtiaľ v smere hodinových ručičiek až do detektoru. Druhý lúč sa bude odrážať presne v opačnom poradí a následne skončí v detektore. Výsledný lúč bude mať väčšiu intenzitu nakoľko pôvodné dva lúče prešli rovnakú dráhu s konštantným fázovým posunom. Akonáhle by však sa interferometer začal otáčať okolo vlastnej osy, dochádzalo by k fázovému posunu pri oboch lúčoch. [9]

3.3 Fabry-Perotov interferometer

Bol zostrojený v roku 1899 C.Fabrym a A- Perotom. Tento interferometer pracuje na princípe mnohonásobnej interferencie, na ktorej sa podieľa mnoho lúčov. Skladá sa zo zdroja, dvoch polopriepustných doštičiek a dvoch šošoviek ktoré navedú lúče na polopriepustné doštičky. Dve polopriepustné doštičky oddeľujú zvyčajne vzduchový priestor. Keď svetlo narazí na polopriepustnú doštičku určitá časť prejde cez polopriepustnú doštičku a určitá časť sa zase odrazí naspäť. Týmto spôsobom sa v priestore medzi dvoma polopriepustnými doskami lúče narúšajú. Prejdené lúče cez druhú polopriepustnú dosku sú pomocou druhej spojovacej šošovky privedené na interferenciu. Fázový rozdiel lúčov závisí na vzdialenosti medzi doskami a tiež na uhle pod ktorým dopadajú na dosku.[10,11,12]



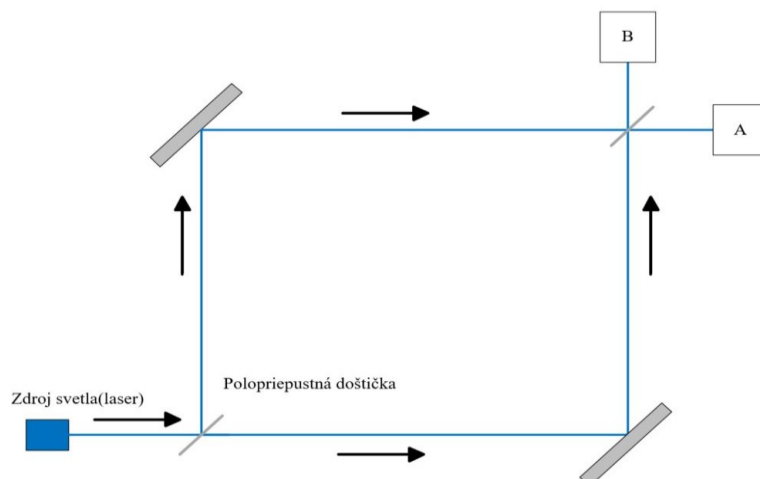
Obrázok 3.3: Fabry-Perotov Interferometer, prebraté z [12].

3.4 Mach-Zehnder Interferometer

3.4.1 Obecný popis

Tento interferometer bol zostavený v rokoch 1891 až 1892. Jeho tvorcovia sú Ernest Mach, jeho syn Ludwig a Ludwig Zehnder.

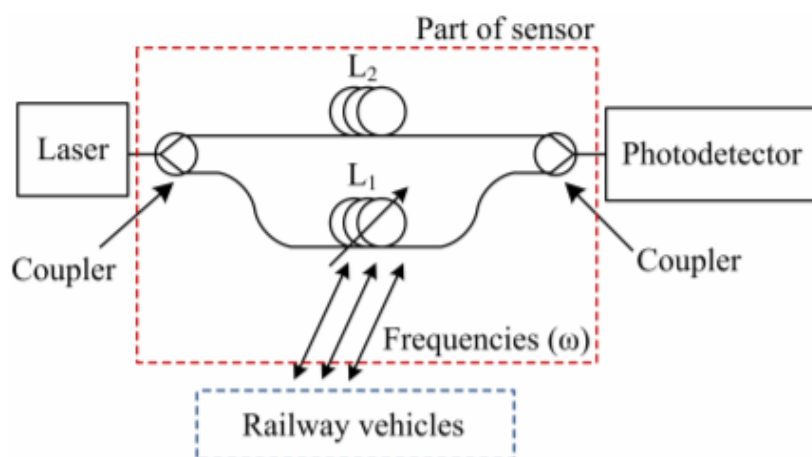
Zrkadlový interferometer sa skladá z dvoch polopriepustných doštičiek (deliaci pomer môže byť premenný), dvoch zrkadiel ktoré 100% odrážajú lúč a dva detektory. Na začiatku sa vstupný lúč rozdelí pomocou polopriepustnej doštičky na dva lúče teda do dvoch ramien, ktoré sú na sebe nezávislé. Do dráhy jedného z lúčov sa vkladá meraný objekt ktorý predĺži jeho optickú dráhu. Pokiaľ sa meraný objekt nevloží do dráhy jedného z lúčov nenastane fázový posun a pôvodný lúč sa dostane do detektoru A. Ďalej pokiaľ by meraný objekt zmenil fázový posun lúča o π tak by sa výsledný lúč dostal do detektoru B. Keby tento fázový posun bol medzi 0 a π tak určitá časť lúča by sa odrazila do detektoru A a určitá do detektoru B. Tento pomer by mohol byť vyjadrený v percentách, od výkonu pôvodného lúča. Čím by sme sa blížili k hodnote π tým by bol väčší podiel výkonu lúča zachytený na detektore B. Toto všetko sa deje kvôli druhej polopriepustnej doštičke ktoré v závislosti od fázy výsledného lúča, tento lúč odrazí alebo prepustí s efektivitou od 0 do 100 %. [13,14]



Obrázok 3.4: Mach-Zehnder zrkadlový interferometer.

3.4.2 Vlákno optický Mach-Zehnder interferometer

Vlákno optický Mach-Zehnder interferometer (MZI) vo využití s jedno módovými vláknami, vykazuje veľkú citlivosť na interferenčný efekt. Oproti zrkadlovému prevedeniu toto prevedenie obsahuje dve optické vlákna s vlnovými deličmi (coupler). Jedno optické vlákno je referenčné ktoré teda bude chránené pred okolitými vplyvmi. A to druhé bude slúži ako senzor, ktoré bude citlivé na vonkajšie faktory pre účely merania. V našom prípade okoloidúce koľajové vozidlo spôsobí frekvenčnú odozvu na senzorickom vlákne pomocou vibrácií a to od niekoľkých Hz až do stoviek kHz. Tieto vibrácie spôsobia zmenu optickej dráhy lúča a to spôsobí zmenu fázy na senzorickom vlákne. Výsledná fázová zmena φ je daná fázovými zmenami svetelného zdroja φ_1 a zmenami v dĺžke ramena a jeho indexu lomu φ_2 . Fázové zmeny zdroja sa dejú v obidvoch ramenách či už v referenčnom alebo v senzorickom, lenže senzorické vlákno je ešte aj ovplyvnené vibráciami okoloidúceho vozidla a to obsahuje informáciu o frekvencii ω ktorú chceme zmerať.[15]



Obrázok 3.5: Vlákno optický Mach-Zehnder Interferometer, prebraté z [15].

3.4.3 Rešerše vláknovo optického MZI interferometra v doprave

V tejto sekcii práce sa bližšie pozrieme skrz internetovú stránku Scopus.com na využitie Mach-Zehnderova interferometra v rámci dopravy. Tento portál zhromažďuje rôzne vedecké články a knihy a pomocou vyhľadávacieho filtra sa budeme sústrediť len na také články kde sa objavuje Mach-Zehnderov interferometer a jeho využitie pre meranie v doprave. Cieľom je zistiť stav techniky.

