

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2016

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

## DISTRIBUOVANÉ OPTICKÉ SENZORICKÉ SYSTÉMY

OPTICAL DISTRIBUTED SENSOR SYSTEMS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

David Dorazin

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Milan Čučka

BRNO 2016

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**  
Ústav telekomunikací

**Student:** David Dorazin

**ID:** 164720

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Distribuované optické senzorické systémy

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem bakalářské práce bude teoretický rozbor optických senzorických systémů, dělení a principy funkčnosti. Práce se bude zabývat teoretickým návrhem Michelsonova interferometru a jeho simulacemi v simulačním programu VPI photonics. Součástí práce bude zpracování náměrů z Michelsonova interferometru a porovnání s výsledky simulace.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] UDD, Eric a William B SPILLMAN. 2011. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, xiii, 498 p. ISBN 978-047-0126-844.

[2] FILKA, Miloslav. 2009. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno: M. Filka, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

**Termín zadání:** 1.2.2016

**Termín odevzdání:** 1.6.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Milan Čučka

**Konzultant bakalářské práce:**

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

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce řeší možnosti využití optického vlákna jako senzoru. V úvodu práce jsou popsány základní principy přenosu signálu v optickém vlákně, optické vlákno a jeho lineární a nelineární parametry. Dále se práce věnuje rozdělení optických vláknových senzorů a popisu jednotlivých distribuovaných optických senzorů podle principů, na kterých pracují. Podrobně je rozebrán Michelsonův interferometr a jeho modifikace v podobě Michelsonova vláknového interferometru, která je následně navrhována a odsimulována v simulačním prostředí VPIphotonics. V závěru práce je provedeno měření vibrací pomocí Mach-Zehnderova interferometru.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Optický světelný paprsek, optické vlákno, lineární a nelineární jevy v optickém vlákně, Rayleighův rozptyl, Ramanův rozptyl, Brillouinův rozptyl, distribuované senzory, OTDR, interferometry, Michelsonův vláknový interferometr, Mach-Zehnderův vláknový interferometr

## **ABSTRACT**

This bachelors thesis solves possibilities of utilization optical fiber as a sensor. At the beginning the thesis describes basic principle of light transmission in optical fiber, optical fiber and its linear and nonlinear properties. Second part of the thesis deals with sorting of distributed optical fiber sensors and describes each type of the sorted sensor due to principle which they work on. The Michelson interferometer is described and its modification in the form of the Fiber optic Michelson interferometer, which is designed and simulated in the VPIphotonics software. At the end of the thesis is performed measuring of vibrations by the Fiber optic Mach-Zehnder interferometer.

## **KEYWORDS**

Optical light beam, optical fiber, linear and nonlinear effects in optical fiber, Rayleigh scattering, Raman scattering, Brillouin scattering, distributed sensors, OTDR, interferometers, Fiber optic Michelson interferometer, Fiber optic Mach-Zehnder interferometer

DORAZIN, David *Distribuované optické senzorické systémy*. bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 63 s. Vedoucí práce byl Ing. Milan Čučka

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Distribuované optické senzorické systémy“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 bakalářské 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 popsany v této bakalářské 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)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# OBSAH

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Optický světelný paprsek</b>                              | <b>12</b> |
| 1.1      | Definice světla . . . . .                                    | 12        |
| 1.2      | Základní vztahy . . . . .                                    | 13        |
| 1.2.1    | Index lomu . . . . .   | 13        |
| 1.2.2    | Snellův zákon . . . . .                                      | 13        |
| 1.2.3    | Popis periodického vlnění . . . . .                          | 14        |
| <b>2</b> | <b>Optické vlákno</b>  | <b>16</b> |
| 2.1      | Dělení optických vláken . . . . .                            | 16        |
| 2.2      | Princip šíření světelného paprsku optickým vláknem . . . . . | 18        |
| 2.3      | Lineární parametry optického vlákna . . . . .                | 18        |
| 2.3.1    | Útlum optického vlákna . . . . .                             | 19        |
| 2.3.2    | Disperze . . . . .   | 19        |
| 2.3.3    | Rayleighův rozptyl . . . . .                                 | 21        |
| 2.3.4    | Ohybové ztráty . . . . .                                     | 21        |
| 2.4      | Nelineární jevy v optickém vlákně . . . . .                  | 21        |
| 2.4.1    | Stimulovaný rozptyl . . . . .                                | 21        |
| 2.4.2    | Brillouinův rozptyl . . . . .                                | 21        |
| 2.4.3    | Ramanův rozptyl . . . . .                                    | 22        |
| 2.4.4    | Kerrův jev . . . . .   | 22        |
| 2.4.5    | Vlastní fázová modulace SPM . . . . .                        | 22        |
| 2.4.6    | Křížová fázová modulace XPM . . . . .                        | 23        |
| 2.4.7    | Čtyřvlnné směšování FWM . . . . .                            | 23        |
| <b>3</b> | <b>Zdroje a detektory optického signálu</b>                  | <b>24</b> |
| 3.1      | Zdroje LED . . . . .   | 24        |
| 3.2      | Zdroje LD lasery . . . . .                                   | 25        |
| 3.3      | Detektory světelného záření . . . . .                        | 25        |
| <b>4</b> | <b>Optické vláknové snímače (OVS)</b>                        | <b>27</b> |
| 4.1      | Obecné zapojení optických vláknových senzorů . . . . .       | 27        |
| 4.2      | Dělení optických vláknových senzorů . . . . .                | 28        |
| 4.2.1    | Amplitudové optické vláknové senzory . . . . .               | 29        |
| 4.2.2    | Fázové optické vláknové senzory . . . . .                    | 30        |
| 4.2.3    | Polarizační optické vláknové senzory . . . . .               | 31        |
| 4.3      | Distribuované optické senzory . . . . .                      | 31        |
| 4.3.1    | OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) . . . . .           | 31        |



|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.3.2    | OTDR založené na Ramanovu rozptylu . . . . .                                      | 33        |
| 4.3.3    | OTDR založené na Brillouinovu rozptylu (BOTDR) . . . . .                          | 34        |
| 4.3.4    | OTDR založené na polarizační reflektometrii v časové oblasti<br>(POTDR) . . . . . | 35        |
| 4.3.5    | Fázová OTDR . . . . .   | 36        |
| 4.3.6    | Senzory závislé na změně fáze - Interferometry . . . . .                          | 36        |
| <b>5</b> | <b>Michelsonův interferometr</b>  | <b>41</b> |
| 5.1      | Základní princip . . . . .  | 41        |
| 5.2      | Michelsonův vláknový interferometr . . . . .                                      | 42        |
| 5.2.1    | Lasery pro interferometry . . . . .   | 44        |
| 5.2.2    | Detekce interferenčních minim a maxim . . . . .                                   | 45        |
| <b>6</b> | <b>Simulace</b>   | <b>47</b> |
| 6.1      | VPIphotonics . . . . .  | 47        |
| 6.1.1    | Nastavení simulace . . . . .  | 48        |
| 6.1.2    | Nastavení prvků . . . . .   | 49        |
| 6.1.3    | VPIphotonics analyzer . . . . .   | 49        |
| 6.2      | Simulace Michelsonova vláknového interferometru . . . . .                         | 49        |
| <b>7</b> | <b>Měření Mach-Zehnderova interferometru</b>                                      | <b>53</b> |
|          | <b>Literatura</b>   | <b>57</b> |
|          | <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>   | <b>59</b> |
|          | <b>Seznam příloh</b>  | <b>62</b> |
| <b>A</b> | <b>Obsah přiloženého CD</b>   | <b>63</b> |
| A.1      | Vlastní elektronická verze práce . . . . .  | 63        |
| A.2      | Složka Matlab . . . . .   | 63        |
| A.3      | Složka VPIphotonics . . . . .   | 63        |
| A.4      | Složka Grafy a obrázky . . . . .  | 63        |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Elektromagnetické vlnění [9]. . . . .  | 12 |
| 1.2  | Lomy světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí. . . . .  | 13 |
| 1.3  | Parametry periodického vlnění. . . . .   | 14 |
| 2.1  | Mnohovidové optické vlákno. . . . .  | 16 |
| 2.2  | Gradientní optické vlákno. . . . .   | 17 |
| 2.3  | Jednovidové optické vlákno. . . . .  | 17 |
| 2.4  | Princip totálního odrazu. . . . .  | 18 |
| 2.5  | Vliv chromatické disperze na signál [8]. . . . .   | 20 |
| 2.6  | Ukázka polarizační vidové disperze [6]. . . . .  | 20 |
| 4.1  | První typ obecného zapojení optického vláknového senzoru. . . . .  | 27 |
| 4.2  | Druhý typ obecného zapojení optického vláknového senzoru. . . . .  | 28 |
| 4.3  | A) schéma bodového senzoru, B) schéma rozprostřeného senzoru. . . . .  | 28 |
| 4.4  | Blokové schéma OTDR. . . . .   | 32 |
| 4.5  | Blokové schéma OTDR využívající Ramanův rozptyl. . . . .   | 33 |
| 4.6  | Zpětné rozptyly v optickém vlákně [11]. . . . .  | 34 |
| 4.7  | Blokové schéma BOTDR. . . . .  | 35 |
| 4.8  | Blokové schéma POTDR. . . . .  | 36 |
| 4.9  | Blokové schéma dvouramenného Mach-Zehnderova interferometru. . . . .   | 37 |
| 4.10 | Ukázka principu jednovláknového Mach-Zehnderova interferometru. . . . .  | 38 |
| 4.11 | a) Ukázka principu dvouramenného Michaelsonova interferometru, b)<br>jednovláknový Michaelsonův interferometr. . . . . | 39 |
| 4.12 | Schéma Sagnacova interferometru [18]. . . . .  | 39 |
| 4.13 | a) Schéma vnějšího Fabry-Perotova interferometru, b) Schéma vnitř-<br>ního Fabry-Perotova interferometru. . . . .      | 40 |
| 5.1  | Základní schéma Michelsonova interferometru. . . . .   | 41 |
| 5.2  | Blokové schéma Michelsonova vláknového interferometru. . . . .   | 43 |
| 6.1  | Uživatelské rozhraní VPIphotonics. . . . .   | 47 |
| 6.2  | Okno nastavení parametrů. . . . .  | 48 |
| 6.3  | Okno nastavení parametrů. . . . .  | 49 |
| 6.4  | Zapojení Michelsonova vláknového interferometru v simulačním pro-<br>středí. . . . .                                   | 50 |
| 6.5  | Výstupní signál měřicího ramena. . . . .   | 51 |
| 6.6  | Výstupní signál Michelsonova interferometru. . . . .   | 51 |
| 7.1  | Blokové schéma měřeného zapojení Mach-Zehnderova interferometru. . . . .   | 53 |
| 7.2  | Výstupní signál Mach-Zehnderova interferometru při 200 Hz. . . . .   | 54 |
| 7.3  | Výstupní signál Mach-Zehnderova interferometru při 300 Hz. . . . .   | 54 |
| 7.4  | Výstupní signál Mach-Zehnderova interferometru při 400 Hz. . . . .   | 55 |

# SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Seznam parametrů OTDR [1]. . . . . | 33 |
|--|----|

# ÚVOD

Distribuované optické vláknové senzory se vyvíjejí od doby, kdy bylo vynalezeno samotné optické vlákno. Kdežto optické vlákno se kvůli svým přednostem ve velkém začalo prosazovat do světa telekomunikací a postupně vytlačuje metalické kabely jak na dálkových, tak už 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 nezáměr se na vývoji nepřestalo pracovat a v současné době se tyto senzory prosazují ve všech odvětvích měřicí, řídicí 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 senzorů různých fyzikálních veličin, za využití 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 těchto jevech, kvůli jejich závislosti na vnějším působení fyzikálních veličin.

