VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018 Bc. David Dorazin

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS


# LOKALIZACE VIBRACE V OKOLÍ OPTICKÉHO VLÁKNA POMOCÍ INTERFEROMETRICKÉHO SENZORU
LOCATION OF VIBRATION AROUND THE OPTICAL FIBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS


AUTOR PRÁCE — Bc. David Dorazin
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Milan Čučka
SUPERVISOR


BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**
Ústav telekomunikací

***Student:*** Bc. David Dorazin ***ID:*** 164720
***Ročník:*** 2 ***Akademický rok:*** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Lokalizace vibrace v okolí optického vlákna pomocí interferometrického senzoru

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je teoretický rozbor interferometrických optovláknových senzorů. Následně budou rozebrány možnosti snímání jednotlivých jevů působících na optické vlákno a jejich lokalizace. Student v rámci práce navrhne a sestaví měřicí pracoviště pro lokalizaci vibrací na optické trase. Systém bude využívat interferometrický typ senzoru. Dále student vyvine aplikace v programu Matlab nebo LabVIEW pro lokalizaci vibrace na optické trase.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] STEEL, W. H. Interferometry. 2nd ed., 1st paperback ed. New York: Cambridge University Press, 1983. ISBN 0521311624.

***Termín zadání:*** 5.2.2018 ***Termín odevzdání:*** 21.5.2018

***Vedoucí práce:*** Ing. Milan Čučka
***Konzultant:***

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**
*předseda oborové rady*

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

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce řeší možnost využití optického vlákna jako senzoru. V úvodu práce je popsáno základní rozdělení těchto senzorů, jejich principy a využití. Dále se práce zaměřuje na distribuované senzory pracující na jevu interference světla tvz. interferometry. Tyto optovláknové interferometry jsou v práci podrobně rozebrány a to především jejich varianty, které jsou schopny měřit a lokalizovat vibrace v okolí optického vlákna. Podstatná část práce se věnuje duálnímu Mach–Zehnderovu interferometru. Ten je v práci teoreticky rozebrán a odsimulován v prostředí Matlab. Dále se práce zabývá vývojem dvou aplikací v prostředí Matlab. Jedna aplikace slouží k simulaci a teoretickým výpočtům duálního Mach–Zehnderova interferometru a druhá aplikace je určena pro zpracování dat získaných při měření tímto interferometrem. V závěru práce je duální Mach–Zehnderův interferometr sestaven v laboratorním prostředí a provedeno měření a lokalizace vibrací za pomoci tohoto interferometru.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Distribuovaný senzor, duální Mach–Zehnderův interferometr, interferometr, lokalizace vibrací, Matlab, optické vlákno, OTDR, zpětný rozptyl

## ABSTRACT

This diploma thesis solves possibilities of utilization optical fiber as sensor. At the beginning, basic division of this sensors is desribed, their principles and usage. Then the thesis is focused on distributed sensors based on the interference of the light, interferometers. This optic fiber interferometers are described, mainly their modifications for detection and localization of vibrations along optical fiber. Significant part of the thesis deals with dual Mach–Zehnder interferometer. This interferometer is theoreticaly desribed and simulated in Matlab. Further the thesis deals with development of two aplication in Matlab software. One application is for simulation and theoretical computation of dual Mach–Zehnder interferometer. Second application serves for signal processing of acquired data that are measured on this interferometer. At the end of the thesis, dual Mach–Zehnder interferometer is designed and build in laboratory enviroment and executed measurement and localization of vibrations using this interferometer.

## KEYWORDS

Distributed sensors, dual Mach–Zehnder interferometer, interferometer, localization of vibrations, Matlab, optical fiber, OTDR, back scattered light

DORAZIN, David. *Lokalizace vibrace v okolí optického vlákna pomocí interferometrického senzoru*. Brno, 2018, 70 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Milan Čučka,

Vysázeno pomocí balíčku `thesis` verze 2.63; `http://latex.feec.vutbr.cz`

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Lokalizace vibrace v okolí optického vlákna pomocí interferometrického senzoru“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno ..... .....

podpis autora(-ky)

# PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Milanu Čučkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno ..... .....

podpis autora(-ky)

Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
http://www.six.feec.vutbr.cz

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsaný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno ..... .....

podpis autora(-ky)

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI

2007–13
OP Výzkum a vývoj pro inovace

# OBSAH

**Úvod** **12**

**1 Optické vláknové snímače** **13**
1.1 Dělení optických vláknových senzorů . . . . . 13
1.2 Distribuované optické vláknové senzory . . . . . 14
1.2.1 Senzory založeny na zpětném rozptylu . . . . . 14

**2 Vláknové interferometry** **18**
2.1 Základní typy interferometrů . . . . . 18
2.1.1 Mach–Zehnderův vláknový interferometr . . . . . 19
2.1.2 Michelsonův vláknový interferometr . . . . . 19
2.1.3 Sagnacův interferometr . . . . . 20
2.1.4 Fabry-Perotův interferometr . . . . . 21
2.2 Interferometry určeny k lokalizaci vibrací . . . . . 21
2.2.1 Duální Mach–Zehnderův interferometr (DMZI) . . . . . 22
2.2.2 Duální Michelsonův interferometr (DMI) . . . . . 24
2.2.3 Sagnacův interferometr pracující na dvou vlnových délkách . . 25
2.2.4 Kombinované interferometry . . . . . 26
2.3 Senzory kombinující metody měření zpětného rozptylu a interferometrii 28
2.3.1 Kombinace Mach–Zehnderova interferometru a fázového OTDR 28
2.3.2 Kombinace Michelsonova interferometru a fázověh OTDR . . . 29

**3 Aplikace vláknových senzorů** **31**
3.1 Monitorování stavu civilní infrastruktury . . . . . 31
3.1.1 Monitorování úniků produktovodů . . . . . 31
3.1.2 Monitorování fyzického stavu staveb . . . . . 32
3.2 Ochrana perimetru . . . . . 32
3.3 Další využití . . . . . 33

**4 Simulace DMZI** **34**
4.1 Matlab . . . . . 34
4.1.1 Komponenty MATLABu . . . . . 34
4.2 Simulace DMZI v prostředí Simulink . . . . . 35
4.3 Teoretický výpočet polohy vibrace . . . . . 37

**5 Aplikace pro simulaci DMZI** **39**
5.1 Popis funkčnosti aplikace . . . . . 40
5.1.1 Generování signálu . . . . . 40

5.1.2 Výpočet pozice vibrace . . . . . 41

**6 Návrh laboratorního měření DMZI** **42**
6.1 Komponenty laboratorního zapojení . . . . . 42

**7 Aplikace na zpracování dat** **49**
7.1 Popis aplikace . . . . . 49
7.1.1 Popis grafického uživatelského rozhraní . . . . . 49
7.1.2 Popis jednotlivých komponent aplikace . . . . . 50

**8 Výsledky laboratorního měření** **56**
8.1 Měření vláken krátkých vzdáleností . . . . . 56
8.1.1 Měření frekvence vibrací . . . . . 56
8.1.2 Určení pozice zdroje vibrací . . . . . 58
8.2 Měření vláken delších vzdáleností . . . . . 59
8.2.1 Měření frekvence vibrací . . . . . 59
8.2.2 Určení pozice zdroje vibrací . . . . . 60
8.3 Vyhodnocení měření . . . . . 61
8.4 Srovnání optovláknových senzorů schopných lokalizace vibrací . . . . 62

**9 Závěr** **64**

**Literatura** **65**

**Seznam symbolů, veličin a zkratek** **67**

**Seznam příloh** **69**

**A Obsah přiloženého CD** **70**
A.1 Vlastní elektronická verze práce . . . . . 70
A.2 Složka Simulace DMZI . . . . . 70
A.3 Složka Aplikace na simulaci DMZI . . . . . 70
A.4 Složka Aplikace na zpracování dat z DMZI . . . . . 70
A.5 Složka Náměry z DMZI . . . . . 70

# SEZNAM OBRÁZKŮ


1.1 A) schéma bodového senzoru, B) schéma rozprostřeného senzoru . . . 13
1.2 Zpětné rozptyly v optickém vlákně . . . . . 15
1.3 Schématické zapojení Φ-OTDR . . . . . 16
1.4 Schématické zapojení POTDR . . . . . 17
2.1 Blokové schéma dvouramenného Mach–Zehnderova interferometru . . 19
2.2 Ukázka principu dvouramenného Michaelsonova interferometru . . . . 20
2.3 Schéma Sagnacova interferometru . . . . . 20
2.4 a) Schéma vnějšího Fabry-Perotova interferometru, b) Schéma vnitřního Fabry-Perotova interferometru . . . . . 21
2.5 Schéma zobrazující vliv vibrací na optické vlákno . . . . . 21
2.6 Schéma duálního Mach-Zehnderova interferometru . . . . . 22
2.7 Schéma kruhového Mach-Zehnderova interferometru . . . . . 24
2.8 Schéma duálního Michelsonova interferometru . . . . . 25
2.9 Schéma Sagnacova interferometru pracujícího na dvou vlnových délkách. . . . . 26
2.10 Schéma kombinovaného Sagnac-MZ interferometru . . . . . 27
2.11 Schéma kombinovaného Sagnac-Michelsonova interferometru . . . . . 28
2.12 Schématické zapojení kombinovaného senzoru: MZI-Φ-OTDR . . . . . 29
2.13 Schématické zapojení kombinovaného senzoru: MI-Φ-OTDR . . . . . 30
4.1 Zapojení simulace DMZI v prostředí Simulink. . . . . 36
4.2 Výstup simulace DMZI. . . . . 37
5.1 Aplikační software DMZI. . . . . 39
5.2 Část určena fotodetektoru v softwaru DMZI. . . . . 40
5.3 Část, kde je proveden výpočet simulace DMZI. . . . . 41
6.1 Blokové schéma laboratorního zapojení DMZI. . . . . 42
6.2 Zařízení pro umístění a teplotní stabilizaci diody. . . . . 43
6.3 Optický izolátor. . . . . 44
6.4 Coupler. . . . . 45
6.5 Konektor FC/APC. . . . . 45
6.6 Optická spojka. . . . . 45
6.7 Fotodetektor PT-5330. . . . . 46
6.8 Digitální USB osciloskop Analog Discovery 2. . . . . 47
6.9 GUI Waveforms. . . . . 47
7.1 Aplikační software sloužící ke zpracování dat DMZI. . . . . 50
7.2 Načtení souboru, výpis jména souboru a zobrazení blokového schéma. 50
7.3 Vykreslení nefiltrovaných signálů na obou fotodetektorech. . . . . 51
7.4 Vykreslení filtrovaných signálů na obou fotodetektorech. . . . . 52

7.5 Vyhodnocení frekvence výstupního signálu. . . . . 53
7.6 Výpočet pozice zdroje vibrací. . . . . 54
8.1 Měření frekvence na vláknu 2 metry, (a,c) vibrace působící na jedno rameno, (b,d) vibrace působící na obě ramena interferometru. . . . . 57
8.2 Měření frekvence na vláknu 5 metrů. . . . . 58
8.3 Výstup aplikace 100 Hz na 3 km vlákně. . . . . 60
8.4 Výstup aplikace 300 Hz na 6 km vlákně. . . . . 61

# SEZNAM TABULEK

4.1 Výpočty vzdálenosti vibrace. . . . . 38
8.1 Výstupní výkon laseru. . . . . 56
8.2 Srovnání optovláknových senzorů . . . . . 63

# ÚVOD

Distribuované optické vláknové senzory se vyvíjí od doby, kdy bylo zjištěno, že je možný přenos světla optickým vláknem. Kdežto optické vlákno se kvůli svým přednostem ve velkém začalo prosazovat do světa telekomunikací a postupně vytlačuje metalické kabely jak na dálkových, tak i na těch kratších trasách, u optických vláknových senzorů nenastal tak velký průlom, jak se původně předpokládalo, i když v porovnání s klasickými elektronickými senzory dosahují stejných či lepších výsledků. Hlavní překážkou pro jejich rozšíření byla především cena výroby. Avšak i přes původní nezájem se na vývoji nepřestalo pracovat a v současné době se tyto senzory prosazují ve všech odvětvích měřící, řídící a automatizační techniky. Svými přednostmi ukazují v mnohých oblastech převahu nad konvenčními elektronickými senzory, hlavně v měření na větší vzdálenosti.

Tato práce se zaměřuje na využití optických vláken jako distribuovaných senzorů různých fyzikálních veličin, především pak se zaměřením na vibrace. Toho je docíleno využitím lineárních a nelineárních jevů v optickém vlákně. Kdežto u optických vláken určených pro telekomunikační účely je cílem potlačit lineární a nelineární jevy co nejvíce, především u dálkových přenosů s navázaným vysokým výkonem, tak optické vláknové senzory jsou založeny právě na snímání těchto jevů, kvůli jejich závislosti na vnějším působení fyzikálních veličin.

Práce postupně popisuje základní rozdělení distribuovaných optovláknových senzorů a částečně jsou popsány senzory pracující na snímání zpětného rozptylu na principech OTDR.

Hlavním tématem této práce jsou však distribuované senzory, pracující na fyzikálním jevu interference světla. Tyto přístroje se nazývají interferometry a je jim věnována podstatná část této práce, speciální zaměření je dále věnováno možnostem lokalizace u těchto přístrojů a je rozebrána řada zapojení umožňující lokalizaci vibrací.

V praktické části se práce bude věnovat duálnímu Mach–Zehnderovu interferometru. Tento interferometr bude simulován v prostředí softwaru Matlab, přesněji v jeho nástavbě Simulink a proveden teoretický výpočet lokalizace vibrací. Dále se bude práce věnovat vývoji aplikací v prostředí Matlab, za pomoci rozšíření GUIDE. Jedna aplikace bude sloužit k simulaci a teoretickým výpočtům duálního Mach–Zehnderova interferometru a druhá aplikace bude navržena na zpracování signálů získaných měřením vibrací na tomto interferometru.

V závěru práce je navrženo zapojení duálního Mach–Zehnderova interferometru v laboratorním prostředí. Interferometr bude sestaven a následně na něm bude provedeno měření a lokalizace vibrací za pomoci aplikace na zpracování dat.

# 1 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SNÍMAČE

Jejich vznik se datuje zhruba do konce šedesátých let minulého století v souvislosti s prvními v praxi použitelnými optickými vlákny. V dnešní době neexistuje veličina, kterou by jsme za pomocí vláknových senzorů nemohli změřit, ale i přes tento fakt, u nich nedošlo k tak masivnímu rozšíření, jak se z počátku předpokládalo. Za hlavní důvod lze považovat ekonomickou náročnost optických snímačů.

Na druhou stranu, u některých aplikací (např. u gyroskopů a hydrofonů) jsou nezastupitelné, protože i nejlepší klasické snímače, nedosahují tak kvalitních parametrů jako optické vláknové senzory. To vyplývá ze zcela odlišného fyzikálního charakteru nosičů informace [1].

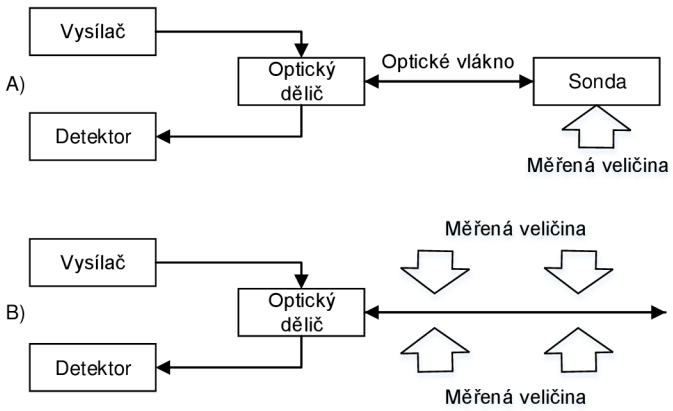
Základní vlastnosti optických vláknových senzorů:

- vysoká citlivost,
- odolnost vůči vnějšímu rušení,
- vysoký izolační odpor,
- jiskrová bezpečnost (do 7 mW),
- odolnost vůči agresivnímu prostředí,
- použitelnost v obtížně přístupných místech.

## 1.1 Dělení optických vláknových senzorů

Optické vláknové senzory můžeme dělit do řady různých kategorií, protože existuje mnoho parametrů, podle kterých je možné provádět dělení, například:

- senzory, kde vlákno slouží pouze k přenosu informace viz obr. 1.1 a),
- senzory, kde vlákno slouží jako samotný detektor viz obr. 1.1 b).




Obr. 1.1: A) schéma bodového senzoru, B) schéma rozprostřeného senzoru [1].

**Dělení podle typu senzoru** [1]:

- Bodové senzory, kam se řadí velká škála různých druhů senzorů, které pracují na různých principech a jsou určené pro měření fyzikálních veličin v jednom bodě. Princip je naznačen na obr. 1.1 a).
- Distribuované (rozprostřené) senzory, které jsou schopny měřit po celé délce svého vedení a jejich princip je zobrazen na obr. 1.1 b). Tato práce se jimi bude zabývat.

**Dělení podle působící fyzikální veličiny** [1]:

- mechanické (tah, tlak, vibrace),
- elektrické (intenzita elektrického pole),
- magnetické (intenzita magnetického pole),
- tepelné, radiační, chemické, biologické.

**Dělení podle principu, na kterém senzor pracuje** [1]:

- amplitudové optické vláknové senzory,
- fázové optické vláknové senzory,
- polarizační optické vláknové senzory.

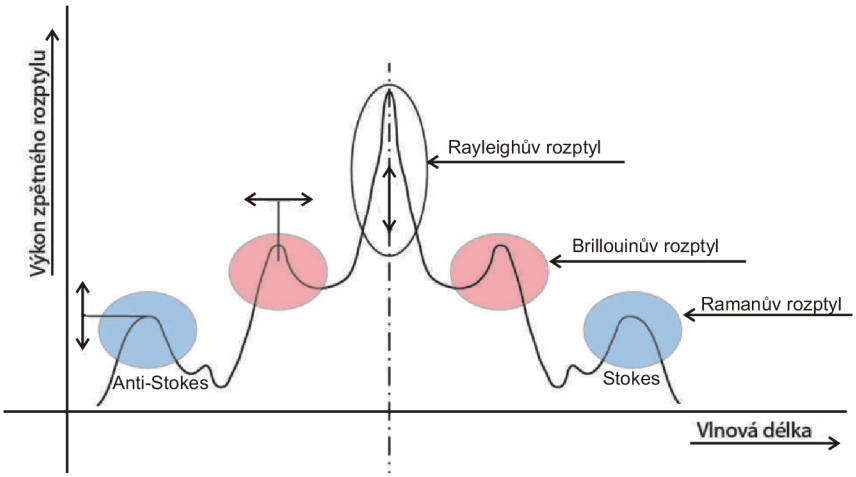
## 1.2 Distribuované optické vláknové senzory

Jak již bylo zmíněno, jsou to senzory, které pro měření používají přímo optické vlákno, které je vystaveno působení fyzikální veličiny a jsou schopny měřit po celé délce tohoto optického vlákna a tak se vlákno chová jako nekonečně mnoho bodových senzorů zapojených za sebou a tak máme přehled o měřené veličině po celé délce trasy. Tyto senzory využívají dvou principů měření, kdy první princip spočívá v měření zpětného rozptylu ve vlákně a druhý princip spočívá v interferenci světla, přičemž se těmto přístrojům říká interferometry a jsou hlavním tématem této práce [1].

### 1.2.1 Senzory založeny na zpětném rozptylu

Když se optická vlna šíří optickým vláknem, vznikají rozptyly a to elastický rozpytyl (Rayleigho) a neelastický (Brillouinův a Ramanův). Rayleigho rozptyl vzniká z důvodu mikroskopických změn v hustotě optického vlákna, kdežto Brillouinův rozptyl vzniká díky zvukovým vlnám. Tyto rozptyly se šíří do všech stran a část těchto rozptylů se šíří zpět, proti směru vyslaného paprsku. Tyto rozptyly se měří a vyhodnocují v měřících přístrojích. Nejznámější z těchto měřících přístrojů je OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), které bylo představeno před více než třemi desetiletími, a používá se k měření délky optických tras, útlumů vláken, spojek,

svarů, konektorů, atd. Další přístroje z této skupiny vychází z koncepce OTDR a jsou to například fázové OTDR (Φ-OTDR), polarizační OTDR (POTDR) nebo frekvenční OTDR (BOTDA), přičemž každý z těchto přístroju pracuje na jiném principu, ovšem vycházející z OTDR [1].




Obr. 1.2: Zpětné rozptyly v optickém vlákně [1].