3.4.3.1 *Vláknovo optický MZI v doprave*

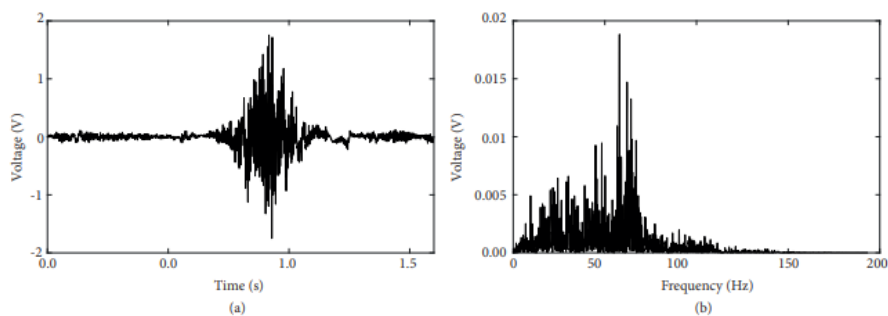
V prvom článku [15] bol Mech-Zehnderov interferometer porovnávaný so seizmickou stanicou. Toto porovnávanie bolo vykonávané tak že boli merané na hôrne skalne hmoty pod prechádzajúcimi električkovými vozidlami. Autori svoje zistenie reprezentovali pomocou frekvenčnej charakteristiky a časových záznamov. Záznamy z obidvoch zariadení sa zhodovali.

V ďalšom pre nás zaujímavom článku [16] autori opisujú kompaktný termooptický spínač s jednosmerným prúdom založený na Mach-Zehnderovom interferometri, ktorý je ako opisujú autori vhodný pre autonómne vozidlá. A to pre nízku hodnotu výhrevného odporu a napríklad rýchlu konštantu spínania.

Ďalšia publikácia [17] popisuje využitie interferometra v električkovej doprave a to na počítanie samotných vozidiel. Spolu ich bolo 435 a interferometer mal 100 % úspešnosť. Autori vyzdvihujú vlastnosť interferometra a to že je odolný voči elektromagnetickému rušeniu, a informácie dokážu vyčítať aj na diaľku.

Článok [18] popisuje opäť detekciu koľajových vozidiel založený na vláknovo optickom interferometri. Autori popisujú že okrem fázovo citlivých distribuovaných systémov sú interferometre jedinou technológiou využívajúcou optické vlákna, ktoré sú schopné pracovať v nepriamom kontakte s koľajnicou, pričom ponúkajú podobnú funkčnosť ako snímače namontované na koľajniciach.

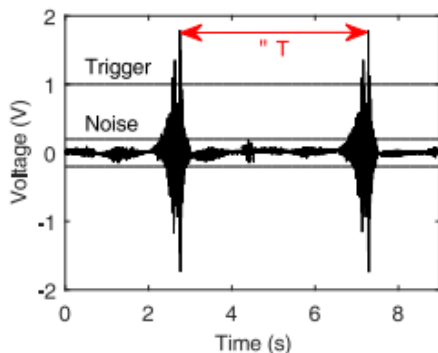
Článok [19] popisuje využitie Mech-Zehnderovho interferometra s optickými vláknami na monitorovanie hustoty premávky. Interferometer bol skonštruovaný na detekciu vibrácií ktoré vytvorili vozidla idúce okolo senzora. Autori používali jedno vidové vlákna s vlnovou dĺžkou 1550 nm a laserový zdroj s výstupným výkonom 1 mW. Pri automobilovej premávke mal úspešnosť 99,27% a pri vlakovej 100%.



Obrázok 3.6: Časový záznam a frekvenčné spektrum, prebraté z [19].

Ďalší článok [20] opisuje využitie interferometra v automobilovej doprave pre kontrolu hustoty premávky na cestnej komunikácii a zaraďovanie vozidiel do jazdných pruhov. Prezentované riešenie sa vyznačuje tým že sa senzor nemusí zabudovať do vozovky.

V ďalšom článku [21] autori využívajú až dva interferometre v automobilovej doprave pre detegovanie rýchlosti. Interferometrické snímače pracujú na princípe Mech-Zehnderovho interferometra. Interferometre spracovávajú vibračnú odozvu vozidiel a rýchlosť vozidla sa vypočítava v časovej oblasti. Pre overenie správnosti výsledkov sa rýchlosť vozidla kontrolovala pomocou GPS. Najvyšší rozdiel bol 7,7% a najmenší 1,36%. Pri prepočte na km/h sa absolútna chyba pohybovala v tolerancii ± 3 km/h.



Obrázok 3.7: Detekcia maximálnej amplitúdy.

V tomto článku [22] autori opisujú meranie pomocou interferometra tak že samotný interferometer bol uložený vo vode odolnej skrinke povedľa cestnej komunikácie. Cez samotnú cestu bol umiestnený kontaktný odnímateľný pás simulujúci spomaľovač. Tento spomaľovač slúžil na to aby pri prechode vznikli dostatočne vibrácie pre zachytenie interferometrom. Výsledky ukázali, že jednotlivé vozidlá prechádzajúce okolo boxu vykazovali charakteristické amplitúdové spektrá, ktoré boli jedinečné pre každý objekt a mali dostatočný pomer signálu k šumu.

Doteraz sme mali využitie interferometru len v rámci automobilovej alebo vlakovej dopravy. Jedna publikácia [23] popisuje využitie interferometra na letisku. Na letisku preto aby

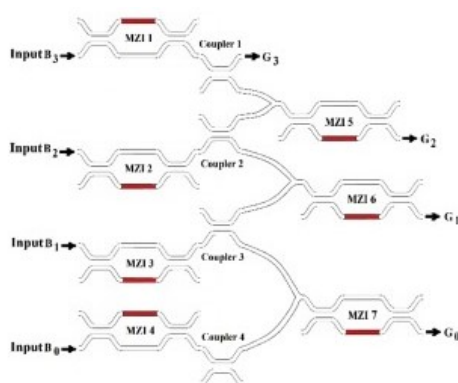
mohol detegovať možné hrozby pri pristáti alebo vzlietaní. Teda možných chodcov, zvierat, pohybujúcich sa objektov. S presnosťou väčšou ako 96,8 %.

3.4.3.2 *Vláknovo optický MZI v rôznych odvetviach*

V ďalšom článku [24] autori opisujú využitie MZ interferometra v aplikáciách v rôznych odvetviach ako je napríklad fyzika, biológia a chémia. Je to opäť kvôli jeho relatívne nízkej cene a vysokej presnosti. Využívajú MZ interferometer s jedno vidovými vláknami pre meranie indexu lomu prostredia a pre meranie teploty. Obidve tieto meranie môžu byť robené súčasne.

V publikácii [25] sa autori zamýšľali nad zvýšením citlivosti samotného MZ interferometra podarilo sa im to dosiahnuť pomocou kaskádovej vláknovo zrkadlovej slučky. RI(index lomu) citlivosť interferometra sa zvýšila takmer trojnásobne.

Táto publikácia [26] opisuje prevod binárnych kódov prenášaných pomocou optickej siete na takzvaný sivý kód. Tieto kódy sú cyklické a vhodné pre detekciu chýb v optickej komunikácii. Pre tento prevod sa využíva zariadenie ktoré využíva MZ interferometer kvôli jeho vlastnosti prepínania svetla z jedného portu na druhý.



Obrázok 3.8: Využitie interferometra pre prenos binárnych kódov, prebraté z [26].

V ďalšom článku [27] opisujú jedinečný typ snímač indexu lomu, ktorý využíva až dva MZ interferometre. Tieto interferometre využívajú ako jedno vidové vlákna tak vlákna s takzvanými bočnými otvormi. Za účelom väčšej citlivosti pre bio-chemické účely.

Publikácia [28] ktorá opisuje využitie MZ interferometra pre meranie koncentrácie etanolu. Experimentálne výsledky ukazujú, že existuje nelineárny vzťah medzi fázovým posunom pri vlnovej dĺžke 1485 nm a koncentráciou etanolu.

4 Seizmická stanica

Seizmické stanice vyrobené rôznymi spoločnosťami sú vybavené senzormi pre meranie rýchlosti a akcelerácie a sú často používané pre meranie vibrácií okolitej pôdy spôsobené v našom prípade koľajovým vozidlom, prípadne pre samotnú detekciu takého vozidla. Samotná stanica generuje časové záznamy prejazdu vozidla v merateľnej vzdialenosti od stanice. Frekvenčné spektrá sú následne vypočítané v relevantnom softvéri. V tejto práci budeme používať Gaia 2T prístroj so seizmickou stanicou ViGeo2 ako referenčný nástroj k nášmu vyrobenému interferometru. Cena týchto zariadení je obyčajne pohybujúca pri radovo tisíckach amerických dolárov. Týmto sa dostávame k využitiu vláknovo optického interferometra ako lacnejšiu verziu ktorá posluží rovnako dobre ako seizmická stanica. Seizmické stanice ako také sa najčastejšie používajú pre meraní vibračných odoziev pôdy. Práve preto sa používajú priamo na mieste merania. Čiže fyzicky musí byť tento prístroj prítomný na danom mieste kde sa jav vyskytuje. Tak isto budeme chcieť použiť aj náš interferometer. Čím bližšie k zdroju vibrácií aby boli naše výsledky čo najpresnejšie. [15]

Tabuľka 1.1: Porovnanie seizmickej stanice a interferometra.