Práce postupně popisuje světelný paprsek a fyzikální jevy, způsobující jeho šíření přenosovým médiem, dělení optických vláken a jevů, které se v optickém vlákně vyskytují. Dále jsou krátce zmíněny zdroje a detektory světelného záření. Hlavní částí této práce je rozdělení optických signálů podle mnohých kritérií a následný popis vláknových senzorů založených na rozptylech a interferometri.

V práci je popsán Michelsonův interferometr a jeho základní princip za použití vzduchu jako přenosového média. Dále je podrobně popsán Michelsonův vláknový interferometr, lasery a detektory používané v interferometrech a další optické součástky, potřebné pro realizaci tohoto interferometru. Michelsonův interferometr je v práci sestaven a simulován v programu VPIphotonics.

V závěru práce se věnuji Mach-Zehnderovu vláknovému interferometru a jeho podobnosti s Michelsonovým vláknovým interferometrem. Je zde popsán jeho princip, zobrazeno blokové schéma, které bylo měřeno a výsledky měření jsou zpracovány v matematickém prostředí Matlab.

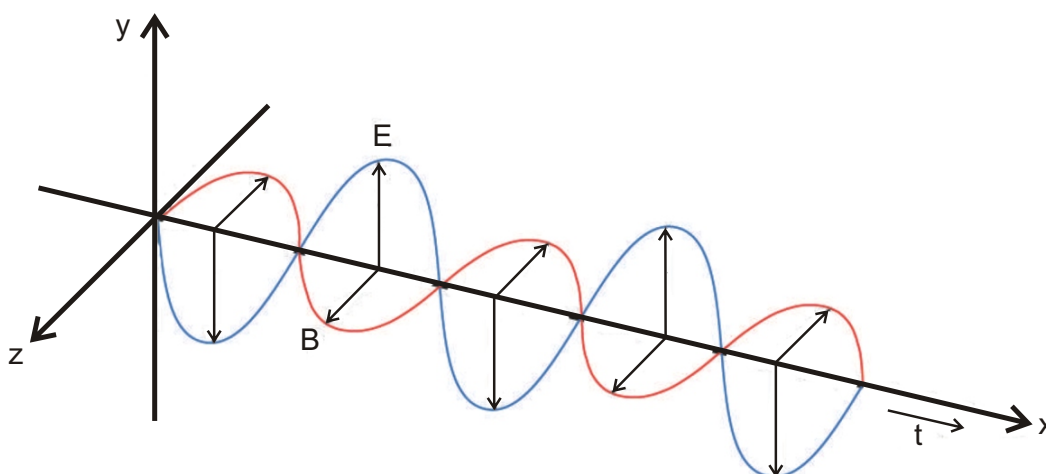
# 1 OPTICKÝ SVĚTELNÝ PAPERSEK

Je tvořen určitou částí světelného spektra, což je vlastně elektromagnetické záření o určité vlnové délce a frekvenci, které je využíváno pro přenos informace v optickém vlákně. Optický světelný paprsek lze tedy popsat stejnými vzorci, které platí pro obecné světlo neboli elektromagnetické záření [11].

## 1.1 Definice světla

Je to elektromagnetické vlnění s velmi vysokou frekvencí (řádově THz). Existují, ale i další druhy elektromagnetického vlnění jako rádiové vlny, infračervené záření, UV záření, atd., které tvoří spektrum elektromagnetických vln [9].

Způsob šíření elektromagnetického vlnění je naznačen na obr. 1.1. Vlna je tvořena dvěma navzájem kolnými složkami, modře znázorněná složka odpovídá elektrické části E a červeně znázorněná složka odpovídá magnetické části B elektromagnetického vlnění šířícího se prostorem v určitý čas  $t$  [11].



Obr. 1.1: Elektromagnetické vlnění [9].

Na světlo se dá nahlížet jako na vlnění z pohledu vlnové optiky nebo jako na částice z pohledu kvantové fyziky. To je důsledkem širokého frekvenčního spektra, což způsobuje rozdílné velikosti energie. A je to právě energie, která rozhoduje, zda-li má světlo blíže k vlnovému chování nebo k částicovému chování. Oba tyto principy se navzájem nevyklučují, jen je pro určité situace výhodnější využívat popisu vlnového chování a někdy částicového pomocí fotonů [15].

Rychlost šíření světla ve vakuu  $c = 299\,792\,458$  m/s, některá literatura používá zaokrouhlenou hodnotou konstanty  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s [9].

## 1.2 Základní vztahy

### 1.2.1 Index lomu

Charakterizuje prostředí, ve kterém k lomu dochází. Je to bezrozměrná jednotka větší než 1, která je dána poměrem rychlosti světla ve vakuu s rychlostí světla v daném materiálu. Index lomu roven jedné má pouze vakuum a je dán vztahem [9]:

$$n = \frac{c}{v} [-]. \quad (1.1)$$

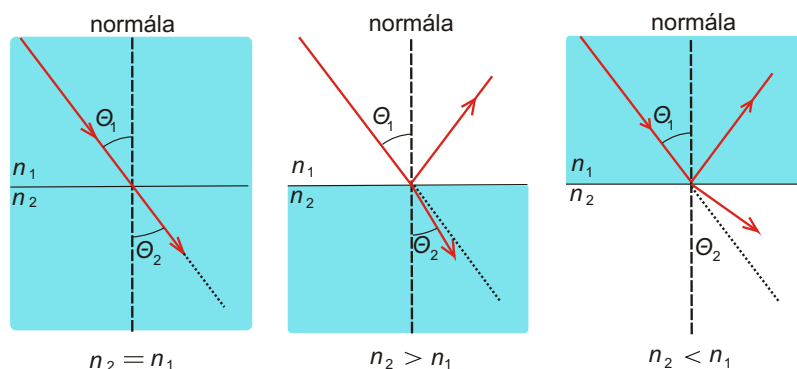
### 1.2.2 Snellův zákon

Snellův zákon pojednává o lomu světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu a je dán rovnicí:

$$n_1 \cdot \sin \Theta_1 = n_2 \cdot \sin \Theta_2 [-]. \quad (1.2)$$

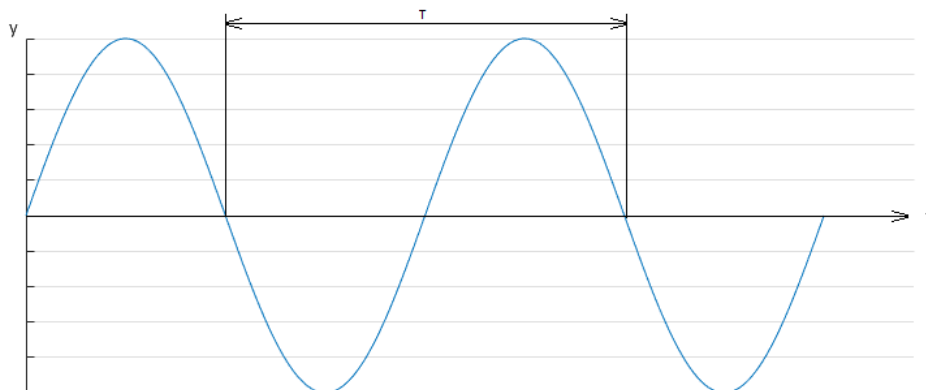
Mohou nastat 3 případy lomu světelného paprsku:

1. Je-li  $n_2$  rovno  $n_1$ , pak je  $\Theta_2$  rovno  $\Theta_1$ . V tomto případě nedochází k lomu ani odrazu paprsku, světlo pokračuje v původním směru.
2. Je-li  $n_2$  větší než  $n_1$ , pak je  $\Theta_2$  menší než  $\Theta_1$ . V tomto případě se paprsek odchyluje směrem k normále jako na obr. 1.2.
3. Je-li  $n_2$  menší než  $n_1$ , pak je  $\Theta_2$  větší než  $\Theta_1$  a lomený paprsek se odchyluje směrem od normály jako na obr. 1.2 [9].



Obr. 1.2: Lomy světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí.

### 1.2.3 Popis periodického vlnění



Obr. 1.3: Parametry periodického vlnění.

#### Časová perioda

Je to doba, za kterou vlna urazí jednu svoji vlnovou délku, viz obr 1.3 a je vyjádřen vztahem:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} [\text{s}], \quad (1.3)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost v rad/s [15].

#### Vlnová délka

Někdy také označována jako prostorová perioda. Je to délka vlny, kterou vlna urazí během jedné periody [15],

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega} [\text{m}], \quad (1.4)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost v rad/s nebo

$$\lambda = c \cdot T [\text{m}], \quad (1.5)$$

kde  $c$  je rychlost světla.

#### Frekvence vlnění

Alternativní popsání periody  $T$  a vlnové délky  $\lambda$  vyjádřena rovnicí:

$$f = \frac{1}{T} [\text{Hz}] \quad (1.6)$$

nebo

$$T = \frac{v}{\lambda} [\text{Hz}], \quad (1.7)$$

kde  $v$  je rychlost šíření vlny a  $\lambda$  vlnová délka [15].



## 2 OPTICKÉ VLÁKNO

Optické vlákno je skleněné nebo plastové přenosové médium, sloužící k přenosu světelného paprsku mezi vysílačem a přijímačem. Ve velké míře nahrazuje metalická vedení díky svým lepším přenosovým vlastnostem, kdy dokáže na větší vzdálenost přenést komunikaci vyšší rychlosti. Optická vlákna jsou odolná vůči elektromagnetickému rušení, těžko odposlouchatelná a při vhodné úpravě je možné je použít pro další aplikace, jako jsou například optické senzory.

### 2.1 Dělení optických vláken

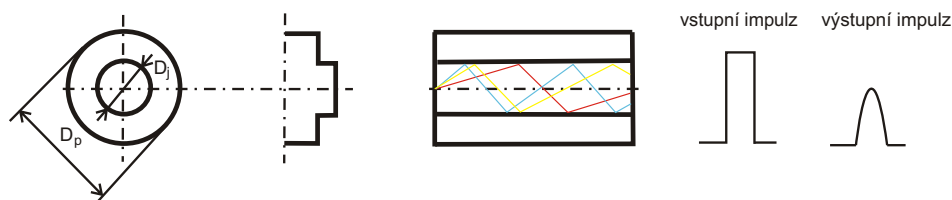
Optická vlákna rozdělujeme podle materiálu a technologie přenosu. Nejčastěji se pro výrobu optických vláken využívá křemenného skla. Podle technologie přenosu je dělíme na jednovidová, mnohovidová s konstantním indexem lomu a mnohovidová s gradientním indexem lomu [10].

#### Mnohovidové optické vlákno

Tato vlákna se vyznačují technologicky nejméně náročnou výrobou, což se příznivě promítá do jejich ceny a jednoduchou manipulací. Nevýhody tohoto vlákna se nacházejí ve větším útlumu, disperzi a malé přenosové kapacitě. Podstata přenosu v tomto typu vlákna je založena na principu totálního odrazu na rozhraní jádro-plášť.

Charakteristické znaky tohoto vlákna jsou větší průměr jádra a pláště  $D_j = 50 - 200 \mu\text{m}$ ,  $D_p = 120 - 300 \mu\text{m}$ , útlum  $5 - 20 \text{ dB/km}$  a šířka pásma  $60 \text{ MHz}$ .