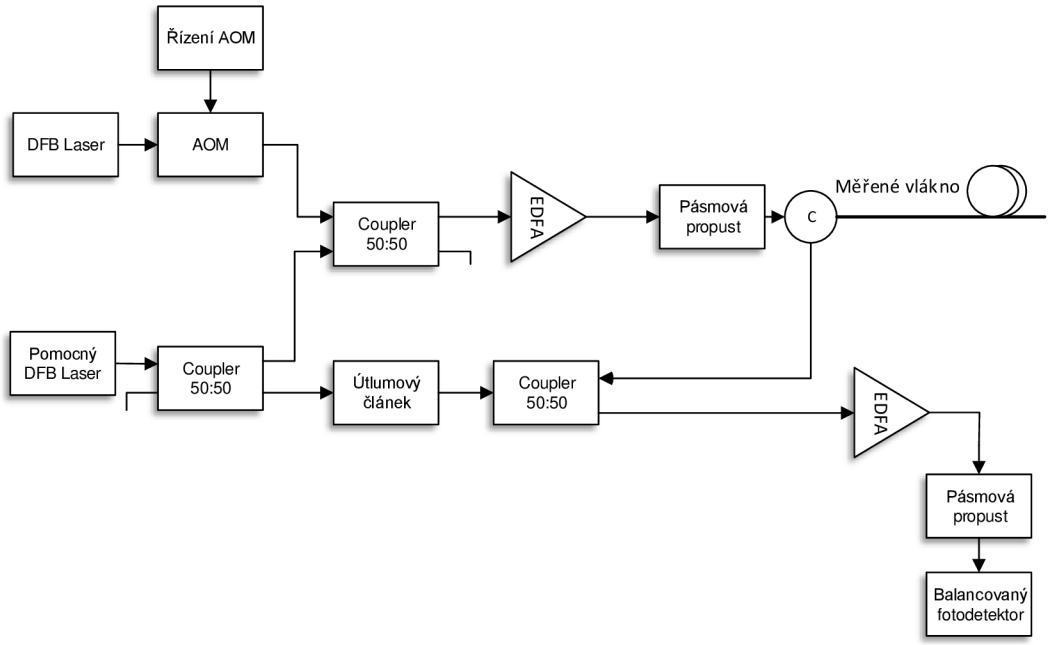
### Fázové OTDR (Φ-OTDR)

Tento distribuovaný senzor je založen na měření změn fáze zpětných rozptylů optické vlny. Jádro tohoto systému je plovoucí interferometr, zařízení citlivé na změny fáze zpětně rozptýleného světla z různých částí optického vlákna, které dorazí ve stejný čas k fotodetektoru. Z tohoto důvodu je Φ-OTDR schopno měřit mnohem menší rušení (např. vibrace) v okolí vlákna než běžné OTDR.

Výzkumné týmy ve světě prezentují své zapojení Φ-OTDR odlišnými způsoby, z důvodu dosažení co nejlepších výsledků modifikují své systémy. Pro demonstraci Φ-OTDR v této práci bylo vybráno zapojení, které bylo realizováno na Vysokém učení technikém v Brně [2].

Klíčovým prvkem Φ-OTDR je vysoce koherentní a frekvenčně stabilní DFB laser s úzkou šířkou spektrální čáry. Dalším důležitým prvkem je akusticko-optický modulátor, který musí být řízen přesným zdrojem napětí a generátorem signálu. V tomto zapojení je použito dvou EDFA zesilovačů. První je použit v režimu booster v přímé větvi pro zesílení impulzů a druhý je použit jako předzesilovač pro zesílení zpětně rozptýleného signálu. Je použito tří coupleru 50:50. První je použit pro rozdělení signálu z pomocného DFB laseru, couplery před EDFA zesilovači slouží ke slučování užitečného signálu se signálem pomocného laseru. Nastavitelný útlumový článek je použit u pomocného laseru k nastavování výkonových úrovní.

Kontinuální optická vlna (CW) vstupuje do akusticko-optického modulátoru, kde jsou vytvořený optické pulzy. Šířka pulzů a frekvence je nastavena podle délky měřeného vlákna. Poté je signál zesílen pomocí EDFA zesilovače a prochází optickou pásmovou propustí přes cirkulátor do měřeného vlákna [2].




Obr. 1.3: Schématické zapojení Φ-OTDR [2].

Jelikož není možné přímo zesilovat pulzy o vysoké frekvenci, je v tomto zapojení použit pomocný DFB laser vysílající na jiné vlnové délce. Tento signál je spojen se signálem hlavního laseru.

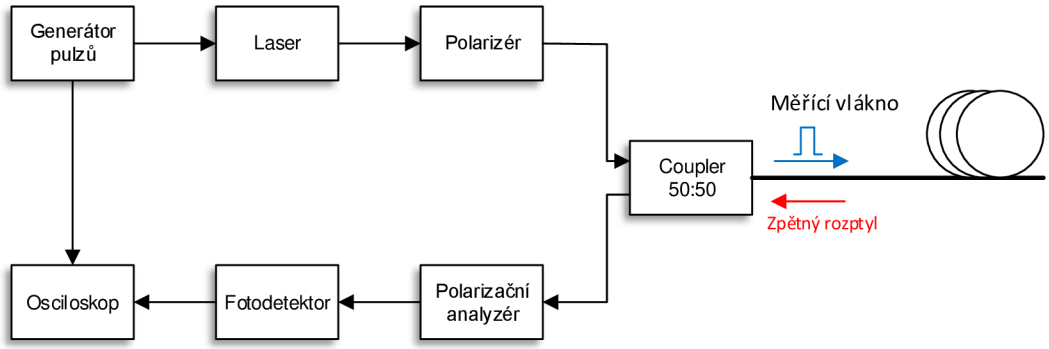
Když je na měřící vlákno aplikována vibrace, zpětně rozptýlený signál je distribuován Rayleigho rozptylem z každého bodu vlákna. Signál prochází optickým cirkulátorem do coupleru, kde je spojen se signálem pomocného laseru. Poté je signál zesílen, filtrován a převeden na signál elektrický pomocí balancovaného fotodetektoru. Oba filtry jsou použity k filtrování signálu pomocného DFB laseru. Signál je dále v počítači zpracován, frekvenčně vyhodnocena povaha a vzdálenost vzniku těchto vibrací [2].

### Polarizační OTDR (POTDR)

První návrh POTDR vznikl roku 1981, tato metoda je založena na měření stavu polarizace Rayleigho zpětného rozptylu v optickém vlákně. Základní zapojení POTDR je zobrazeno na obr. 1.4. Jak je vidět na schéma, POTDR může být sestrojeno

přidáním několika komponent na kontrolu polarizace do klasického OTDR. Polarizér slouží ke generování lineárně polarizovaného světla, které je následně vysláno do měřeného vlákna [4].

Stav polarizace světla procházející optickým vláknem může být ovlivněn mnoha vlivy, jako například tlakem, teplotou, elektrickým polem, atd.




Obr. 1.4: Schématické zapojení POTDR [3].

Princip POTDR spočívá v tom, že jsou vysílány pulzy do optického vlákna a ty kontinuálně vyvolávají Rayleigho rozptyl, tak jak postupují vláknem. Konvenční OTDR využívá intenzity světla zpětně rozptýleného signálu jako nositele informace, která určuje útlum podél celé délky vlákna. Zpětný rozptyl v optickém vlákně také nese informaci o polarizaci světla, která může být podobně využita k distribuovanému snímání fyzikálních veličin podél optického vlákna a na této vlastnosti je založeno POTDR. Polarizační vlastnosti světla ve vlákně se potom mění v závislosti na externích vlivech podél měřené trasy a tyto změny polarizace světla se snímají a dále vyhodnocují [3].

# 2 VLÁKNOVÉ INTERFEROMETRY

Distribuované optické vláknové senzory pro měření vibrací, založeny na interferometrických metodách, byly cílem mnoha výzkumů, z důvodu jejich přijatelné ceny a vysoké citlivosti. V interferometrech jsou informace o snímané veličině (např. vibracích) získány detekováním změny fáze optické vlny.

Působí-li na vlákno externí vibrace, tlak je generován na určité místo optické trasy, což vytváří změny délky optického vlákna, fotoelastický efekt a Poissonův efekt, a tak vznikají změny fáze optické vlny, které nesou informaci o snímané veličině [4].

#### Interference světla

Je to fyzikální jev, kdy superpozicí dvou či více vlnění vzniká výsledné vlnění o menší či větší amplitudě. Interference vzniká u různých typů vlnění, pro nás je to optické.

Interferovat mohou vlny, které se šíří a kmitají stejným směrem a dále mají vhodnou frekvenci. Fáze počátečních vlnění může být rozdílná, přičemž je amplituda výsledného signálu závislá na velikosti fázového posuvu [1].

#### Obecné rozdělení interferometrů

Jako základ konstrukce fázových optických senzorů se používají optické vláknové interferometry, které lze rozdělit do několika skupin:

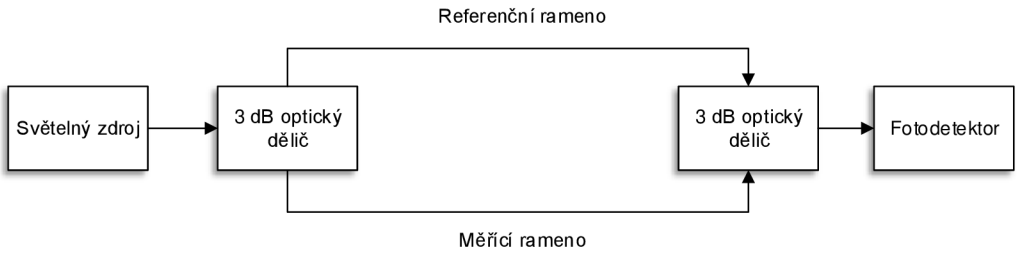
- Dvouramenný jednovidový interferometr (Mach–Zehnderův nebo Michelsonův), který využívá porovnání fáze světelné vlny, která se šíří měřícím optickým vláknem a vlny, která se šíří referenčním optickým vláknem.
- Jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou (Sagnacův interferometr) porovnávající fázi dvou světelných vln, které se šíří proti sobě v cívce optického vlákna.
- Mezividový interferometr využívající interferenci dvou a nebo více vidů světelné vlny, které se šíří stejným optickým vláknem, jeho výhoda je možnost použití mnohavidových optických vláken [1].

## 2.1 Základní typy interferometrů

V této kapitole budou popsány základní typy zapojení vláknových interferometrů, jejich bloková schémata a popis jejich funkce a využití.

### 2.1.1 Mach–Zehnderův vláknový interferometr

Mach–Zehnderův interferometr (MZI) je možné využít pro různé druhy měření, díky jeho flexibilitě a cenové dostupnosti. Interferometr se skládá ze dvou nezávislých ramen, referenčního a měřícího ramene, jako je zobrazeno na obr. 2.1.



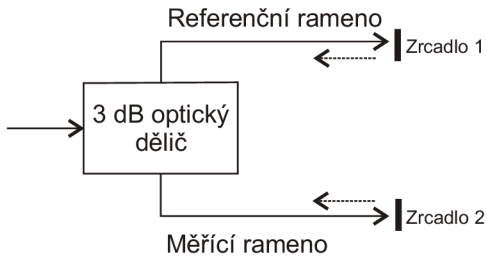

Obr. 2.1: Blokové schéma dvouramenného Mach–Zehnderova interferometru [1].

Vstupní světelný paprsek je rozdělený a znovu spojený optickým děličem (couplerem). Spojený světelný paprsek pak obsahuje interferenční složku v závislosti na rozdílu optické trasy dvou ramen (změny fáze). Pro měřící účely je referenční rameno izolováno od působení měřené veličiny a jen měřící rameno je vystaveno vnějším vlivům. Změna v tomto měřícím rameni může být způsobena teplotou nebo mechanickým namáháním, které změní rozdíl optických drah a mohou byt detekovány analýzou změn v interferovaném signálu. Pokud jsou obě trasy stejně dlouhé, dostaneme maximální amplitudu interference, pokud se délky tras liší dojde k posunu fáze jedné vlny a tím se změní i amplituda na výstupu interferometru. Tento světelný signál je snímán fotodiodou, převeden na elektrický signál a dále zpracováván [1].

### 2.1.2 Michelsonův vláknový interferometr

Optické senzory založeny na Michelsonově interferometru (MI) jsou velmi podobné těm, co využívají Mach–Zehnderova interferometru. Základ opět spočívá v interferenci mezi paprsky v dvou nezávislých ramenech, ovšem změna spočívá v tom, že na konci obou ramen je paprsek odražen jak je znázorněno na obr. 2.2. Ve své podstatě je MI polovina MZI, proto výroba obou interferometrů je skoro stejná, u MI jsou jen přidány odrazové plochy na konci obou ramen, které bývají realizovány pomocí Faradayových rotačních zrcadel, které omezují vliv polarizace na měřený signál. Výhodou tohoto interferometru je možnost paralelně zapojit několik senzorů.

Michelsonův interferometr lze principiálně použít všude tam, kde Mach-Zenderův interferometr. V praxi se však používá na snímání fyzikálních veličin, které působí

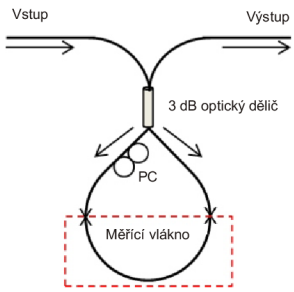



Obr. 2.2: Ukázka principu dvouramenného Michaelsonova interferometru [1].

změnu odrazových vlastností konce senzorového optického vlákna. Lze jím například měřit velmi male posuny a rychlost pohybu externího zrcadla. Také lze použít k měření vibrací či teploty [1].

### 2.1.3 Sagnacův interferometr

Sagnacův interferometr (SI) se skládá z optické smyčky, kterou se šíří dva optické paprsky proti sobě s rozdílnými polarizacemi, jak je vidět na obr. 2.3. Světlo do dvou paprsků dělí optický dělič a po průchodu měřící smyčkou, jsou tyto paprsky opět spojeny ve stejném optickém děliči, kde byly rozděleny a interferují spolu. K zlepšení této závislosti se používají speciální vlákna se závislostí na polarizaci v snímané oblasti. Míra polarizace je kontrolována polarizačním kontrolérem (PC) na začátku snímaného vlákna. Signál na výstupu je pak řízený interferencí mezi paprsky polarizovanými podél pomalejší a rychlejší osy [1].

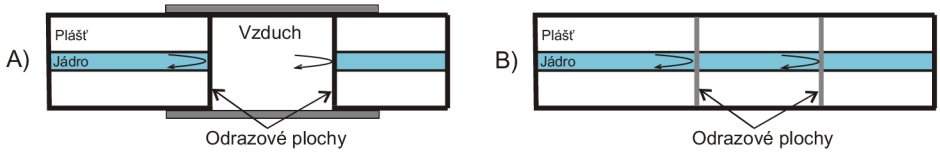



Obr. 2.3: Schéma Sagnacova interferometru [1].

Senzory se Sagnacovým interferometrem se používají výhradně pro měření úhlové rychlosti a polohy (optické vláknové gyroskopy). SI lze také výhodně použít jako senzor intenzity magnetického pole a elektrického proudu a po určitých modifikacích je schopen měřit a lokalizovat i vibrace[1].

### 2.1.4 Fabry-Perotův interferometr

Fabry-Perotův interferometr (FPI) se skládá ze dvou paralelních odrazových ploch oddělených od sebe určitou vzdáleností. Interference nastává při vícenásobné superpozici odraženého a přeneseného paprsku mezi paralelními odrazovými plochami. Na vstup tohoto interferometru dopadá paprsek, který po průchodu první odrazovou plochou dopadá na druhou, tam se část paprsku odrazí a část prochází dál. Odražený paprsek putuje zpět na první odrazovou plochu, kde se opět část odrazí a část projde zpět do interferometru. Tento jev se opakuje a výsledkem je mnohonásobná interference způsobená mnohonásobnými odrazy mezi těmito plochami. Obecně se FPI senzory dělí na vnější a vnitřní [1].

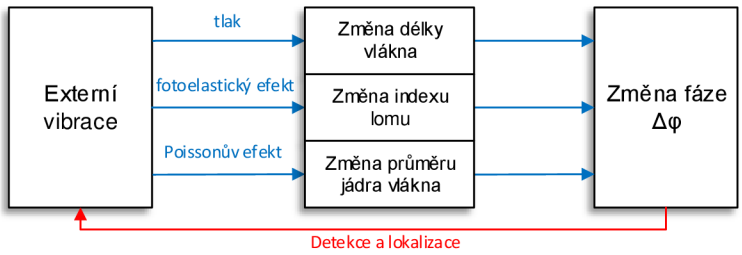



Obr. 2.4: a) Schéma vnějšího Fabry-Perotova interferometru, b) Schéma vnitřního Fabry-Perotova interferometru [1].

Na obr. 2.4 a) je zobrazen vnější senzor s FPI, kde je vlákno přerušeno a dutina vlákna je zastoupena vzduchem. Tento model se však kvůli svým nedostatkům nepoužívá. Na obr. 2.4 b) je vnitřní senzor s FPI, kde je dutina tvořena např. Braggovou mřížkou, nanesení tenkého filmu nebo je chemicky vyleptána.

Při působení např. mechanického napětí dojde k prodloužení dutiny a tím k rozdílu délky optické trasy nebo indexu lomu dutiny [1].

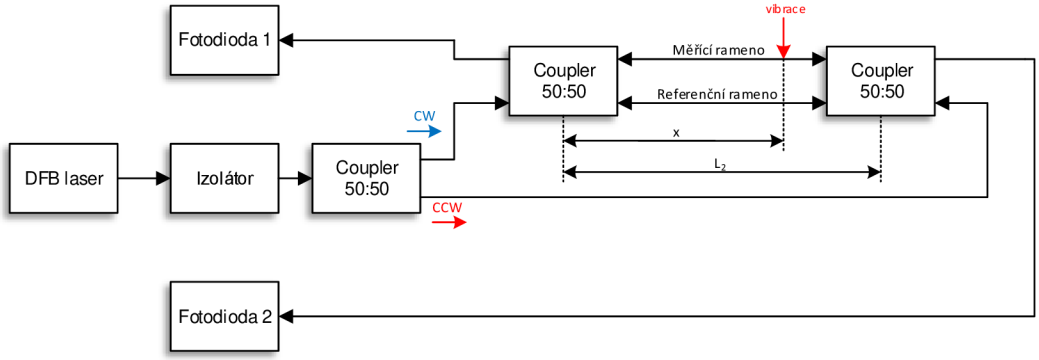
## 2.2 Interferometry určeny k lokalizaci vibrací




Obr. 2.5: Schéma zobrazující vliv vibrací na optické vlákno [4].

### 2.2.1 Duální Mach–Zehnderův interferometr (DMZI)

Klasická verze Mach–Zehnderova interferometru je schopná pouze změřit danou fyzikální veličinu, nikoli však tuto veličinu lokalizovat. K lokalizaci se používá její modifikace a to tzv. duální Mach–Zehnderův interferometr (DMZI), který je zobrazen na obr. 2.6.




Obr. 2.6: Schéma duálního Mach-Zehnderova interferometru [5].

Na obr. 2.6 je zobrazeno blokové schéma zapojení DMZI. Jako zdroj světelného záření je použit vysoce koherentní laser (DFB laser). Přes první coupler 50:50, je světelný paprsek ze zdroje světelného záření rovnoměrně rozdělen do dvou cest, které přivedou světelný signál do dvou coupleru 50:50, jedna cesta je ve směru hodinových ručiček (CW) a druhá proti směru hodinových ručiček (CCW). Paprsek je zároveň přenášen jak do měřícího tak i referenčního ramene interferometru z obou směrů, jak CW tak i CCW. Jakmile vibrace, či jiná fyzikální veličina působí na měřící rameno, fáze světelné vlny se mezi dvěmi rameny liší a tak vzniká fázový posuv mezi rameny. Světelný paprsek je přenesen na oba konce, kde interferuje v couplerech. Nakonec je signál sníman pomocí dvou fotodiod a převeden na signál elektrický, kdy jedna fotodioda snímá CW a druhá CCW optický signál. Čas, kdy CW optická vlna interferuje může být vypočítán z rovnice:

$$t = \frac{x \cdot n}{\mathrm{c}}\ [\mathrm{s}], \tag{2.1}$$

kde $n$ je index lomu jádra vlákna, c je rychlost světla, $x$ je pozice vibrace a $t$ námi hledaný čas. Čas kdy dorazí CCW optická vlna k druhému coupleru, může být spočítán z rovnice:

$$t = \frac{(L - x) \cdot n}{\mathrm{c}}\ [\mathrm{s}], \tag{2.2}$$

kde $L$ je vzdálenost mezi dvěma couplery, tedy délka měřícího či referenčního vlákna a rozdíl mezi těmito dvěma časy odpovídá rovnici:

$$\Delta t = \frac{(L - 2 \cdot x)n}{\mathrm{c}} \text{ [s]}, \tag{2.3}$$

a konečně polohu vibrace je možné spočítat pomocí rovnice:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left( L - \frac{\mathrm{c} \cdot \Delta t}{n} \right) \text{ [m]}, \tag{2.4}$$

Měření časového rozdílu dvou signálů nám umožňuje určit polohu vibrace a je to kritický parametr v přesnosti lokalizace, při použití této techniky měření vibrací.