Typ senzoru	Frekvenčný rozsah(Hz)	Vzorkovacia Frekvencia(Hz)	Cena v dolároch
Gaia 2T + ViGeo 2	2-200	20-500	2500 a viac
Interferometer	2-100	1000 - 10 000	500

4.1 Seizmické vybavenie Gaia 2T

Gaia 2T je trojkanálová seizmická stanica s dynamickým rozsahom 138 dBp-ps a s vlastnosťou prerušovaného alebo nepretržitého zaznamenávania digitálnych dát. Časová synchronizácia je zaistená s GPS modulom, a dáta môžu byť nahraté na flash disk. ViGeo2 je kompaktný, aktívny, vysokorýchlostný seizmometer. Seizmometer obsahuje tri senzory s frekvenciou 2 Hz a frekvenčným rozsahom 2-200 Hz. [15]



Obrázok 4.1: Seizmická stanica Gaia 2T.

5 Úvod do konštrukcie interferometra a do praktickej časti práce

Úvod tejto bakalárskej práce bol venovaný teoretickému rozboru optického média, spôsobu prenosu svetla, všeobecný popis interferometrov, popis jednotlivých základných typov interferometrov použiteľných pre meranie v železničnej doprave, popis seizmickej stanice s ktorou budeme nás skonštruovaný interferometer porovnávať. Súčasťou úvodnej časti bola aj rešerše článkov v ktorých ich autori využívali tento druh interferometra pre riešenie rôznych problematik. V ďalších kapitolách budeme rozoberať konštrukciu interferometra, aký materiál bol k jeho zostaveniu použitý aj jednotlivé rozloženie komponentov v rámci konštrukcie. Priebeh merania, aj analýza jednotlivých dát z merania.

Všetky úkony sú v práci chronologicky popísané ako boli vykonané v čase. Celkový návrh systému zohľadňuje nároky plynúce zo zadania práce, podmienkam v ktorých bude interferometer využívaný a presnosti merania čo je kritickým požiadavkám pre vecné porovnanie so seizmickou stanicou. Funkčný skonštruovaný interferometer bude využívať jedno vidové optické vlákna štandardu G.652.D., ktoré sú často využívané v telekomunikáciách a boli vybraté na odporúčanie vedúceho práce.

6 Konštrukcia Interferometra

Základnou problematikou pri zostrojení senzora je správne uloženie senzorickeho optického vlákna (ramena senzoru), tak aby bolo ovplyvnené vibračne-akustickými vibráciami (signálom, ktorý produkuje prechádzajúce železničné vozidlo), uloženie referenčného vlákna tak aby bolo vlákno v maximálnej miere izolované od vyššie uvedených vibrácií. Taktiež výber správneho materiálu ktorý bude izolovať jednotlivé vlákna. Senzor musí byť odolný voči vonkajším podmienkam ako napríklad dážď teda aby bol vode odolný. Senzor musí byť taktiež kompaktný z hľadiska veľkosti, a to hlavne kvôli prenosu z jedného miesta na druhé v závislosti od merania. Tieto všetky aspekty musia byť zohľadnené a zároveň senzor by mal mať čo najväčšiu presnosť aby porovnanie so seizmickou stanicou bolo čo najrelevantnejšie. Vybraté materiály pre konštrukciu senzoru boli selektované s ohľadom na výslednú cenu senzoru.

6.1 Realizácia meracieho senzoru

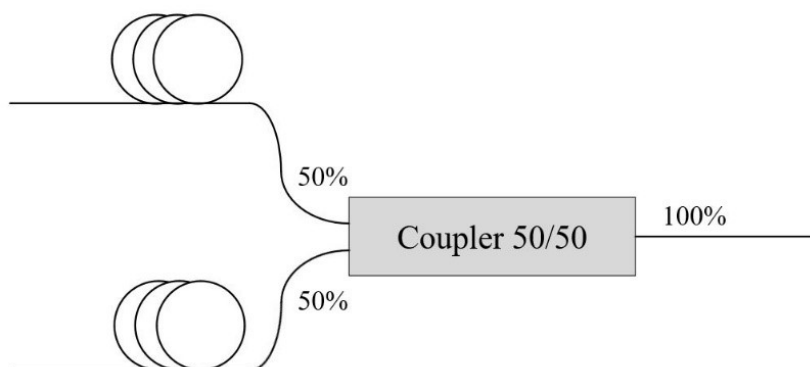
Stavbu meracieho senzoru je možno rozdeliť do niekoľkých krokov. Základom senzoru je tzv. rezonančná podložka. Rezonančná podložka slúži ako styčná plocha na ktorú bude položené rameno senzoru. V prípade referenčného ramena musí byť táto podložka čo najviac schopná izolovať rameno proti vonkajším vibráciám. V prípade meracieho ramena bude táto podložka prenášať vibrácie od povrchu na ktorom bude rameno položené. Tieto podložky a optické vlákna sa musia uložiť do krycieho boxu ktorý bude mať vstupno/výstupné rozhrania. Tieto rozhrania sú tvorené optickými vláknami pre pripojenie fotodetektora na výstup a laseru na vstup. Aj s týmito rozhraniami musí senzor dodržať podmienku aby bol vode odolný.

Prvým krokom pri tejto stavbe bolo uloženie senzorickeho vlákna na spodok boxu z PVC. Dno boxu bude tvoriť rezonančnú podložku pre meracie vlákno. Vlákno je po celej dĺžke uložené na dne boxu a upevnené elektrickou páskou pre jej čo najlepšie upevnenie. Cieľom bolo zaistiť dostatočnú styčnú plochu medzi meracím vláknom s spodnou "rezonančnou" časťou použitého vode odolného plastového boxu (tento box spĺňa podmienku vode odolnosti podľa normy IP66). Po dohode s vedúcim bakalárskej práce bolo zvolené elipsové uloženie meracieho vlákna, ktoré umožnilo maximalizovať styčnú plochu a zamedziť zbytočným ohybom vlákna. Pre úvodné uchytenie vlákna bola využitá konvenčná páska splňujúca podmienku izolácie, tento spôsob bol využitý pre úvodné testovania a praktické testy. V prípade ďalšieho výskumu bude nutné venovať úsilie každej časti návrhu senzoru, teda uloženie meracieho tak referenčného ramena. Jedná sa o samostatné a dlhodobé problémy, ktoré v rámci tejto práce neboli z časových dôvodov detailne riešené.



Obrázok 6.1: Uloženie senzorickeho ramena.

Na obrázku 7.1 si teda môžeme všimnúť ukladanie vlákna kruhovito pre čo najlepšie využitie priestoru v boxe a pre čo najväčšiu citlivosť ramena, zároveň minimalizáciu ohybov. Na vnútornej strane boxu je upevnený väzobný člen 50/50 ktorý nám rozdeľuje svetelnú vlnu šíriacu sa vláknom z lasera alebo zlučuje svetelné vlny pre meranie interferencie z výslednej vlny. Kruhovitú ukladanie bolo realizované na základe požiadavkou vedúceho práce.



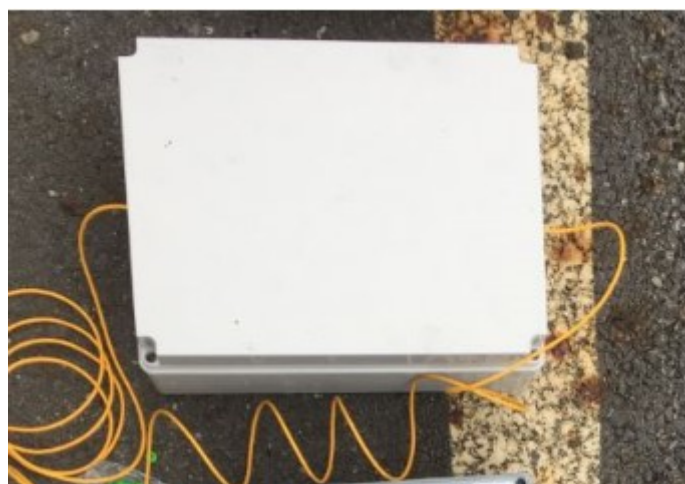
Obrázok 6.2: Coupler.