Vlákna tohoto typu se používají pro spoje na krátké vzdálenosti, především pro krátké přenosy dat, lokální sítě, apod. [6].

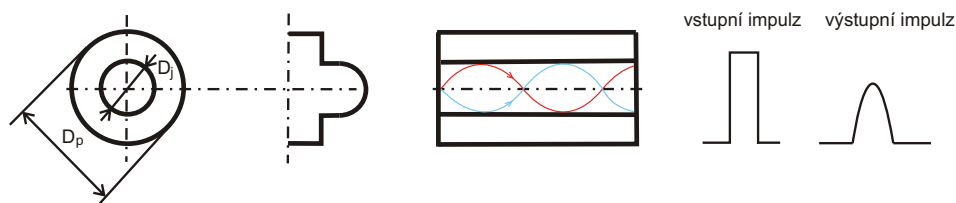


Obr. 2.1: Mnohovidové optické vlákno.

## Gradientní optické vlákno

Vyznačují se menší disperzí a menším útlumem. Jejich výroba je náročnější, zejména díky docílení postupné změny indexu lomu a tím i složitější konstruování a spojování vláken. Díky gradientnímu indexu lomu se světlo v těchto vláknech nešíří pomocí totálního odrazu, ale díky ohybu světla [6, 11].

Vlákno je normalizováno dle doporučení ITU-T,  $D_j = 50 \mu\text{m}$ ,  $D_p = 125 \mu\text{m}$ , útlum vlákna  $2,5 - 5 \text{ dB/km}$  a šířka přenášeného pásma  $600 \text{ MHz}$  [6].



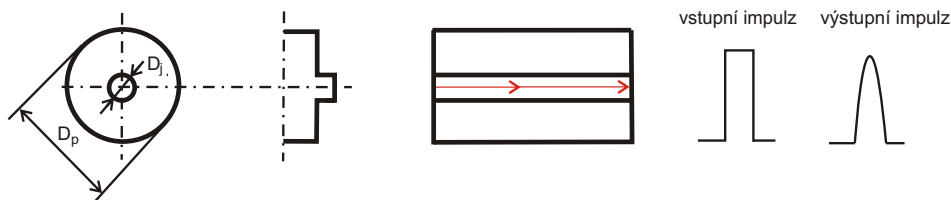
Obr. 2.2: Gradientní optické vlákno.

## Jednovidové optické vlákno

Jednovidová vlákna se vyznačují velmi malou disperzí, velmi malým útlumem a vysokou přenosovou kapacitou. V tomto případě se vláknem šíří pouze jeden optický vid a to ve směru osy vlákna. Aby se toho dalo dosáhnout, musí se průměr jádra zmenšit na hodnotu jen několika vlnových délek světla. Průměry jádra se pohybují  $D_j = 7 - 9 \mu\text{m}$  a pláště  $D_p = 125 \mu\text{m}$ . Podstata přenosu v tomto typu vlákna je založena na principu totálního odrazu na rozhraní jádro-pláště [6].

Charakteristické vlastnosti vlákna jsou útlum menší než  $0,2 \text{ dB/km}$  při vlnové délce  $1,55 \mu\text{m}$  a šířka pásma  $10 \text{ GHz}$  [6].

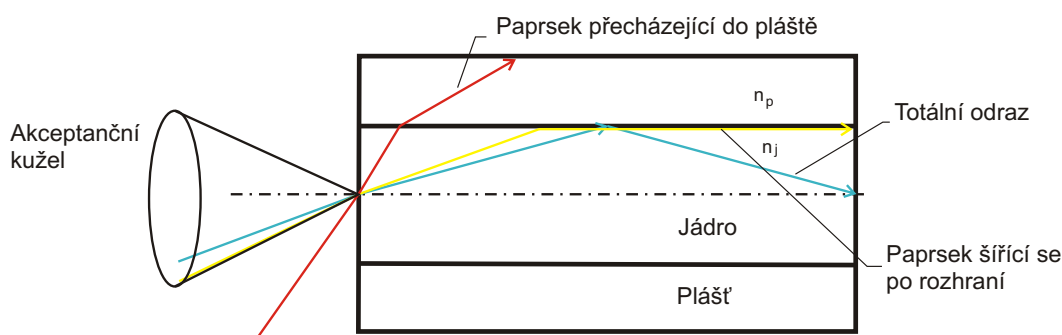
Jednovidová vlákna nacházejí uplatnění především v dálkových přenosech [6].



Obr. 2.3: Jednovidové optické vlákno.

## 2.2 Princip šíření světelného paprsku optickým vláknem

Optické vlákno je ve své podstatě válcový vlnovod vyrobený z nízko ztrátového materiálu pro daný druh vlnění, který se skládá z dvou hlavních částí a to jádra a pláště, jež slouží k přenosu světelného paprsku a z dalších vrstev, které slouží jako ochrana. Nositeli signálu v optickém vlákně jsou neutrální fotony, které na sebe vzájemně nepůsobí a tak nevytváří žádné elektrické či magnetické pole [10].



Obr. 2.4: Princip totálního odrazu.

Aby optické vlákno mohlo vést světelný paprsek, musíme paprsek do vlákna přivést z vnějšího prostředí, kterým je vzduch s indexem lomu 1. Jelikož má vzduch nižší index lomu než jádro vlákna, nastane na optickém rozhraní vzduch–jádro podle Snellova zákona lom ke kolmici. Dále, protože index lomu jádra  $n_1$  je vyšší než pláště  $n_2$ , tak se paprsek šíří vláknem pomocí totálního odrazu na rozhraní jádro–plášť. Způsobů výpočtů parametrů totálního odrazu je několik, například pomocí mezního úhlu šíření  $\Phi_B$ , pro který platí následující vztah [11, 17]:

$$\Phi_B = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) [^\circ], \quad (2.1)$$

kde  $n_1$  je index lomu jádra a  $n_2$  index lomu pláště.

## 2.3 Lineární parametry optického vlákna

Jsou to parametry, které dokážeme spočítat při návrhu optické trasy, jestliže známe typ optického vlákna, které použijeme, délku trasy a pro jaký účel bude navrhovaná trasa využívána.

### 2.3.1 Útlum optického vlákna

Je to základní parametr optického vlákna, který vyjadřuje vliv optického vlákna na přenášený optický paprsek a představuje pokles intenzity signálu mezi dvěma body. Je dán rovnicí [4, 11]:

$$A = 10 \cdot \log \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \text{ [dB]}, \quad (2.2)$$

kde  $P_2$  je výkon na konci optického vlákna a  $P_1$  je výkon, který je do vlákna navázán.

Když v roce 1970 začínaly první pokusy s přenosem signálu po optickém vlákně byl útlum tohoto vlákna 20 dB/km, v dnešní době jsme se s hodnotou útlumu v optickém vlákně dostali pod 0,2 dB/km [6].

Pro získání přehledu, je zde uvedeno několik praktických hodnot útlumu optického vlákna [4]:

- 0,3 dB/km = přeneseno 93,3 % energie ze začátku na konec vedení,
- 1,0 dB/km = přeneseno 79,4 % energie ze začátku na konec vedení,
- 3,0 dB/km = přeneseno 50,1 % energie ze začátku na konec vedení,
- 10,0 dB/km = přeneseno 10 % energie ze začátku na konec vedení.

### 2.3.2 Disperze

Disperze se řadí k nejdůležitějším parametrům optických vláken, určuje šíři přenášeného pásma a tím i přenosovou rychlost. Je hlavní příčinou zkreslení přenášeného signálu a má za důsledek postupné zploštění ve výkonové ose a prodloužení vstupního impulzu v časové ose v závislosti na délce vlákna [6, 11].

Disperzi dělíme na:

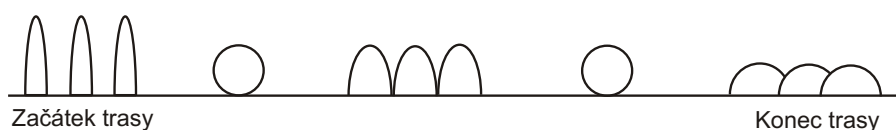
**Materiálová disperze** spočívá v závislosti indexu lomu použitého materiálu pro výrobu optických vláken (základní materiál je křemičité sklo) na vlnové délce záření. Díky tomuto jevu, se optické paprsky o různé vlnové délce šíří optickým vláknem jinou rychlostí [8].

**Vlnodová disperze** je způsobena geometrickými vlastnostmi optického vlákna a to přesněji poměrem poloměru jádra optického vlákna a vlnovou délkou přenášeného světelného paprsku [8].

**Vidová disperze** se projevuje, je-li šířící se energie rozdělena do více vidů. Je způsobena rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých vidů. Vidová disperze se projevuje u mnohavidových vláken a její vliv můžeme redukovat zmenšením počtu vidů vstupujících do vlákna vhodným konstrukčním řešením optického vlákna, v mezním případě až na jeden vid – jednovidové optické vlákno, které má pouze chromatickou disperzi [6, 8].

## Chromatická disperze

Chromatická disperze se skládá ze dvou složek: materiálové a vlnododové disperze. Příčina chromatické disperze spočívá v tom, že spektrální složky signálu různých vlnových délek se šíří optickým vláknem rozdílnou rychlostí. Jestliže se optickým vláknem šíří různé spektrální složky rozdílnou rychlostí (signál vždy obsahuje více spektrálních složek), znamená to, že se některé složky přenášeného signálu budou zpožďovat. Impuls se tedy bude průchodem vlákna časově roztahovat a takto zdeformovaný signál může zasahovat do vedlejších bitových mezer a tím zkreslovat přenášené informace [6].

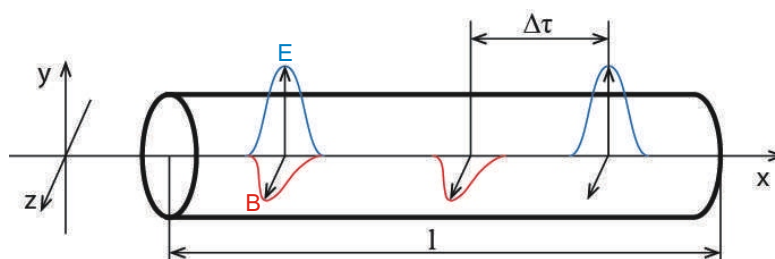


Obr. 2.5: Vliv chromatické disperze na signál [8].

Optické vlákno se ovšem dá technologicky připravit tak, aby se v oblasti vlnové délky  $1,55 \mu\text{m}$  hodnoty chromatické disperze snížily k nule. Tyto DS (dispersion-shifted) vlákna jsou rozdělena do dvou kategorií: vlákna s posunutou disperzní charakteristikou a vlákna s plochou disperzní charakteristikou [6].

## Polarizační vidová disperze (PMD)

Příčina vzniku polarizační vidové disperze spočívá v šíření samotného vidu optickým vláknem. Jelikož je světelný vid elektromagnetické záření, šířící se ve dvou vzájemně na sobě kolmých polarizačních rovinách se v důsledku jakékoliv kruhové nesymetrie vlákna vzniklé při výrobě nebo nevhodným uložení optického kabelu, při kterém nám na kabel působí vnější vlivy, dojde ke zpoždění šíření v jedné ze dvou polarizačních rovin, čímž polarizační vidová disperze vzrůstá [6, 11].



Obr. 2.6: Ukázka polarizační vidové disperze [6].