Jelikož paprsky v obou směrech jsou vyslány stejným zdrojem světelného záření a ovlivněny stejnou vibrací, oba interferované signály detekovány fotodiodami jsou vysoce korelativní a časové zpoždění může být zjištěno lokalizací maxima křížové korelace mezi dvěmi detekovanými signály. Z toho vyplývá, že vibrace může být lokalizována pomocí duálního Mach-Zehnderova interferometru [5].

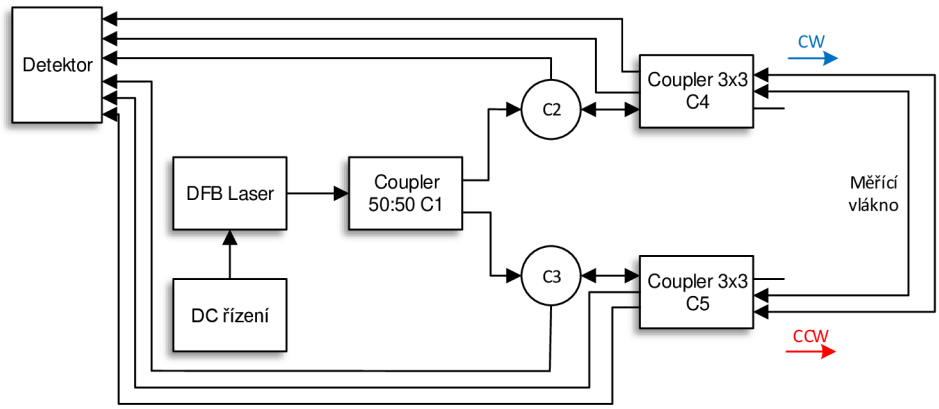
### Kruhový MZI

Další modifikací Mach–Zehnderova interferometru je tzv. kruhový Mach-Zehnderův interferometr, jehož blokové schéma je zobrazeno na obr. 2.7. Tento interferometr pracuje na velmi podobném principu jako duální MZI, a je schopen zachytit a lokalizovat i vibrace z více různých zdrojů. V tomto návrhu je využito dvou symetrických 3x3 couplerů a dvou optických cirkulátorů, které jsou použity proto, aby mohl vstup coupleru zároveň fungovat i jako výstup. Jako snímané vlákno je použito dvoujádrové jednovidové optické vlákno, čímž je dosaženo redukce rozdílu délek referenčního a měřícího vlákna. Jako detektor v tomto zapojení je použit šesti-vstupový fotodetektor, schopen pracovat synchronizovaně se stejnou citlivostí.

Zdrojem světelného záření v tomto zapojení je DFB laser, který vysílá kontinuální světelnou vlnu (CW), která je v coupleru 50:50 rozdělena do dvou cest. Přes cirkulátor C2 je světlo přivedeno do 3x3 coupleru C4, kde je světlo přivedeno do dvou vláken snímacího kabelu. Tyto dvě světelné vlny postupují interferometrem ve směru hodinových ručiček (CW) a nakonec interferují v 3x3 coupleru C5. Zároveň je druhá světelná vlna přivedena přes cirkulátor C3 a coupler C5 do dvou vláken měřícího kabelu, ovšem tyto optické vlny postupují ve směru proti směru hodinových ručiček (CCW) a nakonec interferují v coupleru C4.

Na rozdíl od klasického MZI, kruhový interferometr je schopný lokalizovat vibrace, díky zpracování signálu jak z CW tak CCW směru.

Opět i v této variantě je pro výsledek měření kritické, správně určit časový rozdíl mezi signály přijatými na obou koncích inteferometru pomocí fotodiod. Pro lokalizaci jedné vibrace bude použit stejný výpočetní princip jak pro DMZI [6].



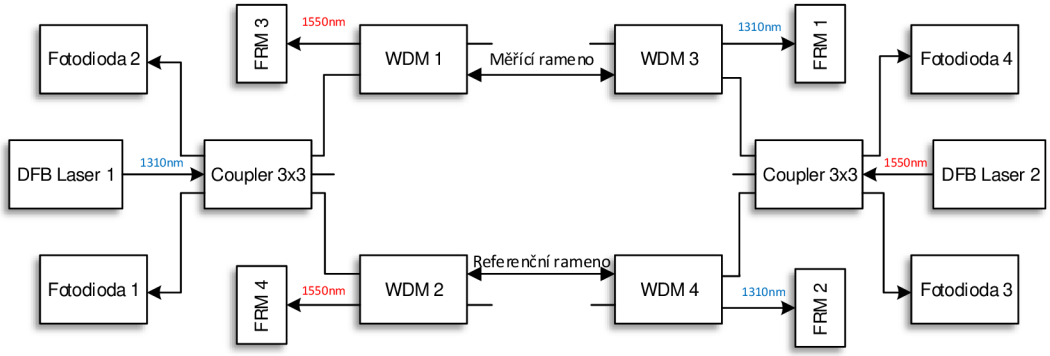

Obr. 2.7: Schéma kruhového Mach-Zehnderova interferometru [6].

### 2.2.2 Duální Michelsonův interferometr (DMI)

Dalším interferometrem určeným k lokalizaci vibrací je modifikace Michelsonova interferometru a to ve formě duálního Michelsonova interferometru (DMI). Jedná se o verzi, ve které je využito Faradayových rotačních zrcadel, které minimalizují nechtěný vliv polarizace na výsledky měření.

Schéma zapojení DMI je zobrazeno na obr. 2.8. Jak je vidět na schéma, dva Michelsonovi interferometry operující každý na vlastní vlnové délce. Jeden pracuje na vlnové délce 1310 nm druhý na vlnové délce 1550 nm. Vysílač světelného signálu č.1 vysíla CW světelný paprsek o vlnové délce 1310 nm do 3x3 coupleru C1 a je veden přes WDM 1 (Wavelength Division Multiplexer) a WDM 2 do měřícího a referenčního ramena. Na konci interferometru je signál odražen od dvou zrcadel FRM 1 a FRM 2, které odrazí paprsky o vlnové délce 1310 nm zpět do coupleru C1, kde oba signály spolu interferují. Oba výstupy C1 jsou detekovány fotodiodami 1 a 2, jejich fázový rozdíl je $2\pi/3$. Druhý interferometr pracuje uplně stejným způsobem, ovšem na vlnové délce 1550 nm. Laser č.2 vysílá světelný paprsek, který je veden přes členy WDM 3 a WDM 4 do měřícího a referenčního ramene, na konci ramen je signál odražen zrcadly FRM 3 a FRM 4. Signál z druhého zdroje interferuje v coupleru a výstup je detekován fotodiodami 3 a 4. Čtyři výstupy fotodiod jsou snímany vysoko rychlostní kartou připojenou k počítači. Naměřené výsledky jsou dále v počítači zpracovány.

Lokalizace vibrace probíhá podobně jako u DMZI a to tak, že je vyhodnocován časový rozdíl mezi dvěmi signály interferometru [7].




Obr. 2.8: Schéma duálního Michelsonova interferometru [7].

### 2.2.3 Sagnacův interferometr pracující na dvou vlnových délkách

U předchozích interferometrů byl klíčový prvek v jejich zapojení přesný, vysoce koherentní zdroj světelného záření, kdežto u Sagnacova interferometru se používá širokopásmových led diod, což snižuje cenu jejich zapojení.

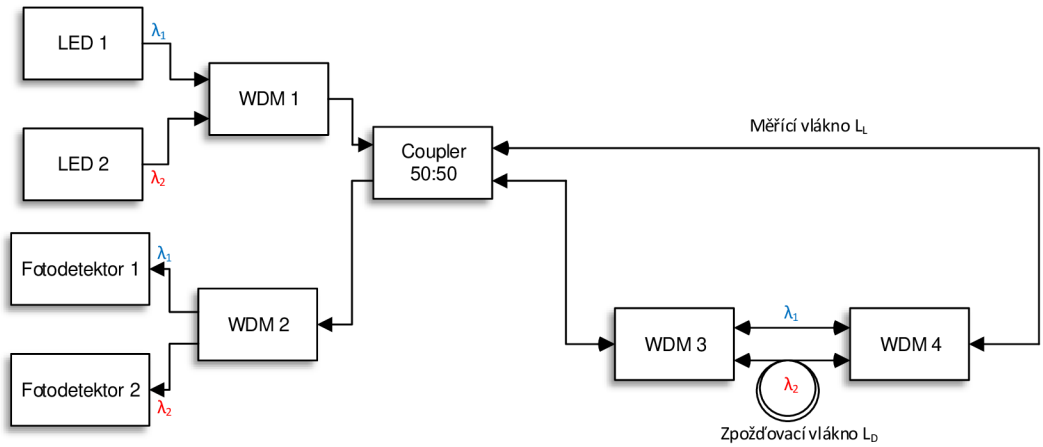
Senzor se skládá ze dvou Sagnacových interferometrů, přičemž každý pracuje na vlastní vlnové délce $\lambda_1$ a $\lambda_2$. Dva zdroje světelného záření jsou připojeny na vstupy WDM 1. Výstup WDM 1 je přiveden na vstup širokopásmového 3 dB coupleru. Optické vlákno mezi výstupy širokopásmového coupleru tvoří Sagnacův interferometr (měřící vlákno). Zbývající výstup širokopásmového coupleru je připojen na dvě fotodiody, do kterých je signál rozdělen pomocí WDM 2. Diferenciální Sagnacův interferometr pracující na $\lambda_2$ je realizován přidáním dvou WDM coupleru a zpoždovacího vlákna jak je zobrazeno na obr. 2.9.

Dvě optické vlny šířící se proti sobě na vlnové délce $\lambda_1$ ve snímacím vlákně, určují výstup Sagnacova interferometru. Světlo z druhého zdroje na vlnové délce $\lambda_2$ vysláno do snímacího vlákna a přes WDM 3 a 4 také do zpoždovacího vlákna, vytváří diferenční Sagnacův interferometr určující polohu vibrace.

Časově proměnná odchylka kdekoliv na snímacím vlákně způsobí, že signál na fotodetektoru 1 vytvoří časově proměnný signál, způsoben dvěma proti sobě šířícími se signály na vlnové délce $\lambda_1$. Výstupní signál této části interferometru je úměrný frekvenci vibrace a vzdálenosti od centra snímacího vlákna.

Druhá část senzoru je ten samý Sagnacův interferometr modifikován do formy pozičně necitlivého diferenčního Sagnacova interferometru. Toho je docíleno na druhé vlnové délce $\lambda_2$ přidáním dvou WDM coupleru a zpoždovacího vlákna $L_D$ o mnohem větší délce než je délka snímacího vlákna $L_L$. Touto modifikací je docileno toho, že

výstup interferometru na fotodetektoru 2 je pouze úměrný zdroji vibrací a nemá explicitní vztah ke vzdálenosti zdroje vibrací.




Obr. 2.9: Schéma Sagnacova interferometru pracujícího na dvou vlnových délkách.

K tomu, aby bylo možné lokalizovat zdroj vibrací, je třeba z hodnot obou vystupů spočítat koeficient pro každou vzdálenost a přístroj tak zkalibrovat [8].

### 2.2.4 Kombinované interferometry

V přechozích kapitolách byly rozebrány interferometry schopné lokalizace, jejichž realizace byla založena na jednom druhu interferometru, takže byly popsány duální Mach–Zehnderův a Michelsonův interferometr a Sagnacův interferometr operující na dvou vlnových délkách. Jak je vidět, tyto interferometry, byly realizovány dvěmi interferometry stejného typu, protože k lokalizaci různého typu rušení interferometrickými metodami, je zapotřebí dvou interferometrů.

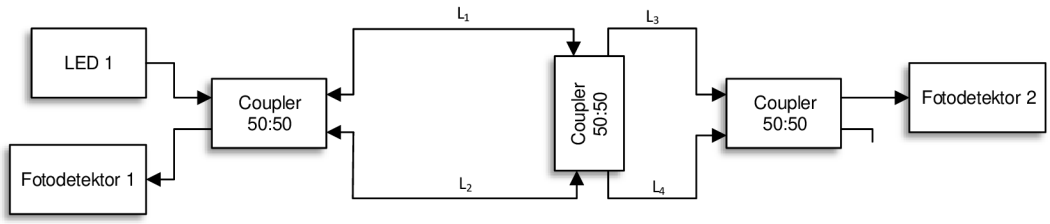
Tato kapitola bude zaměřena na zapojení, která využívají různých typů interferometrů k detekci a lokalizaci vibrací.

#### Kombinovaný Sagnac–Mach–Zehnderův interferometr

Jedná se o zapojení senzoru složeného ze dvou interferometrů a to Sagnacova a Mach–Zehnderova interferometru, které využívají stejná optická vlákna a prvky.

Schématické zapojení senzoru je zobrazeno na obr. 2.10. Sagnacův interferometr se skládá z vláken $L_1$ a $L_2$ a prvního coupleru. Jedno rameno Mach–Zehnderova interferometru se skládá z vláken $L_1$ a $L_4$, a to druhé z vláken $L_2$ a $L_3$. Laserová dioda vysíla světelnou vlnu do obou interferometrů, fotodetektor 1 přijímá signál

ze Sagnacova interferometru a fotodetektor 2 z Mach–Zehnderova interferometru, všechny couplery dělí signál v poměru 50:50.




Obr. 2.10: Schéma kombinovaného Sagnac-MZ interferometru [9].

Výstup Sagnacova interferometru je funkcí pozice, kde se vibrace vyskytla a taky velikosti této snímané vibrace. Kdežto výstup Mach–Zehnderova interferometru je funkcí pouze velikosti a frekvence aplikované vibrace. Takže pozice a velikost vibrace aplikované na měřící vlákno je možno zjistit výpočtem z těchto signálů, získaných pomocí dvou různých interferometrů [9].

### Kombinovaný Sagnac–Michelsonův interferometr

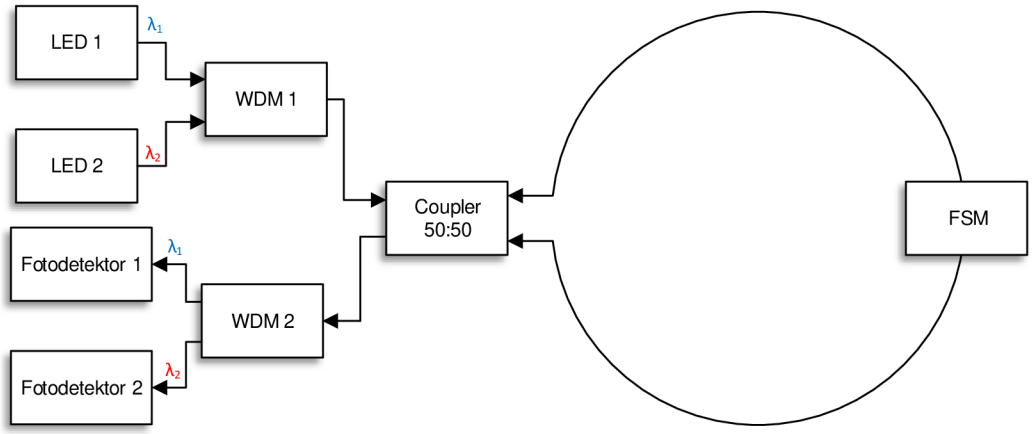
Druhým kombinovaným interferometrem, je Sagnac–Michelsonův interferometr, pracující na podobném principu, jako předchozí senzor. Klíčovým prvkem tohoto zapojení bude zrcadlo odrážející jen zvolenou vlnovou délku světla a propouštějící ostatní světelné signály.

Senzor se skládá ze dvou částí, Sagnacova interferometru a Michelsonova interferometru, které jsou buzeny dvěmi zdroji světelného záření o vlnových délkách $\lambda_1$ a $\lambda_2$. Světelné zdroje jsou přes WDM 1 přivedeny do širokopásmového coupleru 50:50 a z coupleru jsou signály přivedeny do měřícího vlákna. Zbývající port coupleru je připojen na vstup WDM 2 odkud je signál přiveden na dva fotodetektory.

Sagnacův a Michelsonův interferometr v jednom vlákně jsou realizovány pomocí zrcadla (FSM), které odráží pouze určitou vlnovou délku a všechny ostatní propouští. Toto zrcadlo je umístěno uprostřed měřícího vlákna.

Jeden ze dvou párů světelných signálů bude pomocí zrcadla odražen, čili bude pracovat jako Michelsonův interferometr na vlnové délce $\lambda_1$. Na propuštěné vlnové délce $\lambda_2$ bude pracovat Sagnacův interferometr.

Výstup Sagnacova interferometru snímán fotodetektorem 2 je úměrný vzdálenosti vibrace od centra měřícího ramena a také na velikosti aplikované vibrace. Tento interferometr je necitlivý na malé změny frekvence.




Obr. 2.11: Schéma kombinovaného Sagnac-Michelsonova interferometru [10].

Časově proměnné rušení na měřícím vlákně také vytvoří výstupní signál na Michelsonově části interferometru. To vytváří výstupní signál úměrný vibraci bez závislosti na pozici aplikované vibrace. Zpracovaním těchto dvou signálů jsme schopni určit pozici i charakter vibrace [10].

## 2.3 Senzory kombinující metody měření zpětného rozptylu a interferometrii

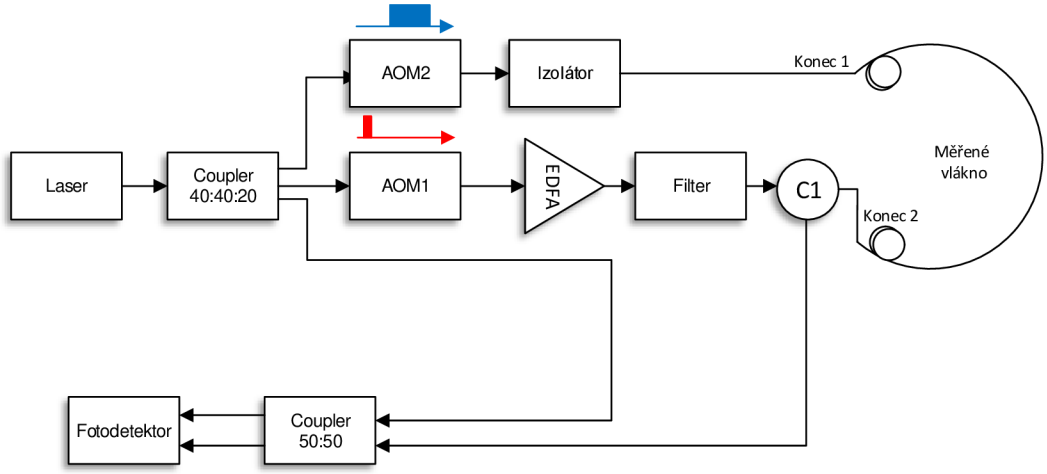
V konvenčních senzorech, které jsou založeny na vyhodnocování zpětného rozptylu je detekovatelná frekvence závislá na frekvenci vysílání pulzů do optického vlákna. Zvýšením frekvence pulzů zvyšuje rozsah detekovatelných frekvencí, ale snižuje dosah měřícího systému. Na druhou stranu, interferometrické senzory nabízejí široký frekvenční rozsah, ale nízkou přesnost lokalizace. Proto se více a více studií zabývá kombinovanými senzory, které jsou založeny na detekci zpětného rozptylu a interferenci světla. Dále v práci budou rozebrány dva příklady těchto senzorů a to v podobě Mach–Zehnderova interferometru a Michelsonova interferometru v kombinaci s Φ-OTDR.

### 2.3.1 Kombinace Mach–Zehnderova interferometru a fázového OTDR

Tento kombinovaný systém, jak bylo popsáno výše využívá výhod obou metod. Přesnost lokalizace je docílena pomocí části pracující jako Φ-OTDR, která snímá změnu

fáze jednoho typu impulzů v systému. Mach–Zehnderova část tohoto senzoru se stará o co nejpřesnější měření snímané frekvence. Systém je znázorněn na obr. 2.12.

Jako zdroj světelného záření je použit laser s velmi úzkou spektrální čarou, který generuje kontinuální světelnou vlnu (CW). Optická vlna je poté rozdělena couplerem v poměru 40:40:20. První část signálu je modulována pomocí opticko-akustického modulátoru na úzké pulzy, poté jsou tyto pulzy zesíleny EDFA vláknovým zesilovačem a vyslány do měřícího vlákna na konci 2 a slouží ke generování Rayleigho rozptylu, který je sbírán cirkulátorem. Druhá část signálu je taktéž modulována pomocí opticko-akustického modulátoru, ale na široké impulzy. Poslední část optické vlny zustává kontinuální a je využita jako referenční. Všechny signály jsou poté snímány balancovaným fotodetektorem.