Na konci vlákna ktoré je určené pre senzoricke rameno je viditeľná spojka na túto spojku pripojíme ďalšie vlákno vychádzajúce z druhého väzobného deliča a spolu budú tvoriť senzoricke rameno. Celé senzoricke vlákno je upevnené páskou a na tomto vlákne je ešte priložená akustická pena. Táto pena bola využitá pre enkapsuláciu referenčného vlákna.



Obrázok 6.3: Uloženie referenčného ramena.

Akustická pena splňuje požiadavku pre čo najlepšie izolovanie referenčného vlákna od mechanických vibrácií viz [15] a po dohode s vedúcim práce bol zvolený tento typ materiálu pre uloženie referenčnej časti senzoru. Referenčné vlákno je podobne ako meracie vlákno tvorené dvomi časťami, sú to dve zostávajúce vlákna z väzobných deličov. Tieto časti sú spojené spojkou a spolu tvoria referenčné rameno. Referenčné rameno je priložené ďalšou vrstvou akustickej peny pre čo najväčšiu izoláciu. Umiestnenie referenčného ramena je vyobrazené na obrázku 7.3. Zakrytie referenčného ramena ďalšou vrstvou akustickej peny bolo za účelom úplne izolovať referenčné rameno pred vonkajšími mechanickými vibráciami. Celý box sme zakryli jeho vrchnou časťou ktorá spolu s vyplnenými výrezmi pre vstup a výstup silikónovou vrstvou chráni celý systém pred vodou, prachom a ďalšími nečistotami ktoré by mohli poškodiť jednotlivé komponenty. Tieto vstupy/výstupy sú na každej strane senzoru ako môžeme vidieť na obrázkoch v ďalších kapitolách, a sú tvorené jedno vidovými optickými vláknami.



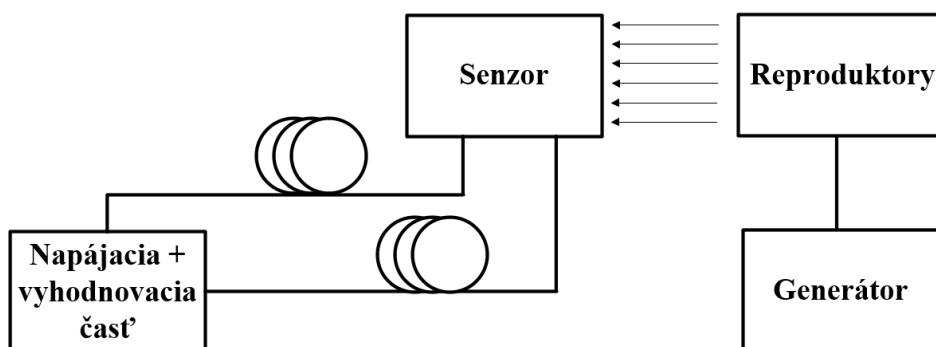
Obrázok 6.4: Zovňajšok celého senzoru.

6.2 Špecifikácia frekvenčného rozsahu senzoru

Pre otestovanie nášho skonštruovaného MZ interferometru je potrebné aby sme dokázali určiť frekvenčný rozsah tohto senzoru, v ktorom je senzor schopný relevantne detegovať vibračne akustickú ozvenu z okolitého prostredia. Pre určenie tohto rozsahu boli použité generátor, basový reproduktor a výškový reproduktor. Reprodukory boli umiestnené cca 1 m od senzoru. Obidva tieto reprodukory boli budené harmonickým signálom o amplitúde 20V z generátoru. Meranie prebieha ladením frekvencie budeného signálu. Pokiaľ uvidíme vo frekvenčnom spektre znateľný peak (s dostatočným odstupom SNR minimálne 3 dB), meníme frekvenciu budeného signálu, pokiaľ peak nesplynie so šumom, posledná hodnota viditeľného peaku je hraničná frekvencia. Frekvenčné spektrum bolo vyobrazované na PC ktoré bolo napojené na meraciu kartu a tá následne na detektor ktorý bol pripojený na výstup senzoru. Tieto merania boli vykonané ako pre hornú tak aj dolnú priepust.

Rozsah maximálnych amplitúd a frekvencie meraných hodnôt pre traťovú dopravu sú definované napríklad v medzinárodnej norme ISO 4866:1990 [29]. Ako je uvedené vyššie, zostavený Mach-Zehnderov senzor možno využiť pre merania v traťovej doprave a splňuje frekvenčný rozsah podľa normy ISO 4866:1990 (typicky sa koľajové súpravy pohybujú vo frekvenčnej oblasti od 10 Hz vyššie viz [15]) :

- Maximálny rozsah posunov 1-200 μm
- Maximálny rozsah amplitúdy rýchlosti kmitania: 0,2 - 50 mm.s-1
- Maximálny rozsah amplitúdy zrýchlenia: 0,02-1 m.s-2
- Frekvenčný rozsah: 1-80 Hz



Obrázok 6.5: Schéma merania rozsahu frekvencie.

7 Praktické porovnávacie merania

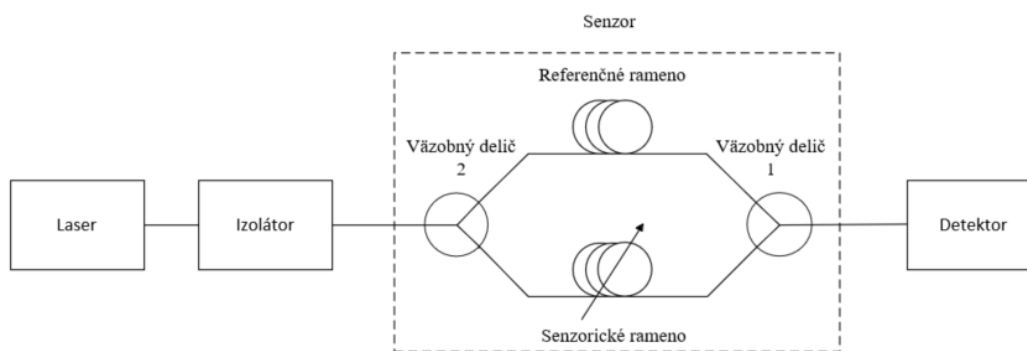
Táto kapitola sa bude venovať praktickým meraniam s skonštruovaným opticko-vláknovým interferometrom v porovnaní so seizmickou stanicou Gaia 2T. Od výsledných meraní očakávame že potvrdia teóriu o možnom využití interferometrov ako alternatívy k seizmickým snímačiam. A taktiež, že nami vytvorený interferometer sa osvedčí v meraniach aj po konštrukčnej stránke, teda bude vode odolný (daždivé počasie počas merania), kompaktný (presun z jedného miesta merania na druhé).

7.1 Postup merania

Všetky uskutočnené merania so zostaveným funkčným senzorom sa odohrávali v mestskej časti Ostravy a to časť Radvanice (GPS súradnice 49.8271772N, 18.3098511E). Pretože senzor bol implementovaný v blízkej koľajovej štruktúre, kvôli bezpečnosti prebiehali všetky merania pod dohľadom bezpečnostných pracovníkov dopravného podniku mesta Ostrava. Po dohode s nimi nám boli ponúknuté tri možné meracie termíny, ktoré boli plne využité. Cieľom bolo porovnávacie meranie vyššie použitých senzorov a záznam prechodov električkových súprav mestskej hromadnej dopravy Ostrava. V meranej lokalite sa vyskytovali električkové súpravy celkom štyroch rôznych typov a to Vario LFR, CKD T3. Miesto merania bolo situované cca 3 km od najbližšej zastávky súprav, a v dostatočnej vzdialenosti od najbližšej cestnej komunikácie.