### 2.3.3 Rayleighův rozptyl

Vzniká tepelnými kmity krystalové mřížky. Tento jev nelze z optického vlákna odstranit, dokonce ani podchlazením vlákna na absolutní nulu, protože při absolutní nule dojde k tzv. „zamrznutí“ jednotlivých pozic atomů v krystalové mřížce, ale světlo se kolem těchto útvarů ohýbá a tím vznikají ztráty rozptylem [15].

Rayleighův spontánní rozptyl je závislý na množství a velikostech oblastí vyšší či nižší hustoty materiálu, v optickém vlákne, které vznikají při výrobě. Po ochlazení vlákna je pozice těchto oblastí přesně dána, a tak se rozptyl na těchto místech frekvenčně nemění. Při použití rozdílných zdrojů se však frekvence měnit bude, ale v časové oblasti by se rozptyly měnit neměli [11].

### 2.3.4 Ohybové ztráty

Jsou způsobeny porušením podmínky totálního odrazu. Ohyb optického vlákna způsobuje změnu úhlu dopadu paprsku na rozhraní jádro-plášť a láme se do pláště.

Další jev, který přispívá k této ztrátě je fotoelastický jev. Při ohybu vlákna vzniká na vnitřní straně ohybu tlak a na vnější straně tahové napětí, jelikož je index lomu funkcí tlaku dochází ke změně indexů lomu jádra a pláště. Díky tomu se změní i mezní úhel šíření světla ve vlákne [15].

## 2.4 Nelineární jevy v optickém vlákne

Jsou to dynamické jevy, které se mění v čase. Vznik nelineárních jevů je způsoben velkými hustotami světelného výkonu ve vlákne. Dochází tak k vzájemnému ovlivňování paprsku a vlákna a to převážně na trasách, které využívají vlnový multiplex a optické zesilovače [6, 11].

### 2.4.1 Stimulovaný rozptyl

Je to nelineární fyzikální jev, při kterém dochází k rozptylu světelné vlny srážkami s akusticky nebo tepelně kmitajícími atomy vlákna. Dochází k mírnému posuvu vlnových délek směrem k vyšším hodnotám [6].

### 2.4.2 Brillouinův rozptyl

Existují dva typy Brillouinova rozptylu:

První je spontánní Brillouinův rozptyl, který vzniká působením akustických vln na samotné vlákno. Jeho hodnota je o 30 dB nižší než hodnota Rayleighova rozptylu [11].

Druhý je tzv. stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS), který vzniká při působení optického paprsku nadkritické hodnoty výkonu pro dané vlákno, a dále při působení akustických či mechanických vibrací na vlákno. V místě, kde na vlákno působí tyto veličiny dojde ke změně indexu lomu optického vlákna a v tomto místě dojde k oddělení fotonu od světelného signálu. Takto oddělený foton se pak pohybuje opačným směrem než původní signál a je jinak frekvenčně posunut. Přesněji ve vlákně vznikne více vln, kdy se jedna šíří v původním směru, jedna se vrací zpět ke zdroji a ostatní jsou postupně utlumeny samotným vláknem.

Tímto způsobem vytvořený signál, postupuje zpět ke zdroji světelného záření a ovlivňuje jeho parametry.

Při překročení určité prahové hodnoty, kdy do optického vlákna vysíláme výkon o nadkritické hodnotě, může dojít prostřednictvím Brillouinova rozptylu k odražení většiny výkonu optické vlny ve vlákně a to je tzv. stimulovaný Brillouinův rozptyl [11].

### 2.4.3 Ramanův rozptyl

Ramanův rozptyl je jev, který vzniká vzájemným působením světelného paprsku a kmitání molekul ve struktuře vlákna, kdy rozptýlené záření má jinou vlnovou délku než dopadající záření.

Tento jev lze do jisté míry potlačit vhodným technologickým řešením vlákna např. zvětšením průměru jádra. Pro jisté aplikace ovšem může být Ramanův rozptyl žádoucí a tyto aplikace se na něm dokonce můžou zakládat, jako např. optické vláknové senzory, které budou popsány dále v práci [3].

### 2.4.4 Kerrův jev

Optický Kerrův jev nám říká, že index lomu je závislý na intenzitě světelného paprsku vstupujícího do optického prostředí. Tato změna indexu lomu je různá v různých částech impulzu, významně však ovlivňuje změny tvaru a polarizace impulzu při šíření. Z Kerrova jevu vychází další typy optických jevů, které se označují jako jevy třetího řádu [7].

### 2.4.5 Vlastní fázová modulace SPM

Někdy označována jako automodulace fáze a vychází z Kerrova jevu. SPM se projevuje v optických vláknech, kde jsou přenášeny krátké impulzy. Signál díky tomuto jevu ovlivňuje sám sebe, mění se velikost vlastní fáze, která je závislá na rychlých změnách hran impulzu. Dochází tak k rozšíření spektra paprsku [7].

## 2.4.6 Křížová fázová modulace XPM

Ovlivňuje fázi optického paprsku v závislosti na interakci s jiným světelným paprskem vyskytující se ve stejném optickém vlákně.

Projevuje se u systému využívajících vlnový multiplex. Optický paprsek s větším optickým výkonem moduluje paprsek s menším optickým výkonem. Tento jev je nepřímo úměrný disperzi ve vlákně, čím větší je disperze ve vlákně, tím se tento vliv zmenšuje a naopak [11].

## 2.4.7 Čtyřvlnné směšování FWM

Vlivem interakce tří a více signálů o různých vlnových délkách vznikají nové signály o nových vlnových délkách. Čtyřvlnné směšování nezávisí na přenosové rychlosti, ale na velikosti rozestupů a velikosti výkonů jednotlivých optických signálů přenášených vláknem [11].

S tímto jevem musí být počítáno při přenosu, kde je použit hustý vlnový multiplex, kde jsou přenosové kanály umístěny blízko u sebe [3].



## 3 ZDROJE A DETEKTORY OPTICKÉHO SIGNÁLU

Zdroj světelného záření je základní prvek každého optoelektronického zařízení. Není to však pouze vlastní prvek, který emituje světelné záření, ale je to i spousta elektronických obvodů, které mají za úkol udržovat stabilní podmínky zdroje světelného záření. Jsou na ně kladeny různé požadavky [6, 16]:

- maximální účinnost přeměny elektrické energie na energii světelnou,
- generace záření na vlnových délkách, kde je útlum stávajících optických vláken nejmenší,
- generace záření při pokojové teplotě,
- spolehlivost a životnost,
- snadná modulovatelnost v širokém rozsahu, především změnou proudu napájení,
- koherence záření,
- co nejužší směrová charakteristika vystupujícího záření,
- jednoduchost navázání generovaného záření do optického vlákna.

Dále popíši jen LED a LD, protože se v dnešní době výhradně používají tyto dva typy zdrojů v optických komunikačních systémech.

### 3.1 Zdroje LED

Polovodičové infračervené elektroluminiscenční diody (LED – Light Emitting Diode) se skládají z polovodičového přechodu P–N převážně na bázi GaAs. Prochází-li přechodem P–N elektrický proud v propustném směru, na přechodu dochází k injekci minoritních nosičů, z nichž část zářivě rekombinuje a přechod emituje světlo o určité vlnové délce. Vlnová délka emitovaného záření je závislá na chemickém složení použitého polovodiče.

LED diody můžeme také rozdělit, podle způsobu vyzařování: na diody s čelním vyzařováním (klasická dioda), využívány u mnohovidových vláken nebo na diody s vyzařováním z hrany, které mají vyšší vyzařovací výkon což umožňuje zvýšení přenosové rychlosti a dosahu diody, ty se používají u jednovidových vláken.

LED diody se v současnosti používají pro přenos signálu na kratší vzdálenosti a pro méně náročné aplikace. Je tomu tak pro jejich nekoherentní charakter emitovaného světla a malý vyzařovací výkon [6, 16].

## 3.2 Zdroje LD lasery

Polovodičová Laserová dioda (LD – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation Diode) se vyznačuje lepšími vlastnostmi než LED dioda jako např. vyšší vyzařovací výkon, menší spektrální šířka, vysoký jas. LD je zdrojem koherentního světla, což znamená, že fotony mají navzájem definovanou fázi. Emitované světlo je monochromatické (jedné vlnové délky). V komunikačních systémech se využívají jako zdroje pro rychlé dálkové trasy.

LD využívají stimulované emise, což znamená, že rekombinace světla probíhá na základě vnějšího stimulu. Na počátku je emitován samovolný foton, který pro excitované elektrony představuje stimulující popud. Nově vzniklý foton má identické vlastnosti. Fotony se šíří stejným směrem, důsledkem je snadné zaostření laserového světla. Zářivé rekombinace jsou synchronizovány v čase, vlny na sebe navazují a existuje fázová souvislost, světlo je tedy koherentní.

## 3.3 Detektory světelného záření

Detektory záření, které jsou potřebné k demodulaci optického signálu v optoelektrických systémech, musí splňovat určité požadavky z hlediska parametrů, slučitelnosti s ostatními prvky, provedení a nákladů. V telekomunikaci se výhradně používají detektory polovodičové, především fotodiody typu PIN a lavinové fotodiody APD (Avalanche-Photodiode). Jsou založeny na principu oddělování párů nosičů náboje, tj. elektronů a děr, které vznikají pohlcováním světelného záření detektorem. Materiály, které se používají na výrobu detektorů jsou Ge, Si, GaAs, InGaAsP, InGaAs, protože mají dobrou pohltivost světla. Tyto detektory pak musí splňovat následující požadavky [6]:

- vysokou citlivost v pásmu používaných vlnových délek  $\lambda = 0,8$  až  $1,55 \mu\text{m}$ ,
- musí zaručit dostatečnou šířku přenášeného kmitočtového pásma,
- rychlou časovou odezvu,
- malý šum,
- co nejmenší možné rozměry, současně vhodné pro připojení na optické vlákno,
- nezávislost na změně teplot, změny napájecího napětí, apod.

Fotodiody PIN jsou velmi rozšířené detektory záření, které mají vysoký kvantový výtěžek (60 – 80 %) a rychlou odezvu. Na vlnových délkách, kde je možné použít jak Si tak Ge diody, je výhodnější dát přednost křemíkovým z důvodu menší teplotní závislosti a menšího proudu za tmy.

Lavinové fotodiody jsou v telekomunikacích používány z důvodu dosažení větší citlivosti v porovnání s PIN diodami.

Volba detektoru optického záření se provádí podle [6]:

- požadované citlivosti,
- hodnoty odstupu signálu od šumu,
- zisku.

## 4 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SNÍMAČE (OVS)

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 pomoci 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 [2].

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 [2].

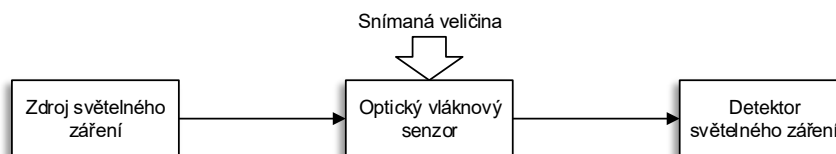
Základní vlastnosti optických vláknových senzorů:

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

### 4.1 Obecné zapojení optických vláknových senzorů

Základní zapojení OVS rozdělíme na 2 kategorie a to podle umístění zdroje a detektoru záření.