Obr. 2.12: Schématické zapojení kombinovaného senzoru: MZI-Φ-OTDR [11].

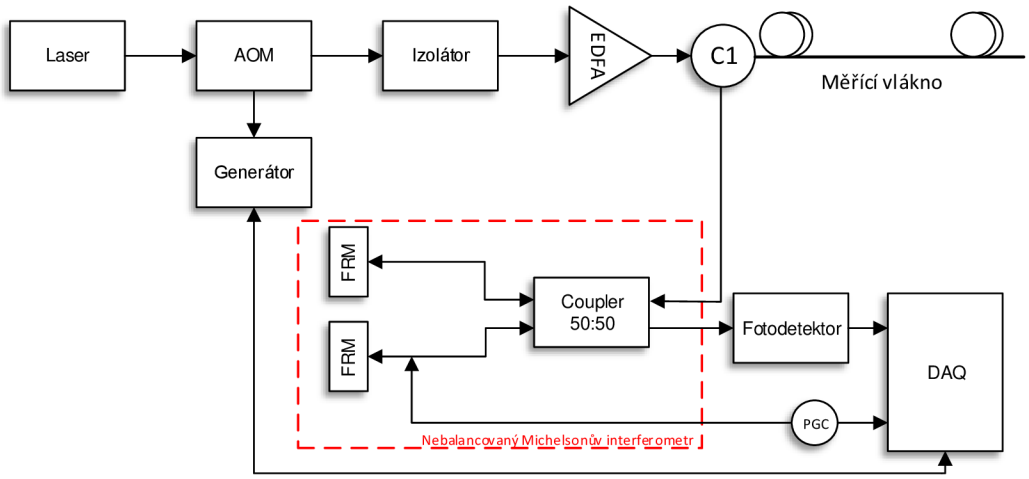
Rayleigho zpětný rozptyl je generován úzkými pulzy, tento světelný signál putuje z měřícího vlákna ke konci 2, zároveň se vláknem šíří i široké impulzy, které se šíří z konce 1 do konce 2, ty interferují s referenčním signálem v coupleru. Rayleigho rozptyl a interferující signály jsou tak přijaty úspěšně.

V této měřící metodě je kritické nastavení výkonových hladin, šířky a frekvence pulzů, vzorkování a signálové zpracování [11].

### 2.3.2 Kombinace Michelsonova interferometru a fázového OTDR

Jako druhý senzor spojující techniky měření zpětného rozptylu a interferenci světla bude v této práci rozebráno fázové OTDR spojené s Michelsonovým interferoemetrem využívající speciální PGC (Phase-Generated Carrier) algoritmus. Nebalanco-

vaný Michelsonův interferometr slouží v tomto zapojení k eliminaci nežádoucích polarizačních vlivů. Rayleigho zpětný rozptyl bude interferovat díky zpoždění mezi dvěmi rameny interferometru a fáze tohoto signálu ponese měřené informace. Tím, že do zapojení vložíme PGC signál, jehož frekvence je vyšší než snímaný signál a modulujeme jím jedno rameno interferometru, dosáhneme toho, že systém má relativně stabilní citlivost na změny fáze [12].




Obr. 2.13: Schématické zapojení kombinovaného senzoru: MI-Φ-OTDR [12].

Zapojení tohoto senzoru je zobrazeno na obr. 2.13. Jako zdroj světelného signálu je použit vysoce koherentní laser s úzkou spektrální čarou. Kontinuální světelné záření je modulováno akusticko-optickým modulátorem, přičemž šířka pulzu a frekvence je udávána generátorem. Dále je tento signál zesílen pomocí EDFA zesilovače. Následně tyto pulzy putují měřícím vláknem a v čase generují Rayleigho zpětný rozptyl. Optická cesta mezi EDFA zesilovačem, měřícím vláknem a MI je kontrolována pomocí cirkulátoru. Nevyvážený Michelsonův interferometr je poté použit k tomu, aby Rayleigho rozptyl interferoval na výstupu tohoto interferometru a generoval tak požadovaný signál. Fáze interferovaného signálu nese snímanou informaci. Faradayova zrcadla jsou v zapojení použita k redukci nežádoucích polarizačních vlivů. Signál je poté detekován vysoce citlivým fotodetektorem.

FFT (rychlá Fourierova transformace) je provedena k identifikaci generovaných frekvenčních složek signálu po celé délce vlákna [12].

# 3 APLIKACE VLÁKNOVÝCH SENZORŮ

Distribuované optovláknové senzory vibrací našli v posledních desetiletích velkou řadu uplatnění. Jsou využívány k monitorování stavu civilní infrastruktury, střežení perimetru budov či rozlehlých prostranství a taky k měření seismických profilů vrtů.

## 3.1 Monitorování stavu civilní infrastruktury

V poslední době vznikla ve společnosti velká poptávka po monitorování stavu civilní infrastruktury. Toto hlídání infrastruktury, jako jsou např. mosty, dálnice, tunely, plynovody, ropovody, atd., je důležité k zajištění bezpečnosti a ekonomické stability po celém světě. Avšak díky tomu, jak jsou tyto stavby rozsáhlé, je využití konvenčních měřících přístrojů značně limitované. Na druhou stranu distribuované optické technologie jsou nejslibnějším kandidátem mezi řadou měřících technik, které jsou použitelné pro tuto funkci a to především díky vlastnostem optického vlákna jako je nízká hmotnost, malá velikost, optická vlákna netrpí korozí a jsou imunní vůči elektromagnetickému rušení. Distribuované optické vláknové senzory mají potenciál především pro monitorování stavu úniků potrubí a měření fyzického stavu rozsáhlých staveb [4].

### 3.1.1 Monitorování úniků produktovodů

Distribuované optovláknové senzory vibrací jsou zkoumány ve spojení s detekcí stavu produktovodů. Jak víme, produktovody jsou důležitou součástí infrastruktury naší společnosti a jsou nepostradatelnými pro přepravu vody, plynu, ropy a dalších produktů. Dlouhá potrubí jsou často zakopána několik metrů pod zemí a jsou náchylné na přírodní či člověkem zaviněné poškození, jako jsou zemětřesení, stavební práce nebo zásahy lidí, kteří se úmyslným poškozením snaží krást produkt či jinak narušit střežený majetek. Tyto zásahy do produktovodu vedou ke vzniku vibrací na vedení, které můžeme snímat a vyhodnocovat měřícím přístrojem.

Konvenční metody na kontrolu produktovodu spočívají v manuální inspekci potrubí nebo detekčních zařízení jako např. tlakových, chemických nebo termálních senzorů. Tyto metody jsou značně ovlivněny kvalitou materiálu a dalšími faktory. K tomu, varování o úniku je hlášeno, až když k úniku dojde, čímž může dojít k újmu na majetku či zdraví.

Velký zájem díky tomu směřuje k novým typům senzorů, které dokáží zajistit měření na vélké vzdálenosti, monitorovat produktovody před aktuální poruchou a lokalizovat místo, kde k poruše má dojít nebo už došlo. Do této skupiny senzoru právě spadají distribuované optovláknové senzory, které měří v celé své délce a tedy

máme přehled o charakteru vibrací na celé délce potrubí, které může dosahovat až několika set kilometrů.

Komerčně dostupné systémy pro tyto typy měření je již možné zakoupit. Například společnost Sillixa, nabízí několik distribuovaných měřících systémů využívající optická vlákna k měření produktovodů. Ty využívájí jak přístrojů měřící vibrace tak i teplotu, pro detekci úniků produktů či narušení potrubí a celé toto monitorování je možno sledovat v reálném čase [4].

### 3.1.2 Monitorování fyzického stavu staveb

Monitorování stavu civilních staveb také patří mezi důležité oblasti v zajištění bezpečnosti v naší společnosti. Díky řadě výhod distribuovaných optovláknových senzorů vibrací, mezi které patří především rozsah pokrytí těchto staveb a vysoká citlivost senzoru, přitáhly tyto typy senzorů pozornost řady výzkumů.

Například výzkumný tým, vyvíjející distribuovaný senzorický systém snímající vibrace, které jsou generovány prasklinami mostu. V tomto experimentu se vědci zaměřili na akustické vibrace generovány prasklinami betonu či oceli. Díky distribuovanému systému mouhou být tyto akustické vibrace zachyceny, analyzovány a určena jejich poloha. Tento experiment prokázal, že distribuované vláknové senzory mohou být využity k monitorování stavu různých staveb. Nicméně, je nutné vylepšit tyto systémy, než bude možné jejich použití v praktických aplikacích. Vylepšit bude třeba např. detekce slabých signálů, vylepšení spolehlivosti, zlepšení přesnosti lokalizace a implementace vysoko rychlostního zpracování signálu v reálném čase. Až se tyto problémy podaří vyřešit, stanou se tyto systémy mocným nástrojem pro monitorování rozsáhlých staveb [4].

## 3.2 Ochrana perimetru

Na důležitých prostranstvích jako jsou letiště, přístavy, vojenské základny, elektrárny, atd. je ochrana perimetru klíčovým prvkem. Tzv. elektronické ploty jsou široce využívány jako prevence před zničením vybavení a ochrana pozemku před vandaly. Tradiční ochrany založeny na hlídkách, značně trpí díky limitaci rozsahu chráněného prostoru a spolehlivosti. Distribuované optovláknové senzory vibrací jsou velmi citlivé a mohou tak detekovat i malé rušení v okolí perimetru a mohou poskytnout varování v okamžik, kdy je perimetr narušen. V dnešní době jsou tyto distribuované systémy hojně používány, právě pro ochranu perimetru objektů. Například ochranný systém státních hranic, který operuje na zhruba 220 km dlouhé hranici, je v provozu od roku 2012 na severu Číny. Dále například společnost OptaSense nabízí mezi řadou různých distribuovaných senzorů, také systém pro ochranu perimetru,

který pracuje na principu zpětného rozptylu. Tato instituce zaručuje dosah jejich systému do 100 km s prostorovým rozlišením 10 m [4].

## 3.3 Další využití

Distribuované optovláknové senzory vibrací mimo výše uvedené příklady, nacházejí také uplatnění na poli seismických aplikací při měření parametrů různých druhů vrtů. Výhoda těchto senzorů spočívá především v tom, že jsou schopny během jednoho měření změřit profil celého vrtu. Těchto přístrojů pro měření seismické aktivity ve vertikálním směru je využíváno především v ropném a plynném průmyslu. Dále se tyto senzory používají pro monitorování železnic a dálnic [4].

# 4 SIMULACE DMZI

Tato kapitola se bude zabývat simulací duálního Mach-Zehnderova interferometru v prostředí Matlab, přesněji v jeho rozšíření Simulink. DMZI bylo pro tuto simulaci zvoleno z toho důvodu, že v pokračování práce se toto zapojení realizuje v laboratorním prostředí a tak bude možno výstup měření porovnat se simulací, což nám poskytne možnost srovnání a vyhodnocení výsledků.

## 4.1 Matlab

Matlab je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk vyvíjen společností MathWorks. Jedná se o software multiplatformní, čili je k dispozici na většině operačních systémů. Původně byl jazyk určen pro matematické účely, ale časem byl upraven, byly přidány nové funkce, rozšířen a dnes se dá využít v široké škále aplikací. Matlab je využíván pro vědecké a výzkumné účely a to jak v soukromém sektoru tak i v řadách akademických. Hlavní datovou strukturou tohoto programovacího jazyku je matice.

Hlavní využití Matlabu spočívá ve věděckotechnických pracích, simulacích, paralelních výpočtech, atd. Zahrnuje výpočty, vizualizaci a programování do uživatelsky ovládaného prostředí. Typické oblasti použití:

- inženýrské výpočty,
- tvorba algoritmů,
- modelování a simulace,
- analýza dat,
- vědecká a inženýrská grafika,
- tvorba aplikací (včetně GUI) [13].

### 4.1.1 Komponenty MATLABu

Prostředí Matlab se skládá z řady komponent, kde každá slouží k jinému účelu.

#### Toolboxy - Knihovny

Důležitou součástí softwaru Matlab jsou knihovny funkcí, které jsou nazývány toolboxy. Tyto toolboxy obsahují vždy uceleným způsobem zpracovaný určitý obor numerické matematiky, analytické matematiky, statistiky a další obory, ve kterých nachází Matlab uplatnění.

### Simulink

Simulink je program, který využívá Matlab a jeho funkce k simulaci dynamických systémů. Do Matlabu byl přidán později a to až ve verzi 4. Zatímco u Matlabu je nejdůležitější příkazový řádek, ovládání u Simulinku je jednodušší a intuitivnější, kdy z palety prvků, si na pracovní plochu přetahuje uživatel různé funkční bloky, které upravuje a propojuje podle potřeby.

### Guide

Toto prostředí umožňuje vytvářet aplikace s grafickým rozhraním a nazývá se GUIDE (Graphical User Interface Development Enviroment) a poskytuje následující vlastnosti:

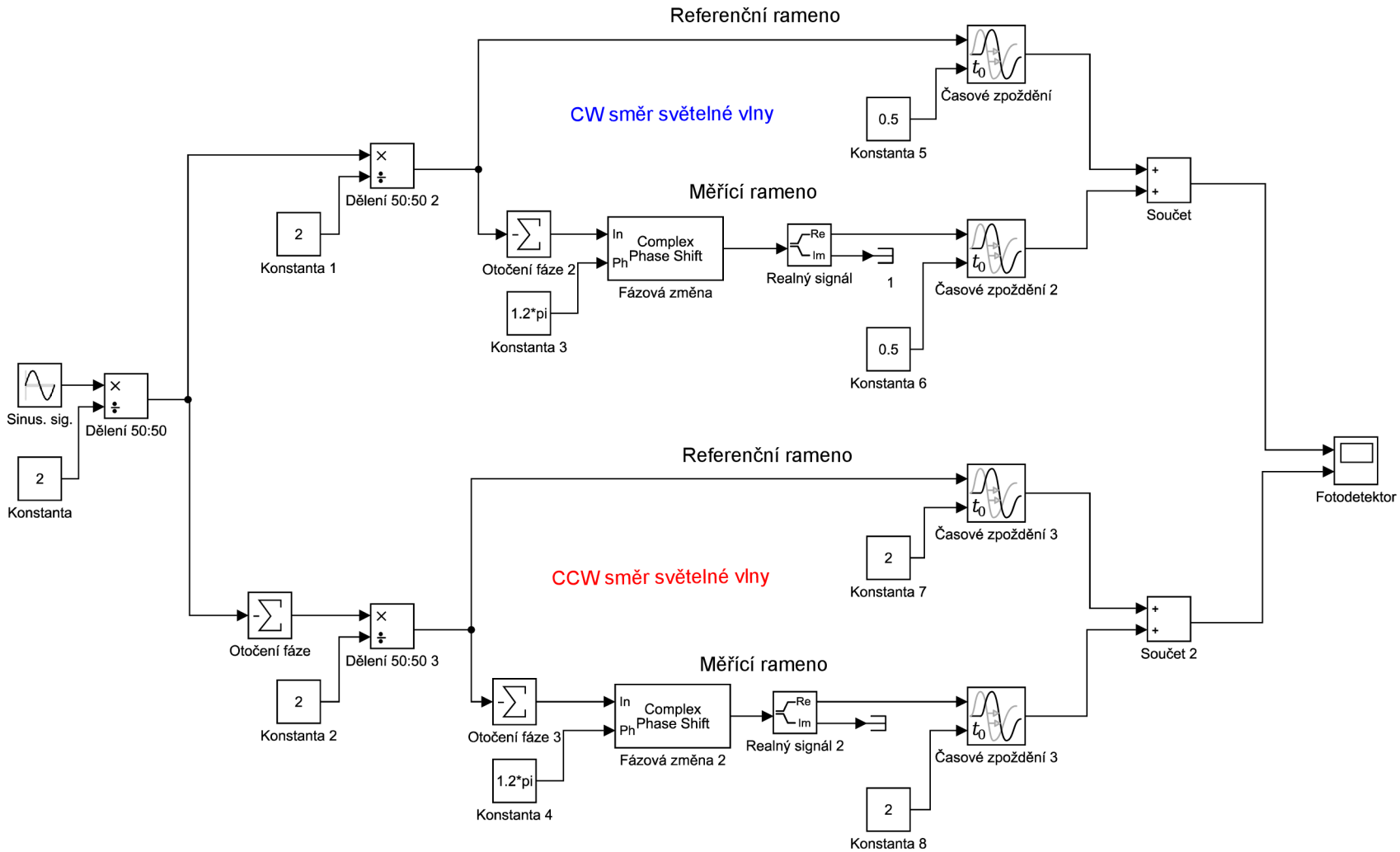
- tvorba a editace uživatelského rozhraní pomocí základních komponent,
- všechny komponenty, které jsou vytvořeny v tomto prostředí, lze měnit za běhu programu,
- vzhled vytvořené GUI aplikace se ukládá do souboru *.fig a jeho zdrojový kód do souboru *.m [13].

## 4.2 Simulace DMZI v prostředí Simulink

Simulace demonstruje signálové pochody odpovídající zapojení Duálního Mach–Zehnderova interferometru, který byl rozebrán v kapitole 2.2.1 a jeho zapojení je zobrazeno na obr. 2.6.

Zapojení simulace je zobrazeno na obr. 4.1. Jako zdroj záření je použit blok generující sinusový signál. Signál dále postupuje do coupleru 50:50, který se ovšem v Simulinku nenachází a tak je realizován tak, že je signál upraven na polovinu v bloku dělení a na jednom výstupu je otočena jeho fáze o 180°. Takto rozdělený signál dále putuje do dalších dvou couplerů, které jsou realizovány totožně jako první coupler. V Simulinku ovšem není možné posílat signály po jednom spojení v obou směrech, jak je tomu u optického vlákna v našem zapojení, a tak je referenční a měřící vlákno rozděleno v simulaci na 2 logické spoje, jeden spoj simuluje CW směr a druhý CCW směr, i když v reálném zapojení je toto spojení realizováno jedním optickým vláknem.

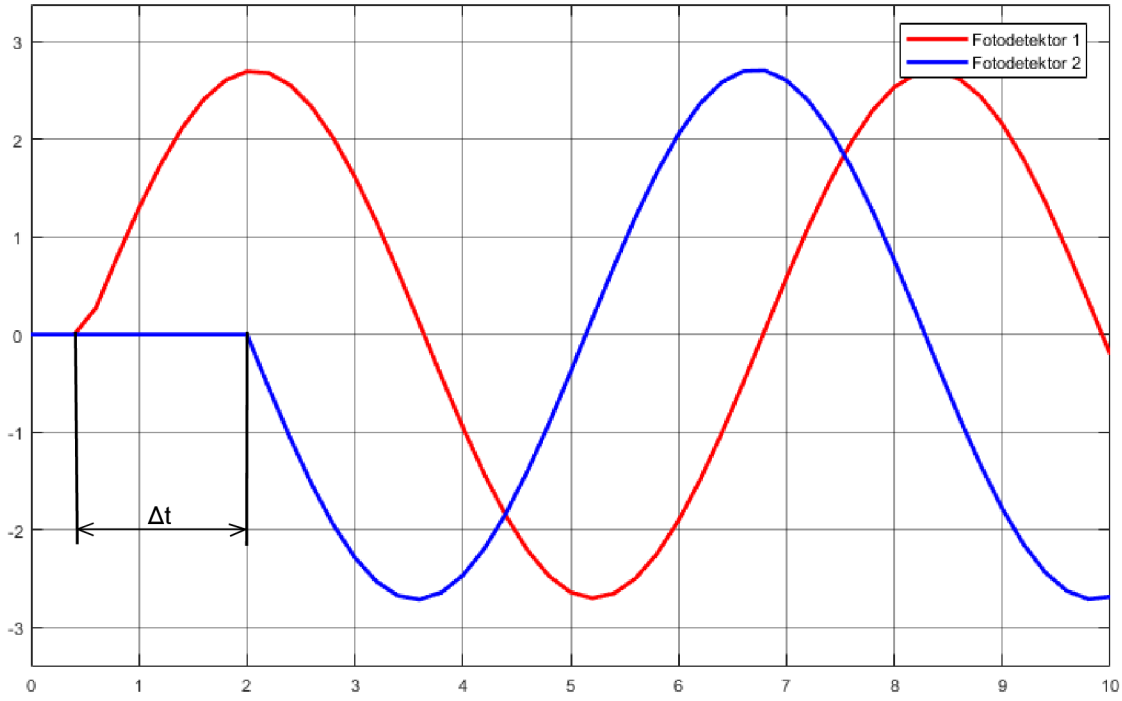
Následně signál putuje do měřícího ramena, kde je použit blok změny fáze signálu, ten simuluje vznik vibrací v okolí optického vlákna. Tento blok však mění signál na komplexní a proto je v simulaci použit blok, který oddělí pouze reálnou složku signálu, která je pro nás důležitá. Dále signál putuje do bloku, který ovlivnuje časové zpoždění signálu. V tomto bloku se signál zpozdí v každém rameni o jinou




Obr. 4.1: Zapojení simulace DMZI v prostředí Simulink.

dobu, která je závislá na pozici vibrace, protože signál způsobený vibrací, ke každému fotodetektoru musí urazit jinou vzdálenost po optickém vlákně.