Počasiu počas merania bolo sychravé miestami sa vyskytla prietrž mračien čo nám pomohlo i čiastočne otestovať aj odolnosť senzoru voči nepriazňam počasia. Laser, detektor a ostatné potrebné zariadenia pre napájanie senzoru a vyhodnocovanie samotných výsledkov, sa nachádzali oddelene od miesta merania vo vzdialenosti cca 10 m

Schéma meracej sústavy je zobrazená na obrázku 8.1.. Táto schéma presne zodpovedá zapojeniu pri meraní. Laser je typu DFB o výstupnom výkone 1-10 mW ten slúži ako zdroj samotného svetelného lúča, izolátor zaisťuje šírenie laserového signálu len v jednom smere a prispieva tak k stabilite výstupného signálu.



Obrázok 7.1: Schéma senzoru.

Väzobné členy ako už bolo spomenuté sú pasívne prvky, ktoré slúžia k zlúčeniu alebo spojeniu optického výkonu z/do jedného optického vlákna. Väzobné členy ktoré boli využité v tejto práci sú jedno vidové výkonové deliče, s deliacim pomerom 50:50 pre 1:2 a pre 2:1 s deliacim pomerom 50:50. Zvolené boli po dohode s vedúcim práce



Obrázok 7.2: Detekčná časť.

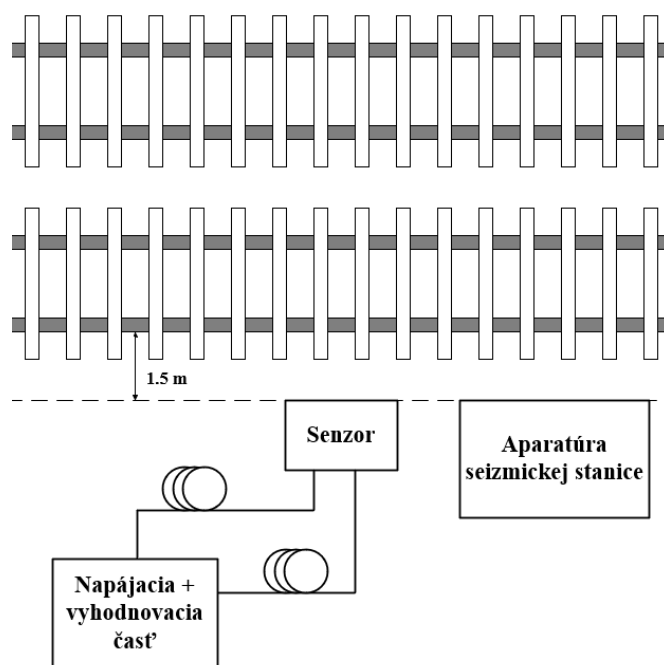
Na obrázku 7.2 si môžeme všimnúť detekčnú časť merania. Fotodetektor je optoelektronický prvok, ktorý prevádza dopadajúce svetlo na elektrický signál (napätie, prúd). Tento fotodetektor je typu PbSe. PbSe detektory sú fotovodivé senzory, pre ktoré platí že s rastúcou intenzitou dopadajúceho IR žiarenia sa jeho odpor znižuje. Meracia karta s označením NI USB-6210 bola využitá najmä z dôvodu jej kompatibility s vývojovým prostredím LabVIEW v ktorom bola vytvorená aplikácia pre vyhodnotenie signálu. Táto meracia karta slúži ako A/D prevodník. A/D prevodník slúži k prevodu analógového napäťového signálu získaného z fotodetektora do diskretnej (digitálnej podoby signálu). Ktorý možno potom počítačovo spracovať. V samotnom PC bola aplikácia v LabVIEW (dodaná vedúcim práce) ktorá slúžila pre vyhodnotenie signálu.



Obrázok 7.3: Interformetre a seizmická stanica (z ľava: nami vytvorený MZ senzor, trojramenný senzor, dve časti seizmickej stanice).

Senzory boli od prvej koľajnice vzdialené 1,5 metra. Za touto koľajnicou bola ďalšia koľajnica, čiže električkové súpravy šli v oboch smeroch. Tento fakt by sa mal odraziť aj na výstupných hodnotách, súprava prechádzajúca po bližšej koľajnici vydáva vyššiu vibračne akustickú ozvenu ako súprava na vzdialenejšej koľajnici. Taktiež celková rýchlosť, dĺžka súpravy a obsadenosť cestujúcimi sa odrazí na váhe súpravy z týchto skutočností môžeme usúdiť že priamo úmerne týmto vlastnostiam sa bude meniť aj vibračne akustická ozvena vytváraná prechádzajúcou súpravou. Počas merania sme zapisovali jednotlivé časy prechodu súprav na jednotlivých koľajniciach, pre vyhodnotenie výsledkov merania. Na cele meranie dohliadal personál z dopravného podniku Ostrava, ktorý zabezpečoval bezpečnosť pri meraní a plynulosť dopravy. Meranie bolo ukončené pri dostatočnom počte prejdejších súprav pre kvalitné spracovanie výsledkov.

Na obrázku 8.3 si môžeme všimnúť pozíciu jednotlivých komponentov meracieho senzoru, aparatury seizmickej stanice a napájacej a vyhodnovej časti.



Obrázok 7.4: Schéma merania.

7.2 Vyhodnotenie praktických meraní

V tejto podkapitole sa budeme venovať vyhodnoteniu praktických meraní ktoré prebehli ako už bolo vyššie spomenuté v mestskej časti Ostravy a to Radvanice. Pre dostačujúce štatistické vyhodnotenie meraní ja potrebné vykonať viac týchto meraní. Celkovo sa uskutočnili tri merania. Väčší počet meraní sa bohužiaľ z dôvodu globálnej pandémie vírusu COVID-19 nemohlo uskutočniť. Pri meraní je potrebné mať bezpečnostný dozor zo strany dopravného

podniku Ostrava, kvôli bezpečnosti našej tak aj bezpečnosti dopravy ako takej. Tento dohľad bohužiaľ pri takejto mimoriadnej situácii nemohol byť poskytnutý.

7.3 Druhy električkových súprav

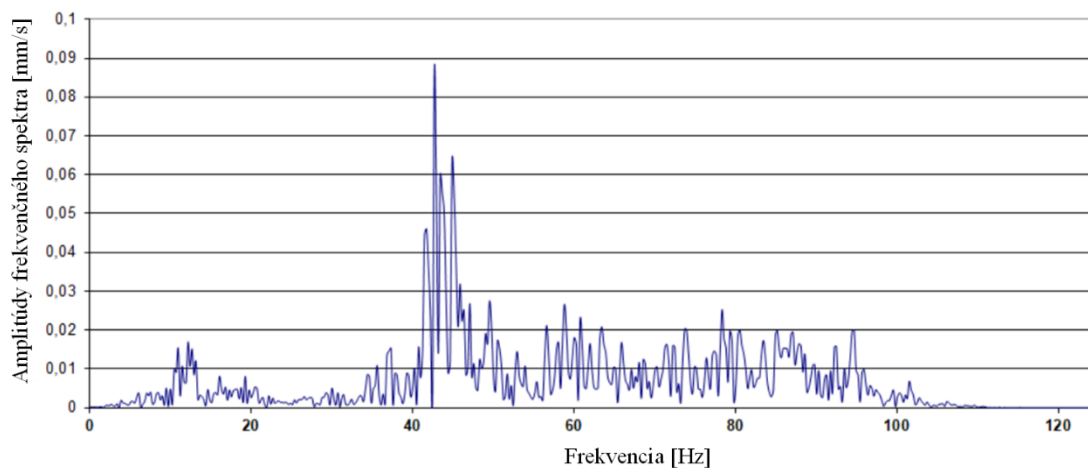
Pri našom meraní sme zaznamenali prechod dvoch typov električkových súprav. Ich počet prechodov a dominantné frekvenčné pásmo v ktorom sme ich prechod zaznamenali môžeme vidieť v tabuľke 1.2. Pri pohľade na nižšie uvedené grafické záznamy je zrejmé, že osa y je v prípade seizmickej stanice reprezentovaná amplitúdou frekvenčného spektra [mm/s] zatiaľ čo interferometrický senzor má osu y reprezentovanú v jednotkách [V]. Táto bakalárska práca popisuje iba úvodné meranie, kde cieľom bolo preukázať či merateľné frekvencie dané prejazdom električkovej súpravy sa zhodujú alebo sú podobné. Kalibrácia medzi interferometrom a seizmickou stanicou bude námetom nadväzujúcej práce po dohode s vedúcim práce.