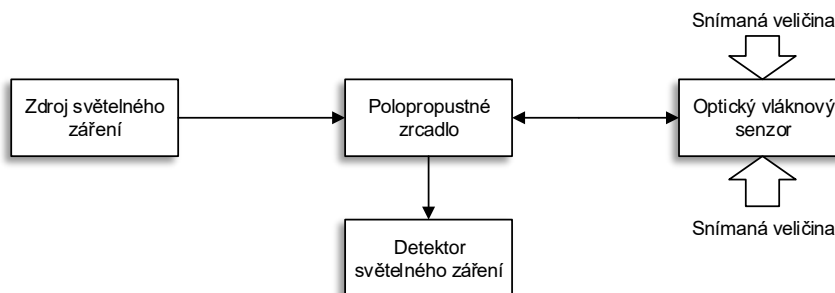
První typ je OVS se zdrojem světelného záření na jednom konci vlákna a detektorem na druhém konci, zobrazen na obr. 4.1. U tohoto typu zapojení dochází přímo k ovlivňování procházejícího paprsku v závislosti na měřené veličině.



Obr. 4.1: První typ obecného zapojení optického vláknového senzoru.

Druhý typ OVS má zdroj i detektor světelného záření na jednom konci vlákna a nevyužívá přímo optický signál ze zdroje, ale měří zpětné rozptyly ve vlákne, které

se šíří zpět ke zdroji záření, proto je zde použit prvek (polopropustné zrcadlo, optický cirkulátor), který odklání zpětné signály do příslušného detektoru viz obr. 4.2.

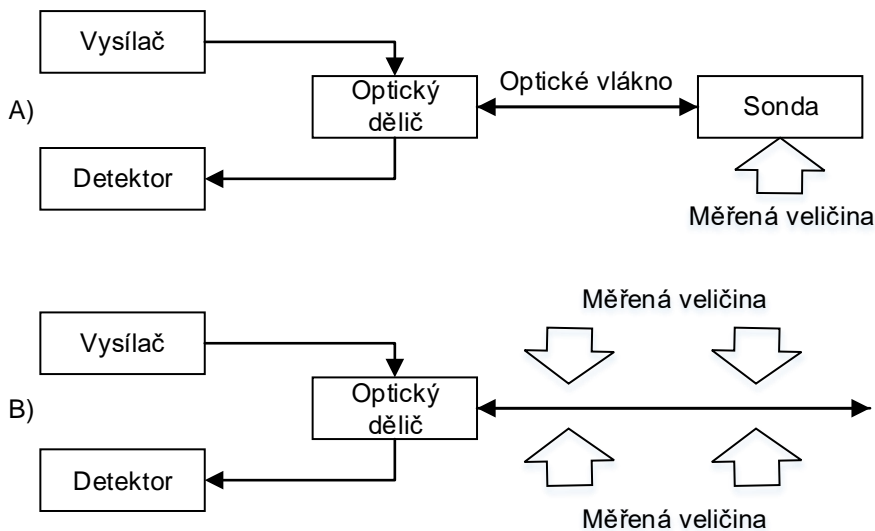


Obr. 4.2: Druhý typ obecného zapojení optického vláknového senzoru.

## 4.2 Dělení optických vláknových senzorů

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

- Sensory, kde vlákno slouží pouze k přenosu informace viz obr. 4.3 a).
- Sensory, kde vlákno slouží jako samotný detektor viz obr. 4.3 b).



Obr. 4.3: A) schéma bodového senzoru, B) schéma rozprostřeného senzoru.

### **Dělení podle typu senzoru [2]:**

- Bodové senzory: řadí se sem velká škála různých druhů senzorů, které pracují na různých principech a jsou určeny pro měření fyzikálních veličin v jednom bodě. Princip je naznačen na obr. 4.3 a).
- Distribuované (rozprostřené) senzory: jsou schopny měřit po celé délce optického vlákna a jsou hlavním předmětem této práce. Budou podrobně rozebrány dále a jejich princip je zobrazen na obr. 4.3 b).

### **Dělení podle působící fyzikální veličiny [2]:**

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

### **Dělení podle principu, na kterém senzor pracuje [2]:**

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

## **4.2.1 Amplitudové optické vláknové senzory**

Jsou to jedny z nejrozšířenějších senzorů, které pro svou činnost využívají optická vlákna. Při působení fyzikální veličiny dochází k ovlivnění amplitudového modulatoru, který pak ovlivňuje procházející optický signál [2].

Amplitudová modulace optického signálu se může rozdělit do několika skupin:

- změnou tlumení,
- změnou přechodu a odrazu světla,
- porušením okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí,
- generací záření.

### **Senzory se změnou tlumení**

Využívají optické vlákno nebo vložené optické prostředí, které je přímo vystaveno působení měřené veličiny. Při měření tak dochází k nárůstu útlumu.

Nejrozšířenější senzory z této skupiny, jsou senzory měřící radioaktivní záření, při kterém dochází k poškození optického vlákna, čímž se u optického vlákna zvýší interakční délka mezi světlem a poškozeným jádrem vlákna a tím dochází k nárůstu útlumu optického vlákna. Je možné jimi měřit dávky radiace od  $10^{-5}$  až  $10^4$  Gy.

Útlum optického vlákna je dán parametry radioaktivního záření, konstrukcí optického vlákna a vlnovou délkou procházejícího signálu. Pro použití v konkrétních situacích se vyvíjejí optická vlákna se speciálním složením [2].

### **Senzory využívající změnou přechodu a odrazu světla**

Tyto senzory využívají vzájemné světelné vazby mezi dvěma konci optického vlákna, které je v bodě měření rozpůlené. Princip spočívá v upevnění jednoho konce do pevné polohy a protější konec optického vlákna je ve volné pozici, přesně proti prvnímu konci. Měřená veličina působí na volný konec, který se vychyluje a tak dochází ke změně intenzity optického paprsku.

Tento princip se využívá u optických vláknových sensorů [11].

### **Senzory využívající porušení okrajových podmínek šíření světla**

Využívají především podmínky totálního odrazu světelného paprsku v optickém vlákně. Nejvíce těchto sensorů pracuje na principu mikroohybů, kdy dochází k deformaci optického vlákna.

Druhá skupina těchto sensorů využívá optická vlákna bez pláště, tudíž index lomu prostředí je neznámý, a proto se i amplituda přenášeného paprsku bude měnit v závislosti na prostředí kolem jádra (voda, vzduch, olej, ...) [11].

### **Senzory využívající generace záření**

Senzory toho typu nepotřebují ke své činnosti zdroj světelného signálu, protože využívají indukovaného záření v optickém vlákně působením optických, tepelných, radiačních a dalších vlivů [2].

## **4.2.2 Fázové optické vláknové senzory**

Jedná se o nejcitlivější vláknové senzory, které jsou založeny na fázové modulaci světelné vlny v optickém vlákně. Tyto změny fáze se měří interferometrickými metodami. Je jimi možno měřit změnu fáze řádově o  $10^{-8}$  rad.

Fáze optického signálu může být změněna prostřednictvím délky vlnovodu, indexu lomu a průřezu optického vlákna.

Jako základ konstrukce fázových optických sensorů se používají interferometry nebo Fabry-Perotův rezonátor [2].

### 4.2.3 Polarizační optické vláknové senzory

Modulace polarizace stavu optického signálu přenášeného optickým vláknem nám nabízí široké možnosti konstrukce optických senzorů s různou citlivostí a parametry. Optické vlákno zde může být buď přímo citlivou částí (senzorem) nebo slouží pouze jako přenosové médium mezi světelným zdrojem, vhodným optickým polarizačním modulátorem a snímací částí [2, 11].

Využíváme zde hned několik fyzikálních jevů:

- Faradayův magnetický jev (otočení roviny polarizace vlivem magnetického pole),
- elektrogyreční jev (vzniká při působení elektrického pole na některé křišťály (např. křemen), polarizace je zde úměrná intenzitě elektrického pole),
- Kerrův jev (viz kapitola 2.4.4),
- foto elastický jev (vznik dodatečného dvojlomu v některých materiálech při působení deformace v jednom směru),
- optická aktivita roztoku.

## 4.3 Distribuované optické senzory

Jsou to optické vláknové senzory založeny na reflektometrických metodách využívajících zpětný rozptyl v optickém vlákně. Jako citlivá část těchto senzorů je použito optické vlákno, které je vystaveno působení měřené fyzikální veličiny.

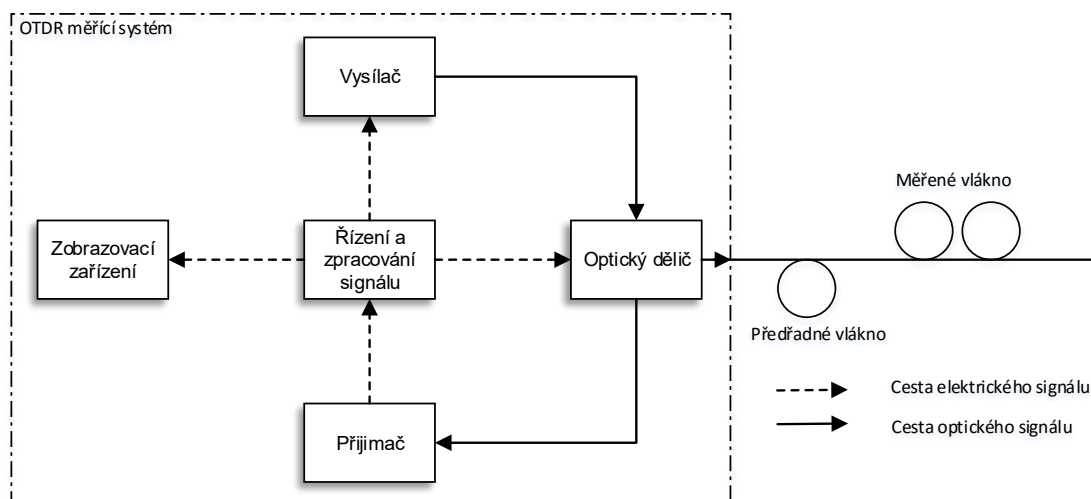
### 4.3.1 OTDR (Optical Time Domain Reflectometry)

Jedná se o nejrozšířenější metodu využívající měření zpětného rozptylu v časové oblasti. Největší uplatnění našla tato metoda při měření optických komunikačních tras, kde pomocí této metody můžeme určit, v kterých místech optického vlákna dochází k útlumu světelného paprsku. Útlum optického vlákna může být způsoben konektory, sváry optického vlákna nebo působením vnějších vlivů na měřené optické vlákno. Lze takto přesně identifikovat místo poškození optického vlákna a jeho rychlou opravu.

Velkou výhodou OTDR je, že měření provádíme na jednom konci vlákna, z kterého vysíláme laserem měřený signál a odchyťujeme zde odraženou vlnu v důsledku Rayleighova rozptylu. Při průchodu světla vláknem dochází k dvěma odrazům, první z nich je Rayleighův rozptyl viz kapitola 2.3.3, kdy se část tohoto rozptylu vrací zpět ke zdroji světelného signálu a můžeme podle něj sledovat postupnou ztrátu energie způsobenou útlumem vlákna nebo působením prostředí. Druhým případem



jsou Fresnelovy odrazy, ke kterým dochází při dopadu světla na rozhraní dvou prostředí s různým indexem lomu a díky nim můžeme určit polohu a útlum zařazených konektorů, svarů, porušení či přerušení vlákna.



Obr. 4.4: Blokové schéma OTDR.