Po průchodu měřícím a referenčním ramenem oba signály (jak v CW směru, tak v CCW směru) následně interferují v couplerech, což je v simulaci realizováno sčítacím členem a poté jsou signály detekovány na fotodetektoru.




Obr. 4.2: Výstup simulace DMZI.

Výstup simulace je zobrazen na obr. 4.2. Z grafu je zřejmé, že každý signál dorazil k detektoru v jiný čas, tento čas se změří, a podle něj se poté může vypočítat poloha zdroje vibrací v okolí optického vlákna.

## 4.3 Teoretický výpočet polohy vibrace

Tato kapitola bude věnována výpočtu místa vzniku vibrace při meření duálním Mach-Zehnderovým interferometrem, který byl simulován výše za pomoci programu Matlab a teoreticky rozebrán v kapitole 2.2.1.

Pro teoretický výpočet bude použita rovnice (2.4), která byla odvozena v kapitole věnující se duálnímu Mach–Zehnderovu interferometru.

**Určení vstupních proměnných a konstant:**

- Délka ramen interferometru: L = 1000 m (pouze vymyšlená vzdálenost pro účel tohoto výpočtu, v reálném zapojeni se přesná délka změří pomocí OTDR),

- rychlost světla: c = $3 \cdot 10^8$ m/s (pro náš výpočet stačí její zaokrouhlená hodnota),
- index lomu jádra vlákna: n = 1,46 (v laboratorním zapojení zjistíme přesný index lomu použitého vlákna),
- časový rozdíl mezi signály přijatými na obou fotodetektorech: $\Delta t = 1,5\,\mu s$ (podle hodnoty časového rozdílu mezi signály určujeme polohu vibrace a tedy je klíčovým parametrem).

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left( L - \frac{\mathrm{c} \cdot \Delta t}{n} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 \cdot 10^3 - \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}}{1,46} \right) = 345,89\,\mathrm{m} \tag{4.1}$$

Pro představu jak musí byt měření časového rozdílu přesné, bude v tabulce uvedeno několik vypočítaných hodnot. Časový rozdíl musí byt volen v určitém rozsahu a to v závislosti na délce měřeného vlákna, protože díky tomu se mění doba, za kterou světelný paprsek projde optickým vláknem.

Tab. 4.1: Výpočty vzdálenosti vibrace.

| **L [m]** | $\Delta t$ **[s]** | **x [m]** |
|---|---|---|
| $1 \cdot 10^3$ | $0,1 \cdot 10^{-6}$ | 490 |
| $1 \cdot 10^3$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | 397 |
| $1 \cdot 10^3$ | $1,5 \cdot 10^{-6}$ | 346 |
| $1 \cdot 10^3$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | 294 |
| $1 \cdot 10^3$ | $3 \cdot 10^{-6}$ | 192 |
| $1 \cdot 10^3$ | $4 \cdot 10^{-6}$ | 89 |

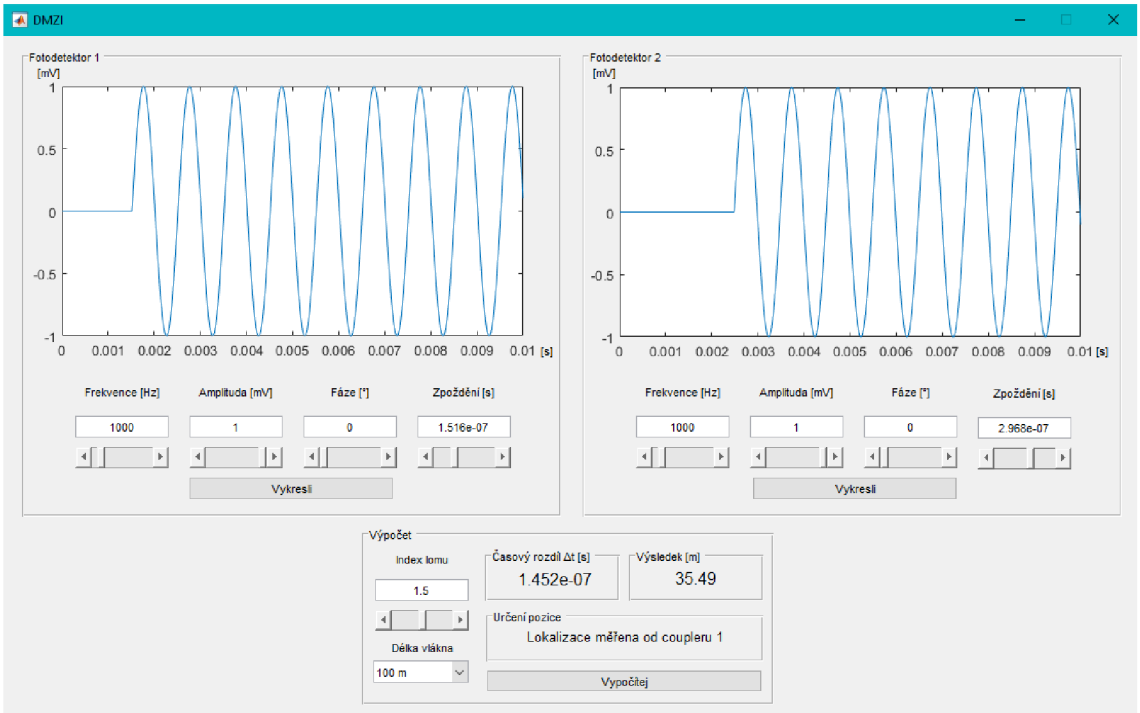
Z tabulky 4.1 je zřetelné, s jakou citlivostí je třeba změřit časový rozdíl mezi signáli, abychom byli schopni změřit polohu vibrace. U kilometrového optického vlákna je třeba, aby jsme byli schopni změřit rozdíl měnší než 5 $\mu$s. Dále je v tabulce vidět, že hodnoty výpočtů dosahují pouze k polovině celkové délky trasy, to je z důvodu, že záleží na pořadí dvou přijatých signálů v čase a podle toho se určuje vzdálenost k jednomu či druhému coupleru.

# 5 APLIKACE PRO SIMULACI DMZI

Obecně je aplikační software nebo taky aplikace programové vybavení počítače, které umožňuje uživateli provádět nějakou užitečnou činnost. V tomto případě se jedná o aplikaci, která umožňujě simulovat duální Mach–Zehnderův interferometr a to tak, že si uživatel vygeneruje výstupy na dvou fotodetektorech a podle tohoto nastavení, může dopočítávat teoretickou pozici vibrace, která je ovšem závislá na parametrech optického vlákna.

Pro vývoj této aplikace bylo využito skriptovacího jazyku Matlab a to jeho verze R2017a. V tomto prostředí byla aplikace navržena pro operační systém Windows, pomocí grafického uživatelského rozhraní GUIDE, což je jedna z komponent Matlabu, která umožňuje tvorbu aplikací a jejich grafických uživatelských rozhraní. Zkušební verze produktu Matlab byla zdarma stažena z oficiálních webových stránek tohoto produktu.

Aplikace pro simulaci DMZI je zobrazena na obr. 5.1.




Obr. 5.1: Aplikační software DMZI.

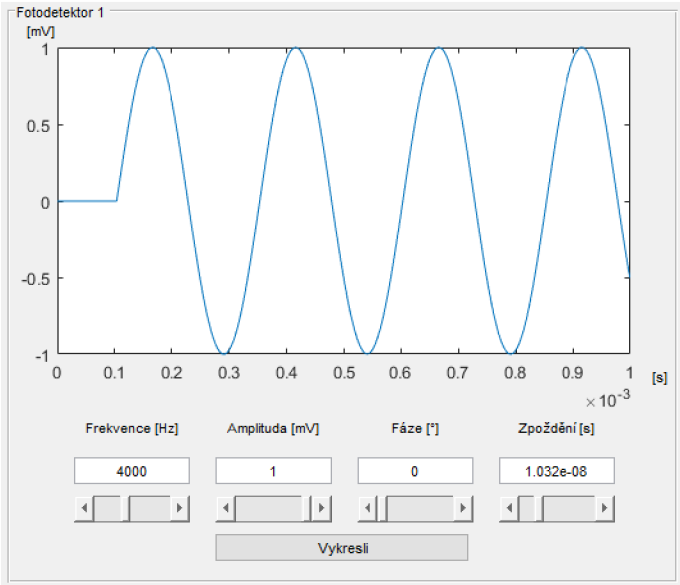
Rozložení grafického uživatelského rozhraní aplikace je zobrazeno na obr. 5.1. V horní části jsou dvě okna, ve kterých se nastavují parametry na výstupech fotodetektoru 1 a fotodetektoru 2 a takto nastavené výstupy jsou zde zobrazeny na grafech. Ve spodní části programu je okno, které se věnuje výpočtu pozice vibrací. Funkčnost této aplikace bude podrobně rozebrána dále.

## 5.1 Popis funkčnosti aplikace

Aplikace je opticky rozdělena na dvě části, první část se zaměřuje na generování signálu, který je přijat na prvním a druhém fotodetektoru interferometru. Ve druhé části, se z vygenerovaných signálů počítá teoretická pozice vibrací v okolí optického vlákna, kde si můžeme délku a index lomu tohoto vlákna nastavit.

### 5.1.1 Generování signálu

V aplikaci se nacházejí dvě stejná okna, která slouží ke generování signálů na obou fotodetektorech duálního Mach-Zehnderova interferometru. Jedno toto okno je zobrazeno na obr. 5.2. V této sekci generujeme sinusový signál, u kterého můžeme nastavit jeho parametry: frekvenci, amplitudu, fázi a zpoždění signálu v čase. Tyto parametry můžeme v aplikaci nastavit pomocí posuvníků a nebo zapsat přesnou hodnotu do textového okna. Zpoždění je ovšem v grafu několikanásobně zvětšeno, kvůli názornosti, jelikož reálná hodnota je pouhým okem nepostřehnutelná. Takto vygenerovaný signál je poté zobrazen v grafu za pomoci tlačítka **Vykresli**. Signály v aplikaci uživatel generuje pro oba fotodetektory a podle hodnot těchto signálu je dále počítána teoretická poloha vibrace v závislosti na parametrech optického vlákna.



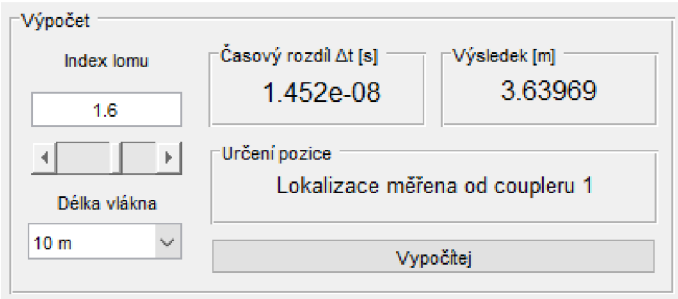

Obr. 5.2: Část určena fotodetektoru v softwaru DMZI.

### 5.1.2 Výpočet pozice vibrace

Ve spodním okně, nazvaném výpočet, které je zobrazeno na obr. 5.3, aplikace počítá polohu vibrace podle dvou vygenerovaných signálů a hodnot nastavených právě v tomto okně. V okně výpočtu může uživatel nastavit index lomu a délku teoreticky měřeného optického vlákna. Takto zadané hodnoty jsou následně použity při výpočtu, podle rovnice:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left( L - \frac{\mathrm{c} \cdot \Delta t}{n} \right) \text{ [m]}, \tag{5.1}$$

kde $L$ je vzdálenost mezi dvěma couplery, tedy délka měřícího či referenčního vlákna, $\Delta t$ je časový rozdíl generovaných signálů, c je rychlost světla a $n$ je index lomu optického vlákna.



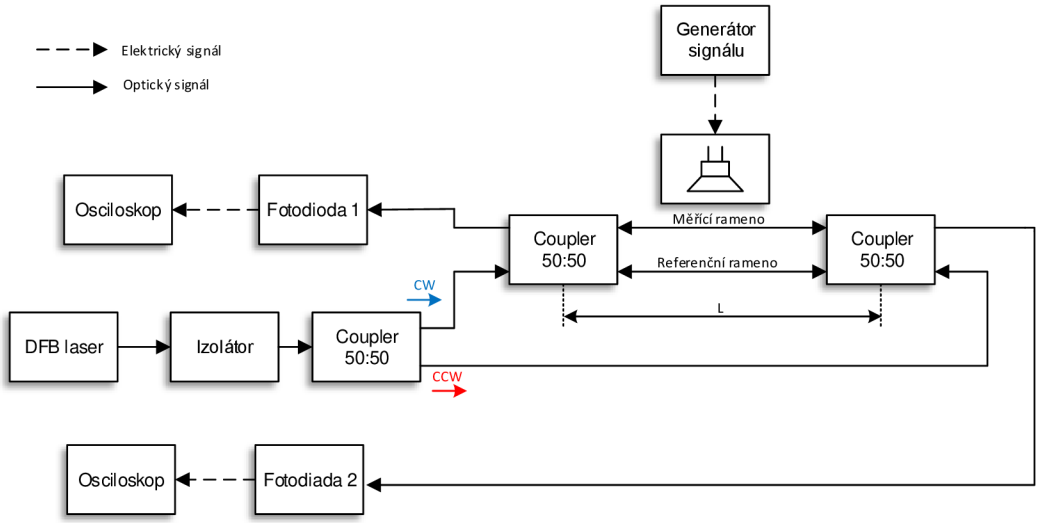

Obr. 5.3: Část, kde je proveden výpočet simulace DMZI.

Po výpočtu lokalizace, aplikace vypíše vzdálenost vibrace na optickém vlákně, pozici od kterého coupleru je tato vzdálenost počítána a časový rozdíl $\Delta t$ mezi signály, což je kritiká hodnota při výpočtu lokalizace vibrací u duálního Mach-Zehnderova interferometru a v reálném zapojení potřebujeme změřit tento údaj co nejpřesněji kvůli přesnosti výsledného výpočtu.

# 6 NÁVRH LABORATORNÍHO MĚŘENÍ DMZI

V této kapitole bude podrobně popsáno zapojení duálního Mach–Zehnderova interferometru v laboratoři. Budou popsány jednotlivé komponenty tohoto zapojení, princip funkce senzoru a následné zpracování naměřených hodnot.

Duální Mach–Zehnderův interferometr byl vybrán z důvodu dostupnosti potřebných komponent ve školní laboratoři a také kvůli jednodušší konstrukci tohoto senzoru, schopného lokalizovat zdroj vibrací.




Obr. 6.1: Blokové schéma laboratorního zapojení DMZI.

Princip a možnost lokalizace zdroje vibrací jsou podrobně rozebrány v kapitole 2.2.1, kde je zobrazeno obecné schéma zapojení i odvozeny rovnice pro výpočet místa výskytu vibrací v okolí optického vlákna.

## 6.1 Komponenty laboratorního zapojení

### Zdroj světelného záření

Jako zdroj světelného záření byla použita laserová dioda typu SLT5412, která je umístěna v přístroji s integrovanou teplotní stabilizací od společnosti ThorLabs, který se nachází na obr. 6.2.

Výběr vhodného optického zdroje je při konstrukci interferometru jedním z nejdůležitějších aspektů. Podle výběru optického zdroje se dále odvíjí výběr dalších komponent. Jelikož pro konstrukci interferometru potřebujeme zdroj koherentního světla se stabilním výstupním paprskem, byla zvolena laserová dioda, která se vyznačuje

lepšími vlastnostmi než LED dioda jako například vyšším vyzařovacím výkonem, užší spektrální šířkou, emitované světlo je monochromatické (jedné vlnové délky) a také mají mnohem větší koherentní délku.

V interferometru byla použita laserova dioda s těmito parametry:

- výstupní výkon laseru: 9,95 mW,
- vlnová délka ve vakuu: 1549,97 nm,
- nominální vlnová délka: 1553,33 nm,
- pracovní teplota: 25 °C.

Obr. 6.2: Zařízení pro umístění a teplotní stabilizaci diody.

Na obr. 6.2 je zobrazeno zařízení, které bylo využito v zapojení. Přístroj obsahuje držák na upevnění laserové diody, čímž zajištuje mechanickou stabilitu. Toto zařízení obsahuje řadu funkcí k ovládání a chlazení laserové diody. Zařízení je řízeno diagonálním barevným dotykovým displejem, který usnadňuje ladění a optimalizaci parametrů výstupu laseru. Provozní parametry jsou nastaveny pomocí intuitivního systému.

- napájecí proud: až 1,5 A,
- napájecí napětí: >4 V.

### Optický izolátor

Optický izolátor se používá z důvodu ochrany světelného zdroje. V případě DMZI, kdy jsou světelné paprsky vysílány proti sobě ve stejném optickém vlákně, kde se tyto paprsky částečně vracejí zpět ke světelnému zdroji a mohlo by tak dojít k poškození

světelného zdroje. Tento optický prvek funguje tak, že propouští světelný signál pouze v jednom směru.

Optický izolátor má tyto parametry:

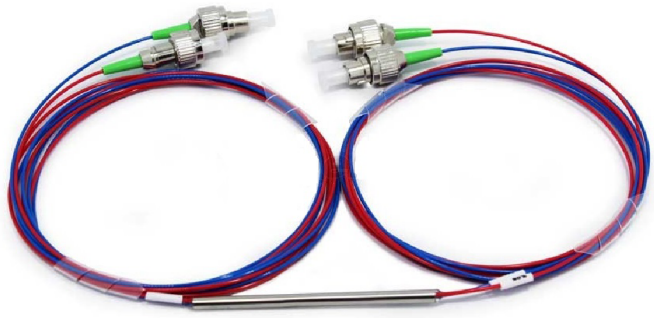
- operační vlnová délka: 1550 nm ± 15 nm;
- 300 mW,
- 30-35 dB,
- průchozí útlum: 0,58-0,9 dB,
- zpětné ztráty: >55 dB,
- typ vlákna: SMF-28e,
- konektory: FC/APC.

Obr. 6.3: Optický izolátor.

### Vazební člen (coupler)

Vazební člen neboli coupler je optická součástka sloužící k rozdělení či sloučení optických signálů. V zapojení duálního Mach–Zehnderova interferometru jsou použity tyto couplery dokonce tři a všechny v dělícím poměru 50:50. Všechny couplery v tomto zapojení boudou planární. Existují dva základní druhy coupleru, zde jsou uvedeny základní rozdíly.

- Planární coupler: vysoká kvalita, dobrá stabilita při všech poměrech, menší velikost, až 64 výstupů, použitelné pro vlnové délky 1260-1650 nm, jsou dražší a jejich výroba je složitější.
- Fúzní coupler: jednoduchá výroba, poměry mohou být upravovány, pracují pouze na třech vlnových délkách, až 32 výstupů, jsou levnější než planární couplery [15].



Obr. 6.4: Coupler.

### Optická vlákna a jejich propojení

Ramena interferometru budou realizovány pomocí jednovidových optických vláken G.652 s konektory FC/APC, který je vidět na obr. 6.5.

Obr. 6.5: Konektor FC/APC.

Konektor je důležitý prvek optického vlákna. Jedná se o pasivní optickou součástku, zajištující rozebiratelný spoj optického vlákna s dalšími prvky. Vlákno je zalepeno ve feruli a jeho konec je zaleštěn spolu s čelem ferule do jedné plochy. Nejdůležitější vlastnosti konektoru jsou nízký útlum a vysoká opakovatelnost spojení.

Obr. 6.6: Optická spojka.

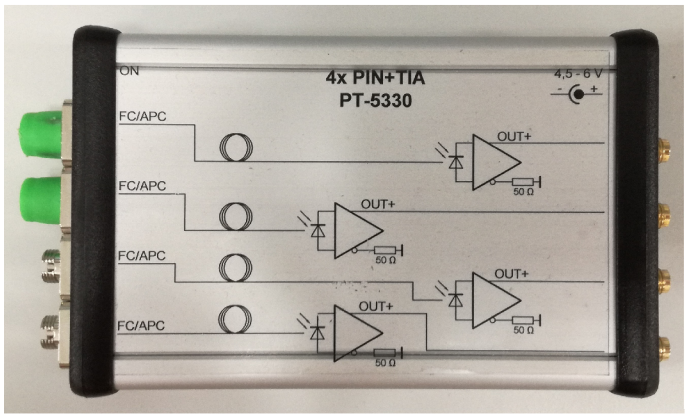
Propojení optických vláken a coupleru bude realizováno pomocí optických spojek. Tyto spojky vnášejí do zapojení útlum a požadavkem na kvalitní spojku je, aby tento útlum byl co nejnižší. Spojka je zobrazena na obr. 6.6.