Tabuľka 1.2: Električkové súpravy, prechody, frekvenčný charakteristika.

Typ súpravy	Počet prechodov	Dominantná frekvenčná zložka [Hz]	
		Seizmická stanica	Interferometer
Vario LFR	33	40-45	42-48
CKD T3	29	40-50	41-48

7.4 Frekvenčná analýza súpravy Vario LFR

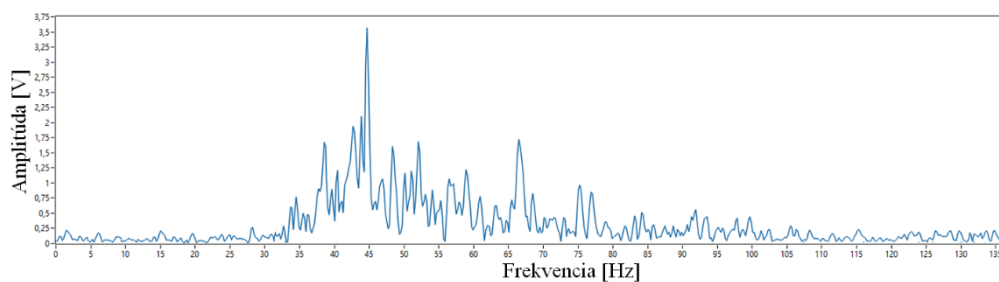
Na obrázku 7.5 si môžeme všimnúť grafickú ukážku vyhodnocovacieho frekvenčného spektra prejazdu súpravy typu Vario LFR. Prechody boli uskutočnené na bližšej koľajovej trati a samozrejme podľa schémy na obrázku 7.4. Toto spektrum platí pre seizmickú stanicu.



Obrázok 7.5: Frekvenčné spektrum, seizmická stanica, Vario LFR.

Najväčší peak si môžeme všimnúť pri frekvencii 45 Hz na ose x (obr. 7.5). Tento peak môžeme charakterizovať ako dominantnú frekvenčnú zložku. Pri tejto frekvencii bola amplitúda frekvenčného spektra najvyššia, tento údaj môžeme vyčítať na ose y. Na obrázku 7.6 je grafická ukážka spektra zaznamenaného interferometrickým senzorom. Jedná sa o rovnaký prejazd a typ električkovej súpravy zobrazený na obrázku vyššie (obr. 7.5). Dominantná frekvencia je opäť viditeľná okolo hodnoty 45 Hz.

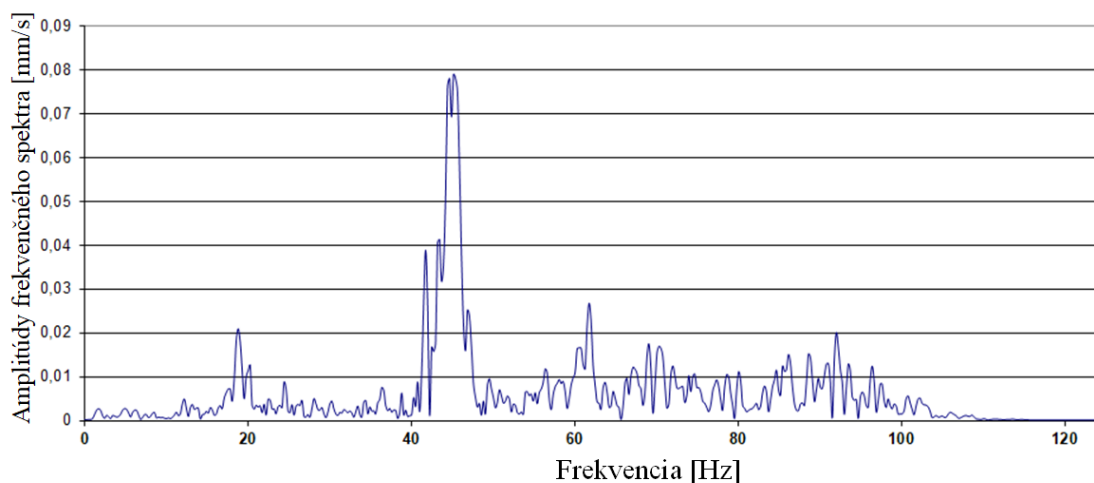
Tento poznatok je totožný s najväčším peakom na seizmickej stanici. Interferometer teda v tomto prípade veľmi dobre splnil úlohu seizmickej stanice nakoľko najväčší peak je v totožnej frekvencii.



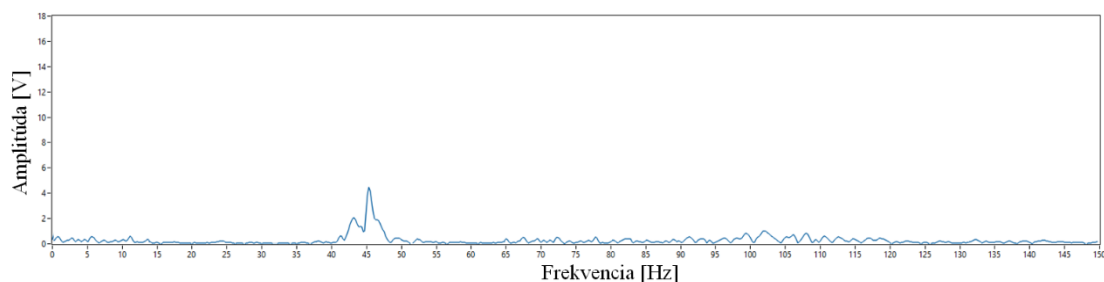
Obrázok 7.6: Frekvenčné spektrum, interferometer, Vario LFR.

7.5 Frekvenčná analýza súpravy CKD T3

Na obrázkoch 7.7 a 7.8 vidíme frekvenčné spektrá zo seizmickej stanice a z nami konštruovaného interferometra. Na oboch spektrách je viditeľný peak v hodnote 46 Hz aj v tomto prípade boli výsledky veľmi totožné. V tomto prípade sa jedná o totožný prejazd električky typu CKD T3.



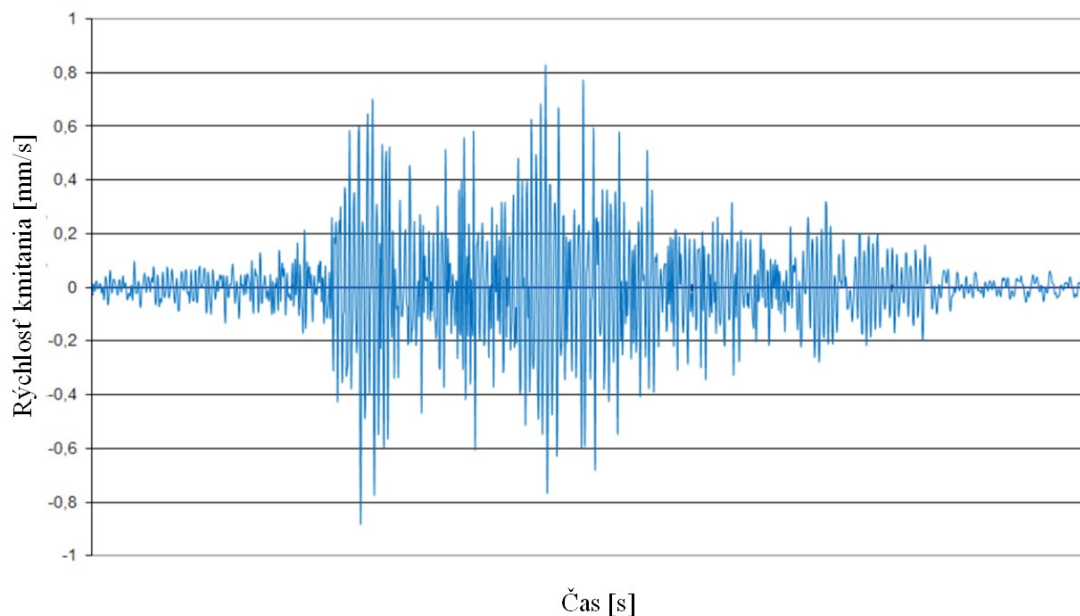
Obrázok 7.7: Frekvenčné spektrum, seizmickej stanica, CKD T3.