Na blokovém schématu můžeme vidět obecné vnitřní zapojení OTDR. Generátorem světelného signálu je laser, který je schopný vysílat krátké (desítky ns až jednotky s) impulzy s frekvencí jednotek kHz. Šířka impulzů se volí podle délky měřené trasy, čím delší je měřená trasa tím delší musíme vysílat impulzy. S delšími impulzy se nám však snižuje citlivost detektoru. Po průchodu optickým děličem je paprsek navázán do vlákna. Optický dělič slouží k tomu, aby do detektoru vstupovaly pouze odražené a ne generované paprsky. V jednotce zpracování je signál vyhodnocen, vhodně převeden na signál elektrický, který je dále zpracován a zobrazen na zobrazovací jednotce.

Každý měřicí přístroj založený na metodě OTDR má tzv. mrtvou zónu, která udává minimální vzdálenost od měřícího přístroje, na které není možné přesně měřit. Mrtvá zóna vzniká díky Fresnelovu odrazu při navázání optického signálu do vlákna. Z tohoto důvodu je za měřicí systém OTDR umístěno předřadné vlákno, které plní dvě funkce. První funkce je ochrana samotného měřícího přístroje a to kvůli tomu, že by měřené vlákno bylo porušeno hned na prvních metrech a celý vstupní signál by se odrazil a směřoval by do detektoru. Druhou funkcí předřadného vlákna je vyhnutí se mrtvé zóny přístroje tak, aby měřené vlákno bylo přesně měřeno hned od svého začátku [1, 11].

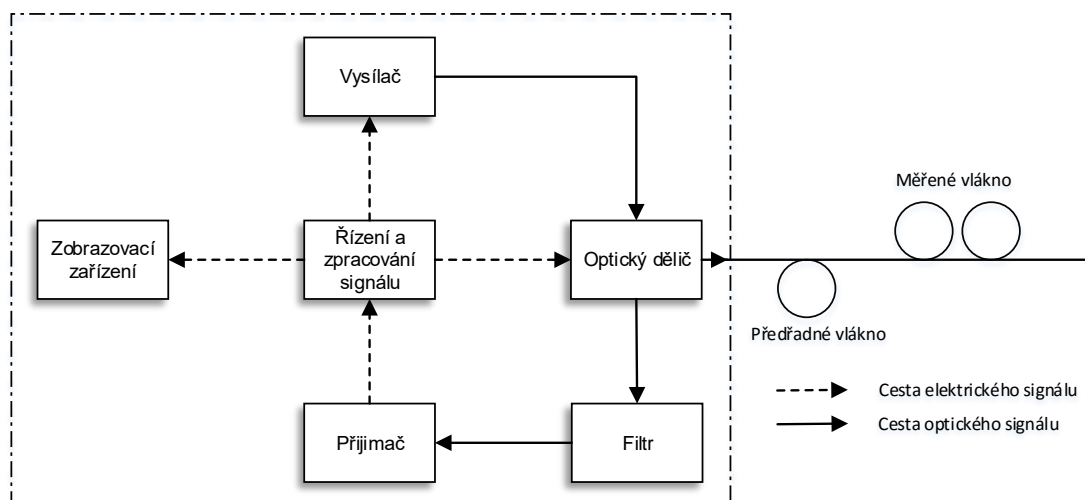
V dnešní době se klasický měřicí systém OTDR používá výhradně k měření nehomogenit na vedení.

Tab. 4.1: Seznam parametrů OTDR [1].

| délka měřicího impulsu [ns] | délka vstupní mrtvé zóny [m] | dynamický rozsah [dB] | doporučená délka předřadného vlákna [m] |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------|---|
| 10                          | 30                           | 9,7                   | 100                                     |
| 30                          | 50                           | 12,1                  | 200                                     |
| 100                         | 70                           | 21,0                  | 200                                     |
| 275                         | 100                          | 24,1                  | 500                                     |
| 1000                        | 200                          | 27,3                  | 500                                     |

### 4.3.2 OTDR založené na Ramanovu rozptylu

Klasická metoda OTDR založená na Rayleighově rozptylu má velkou nevýhodu v tom, že je tento rozptyl poměrně málo závislý na okolní teplotě, proto speciálně pro měření teploty byla vyvinuta metoda OTDR využívající Ramanův rozptyl. Tato metoda nám umožní získat několik tisíc hodnot teploty a v podstatě tak určit profil teploty podél celého měřeného optického vlákna.

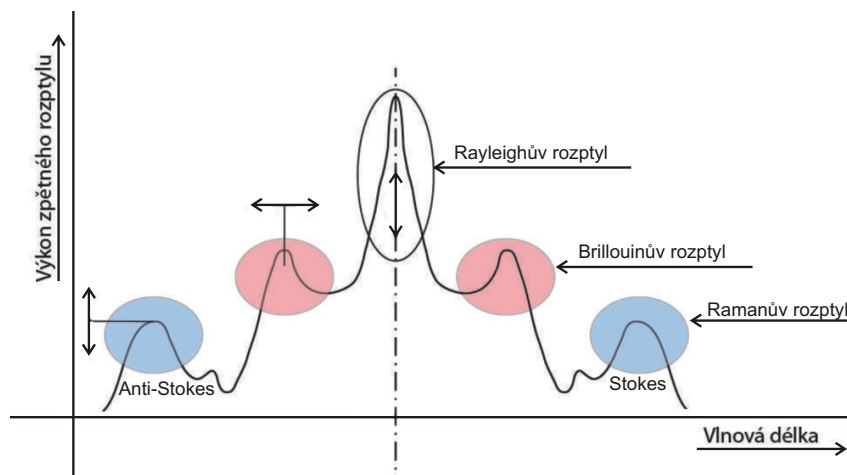


Obr. 4.5: Blokové schéma OTDR využívající Ramanův rozptyl.

Jak je popsáno v kapitole 2.4.3 Ramanův rozptyl je vlastně rozptyl fotonů v optickém vlákne. V důsledku vibrací molekul způsobenými dopadajícím světlem se světlo rozptyluje a vznikají širokopásmové kmity se dvěma důležitými vlnovými délkami: Stokesovou vlnovou délkou a Anti-Stokesovou vlnovou délkou. Pro naše účely (měření teploty) je důležitý poměr těchto dvou vlnových délek, který je závislý na teplotě.

Na obr. 4.5 vidíme obecné zapojení OTDR využívající Ramanova rozptylu na

měření teploty. Zapojení je obdobné jako u OTDR využívající Rayleighův rozptyl s tím rozdílem, že před detektor světelného záření je zařazen filtr, který slouží k tomu, aby jsme mohli zachytit Stokesovu a Anti-Stokesovu složku odděleně. Obě hodnoty vlnových délek a intenzit jsou funkce času. Potom je ve vyhodnocovací jednotce vypočítán poměr mezi těmito složkami, z kterého získáme měřenou teplotu jako funkci času.



Obr. 4.6: Zpětné rozptyly v optickém vlákně [11].

Tato technologie našla uplatnění jako lineární požární systém v tunelech, metru a dalších prostorách, v geotechnice, monitoringu produktovodů apod.

Nevýhodou této metody je, že odražený signál je slabší (asi 3x slabší než Rayleighův odraz), a proto je na vstupu vyžadován výkonný zdroj světelného záření [4, 7].

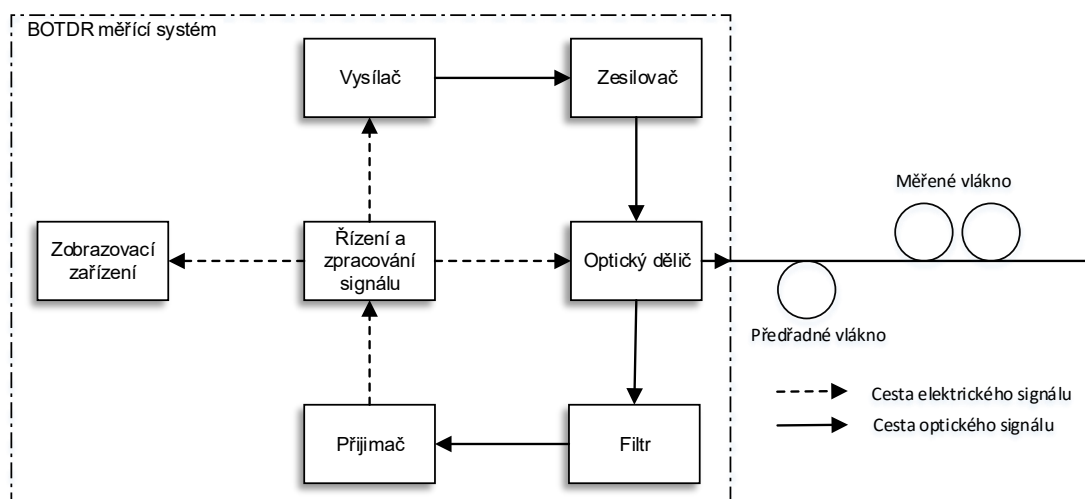
### 4.3.3 OTDR založené na Brillouinovu rozptylu (BOTDR)

I tato metoda vychází z metody OTDR, ovšem využívá stimulovaného Brillouinova rozptylu, který vzniká při nadkritické hodnotě vstupního výkonu do konkrétního vlákna. Tyto systémy jsou kromě teploty schopné měřit také mechanické namáhání.

Pokud chceme měřit pouze mechanické namáhání měřené trasy tak zpravidla používáme speciální optický kabel, který je schopen zafixovat jedno vlákno ke struktuře a přenášet na něj mechanické napětí, druhé je volné a žádné mechanické napětí na něj nepůsobí, tudíž všechny změny jsou způsobeny pouze teplotou. Tyto změny způsobené teplotou pak lze odečíst od změn způsobených na prvním vlákně oběma vlivy a tak získat přesné informace pouze o změnách způsobených namáháním.

Na obr. 4.7 je zobrazeno obecné zapojení BOTDR vycházející z klasického OTDR rozšířeno o 2 prvky. První je zesilovač na výstupu zdroje světelného paprsku, z dů-

vodu vyslání paprsku nadkritické hodnoty pro konkrétní měřené vlákno. Druhý prvek je filtr na vstupu přijímače. V tomto systému není filtr naladěn na blízké okolí měřeného impulsu, ale na rozsah frekvencí zpětného Brillouinova rozptylu. Kdyby tak nebylo, mohlo by dojít ke zkreslení měřených výsledků.



Obr. 4.7: Blokové schéma BOTDR.

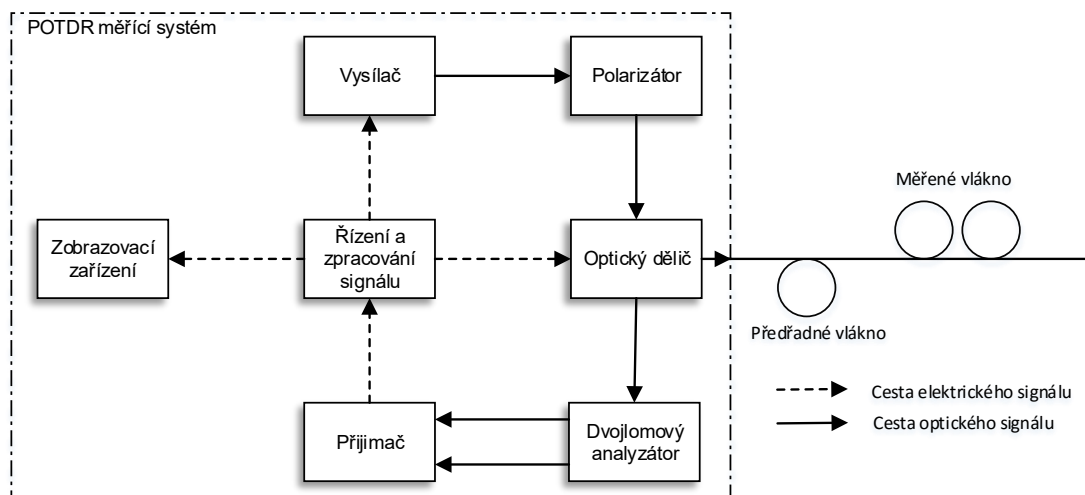
Systémy BOTDR jsou využívány v geotechnice a stavebnictví, délka bývá několik set metrů s rozlišovací schopností zhruba 1 metr [4, 11].