### Fotodetektor

V praxi je více možností jak převádět optický signál na elektrický. V tomto zapojení bude použit PIN detektor s transimpedančním zesilovačem typu PT-5330 viz obr. 6.7. PIN detektory mají vysokou kvantovou účinnost a rychlou odezvu.

Technické parametry detektoru:

- detektor: InGaAs,
- napájecí napětí 3,15-3,45 V,
- napájecí proud (bez zátěže): 40 mA,
- detekční pásmo vlnové délky: 1100-1650 nm,
- šířka pásma: 450 MHz.




Obr. 6.7: Fotodetektor PT-5330.

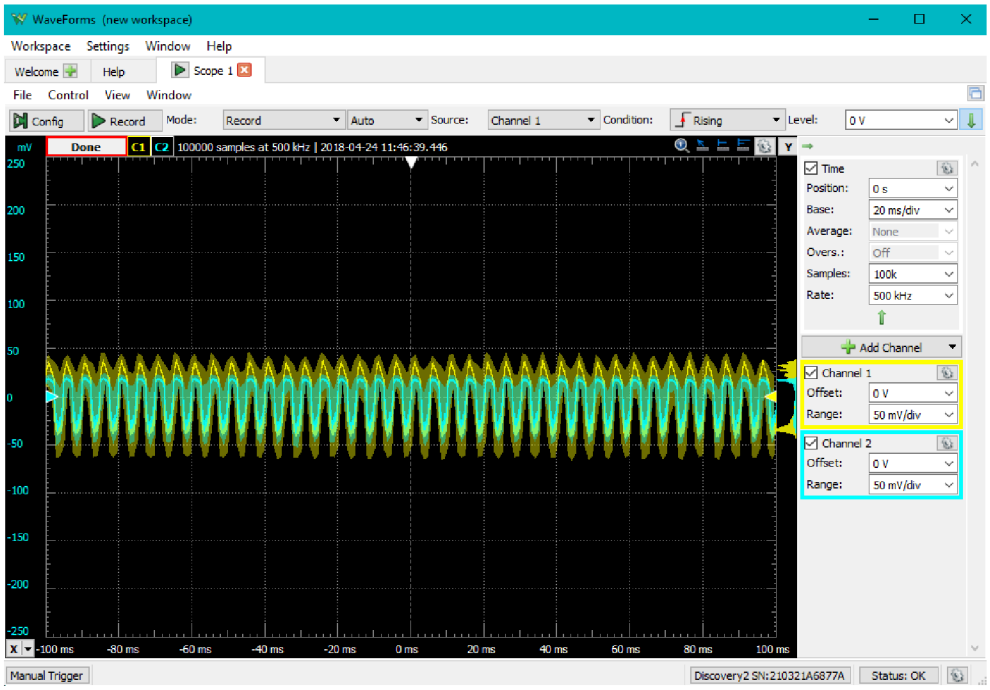
### Digitální USB osciloskop

Ke snímání již převedeného signálu optického na elektrický byl použit digitální USB osciloskop Analog Discovery 2 od výrobce Digilent. Jedná se o kompaktní zařízení, které může plnit řadu funkcí jako např. umožňuje uživateli měřit, zobrazovat, generovat či zaznamenávat různé druhy signálů. Velká výhoda tohoto zařízení je v jeho malé velikosti a váze, takže je možné ho bez problému přemístit, kam je třeba, připojit k počítači a měřit. Pro měření DMZI je nejdůležitější vlastností tohoto zařízení to, že může pracovat jako dvou kanálový digitální osciloskop o parametrech:

- vstupní impedance: 1 MΩ,
- rozlišovací schopnost: 14 bitů,
- vzorkovací frekvence: 100 MS/s,
- šířka pásma: 30 MHz.

Obr. 6.8: Digitální USB osciloskop Analog Discovery 2.

Jak již bylo řečeno, USB osciloskop je připojen k PC, na kterém je nutné mít nainstalovaný software Waveforms 2015, který je volně ke stažení na oficiálních webových stránkách výrobce Digilent. Grafické uživatelské rozhraní tohoto softwaru je zobrazeno na obr. 6.8. Ovládání programu je velice intuitivní a podobné ovládání klasického osciloskopu, jen s tím rozdílem, že veškeré nastavení se provádí nastavováním hodnot na počítači. Software může pracovat v několika režimech, jako například mód zobrazení signálu v reálném čase nebo změření a zaznamenání časového úseku.




Obr. 6.9: GUI Waveforms.

### Generátor signálu a reproduktor

V tomto laboratorním měření se snímali a vyhodnocovali vibrace působící na jednovidové optické vlákno. Tyto vibrace byly uměle vytvářeny za pomoci generátoru signálu ESCORT EGC-3235A. Tento generátor za pomoci sinusového signálu o námi zvolených frekvencích budil reproduktor, který vytvářel vibrace působící na část optického vlákna, v různých vzdálenostech mezi couplery.

# 7 APLIKACE NA ZPRACOVÁNÍ DAT

V kapitole 5 byla rozebrána aplikace, která slouží k simulaci výstupních signálů na fotodetektorech duálního Mach–Zehnderova interferometru a následně se z těchto údajů počítá pozice zdroje vibrací v okolí vlákna.

Tato kapitola se bude opět věnovat aplikaci, avšak tato aplikace bude zpracovávat reálné výsledky měření z duálního Mach–Zehnderova interferometru, který byl sestrojen a odzkoušen ve školní laboratoři optických sítí.

Měření tohoto zapojení probíhalo v několika etapách a byly odzkoušeny krátké i delší vzdálenosti optických vláken. Následně probíhal vývoj aplikačního softwaru v závislosti na potřebách měření z důvodu dosažení co nejlepších výsledků.

## 7.1 Popis aplikace

Na obrázku 7.1 je zobrazeno počáteční rozestavení grafického uživatelského rozhraní a nastavení aplikace pro zpracovaní dat získaných při měření duálním Mach–Zehnderovým interferometrem.

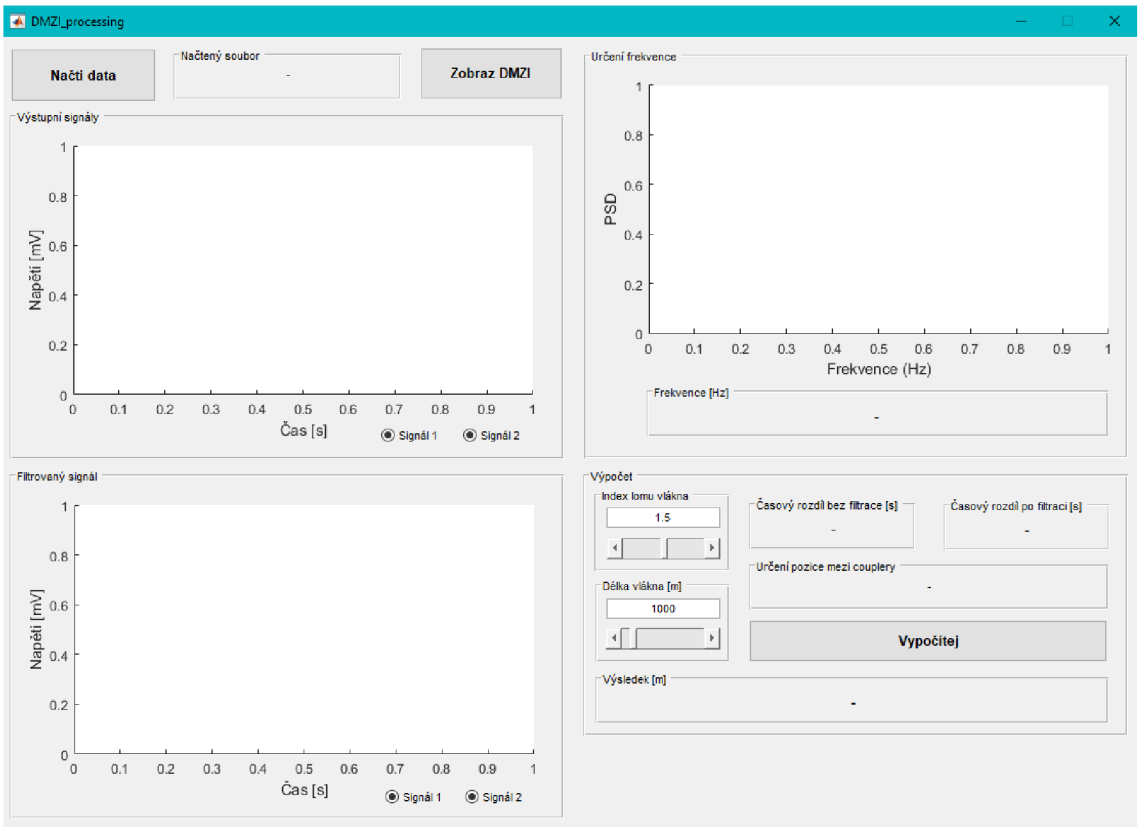
### 7.1.1 Popis grafického uživatelského rozhraní

V horní části aplikace se nachází tlačítko **Načti data**, kterým se jednoduše načtou pořízená data do aplikace ze souboru ve formátu *.csv. Vedle tohoto tlačítka je pole, ve kterém je zobrazen název načteného souboru pro větší přehlednost při používání aplikace. Sadu těchto tlačítek doplňuje tláčítko **Zobraz DMZI**, kdy stisk tohoto tlačítka vyvolá blokové schéma duálního Mach–Zehnderova interferometru pro názornost při práci.

Pod výše zmíněnými tlačítky se nacházejí dva grafy, první graf vykresluje signály, které byly naměřeny na výstupu DMZI pomocí fotodetektoru, bez dalších úprav. Na druhém grafu v prvním sloupci jsou vykresleny signály po filtraci vyšších frekvenčních složek, které ruší užitečný signál potřebný k dalšímu zpracování. Po této filtraci je signál plynulejší, méně zarušený. V obouch těchto grafech je pomocí tlačítek (tzv. radio buttons) umožněno uživateli odebrat z grafu jeden či druhý signál a vykreslit pouze signál zachycen požadovaným fotodetektorem.

V pravé horní části aplikace se nachází graf, který zobrazuje závislost výkonu spektrální hustoty na frekvenci. Prakticky tento graf ukazuje, při jaké frekvenci má výkon spektrální hustoty nejvyšší hodnotu a podle tohoto algoritmu dokáže aplikace určit přesnou frekvenci přijatého signálu v určitém časovém úseku.

Nejdůležitější část aplikace se nachází v pravém dolním rohu, tato část je označena jako výpočet. V této části se nastavují hodnoty indexu lomu optického vlákna a



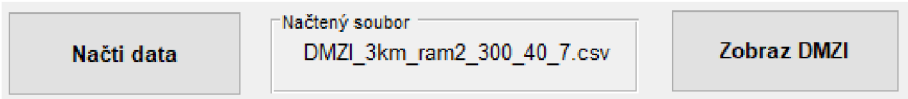

Obr. 7.1: Aplikační software sloužící ke zpracování dat DMZI.

jeho délka. Po nastavení těchto hodnot a stisku tlačítka **Vypočítej**, aplikace vypíše hodnotu $\Delta t$ jak před filtrací tak po filtraci, následně zobrazí od kterého coupleru se pozice určuje a ve spodním okně je vypsána pozice, kde se vibrace na vlákně přibližně vyskytuje.

### 7.1.2 Popis jednotlivých komponent aplikace

V této části budou podrobněji popsány části aplikace a vysvětleny nejdůležitější části kódu, vytvořeného v prostředí Matlab za pomoci rozšíření GUIDE.

#### Načtení souboru




Obr. 7.2: Načtení souboru, výpis jména souboru a zobrazení blokového schéma.

Po stisku tlačítka **Načti data** se zobrazí nabídka výběru požadovaného souboru, kde si uživatel zvolí soubor, který chce v aplikaci zpracovat. Po výběru souboru a

potvrzení, se tento soubor načte do aplikace a jeho název se zobrazí v poli **Načtený soubor**.

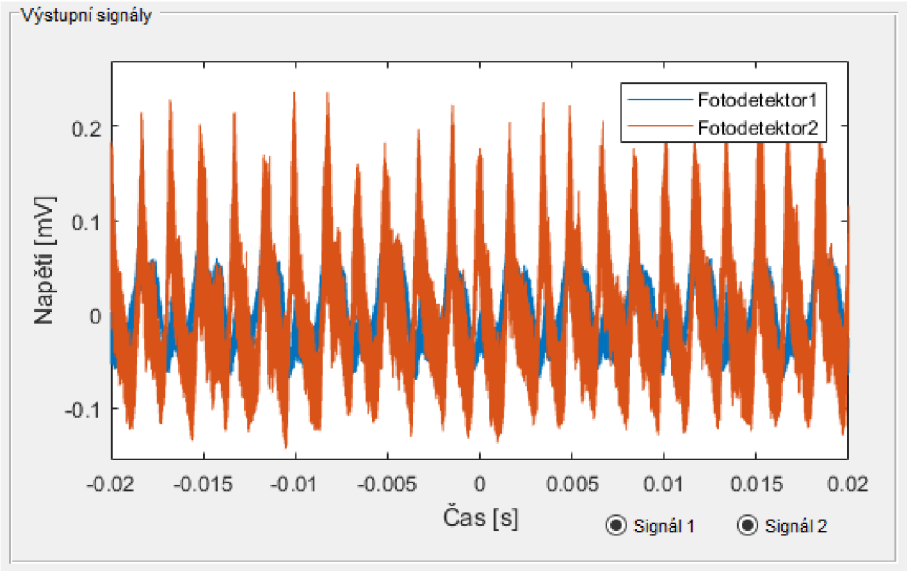
Tyto úkony jsou naznačeny v následujícím bloku kódu, kde je soubor načten pomocí příkazu `uigetfile()`, a data jsou uložena do proměnné příkazem `csvread()`. Z této proměnné následně aplikace vybírá data po sloupcích a ukládá do proměnných pro čas a dva kanály osciloskopu.

Výpis 7.1: Načtení souboru *.csv.

```
[FileName, PathName] = uigetfile('*.csv'); %načti soubor
completePath = strcat(PathName, FileName);
set(handles.file_name,'String',FileName); %vypiš název
namer = csvread(completePath,17,0); %vlož data do souboru
time = namer(:,1); %vyber první sloupec z proměnné
channel1 = namer(:,2);
channel2 = namer(:,3);
```

### Vykreslení výstupních signálů

V této části aplikace jsou vykreslena data, která jsou přijata na dvou kanálech osciloskopu. Data nejsou nijak upravena a jak je vidět na obr. 7.3 signály mohou být značně ovlivněny šumem a to především při měření na delší vzdálenosti.




Obr. 7.3: Vykreslení nefiltrovaných signálů na obou fotodetektorech.

Součástí tohoto grafu jsou dvě tlačítka ve spodní části, která slouží k přidání či odebrání signálů z grafu pro větší přehlednost.

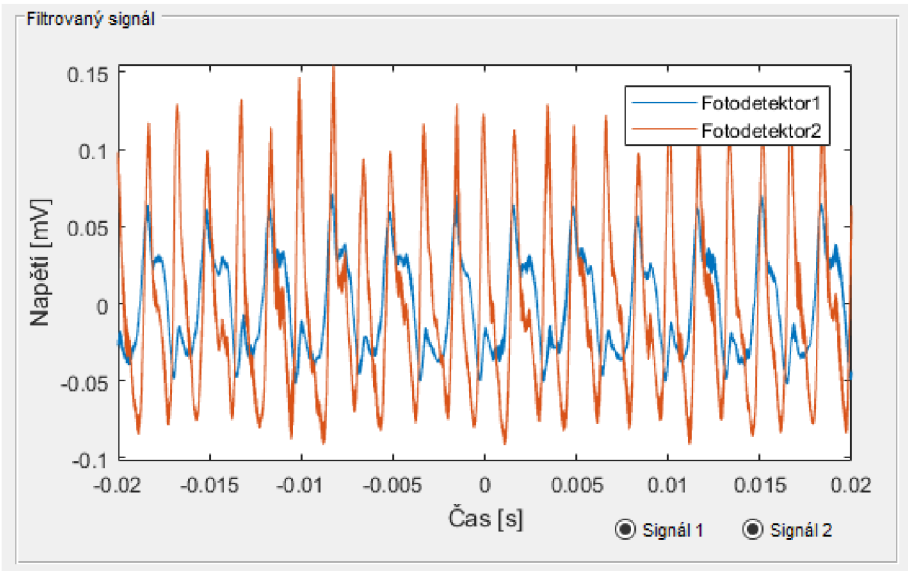
Výpis 7.2: Vykreslení signálů.

```
plot(handles.graf1,time,channel1,time,channel2);
legend(handles.graf1,'Fotodetektor1','Fotodetektor2');
axis(handles.graf1,[-0.02 0.02 -inf inf]);
xlabel(handles.graf1,'Čas [s]');
ylabel(handles.graf1,'Napětí [mV]');
```

V zobrazeném kódu 7.2 je znázorněno jak se v rozšíření Matlabu GUIDE pracuje s grafy. Graf je vykreslen, přidána legenda, popisky či rozsahy obou os.

### Filtrace výstupních signálů

Redukce šumu vstupních signálů byla řešena digitálním filtrem. Tento šum bylo potřeba odstranit pro přesnost výsledného výpočtu. Šum byl odstraněn za pomocí filtru dolní propusti, kterým byly odfiltrovány vyšší frekvenční složky signálů a ponechán byl tak jen užitečný signál.




Obr. 7.4: Vykreslení filtrovaných signálů na obou fotodetektorech.

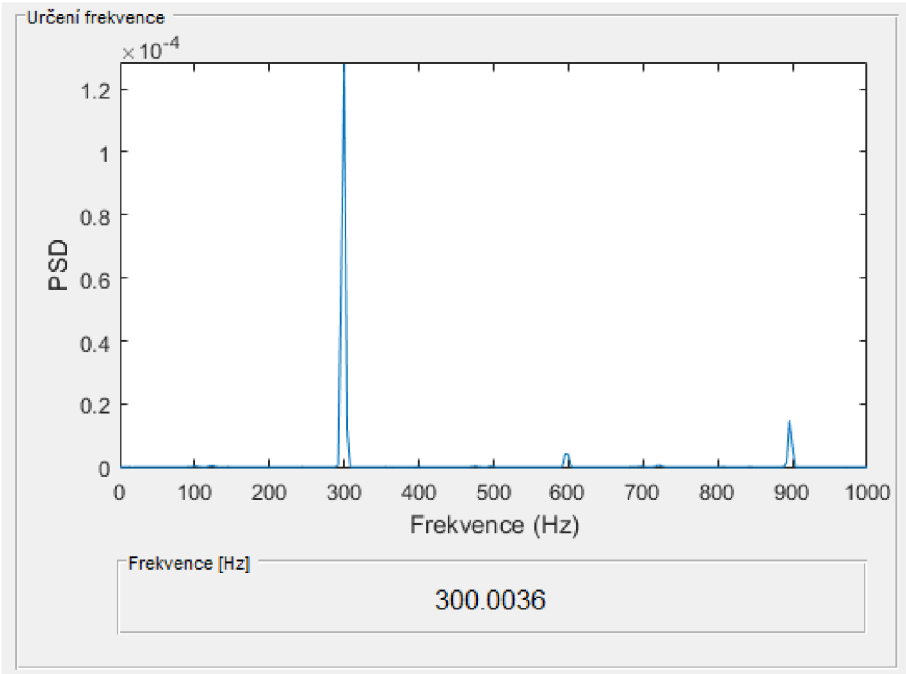
Filtr byl vytvořen pomocí funkce `designfilt()`, což je funkce prostředí Matlab, která umožňuje vymodelovat digitální filtr pro potřeby aplikace. Při návrhu tohoto filtru je možné volit řadu parametrů, jak je zřejmé ve výpisu 7.3, např. typ filtru, hraniční frekvenci, algoritmus tvorby tohoto filtru, atd. Práce s digitálním filtrem je naznačena ve výpisu kódu 7.3. Opět i v tomto grafu je možné odebrat jeden nebo druhý signál z vykresleného grafu, aby měl uživatel názornější náhled na konkrétní signál. Filtrované signály byly vykresleny stejným způsobem jak je znázorněno ve výpisu 7.2.