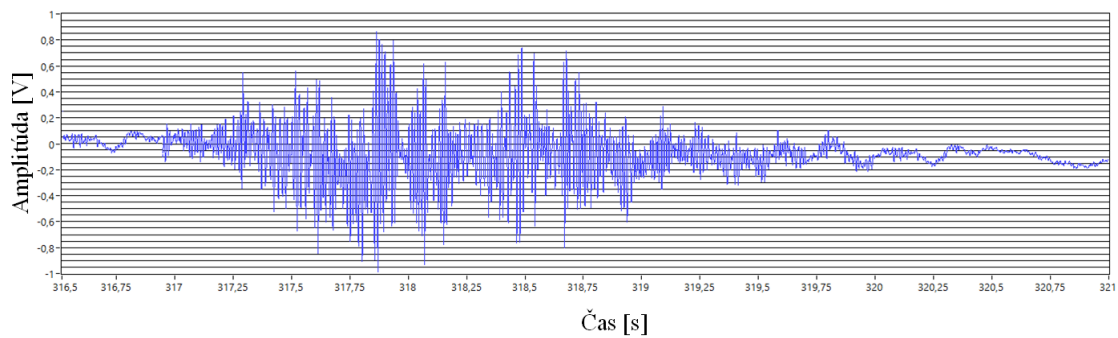
Obrázok 7.8: Frekvenčné spektrum, interferometer, CKD T3.

7.6 Časová analýza súprav Vario LFR, CKD T3

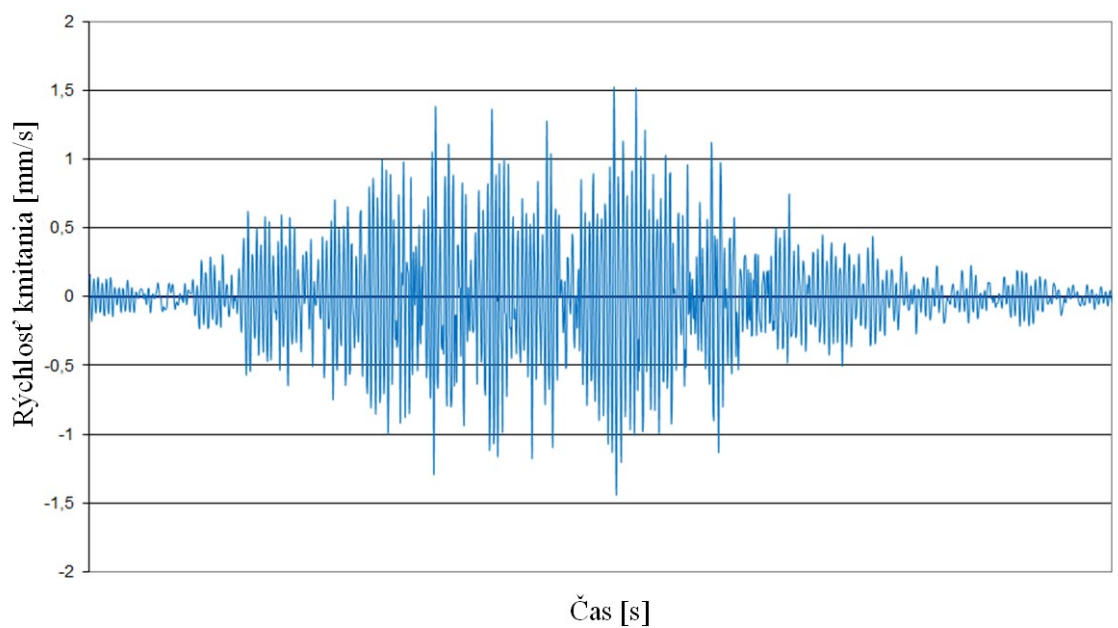
Na obrázkoch 7.9 a 7.10 vidíme zaznamenávanie odozvy v časovej doméne u seizmickej stanice a taktiež aj u interferometra, časové záznamy sú v tejto práci zobrazené na ukážku z dôvodu grafického porovnania získaných dát. Teda že v čase či už seizmická stanica alebo interferometer reagovali veľmi podobne na okolitý prechod rovnakej elektrického súpravy. Pri bližšom pohľade je možné sledovať relatívne veľkú podobnosť signálu. V prípade ďalšieho signálového spracovania či konštrukčných úprav senzoru by napríklad bol možné detegovať a kalkulovať jednotlivé nápravy vozidiel. Táto úloha môže byť námetom pre nadväzujúci výskum. Na obrázkoch 7.11 a 7.12 je zobrazené časové spektrum pre súpravu CKD T3.



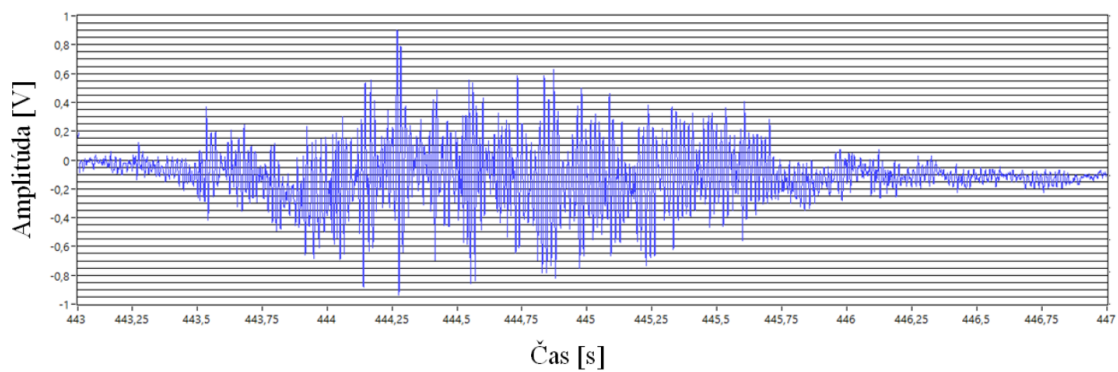
Obrázok 7.9: Časové spektrum, seizmická stanica, Vario LFR.



Obrázok 7.10: Časové spektrum, interferomter , Vario LFR.



Obrázok 7.11: Časové spektrum, seizmická stanica, CKD T3.



Obrázok 7.12: Časové spektrum, interferomter , CKD T3.

Záver

Táto bakalárska práca sa v teoretickej časti venuje vysvetleniu a princípu funkcie vláknovo optických interferometrov. Základným stavebným kameňom takýchto zariadení sú optické vlákna. Teda teoretická časť obsahuje vysvetlenie pojmu svetlo, spôsob naviazania svetla do optického vlákna, konštrukciu optického vlákna, samotnú výrobu aj druhy optických vlákien a ich jednotlivé výhody v praxi. Samotný princíp interferencie svetla čo je kľúčový princíp práce interferometrov ako takých, vysvetlenie tohto pojmu sa taktiež nachádza v tejto časti práce. Ďalej nasledoval rozbor jednotlivých druhov známych interferometrov od ich histórie až po konštrukciu a taktiež ich využitie v praxi. Pre zostrojenie nášho vlastného vláknovo optického senzora sme použili Mach-Zehnderov dvojramenný interferometer.

Rešerše použitia vláknovo optických interferometrov bol jeden bod zo zadanie práce. V tejto časti sme získavali poznatky z rôznych vedeckých článkov kde autori využívali MZ interferometer pre rôzne aplikácie či už v doprave alebo iných odvetviach vedy a výskumu. Práca obsahuje aj časť ohľadom charakteristiky seizmickej stanice ktorá bola použitá pri meraniach ako porovnanie s nami zostrojeným interferometrom.