#### 4.3.4 OTDR založené na polarizační reflektometrii v časové oblasti (POTDR)

Další z metod založených na OTDR, které nabízejí daleko lepší citlivost. Metoda je založena na polarizační reflektometrii v časové ose. Hlavní princip metody spočívá v měření polarizace zpětného rozptylu, kdežto klasický OTDR systém měří intenzitu zpětného rozptylu. Parametry polarizace jsou citlivé na několik vnějších vlivů jako mechanické namáhání, tlak ale i magnetické či elektrické pole. V důsledku těchto fyzikálních veličin kolísá míra polarizace podél vlákna.

Hlavním prvkem této metody je navázání polarizovaného úzkopásmového optického signálu do jednojádrového optického vlákna, kdy je uvažováno, že polarizace měřeného optického paprsku se průchodem optickým vláknem zásadně nezmění.

Na obr. 4.8 vidíme blokové schéma s dvěma novými bloky oproti metodě OTDR. Prvním blokem je polarizátor, který se nachází na výstupu světelného zdroje a slouží k přesné definici polarizace měřicího signálu, která se nastavuje na hodnotu  $45^\circ$  mezi rovinami y a z, je-li rovina x souběžná s osou optického vlákna.



Obr. 4.8: Blokové schéma POTDR.

Druhým blokem je dvojlomový analyzátor, který na vstupu detektoru rozloží příchozí zpětný rozptyl na dva navzájem kolmé polarizované signály, které jsou samostatně zpracovány [2, 4].

#### 4.3.5 Fázová OTDR

Jedná se o novější metodu, používanou hlavně na měření porušení trasy, vibrací nebo tlaku na velké vzdálenosti. Pracuje podobně jako klasická OTDR na analýze zpětného odrazu způsobeném Rayleigho rozptylem. Jenže místo změn útlumu v čase se vyhodnocuje fázový rozdíl, což zajišťuje vysokou citlivost.

Při fázovém OTDR je nutno použít vysoce koherentní zdroj záření. Ve vlákne se generují tzv. časové obrazce, které se generují na detektor. Sledováním změn v těchto obrazcích, mohou být detekovány změny indexu lomu.

Fázová OTDR má schéma zapojení podobné jako klasické OTDR, avšak jako zdroj světelného signálu musíme použít laser s úzkou šířkou pásma. Velkou výhodou u této metody je, že můžeme jako detekční vlákna použít standardní jednovidová optická vlákna v již položených telekomunikačních trasách [4, 7].

#### 4.3.6 Senzory závislé na změně fáze - Interferometry

Interferometry jsou nejcitlivější vláknové měřicí přístroje, které využívají interference světla k velmi přesným měřením.

## 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 [12].

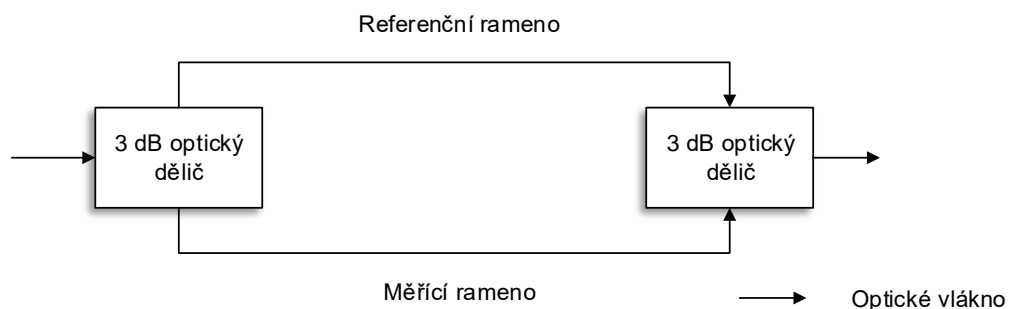
## Obecné rozdělení interferometrů

Jako základ konstrukce fázových optických sensorů 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 výhodou je možnost použití mnohavidových optických vláken [2].

## Mach-Zehnderův interferometr

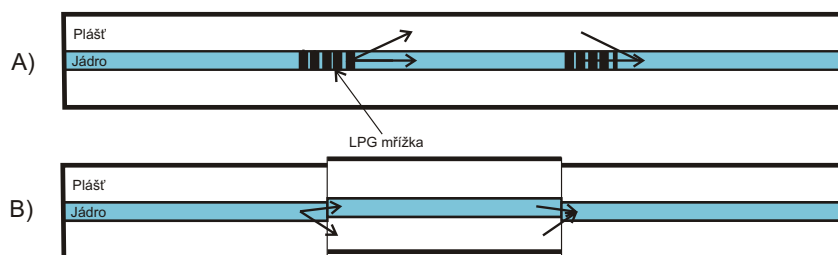
Mach-Zehnderův interferometr (MZI) se používá pro různé druhy měření díky jeho flexibilitě. První interferometry měli dvě nezávislé ramena, referenční a měřící rameno, jako je zobrazeno na obr. 4.9.



Obr. 4.9: Blokové schéma dvouramenného Mach-Zehnderova interferometru.

Vstupní světelný paprsek je rozdělený a znovu spojený optickým děličem (vazebním členem). Spojený světelný paprsek pak obsahuje interferenční složku v závislosti

na rozdíl optické trasy dvou ramen. Pro měřicí účely je referenční rameno izolováno od působení měřené veličiny a jen měřicí rameno je vystaveno vnějším vlivům. Změna v tomto měřicím rameni může být způsobena teplotou nebo mechanickým namáháním (optické vlákno mění svou délku), které změní rozdíl optických drah a mohou být 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.



Obr. 4.10: Ukázka principu jednovláknového Mach-Zenderova interferometru.

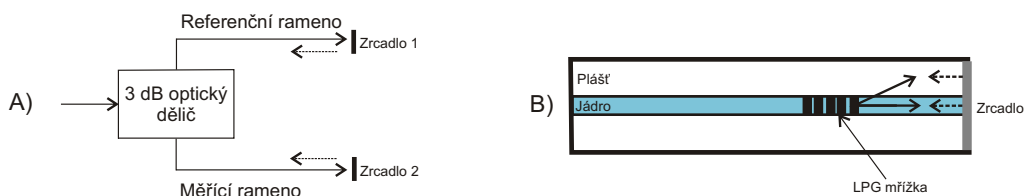
Avšak tento typ s použitím dvou oddělených ramen v MZI byl rychle nahrazen tzv. „in-line“ interferometrem od příchodu vláken s dlouhými periodami mřížek (LPG - Long Period Gratings). Jak je vidět na obr. 4.10 a) část světelného paprsku, která je vedena jednovidovým vláknem je odražena do pláště LPG mřížkou a po určité délce je přiveden zpět do jádra druhou LPG mřížkou. Tyto dva světelné paprsky spolu také interferují a vytvářejí kompaktní a velmi efektivní Mach-Zenderův interferometr v jednom optickém vlákně. Fyzická délka obou ramen je v tomto případě stejná, liší se však délkou optické trasy a to z důvodu vidové disperze, protože plášť má nižší index lomu než jádro a světlo se v něm šíří rychleji [18].

Rozdělení světelného paprsku ve vlákně lze dosáhnout i jinými metodami než je LPG. Například rozdělením vlákna a následným spojením s mírnou odchylkou ve dvou místech optického vlákna, jak je zobrazeno na obr. 4.10 b). Důvodem posunutí, se část paprsku z jádra naváže v několika videch do pláště [18].

### Michelsonův interferometr

Optické senzory založené na Michelsonově interferometru (MI) jsou velmi podobné těm co využívají Mach-Zenderova 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. 4.11 a). Ve své podstatě je MI polovina MZI, proto výroba obou interferometrů je skoro stejná u MI jsou jen přidány odrazové plochy. Výhodou tohoto interferometru je, že můžeme paralelně zapojit několik sensorů.

I zde je možné použít tzv. „in-line“ variantu interferometru (s jedním vláknem pro dvě ramena). Opět je část světelného paprsku z jádra navázána do pláště a na konci vlákna jsou paprsky v obou ramenech odraženy stejnou odrazovou plochou, jak je zobrazeno na obr. 4.11 b) [18].

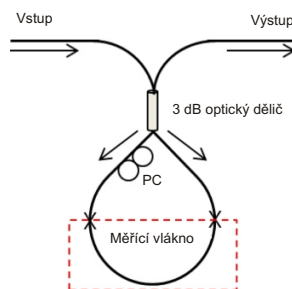


Obr. 4.11: a) Ukázka principu dvouramenného Michaelsonova interferometru, b) jednolávkový Michaelsonův interferometr.

Michelsonův interferometr lze principiálně použít všude tam, kde Mach-Zenderův interferometr. V praxi se však používá na snímání fyzikálních veličin, které působí změnu odrazových vlastností konce sensorového optického vlákna. Lze jím například měřit velmi malé posuny a rychlost pohybu externího zrcadla. Podrobně bude tento interferometr popsán dále v práci [2].

### 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. 4.12. Světlo do dvou paprsků dělí optický dělič a po průchodu měřicí smyčkou, jsou tyto paprsky opět spojeny ve stejném optickém děliči, kde byly rozděleny. 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 [18].



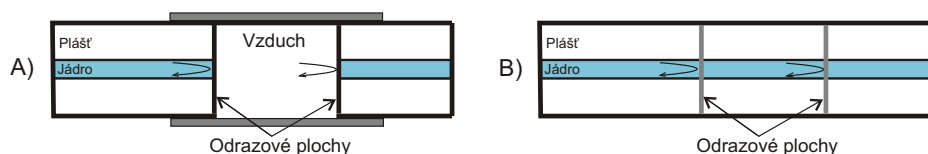
Obr. 4.12: Schéma Sagnacova interferometru [18].



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 [2].

### Fabry-Perotův interferometr

Fabry-Perotův interferometr (FPI) se skládá z 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.



Obr. 4.13: a) Schéma vnějšího Fabry-Perotova interferometru, b) Schéma vnitřního Fabry-Perotova interferometru.

Na obr. 4.13 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. 4.13 b) je vnitřní senzor s FPI, kde je dutina tvořena např. Braggovou mřížkou, nanesení tenkého filmu nebo chemicky vyleptána.

Při působení např. mechanického napětí dojde k prodloužení dutiny a tím k rozdílu délky optické trasy nebo indexu lomu dutiny [2].