Výpis 7.3: Filtrace signálů.

```
DeFilt = designfilt('lowpassfir','FilterOrder',20,
'CutoffFrequency',350,'DesignMethod','window','Window',
{@kaiser,3},'SampleRate',Fs); %vytvoření filtru
y1 = filter(DeFilt,channel1); %filtrace 1. signálu
y2 = filter(DeFilt,channel2); %filtrace 2. signálu
```

### Určení frekvence signálu

Tato část aplikace se věnuje získání přesné frekvence signálu z naměřených dat. Frekvence se v aplikaci určuje podle výkonu spektrální hustoty (PSD) závislé na frekvenci. Prakticky nám graf ukazuje, při jaké frekvenci je energie spektrální hustoty nejvyšší a podle toho určuje hledanou frekvenci. Tento graf můžeme vidět na obr. 7.5




Obr. 7.5: Vyhodnocení frekvence výstupního signálu.

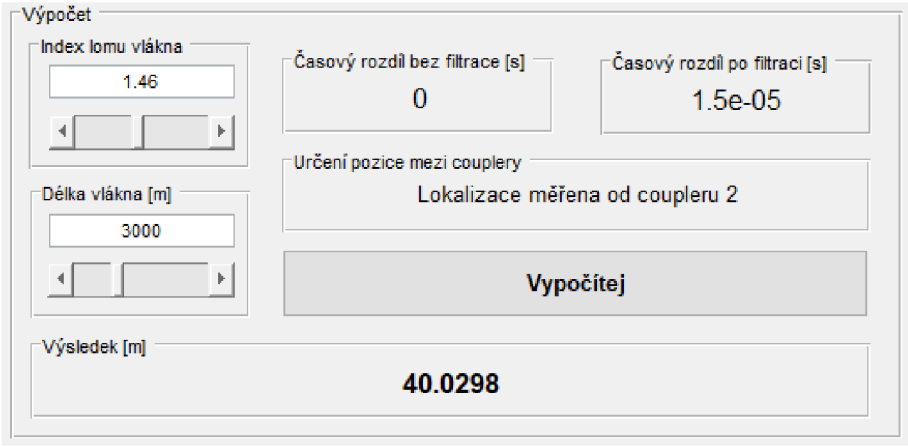
Jak je vidět z výpisu 7.4, ke zjištění frekvence je použita funkce `pwelch()`, což je Welshova metoda odhadu spektrální hustoty využívající FFT (Fast Fourier Transformation) a sloužící k převodu signálu z časové oblasti do frekvenční. Tato metoda vrací odhad výkonu spektrální hustoty a z tohoto odhadu následně vybereme maximální hodnotu spektrální hustoty, kde z maximální hodnoty určíme hledanou frekvenci. Na obr. 7.5 je vidět odhad frekvence při generování signálu o frekvenci přesně 300 Hz na optickém vlákně délky 3 km.

Výpis 7.4: Zjištění frekvence.

```
Nfft = length(channel1); %počet vzorků signálu
[Pxx,f] = pwelch(channel1,gausswin(Nfft),Nfft/2,Nfft,Fs);
[~,loc] = max(Pxx); %max PSD
FREQ_ESTIMATE = f(loc); %odhadovaná frekvence
```

### Výpočet pozice zdroje vibrací

Jedná se o klíčovou část aplikace. Její rozložení můžeme vidět na obr. 7.6. V této části aplikace se za pomoci algoritmů, které budou uvedeny dále zjišťuje poloha zdroje vibrací v okolí optického vlákna.




Obr. 7.6: Výpočet pozice zdroje vibrací.

V první řadě se v této části aplikace nastavují dva důležité parametry optického vlákna a to jeho index lomu a délka. Jak je vidět z obr. 7.6 je toto nastavení realizováno editovatelným polem, které je doplněno o posuvník a tak má uživatel dvě možnosti jak tyto hodnoty nastavit.

Dále je v aplikaci vypočítána časová odchylka $\Delta t$ jak pro signál filtrovaný tak pro signál bez úprav. V aplikaci se počítá s odchylkou signálů filtrovaných z důvodu vyšší přesnosti. Jelikož je $\Delta t$ nejdůležitější parametr z hlediska lokalizace vibrací, bylo třeba vyřešit, jakým způsobem ze dvou signálů získat tuto hodnotu. Pro získání této hodnoty bylo využito funkce `xcorr()`, která slouží ke křížové korelaci dvou signálů. Tato funkce vrací křížovou korelaci dvou diskrétních signálů, v tomto případě vyfiltrovaných signálů dvou kanálů osciloskopu. Křížová korelace měří podobnost mezi prvním kanálem a posunutým druhým kanálem jako funkci zpoždění. Funkce také vrací vektor se zpožděním, ve kterém byla korelace počítána. Použití této techniky je znázorněno ve výpisu 7.5.

Výpis 7.5: Získání časového rozdílu dvou stejných signálů.

```
[acor,lag] = xcorr(y1,y2); %křížová korelace
[~,I] = max(abs(acor));
lagDiff = lag(I); %rozdíl zpoždění
timeDiff = lagDiff/Fs; %časový rozdíl
```

Jelikož se pozice vibrace v tomto zapojení počítá mezi dvěma couplery, musí se určit, od kterého coupleru tuto vzdálenost počítáme, z toho důvodu, že rovnice pro výpočet pozice vibrací dokáže určit jako maximální vzdálenost polovinu délky měřeného optického vlákna. Prakticky se jedná o to, že aplikace musí zjistit, který signál je zpožděný a tak určit, ke kterému coupleru se pozice zdroje vibrací váže.

Výpis 7.6: Určení vztažného coupleru.

```
if(delta_t >= 0)
set(handles.pozice,'String','Měřeno od coupleru 1');
elseif(delta_t < 0)
set(handles.pozice,'String','Měřeno od coupleru 2');
```

Jak je vidět z výpisu 7.6, v aplikaci je tento problém vyřešen tak, že porovnává výstup křížové korelace $\Delta t$ a podle toho jestli je hodnota kladná nebo záporná určuje coupler, ke kterému se měření vztahuje.

Závěrečná část aplikace slouží k samotnému výpočtu pozice vibrace z naměřených a zvolených hodnot dle rovnice:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left( L - \frac{\mathrm{c} \cdot \Delta t}{n} \right) \text{ [s]}, \tag{7.1}$$

kde $x$ je vzdálenost zdroje vibrací od coupleru, $L$ celková délka měřené trasy, c rychlost světla, $n$ index lomu optického vlákna a $\Delta t$ je časový rozdíl mezi dvěma signály.

Výpis 7.7: Výpočet pozice vibrace.

```
L = get(handles.slider_delka,'Value'); %délka vlákna
n = get(handles.sliderIndex,'Value'); %index lomu
c = 299792458; %konstanta rychlosti světla
vysl = 0.5*(L-(c*delta_t2)/n);
```

Na výpisu 7.7 je naznačen výpočet v aplikaci. Hodnoty $L$ a $n$ jsou zde získány z nastavení posuvníků a rychlost světla je přesně nastavena.

# 8 VÝSLEDKY LABORATORNÍHO MĚŘENÍ

Měření probíhalo v několika etapách ve školní laboratoři optických sítí. Proběhlo měření různých délek optických vláken, kdy se vlákna budila světelným signálem různých výkonových úrovní, tak aby výsledky měření byly co možná nejpřesnější. Vlakna pro měření byla použita jednovidová. Při měření se experimentovalo i s uchycením optického vlákna ke zdroji vibrací. V následující kapitole budou popsány výsledky těchto měření, jak z hlediska frekvenčního, tak vyhledávání pozice zdroje vibrací. V tabulce 8.1 jsou převedeny hodnoty vstupního proudu laseru na optický výkon na jeho výstupu.

Tab. 8.1: Výstupní výkon laseru.

| **Vstupní proud [mA]** | **Optický výkon [mW]** |
|---|---|
| 25 | 3,98 |
| 30 | 5,03 |
| 35 | 6,09 |
| 40 | 7,11 |
| 45 | 8,23 |
| 50 | 9,25 |

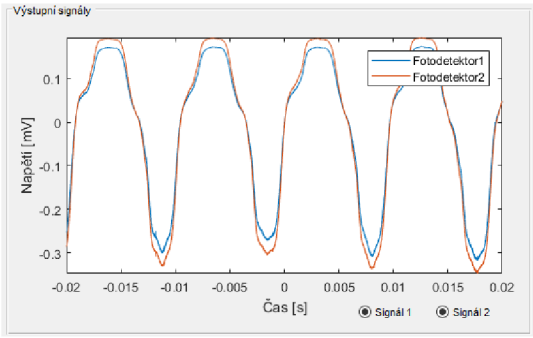
## 8.1 Měření vláken krátkých vzdáleností

Měřením vláken kratších vzdáleností je myšleno použití optických vláken délky do deseti metrů. Měření těchto druhů vláken bylo minimálně rušeno nežádoucím vlivem vnějšího prostředí, takže průběhy signálů byly na osciloskopu jasně zřetelné a tudíž i zjištění frekvence bylo bez problémů. Avšak měření polohy zdroje vibrací bylo nemožné jak bude vysvětleno dále v práci.

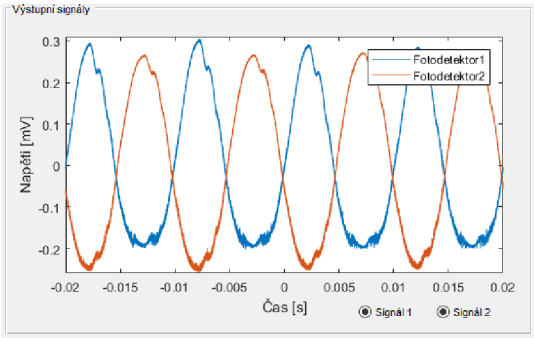
### 8.1.1 Měření frekvence vibrací

Jak již bylo řečeno v úvodu této práce, interferometry jsou velice přesné a citlivé přístroje pokud se jedná o měření vibrací a jinak to není ani u duálního Mach–Zehnderova interferometru. Pro měření krátkých vláken byly použity propojovací optické kabely o délkách 2 a 5 metrů. Tyto délky byly použity z důvodu dostupnosti v laboratoři.

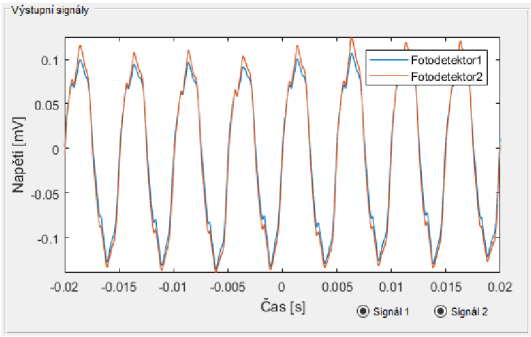
Při měření těchto délek vláken byly průběhy signálů čisté a neovlivněny rušením. Díky tomu bylo možno jednoduše určit frekvenci i bez použití filtrů jak je vidět z obrázků.



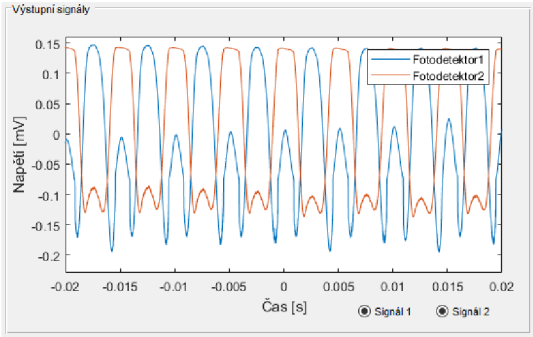

(a) 100 Hz




(b) 100 Hz




(c) 200 Hz



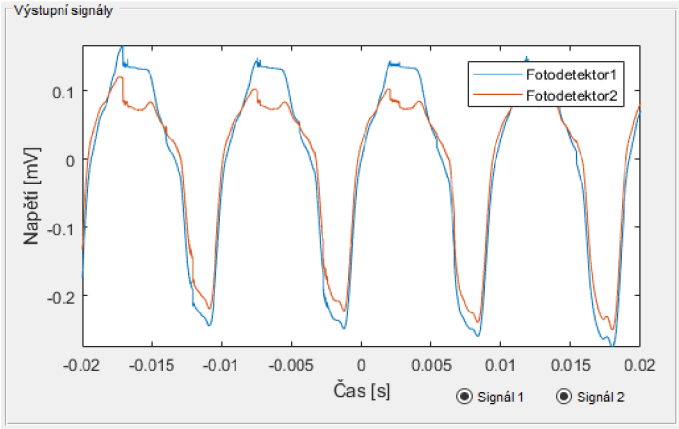

(d) 200 Hz

Obr. 8.1: Měření frekvence na vláknu 2 metry, (a,c) vibrace působící na jedno rameno, (b,d) vibrace působící na obě ramena interferometru.

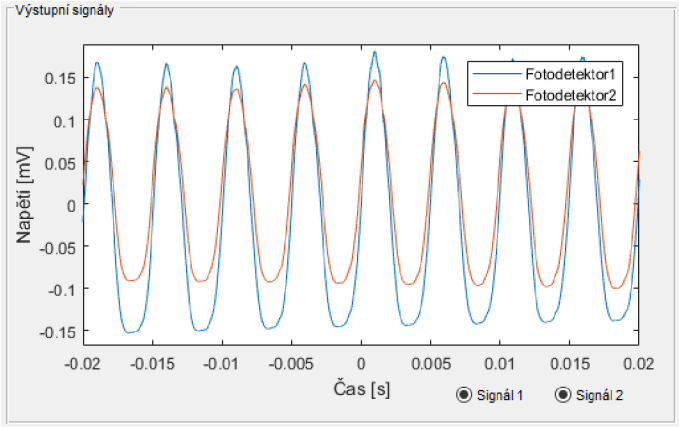
Na obr. 8.1 jsou zobrazeny výstupy aplikace, kdy měřené vlákno bylo délky 2 metry a reproduktor byl buzen signálem o frekvenci 100 Hz a 200 Hz. Laser byl při tomto měření napájen vstupním proudem 30 mA. Jak je vidět průběhy signálů na obrázcích jsou plynulé a nezarušené a i pouhým pohledem je možné odhadnout periodu signálu a spočítat danou frekvenci, takže aplikace využívající Welshův algoritmus neměla žádný problém při určování přesné frekvence.

Při tomto měření bylo dále zjištěno, že pokud vibrace působí na jedno rameno interferometru, je fáze obou signálů stejná. Jestliže však vibracím vystavíme obě ramena interferometru, fáze jednoho signálu je otočena, respektive posunuta o 180°, ovšem na výsledky detekce vibrací to nemá vliv.

Na dalším obr. 8.2 je provedeno identické měření za použití vlákna o délce 5 metrů, vstupní proud laseru byl opět 30 mA. Je vidět, že tato délka vykazuje stejné výsledky jako předchozí kratší vzdálenost. Frekvence je opět zjištěna aplikací velmi přesně. Frekvence 100 Hz a 200 Hz nebyli nijak zásadní pro měření pozice vibrací. Interferometr je schopen přesně měřit frekvence i 2 kHz velmi přesně, jak bylo ověřeno při laboratorním měření.




(a) 100 Hz




(b) 200 Hz

Obr. 8.2: Měření frekvence na vláknu 5 metrů.

### 8.1.2 Určení pozice zdroje vibrací

Určení pozice vláken kratších vzdáleností je u duálního Mach–Zehnderova interferometru téměř nemožná a důvod je velmi prostý. Všechno závisí na rychlosti šíření optické vlny vláknem a rozlišovací schopnosti detektoru.

Pro pochopení, proč nelze vibraci detekovat, vypočítáme čas, za který urazí světlo jeden metr v optickém vlákně. Pro tento výpočet využijeme rovnice $t = s/v$, kde $t$ je čas, $s$ je dráha, kterou má světlo urazit a $v$ je rychlost. V tomto případě bude použita rychlost světla a jelikož chceme vypočítat za jakou dobu světlo urazí jeden metr, můžeme rovnici upravit na tento tvar a dopočítat $t = 1/\mathrm{c} = 3,33 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{m}$. Problém nastane tehdy, když se má signál snímat, jelikož v tomto zapojení počítá aplikace pozici z časového rozdílu dvou signálů, jsme omezeni rozlišovací schopností detektoru. Použitým přístrojem jsme měřili se vzorkovací frekvencí 2 MHz čili perioda mezi dvěma vzorky byla $5 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{s}$, což je větší hodnota než za jakou

světelný paprsek prošel námi měřená vlákna z čehož vyplývá, že nejsme schopni změřit ještě daleko kratší časový rozdíl mezi dvěma signály. Duální Mach-Zehnderův interferometr sestaven ve školní laboratoři by byl teoreticky schopen změřit nejkratší vlákno o délce 1 km, kdy by dosáhl rozlišovací schopnosti ± 150 m.

## 8.2 Měření vláken delších vzdáleností

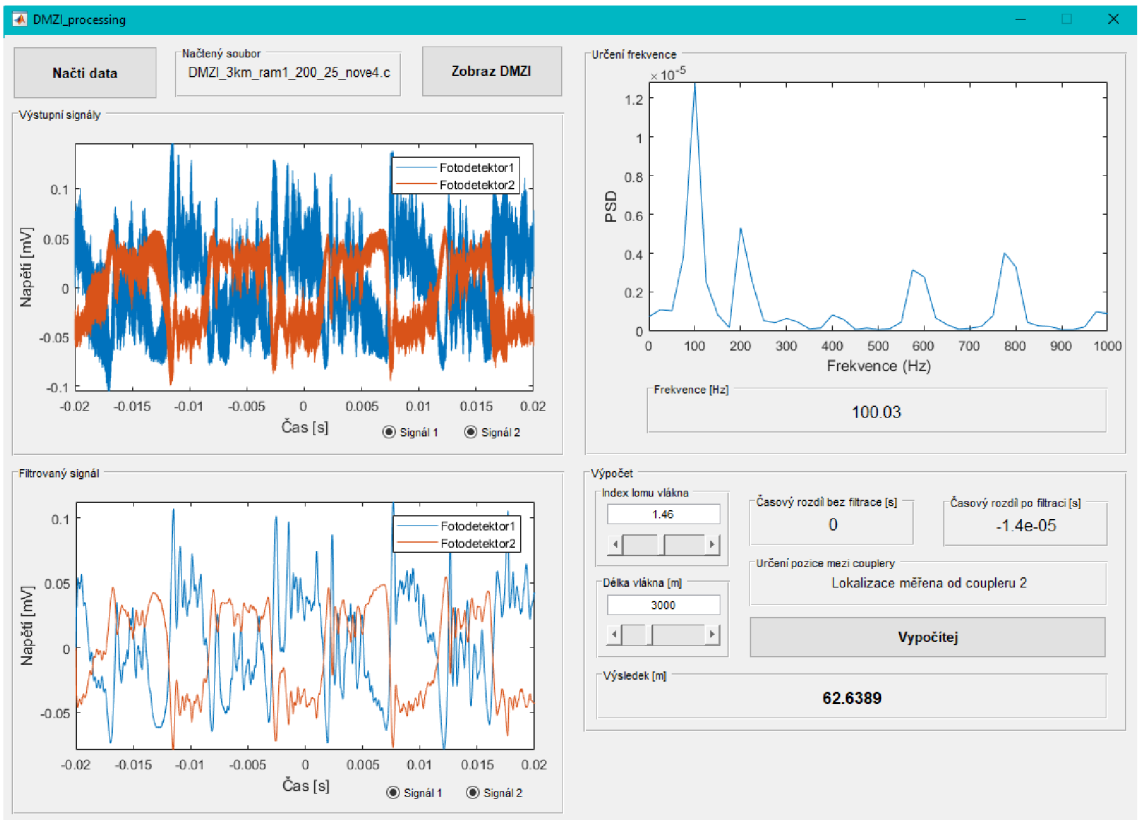
Jak je uvedeno v předchozí kapitole, určení pozice zdroje vibrací u vláken kratších vzdáleností je téměř nemožné. I z pohledu teoretického využití, jsou krátké vzdálenosti pro lokalizaci ve své podstatě zbytečné. Například při ochraně perimetru rozsáhlého pozemku by bylo využíváno vlákna o délce několika kilometrů a tak v této kapitole budou popsány výsledky měření na vláknech delších než kilometr. Konkrétně měření probíhalo na optických vláknech délky 3 km z důvodu dostupnosti v laboratoři a taky jsme byli omezeni tím, že k sestrojení přístroje je potřeba zapojení dvou identických vláken. V zavěrečných pokusech byl pokus změřit vlákna délky 6 km, avšak vlákna nebyla identická a tak měření postrádalo potřebnou přesnost.

### 8.2.1 Měření frekvence vibrací

Také u delších vláken byly měřeny frekvence do zhruba 300 Hz. U měřených vláken 3 km a 6 km, bylo značně patrné rušení vnějšího prostředí na výstupních signálech a tak bylo nutné v aplikaci použít i filtr typu dolní propusti pro větší přesnost. Avšak i u značně zarušených signálů, byla aplikace schopna velmi přesně určit měřenou frekvenci díky použitému algoritmu.