Praktická časť sa zaoberá chronologickým postupom konštrukcie interferometra, opisom postupu merania, opisom podmienok pri jednom z meraní a nakoniec samotným vyhodnotením výsledkov z merania. Ako základ pre interferometer bol použitý PVC box do ktorého boli umiestnené jednotlivé komponenty interferometra pre jeho správnu funkciu, samozrejme konštrukcia musela splňovať špecifické vlastnosti ako je vode odolnosť, kompaktnosť aj odolnosť ako taká voči vonkajším vplyvom. Prebehli celkovo tri meracie dni, po spracovaní výsledkov z týchto meraní sa nám naša teória potvrdila a nami zostrojený interferometer mal veľmi totožné výsledky s konvenčne používanou seizmickou stanicou Gaia 2T, primárne vo frekvenčnej oblasti čo je najdôležitejšie.

Interferometer má niekoľko výhod oproti seizmickej stanici a to napríklad cena, elektrická pasivita, oddelenie miesta merania od miesta napájania a odolnosť voči elektromagnetickému rušeniu čo môže byť pri modernejších traťových vozidlách značný problém. Výsledky tejto práce sú teda základným dôkazom využiteľnosti vláknovo optických interferometrov v meraní vibračno-akustickej odozvy koľajových vozidiel a môžu konkurovať seizmickým staniciam.

Samotná konštrukcia interferometra ako aj hlbší výskum negatívnych javov železničnej dopravy môže byť témou ďalšieho výskumu.

Použitá literatura

- [1] SKAPA, Ján. Přenosové systémy a média pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO. Ostrava: Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3564-8.
- [2] Optická vlákna – páteř moderních komunikací [online]. 2011 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: https://www.ufe.cz/sites/default/files/Media/ccf_1-11_e.pdf
- [3] NAVRÁTIL, Jiří a Pavel LORENZ. Mnohovidová vlákna [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/824>
- [4] NAVRÁTIL, Jiří a Pavel LORENZ. Výroba optického vlákna [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2019-10-9]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/827>
- [5] Optické vlákna [online]. [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <http://evyucba.ku.sk/oks/index.html>
- [6] Interferometry a vlastnosti laserového záření [online]. [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: http://home.mlab.cz/WebSVN/filedetails.php?repname=svnkaklik&path=%2Fdokumenty%2Fskolni%2FZPOP%2Finterferometry%2FZPOP_03.pdf
- [7] MISHRA, Raj. Distributed Fibre Optic Virtual Fencing System [online]. 2013 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/263485253_Distributed_Fibre_Optic_Virtual_Fencing_System
- [8] MICHELSON'S INTERFEROMETER [online]. [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: https://www.niser.ac.in/sps/sites/default/files/basic_page/Michelson%20Interferometer.pdf
- [9] The Sagnac effect [online]. [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <http://www.cleonis.nl/physics/phys256/sagnac.php>
- [10] The Fabry-Perot Interferometer [online]. [cit. 2019-11-3]. Dostupné z: https://www.phy.davidson.edu/StuHome/cabell_f/diffractionfinal/pages/Fabry.htm
- [11] Fabry-Perot Interferometer [online]. [cit. 2019-11-3]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/fabry.html>
- [12] FABRY-PEROT INTERFEROMETER [online]. [cit. 2019-11-3]. Dostupné z: https://www.niser.ac.in/sps/sites/default/files/basic_page/FabryPerot%20Interferometer.pdf
- [13] Optical Instrumentation 9. Interferometer [online]. [cit. 2019-11-8]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/ErFarukBinPoyen/optical-instrumentation-9-interferometer>
- [14] ZETIE, K P, S F ADAMS a R M TOCKNELL. How does a Mach-Zehnder interferometer work? [online]. [cit. 2019-11-8]. Dostupné z: https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos576/papers/zetie_et_al_mach_zehnder00

- [15] NEDOMA, Jan, Marcel FAJKUS, Martin STOLARIK a Miroslav PINKA. Use of Fiber-Optic Sensors for the Detection of the Rail Vehicles and Monitoring of the Rock Mass Dynamic Response Due to Railway Rolling Stock for the Civil Engineering Needs [online]. 2019 [cit. 2019-11-8]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/330109761_Use_of_Fiber-Optic_Sensors_for_the_Detection_of_the_Rail_Vehicles_and_Monitoring_of_the_Rock_Mass_Dynamic_Response_Due_to_Railway_Rolling_Stock_for_the_Civil_Engineering_Needs
- [16] MENDEZ-ASTUDILLO, Manuel, Masaki OKAMOTO, Yoshiaki ITO a Tomohiro KITA. Compact thermo-optic MZI switch in silicon-on-insulator using direct carrier injection [online]. 2019 [cit. 2019-11-8]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-27-2-899&id=403781>
- [17] NEDOMA, Jan, Marcel FAJKUS, Radek MARTINEK, Jan JARGUS, Karel WITAS a Vladimír VAŠINEK. Sensor system based on the Mach-Zehnder interferometer for the rail transport [online]. 2018 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/325132327_Sensor_system_based_on_the_Mach-Zehnder_interferometer_for_the_rail_transport
- [18] KEPAK, Stanislav, Jakub CUBIK, Jan NEDOMA, David HRUBY, Stanislav HEJDUK, Petr ZAVODNY, Marcel FAJKUS a Vladimír VASINEK. Compact Fiber Optic Trackside Sensor for Rail Vehicle Detection and Analysis [online]. 2018 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318309030?via%3Dihub>
- [19] NEDOMA, Jan, Marcel FAJKUS, Radana KAHANKOVA, Radek MARTINEK, Marek DVORSKY, Jan VANUS, Vladimír VASINEK a Daniel CVEJN. Compact Fiber Optic Trackside Sensor for Rail Vehicle Detection and Analysis [online]. 2017 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-18-26-6/elk-26-6-17-1712-166.pdf>
- [20] NEDOMA, Jan, Marcel FAJKUS, Radek MARTINEK, Vladimír VASINEK, Martin NOVÁK, Jan JARGUS a Pavel MEC. Fiber optic sensor for monitoring a density of road traffic [online]. 2017 [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320635750_Fiber_optic_sensor_for_monitoring_a_density_of_road_traffic
- [21] NEDOMA, Jan, Marcel FAJKUS, Lukas BEDNAREK, Vladimír VASINEK a Jan JARGUS. Non-destructive Fiber-optic Sensor System for the Measurement of Speed in Road Traffic [online]. 2016 [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <http://advances.utc.sk/index.php/AEEE/article/view/1857>
- [22] NEDOMA, Jan, Ondřej ZBORIL, Marcel FAJKUS, Petr ZAVODNY, Stanislav KEPAK, Lukas BEDNAREK, Radek MARTINEK a Vladimír VAŠINEK. Fiber optic system design for vehicle detection and analysis [online]. 2016 [cit. 2019-11-22]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/301711568_Fiber_optic_system_design_for_vehicle_detection_and_analysis

- [23] JIANG, Li-Hui, Xiang-Ming LIU a Feng ZHANG. Multi-target recognition used in airport fiber fence warning system [online]. 2010 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5580929>
- [24] WEI, Liu, Wu XUQIANG, Zhang GANG, Li SHILI, Zuo CHENG, Fang SHASHA a Yu BENLI. Refractive index and temperature sensor based on Mach-Zehnder interferometer with thin fibers [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520019304997?via%3Dihub>
- [25] SUBHASHREE OJHA, N.N., Ashish KUMAR, Naveen KUMAR, Zuo CHENG a Yu BENLI. Post-fabrication refractive index sensitivity enhancement technique for single-fiber Mach-Zehnder interferometer [online]. 2020 [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520019304997?via%3Dihub>
- [26] KUMARI, Anu, Amrindra PAL, Ajaypreet SINGH a Sandeep SHARMA. All-optical binary to gray code converter using non-linear material based MIM waveguide [online]. 2020 [cit. 2019-12-5]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402619313476?via%3Dihub#!>
- [27] HU, Jie. Dual Mach-Zehnder Interferometer Based on Side-Hole Fiber for High-Sensitivity Refractive Index Sensing [online]. 2019 [cit. 2019-12-5]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8873618>
- [28] CHANGRUI, Liao. Fiber Taper-Based Mach-Zehnder Interferometer for Ethanol Concentration Measurement [online]. 2019 [cit. 2019-12-5]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-666X/10/11/741>
- [29] BS ISO 4866:2010: Mechanical vibration and shock. Vibration of fixed structures. Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures. BSI Group, 2010. ISBN 978 0 580 64577 8.