Na obr. 8.3 je zobrazen výstup aplikace při měření vibrací na vlákně délky 3 km. Generátor vibrací byl buzen frekvencí 100 Hz a vstupní proud laseru byl 25 mA, protože je to prahový proud použité diody, kdy laserová dioda dosahuje nejlepších parametrů. Z obrázku je jasně patrné, že při měření na tomto vlákně je signál rušen vlivem okolního prostředí, jelikož zapojení nebylo provedeno v odrušené místnosti nýbrž v laboratoři. Signály tedy nejsou ani zdaleka tak plynulé, jak tomu bylo při měření na vláknech délky 5 m. Proto je použit filtr typu dolní propusti vytvořen pomocí funkce Matlabu a tak v levé dolní části výstupu aplikace můžeme vidět signály po filtraci. I přes značné zarušení výstupního signálu je algoritmus stále schopen velmi přesně vypočítat frekvenci vibrací.

Měření na vláknech délky 6 km je zobrazeno na obr. 8.4. Frekvence vibrací byla 305 Hz a vstupní proud laserové diody byl nastaven na 40 mA. Na tuto délku už bylo třeba zvýšit vstupní proud laserové diody a to kvůli útlumu trasy optického vlákna. I přes to, že vlákna nebyla totožná a proto měření postrádalo určitou přesnost, byla frekvence změřena s vysokou přesností.




Obr. 8.3: Výstup aplikace 100 Hz na 3 km vlákně.

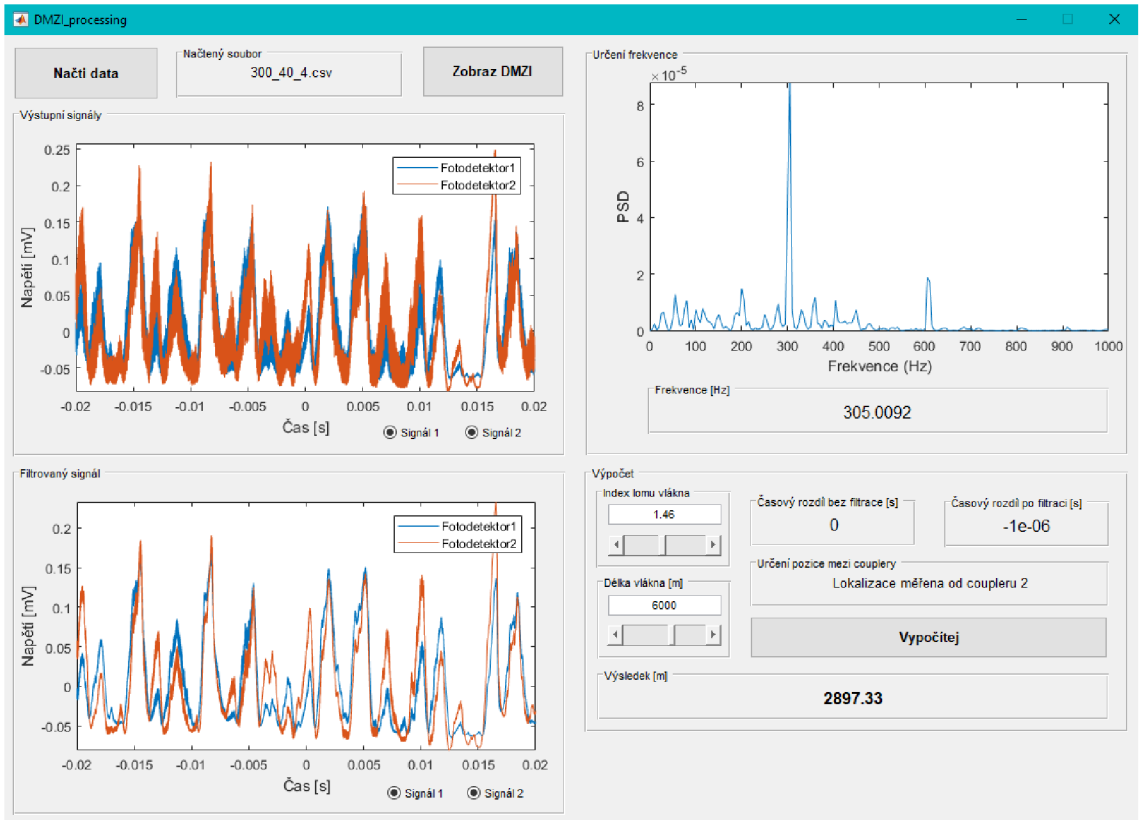
### 8.2.2 Určení pozice zdroje vibrací

V části aplikace pro lokalizaci vibrací, která je zobrazena na obr. 8.3, byly nastaveny hodnoty měřených vláken podle jejich reálných parametrů, to znamená že index lomu optického vlákna byl nastaven na 1,46 a délka tohoto vlákna byla nastavena na 3000 m. Po stisku tlačítka **Vypočítej** aplikace vypočítala časový rozdíl před filtrací a po filtraci, pro aplikaci je důležitý rozdíl po filtraci, s kterým následně pracuje algoritmus pro výpočet pozice vibrací. Časový rozdíl byl tedy na našem vzorovém měření $-1,4 \cdot 10^{-5}$ s. Dále aplikace podle tohoto rozdílu vyhodnotila, od kterého optického coupleru je pozice počítána a konečně ve spodní části je vypsán výsledek tohoto měření v metrech.

Jak je tedy vidět z přiloženého obrázku, časový rozdíl na vláknu délky 3 km už jsme schopni s použitými přístroji změřit a z toho vyplývá, že jsme schopni přibližně změřit i pozici zdroje vibrací.

Zdroj vibrací při tomto měření ležel zhruba 2 metry za couplerem a aplikace určila pozici na 62. metr. To se může jevit jako velká odchylka, ale pokud bereme v potaz, že jsme při tomto měření teoreticky mohli pokrýt obvod pozemku dlouhý 3 km za použití relativně levných a dostupných součástek, tak se tento výsledek jeví jako přijatelný.

Na obr. 8.4 je vidět měření na vláknech délky 6 km. Měření bohužel probíhalo na vláknech, která nebyla úplně identická a tak výsledek tohoto měření vůbec neodpovídal pozici zdroje vibrací. U takto přesných měření, jako bylo měření duálního Mach–Zehnderova interferometru, kde měříme změny v řádech mikrosekund, je i nepatrný rozdíl kritický.




Obr. 8.4: Výstup aplikace 300 Hz na 6 km vlákně.

## 8.3 Vyhodnocení měření

Měřením duálního Mach–Zehnderova interferometru byla v práci ověřena jeho funkčnost, jak z pohledu meření frekvence tak lokalizace zdroje vibrací.

Při určování frekvence je toto zapojení velmi přesné, dokáže si poradit i s výrazně zarušeným sigálem a frekvenci přijatého signálu dokáže přesně určit. Díky této vlastnosti je tento interferometr dobrá volba, pokud je třeba identifikovat zdroj vibrací za pomoci frekvenční analýzy. Tím je myšleno, určovat co způsobilo vibrace v okolí optického vlákna (jako například únik na produktovodu, kopání, vrtání, chůze, atd.).

Určování pozice zdroje vibrací už byl těžší úkol než pouze určit jejich frekvenci. Jelikož se muselo pracovat s maximální přesností výpočtu minimálních časových rozdílů bylo třeba provádět měření velmi přesně a tak řada měření díky vnějšímu rušení

nevyšla podle představ. Měření potvrdilo, že přibližně lokalizovat zdroj vibrací je možné pomocí duálního Mach–Zehnderova interferometru, avšak řada měření také tuto pozici neurčila. Pro získání lepších výsledků by bylo třeba provést více měření v terénu, generovat vibrace na různých úsecích vlákna a tak si udělat obrázek o chování výstupů v závislosti na vzdálenostech generátoru vibrací. Toto bohužel není v laboratoři možné, jelikož měření provádíme na vláknech v řádech kilometrů.

Celkově si myslím, že takto, jak byl duální Mach–Zehnderův interferometr sestaven v laboraři, není schopen být použit v praxi pro lokalizaci vibrací, jelikož přesnost měření nebyla dostačující. Přesnost by se dle mého názoru dala zlepšit několika způsoby:

- použitím přesnějších součástek (zdroj světelného záření, fotodetektor, osciloskop),
- modifikací zapojení a použitím hybridní konstrukce ve spojení s dalším typem optovláknového senzoru, jak bylo uvedeno v kapitole 2.

Prakticky by se jednalo o to zjistit, zda by tyto modifikace dokázali zvýšit přesnost měření v důsledku nárustu ceny zapojení a také, jestli by bylo toto zapojení finančně únosné a nebylo tak lepší raději přejít na testování jiného druhu senzoru.

## 8.4 Srovnání optovláknových senzorů schopných lokalizace vibrací

V této části práce budou vypsány dříve popsané optovláknové senzory určeny k měření vibrací a následnou lokalizaci zdroje těchto vibrací. V tabulce 8.2 jsou vypsány tyto senzory, je zde zmíněn výzkumný tým, který na senzoru pracoval, délka senzoru s jeho prostorovým rozlišením a rok, ve kterém byl výzkum zveřejněn. V tomto výpisu jsou zmíněny aktuální výzkumy z nejbližších let. Jak je vidět, velký podíl ve výzkumu optovláknových senzorů zastupují čínské týmy, ale i ve zbytku světa se této problematice vědci věnují.

Z tabulky 8.2 jsou pro tuto práci důležité údaje o senzoru MZI. Čínské týmy výzkumníku dokázali měřit vibrace na modifikacích Mach–Zehnderova interferometru délky 2 km s prostorovým rozlišením 20 m a 75 m. V rozsahu této práce nebylo uskutečněno požadované množství měření v terénu z výše uvedených důvodů, a tak není možné přesně stanovit, kde se mezi těmito senzory z pohledu lokalizace zdroje vibrací nachází duální Mach–Zehnderův interferometr, který byl sestaven v laboratoři. Frekvence byla uspěšně změřena na vzdálenost 6 km.

Tab. 8.2: Srovnání optovláknových senzorů [4].

| **Senzor** | **Výzkumný tým** | **Vzdálenost [km]** | **Prostorové rozlišení [m]** | **Rok** |
|---|---|---|---|---|
| Sagnac | Huazhong University of Science and Technology, China | 41 | 100 | 2014 |
| Sagnac | Fudan University, China | 25 | 59 | 2008 |
| MZI | Tianjin University, China | 2,25 | 20 | 2015 |
| MZI | Beijing Jiaotong University, China | 2 | 75 | 2015 |
| MI | Beijing University of Posts and Telecommunications, China | 4 | 51 | 2011 |
| Φ-OTDR | Faculdate de Ciencias da Universidade do Porto, Portugal | 125 | 10 | 2015 |
| Φ-OTDR | Nanjing University, China | 9 | 2 | 2015 |
| POTDR | Nanjing University, China | 10 | 10 | 2015 |
| OFDR | Tianjin University, China | 40 | 6,7 | 2016 |
| Φ-OTDR+MZI | University of Southampton, Southampton, UK | 1 | 2 | 2013 |
| Φ-OTDR+MI | Chinese Academy of Sciences, Beijing, China | 10 | 6 | 2015 |

# 9 ZÁVĚR

V práci byly rozděleny distribuované optovláknové senzory podle řady kriterií a následně byly zmíněny senzory založeny na snímání zpětného rozptylu světelné vlny.

Hlavním cílem této práce byly senzory pracující na interferenci světla, interferometry. Bylo zde popsáno základní dělení těchto interferometrů a jejich základní typy a využití. Velký důraz této práce byl kladen na snímání vibrací a následné lokalizaci vzniku těchto vibrací v okolí optického vlákna. Postupně byly rozebrány různé modifikace interferometrických senzorů a jejich možnosti snímání a lokalizace vibrací.

V práci je také popsáno praktické využití a aplikace těchto distribuovaných optovláknových senzorů v praxi, kdy největší využití se nachází v ochraně perimetru rozsáhlých pozemků a snímání okolí civilní infrastruktury a produktovodů.

Následně je v práci popsán a v programu Matlab odsimulován duální Mach-Zehnderův interferometr a proveden teoretický výpočet lokalizace vibrací u tohoto interferometru.

Dále se značná část práce věnuje vývoji aplikací v prostředí Matlab za použití jeho rozšíření GUIDE. První aplikace slouží k simulaci duálního Mach-Zehnderova interferometru a teoretickému výpočtu pozice zdroje vibrací. Druhá aplikace slouží ke zpracování signálu získaného z měření na duálním Mach-Zehnderově interferometru. Tato aplikace se využívala při vyhodnocování frekvence vibrací a výpočtu lokalizace vibrací podél optického vlákna.

V práci je navrženo zapojení duálního Mach-Zehnderova interferometru v laboratorních podmínkách za pomoci reálných optických součástek ve školní laboratoři. Popis funkce těchto součástek a jejich technických parametrů.

V závěru práce je pak ve školní laboratoři duální Mach-Zehnderův interferometr sestaven a provedena na něm řada měření vibrací. Výsledky těchto měření jsou sepsány a vyhodnoceny v závěru práce s názory, jak by se dalo toto zapojeni vylepšit či modifikovat.

# LITERATURA


[1] DORAZIN, David, 2016. *Distribuované optické senzorické systémy.* Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Milan Čučka.

[2] ŠIFTA, Radim, Petr MÜNSTER, Tomáš HORVATH, Vít NOVOTNÝ, Ondřej KRAJSA a Miloslav FILKA, 2015. Distributed Fiber-Optic Sensor for Detection and Localization of Acoustic Vibrations. *Metrology and Measurement Systems* [online]. **22**(1), 111-118 [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: `http://bit.ly/2zOpr0W`.

[3] ROGERS, A.J., 1980. Polarisation optical time domain reflectometry. *Electronics Letters* [online]. **16**(13), 489-490 [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: `http://ieeexplore.ieee.org/document/4244111/`

[4] LIU, Xin, Baoquan JIN, Quing BAI, Yu WANG, Dong WANG a Yuncai WANG, 2016. Distributed Fiber-Optic Sensors for Vibration Detection. *Sensors (Basel, Switzerland)* [online]. **16**(8), 1164-1195 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: `https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5017330/`

[5] KIZLIK, Bogdan, 2002. Fibre optic distributed sensor in Mach-Zehnder interferometer configuration. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science* [online]. **2**(1), 128-130 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: `http://ieeexplore.ieee.org/document/1015886/`

[6] SUN, Quizhen, Deming LIU, Jian WANG a Hairong LIU, 2008. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer. *Optics Communications* [online]. **20**(6), 1538-1544 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401807012175`

[7] HONG, Xiaobin, Jian WU, Chao ZUO, Fangsen LIU, Hongxiang GUO a Kun XU, 2011. Dual Michelson interferometers for distributed vibration detection. *Optical Society of America* [online]. **50**(22), 4333-4338 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: `http://bit.ly/2jCWbEz`.

[8] SPAMMER, Stephanus, Pieter SWART a Anatoli CHTCHERBAKOV, 1998. Distributed dual-wavelength Sagnac impact sensor. *Microwave and optical technology letters* [online]. **17**(3), 170-173 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: `http://bit.ly/2AaUhlD`.

[9] CHTCHERBAKOV, Anatoli, Pieter SWART, Stephanus SPAMMER a Beatrys LACQUET, 1998. Modified Sagnac/Mach-Zehnder interferoemter for distributed disturbace sensing. *Microwave and optical technology letters* [online]. **20**(1), 34-36 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: `http://bit.ly/2hHwBO5`.

[10] SPAMMER, Stephanus a SWART Pieter, 1997. Merged Sagnac-Michelson Interferometer for Distributed Disturbace Detection. *Journal of lightwave technology* [online]. **15**(6), 972-976 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: `http://ieeexplore.ieee.org/document/588669/`.

[11] HE, Quian, Tao ZHU, Xianghui XIAO, Baomei ZHANG, Dongmei DIAO a Xiaoyi BAO, 2013. All Fiber Distributed Vibration Sensing Using Modulated Time-Difference Pulses. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. **25**(20), 1955-1957 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: `http://ieeexplore.ieee.org/document/6582659/`.

[12] FANG, Gaosheng, Tuanwei XU, Shengwen FENG a Fang LI, 2015. Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer Based on Phase-Generated Carrier Algorithm. *Journal of Lightwave Technology* [online]. **33**(13), 2811-2816 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: `http://ieeexplore.ieee.org/document/7063256/`.

[13] PÍŠA, Pavel, 1998. Matlab,laboratoř nejen pro matematiky. *Sdělovací technika* [online]. **46**(9), 9-19 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: `http://cmp.felk.cvut.cz/~pisa/Public/ST_matlab.html`.

[14] SRNSKÝ, Petr, 2017. *Optovláknová interferometrie*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Milan Čučka.

[15] *FBT vs. PLC Fiber Optic Splitters - What's The Difference?* [online], 2017. 1076 Florida Central Parkway Longwood, FL 32750: Multicom [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: `https://www.multicominc.com/training/technical-resources/fbt-vs-plc-fiber-optic-splitters-whats-the-difference`.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | |
|---|---|
| AOM | akusticko-optický modulátor – acousto-optic modulator |
| BOTDA | OTDR založeno na Brillouinovu royptylu – Brillouin Optical Time Domain Analysis |
| c | rychlost světla |
| CCW | proti směru hodinových ručiček — Counter Clockwise |
| CW | kontinuální optické vlna — Continual wavelength |
| CW | ve směru hodinových ručiček — Clockwise |
| DFB | distribuovaný laser se zpětnou vazbou — Distributed–Feedback Laser |
| DMI | duální Michelsonův interferometr – dual Michelson Interferometer |
| DMZI | duální Mach-Zehnderův interferometr – dual Mach-Zehnder Interferometer |
| EDFA | Erbiem dotovaný vláknový zesilovač — Erbium-doped optical fiber amplifier |
| FFT | rychlá Fourierova transformace – Fast Fourier Transformation |
| FPI | Fabry–Perotův interferometr – Fabry-Perot Interferometer |
| FRM | Faradayovo rotační zrcadlo – Faraday Rotator Mirror |
| FSM | Frekvěnční polopropustné zrcadlo – Frequency Selective Mirror |
| GUI | grafické uživatelské rozhraní – Graphical User Interface |
| GUIDE | prostředí pro tvorbu grafických rozhraní – Graphical User Interface Development Enviroment |
| $L$ | celková délka |
| LED | elektroluminiscenční dioda – Light–Emitting Diode |
| MI | Michelsonův interferometr – Michelson Interferometer |
| MZI | Mach-Zehnderův interferometr – Mach-Zehnder Interferometer |
| $n$ | index lomu |
| OTDR | Optical Time Domain Reflectometer |
| POTDR | OTDR založeno na polarizační reflektometrii v časové oblasti – Polarization Optical Time Domain Reflectometry |
| PC | Polarizační kontrolér – Polarization Controller |
| PGC | Algoritmus generující nosnou fáze – Phase-Generated carrier |
| $s$ | dráha |
| SI | Sagnacův interferometr – Sagnac Interferometer |
| $t$ | čas |
| $v$ | rychlost |
| WDM | vlnový multiplex – Wavelength Division Multiplex |
| $x$ | vzdálenost |
| $\lambda$ | vlnová délka |

Φ–OTDR Fázové OTDR – Phase-Optical Time Domain Reflectometer

# SEZNAM PŘÍLOH

**A Obsah přiloženého CD** **70**

A.1 Vlastní elektronická verze práce . . . . . 70

A.2 Složka Simulace DMZI . . . . . 70

A.3 Složka Aplikace na simulaci DMZI . . . . . 70

A.4 Složka Aplikace na zpracování dat z DMZI . . . . . 70

A.5 Složka Náměry z DMZI . . . . . 70

# A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

## A.1 Vlastní elektronická verze práce

Obsahuje soubor DP.pdf s elektronickou verzí diplomové práce.

## A.2 Složka Simulace DMZI

Obsahuje soubor simulace duálního Mach–Zehnderova interferometru:

- DMZI.slx.

## A.3 Složka Aplikace na simulaci DMZI

Obsahuje soubory aplikace na simulaci duálního Mach–Zehnderova interferometru:

- DMZI.fig,
- DMZI.m.

## A.4 Složka Aplikace na zpracování dat z DMZI

Obsahuje soubory aplikace na zpracování dat z duálního Mach–Zehnderova interferometru:

- DMZI_processing.fig,
- DMZI_processing.m.

## A.5 Složka Náměry z DMZI

Obsahuje soubory, které byly naměřeny duálním Mach–Zehnderovým interferometrem a použity v práci:

- 2m_100Hz_30mA_ram1.csv,
- 2m_100Hz_30mA_ram2.csv,
- 2m_200Hz_30mA_ram1.csv,
- 2m_200Hz_30mA_ram2.csv,
- 3km_100Hz_25mA.csv,
- 5m_100Hz_30mA.csv,
- 5m_200Hz_30mA.csv,
- 6km_305Hz_40mA.csv.