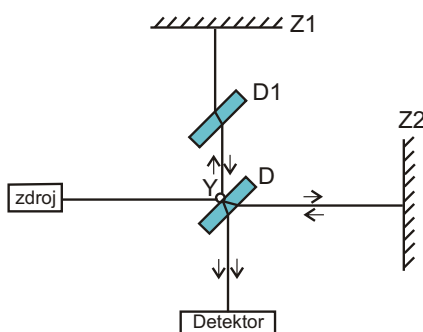
## 5 MICHELSONŮV INTERFEROMETR

V roce 1881 A. A. Michelson navrhl a sestrojil interferometr. Původně měl jeho interferometr sloužit jako prostředek ke studiu éteru, což bylo v té době značně probírané téma. Michelsonův interferometr se postupem času stal vysoce používaným přístrojem pro měření vlnové délky světla a k měření velmi krátkých vzdáleností v případě, že známe vlnovou délku použitého světla.

V kapitole 4.3.6 jsem obecně popsal Michelsonův interferometr, jelikož však bude dále v práci simulován, bude zde rozebrán detailněji.

### 5.1 Základní princip

Základní schéma Michelsonova interferometru je naznačeno na obr. 5.1. Jako zdroj světelného signálu je nyní používán laser (u původního interferometru to byla rtuťová žárovka, kde za pomoci spojek byl vytvořen rovnoběžný svazek paprsků). Světelný paprsek dopadá pod úhlem  $45^\circ$  na planoparalelní destičku D, kde se odráží a láme. V bodě Y se paprsek dělí na dva svazky o přibližně stejné intenzitě. První svazek se odráží a dopadá přímo na pevné (referenční) zrcadlo Z1, které je odráží zpět do bodu Y, z něž se pak lámou a jdou do detektoru. Druhý svazek je lomen a dopadá přímo na pohyblivé (měřící) zrcadlo Z2, od kterého se odrazí zpět do bodu Y, kde se odrazí a putuje do detektoru. Paprsky odražené od obou zrcadel se vektorově sčítají v bodě Y. Do cesty odraženému paprsku se vkládá kompenzační destička D1, aby se zaručila stejná dráha obou (odraženého i lomeného) paprsku. Dráhy obou paprsků jsou tedy stejné, je-li vzdálenost zrcadel Z1 a Z2 od bodu Y stejná. Je-li posunuto zrcadlo Z2, vznikne tak dráhový rozdíl paprsků a v závislosti na velikosti tohoto posuvu pak vznikají interferenční minima a maxima [5].



Obr. 5.1: Základní schéma Michelsonova interferometru.

Detektor je reprezentován některým z optoelektronických senzorů a je pomocí něj měřena intenzita vektorového součtu paprsků odražených od obou zrcadel.

Intenzita je úměrná kvadrátu elektrické složky výsledného pole vzniklého interferencí odraženého od referenčního a měřícího zrcadla. Za předpokladu koherentního světla o frekvenci  $\omega$ , lineární polarizace obou svazků ve stejné rovině a dokonalého odrazu platí součet obou propustných vln [5]:

$$\vec{E}(j\omega) = \vec{E}_1(j\omega) + \vec{E}_2(j\omega) = |\vec{E}_1(j\omega)| e^{-j(\beta x_1 + \phi)} + |\vec{E}_2(j\omega)| e^{j(\beta x_1 + \phi)}, \quad (5.1)$$

kde  $x_1$ ,  $x_2$  jsou dráhy referenčního a měřícího paprsku určené koncovými body zdroj-místo interference,

$$\beta = \omega \sqrt{\varepsilon \mu} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (5.2)$$

kde  $\beta$  je konstanta šíření vlnění o vlnové délce  $\lambda$  ve vakuu. Mezi vektory  $\vec{E}_1(j\omega)$  a  $\vec{E}_2(j\omega)$  je fázový úhel:

$$\beta(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x. \quad (5.3)$$

Podle kosinové věty platí pro výslednou amplitudu:

$$|\vec{E}(j\omega)|^2 = |\vec{E}_1(j\omega)|^2 + |\vec{E}_2(j\omega)|^2 = 2 \cdot |\vec{E}_1(j\omega)| \cdot |\vec{E}_2(j\omega)| \cos \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \quad (5.4)$$

Maxima a minima intenzity osvětlení určuje argument kosinové funkce, takže platí pro maxima intenzity:

$$2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} = n\pi \Rightarrow \Delta x = n \frac{\lambda}{2}; \quad n = 0, 1, \dots \quad (5.5)$$

Obdobně minimální hodnota osvětlení nastává, splňuje-li rozdíl drah paprsků vztah:

$$\Delta x = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}. \quad (5.6)$$

Rozdíl drah  $\Delta x$  je dvojnásobek rozdílu geometrických vzdáleností mezi zrcadly a místem interference.

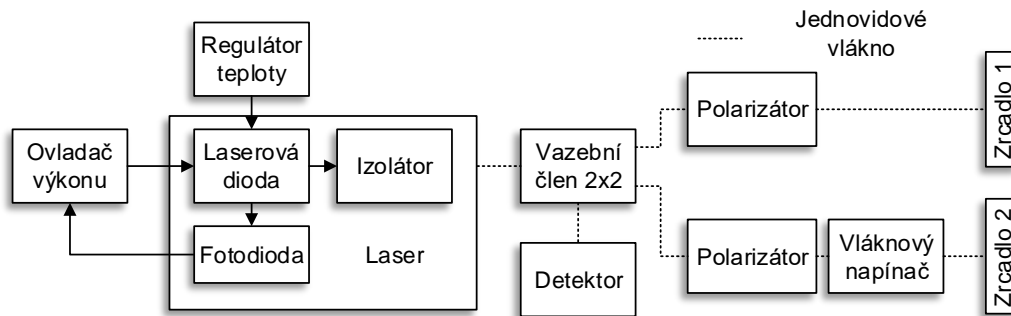
Předpokladem správné interpolace jsou známe hodnoty elektrických intenzit  $E_1$  a  $E_2$  [5].

## 5.2 Michelsonův vláknový interferometr

V předchozí podkapitole jsem popsal základní princip fungování Michelsonova interferometru, ten ovšem není cílem mé práce, protože nepoužívá pro přenos signálu optické vlákno, ale vzduch a tak dále rozeberu jeho modifikaci v podobě Michelsonova vláknového interferometru.

Michelsonův vláknový interferometr pracuje na stejném principu jako klasický, tudíž na rozdělení světelného paprsku do dvou větví, kdy je jedna měřicí a druhá referenční a následném vyhodnocení fázových rozdílů těchto dvou optických tras. Oba světelné paprsky odražené od reflexní plochy interferují v optickém vazebním členu (coupleru). U toho interferometru je hodně specifických rysů, nehledě na to, že se stále jedná o Michelsonův interferometr. Zásadní rozdíl je v tom, že je světelný signál veden jednovidovým optickým vláknem.

Vláknové odrazové plochy a optický vazební člen by měli být kompatibilní s použitým laserem. Teoreticky jsou navrženy tak, že by měli pracovat na určité vlnové délce, ale v praxi, jsou levná vláknová zrcadla vyráběna z dialektrických materiálů a jsou širokopásmové. Například zrcadlo určené pro vlnovou délku 1310 nm bude pravděpodobně jevit vysokou odrazivost i na vlnové délce 1550 nm. U vazebního členu je to ovšem jinak, kde je jejich dělicí poměr důležitý pro výsledek interference a u každé vlnové délky může být jiný. Schéma Michelsonova vláknového interferometru je zobrazeno na obr. 5.2 [13].



Obr. 5.2: Blokové schéma Michelsonova vláknového interferometru.

Avšak nastává zde zásadní problém, když je laserový parsek rozdělen a znovu spojen ve vazebním členu, souběžně putující signály optickým vláknem už nejsou schopné interferovat. Což je úplně odlišné než u vláknového Sagnacova interferometru, kde mohou světelné paprsky putovat jednovidovým vláknem kilometry a stále perfektně interferují [14].

Tento problém nastává ze dvou důvodů. První je koherentní délka světla laseru (je to délka, kterou laser dosvítí a signál je schopen interferovat) v porovnání s délkou optické trasy a druhý, důležitější, je udržení stejného stavu polarizace rozdělených paprsků ve vlákně. Optický parsek putující jednovidovým vláknem prochází náhodnými změnami v dvojlomu důsledkem namáhání, změn teplot nebo vibrací. Z toho vyplývá, že vracející se paprsek v Michelsonově interferometru není schopen udržet původní stav polarizace a tím pádem je interference nemožná. Existují

dvě varianty řešení toho problému. Jedním řešením je použití PM (polarization-maintaining) vlákna, které udržuje stejnou polarizaci, v celém systému. Z důvodu vysoké ceny PM vláken je toto řešení často neatraktivní. Více se nabízí řešení pomocí Faradayova otočného zrcadla FRM (Faraday rotator mirror) odrážejícího paprsek na konci obou větví interferometru, které slouží jako fázové časované zrcadlo, které vytváří fázové zpoždění  $90^\circ$ . To umožňuje zrcadlu automaticky kompenzovat jakékoliv dvojlomy vyvolány v paprsku. Polarizátory se nepoužívají z důvodu ztrátovosti signálu [14].

Problém s koherentní délkou světla laseru, může být řešen vybráním správného zdroje záření. Používají se DFB (Distributed feedback) infračervené laserové diody. Zdroje záření pro interferometry budou popsány dále [14].

Kalibrace optického vláknového interferometru vyžaduje použití dalších komponent v porovnání s klasickými interferometry, kde optickou dráhu jednoduše změním posunutím zrcadla. U vláknového Michelsonova interferometru můžeme optickou dráhu prodloužit vložением vzduchové mezery mezi dvě vlákna, ale to popírá celou koncepci tohoto řešení. Nejrozšířenější řešení je použití tzv. vláknového napínače. Křemíkové vlákno je elastické a může být mechanicky prodlouženo až o 2 % své délky, což umožňuje změnu optické dráhy nezbytnou pro přesnou fázi paprsků a intenzitu blížící se nule na detektoru [13].

### Optický vazební člen (coupler)

Vláknový optický vazební člen je zařízení užívané v optických systémech, sloužící k rozdělení vstupního optického signálu mezi více výstupů. Vazební člen můžeme volit podle několika parametrů jako například počet vstupních a výstupních portů, pracovní vlnové délky, poměru výstupní intenzity světelných paprsků. Pro účely Michelsonova vláknového interferometru je nejvhodnější využít jednovidový vazební člen  $2 \times 2$ , což znamená, že má dva vstupní a dva výstupní porty, s tím že jeden vstupní, může sloužit jako výstup interferovaného signálu pro detektor. Používá se poměr výstupních signálů 50/50, protože v měřící i referenční větvi potřebujeme stejné podmínky. Vazební člen je zdrojem ztrát na trase, typicky je to zhruba 0,1 dB.

#### 5.2.1 Lasery pro interferometry

Michelsonův vláknový interferometr většinou pracuje na telekomunikačních vlnových délkách a to 1310 nm a 1550 nm a to z důvodu kompatibility s ostatními součástkami a optickým vláknem. To ovšem není podmínkou funkčnosti, interference světla funguje i na ostatních vlnových délkách, jen musíme uvážit další důležité vlastnosti jako je např. útlum, atd. He–Ne laser je velmi populární v optických spojích volných prostorem, ale je nepoužitelný pro většinu optických vláken.

DFB laser pracuje na délkách ze zmíněného rozsahu a nejčastěji pracuje na vlnové délce 1310 nm nebo 1550 nm. DFB lasery mají relativně úzké spektrum emitované vlnové délky, ale stabilita vlnové délky bývá většinou horší než u He–Ne laseru. Je stabilní při teplotě lehce pod pokojovou teplotou a tak je zde použit regulátor teploty. Snížení teploty nám zaruší dostatečnou stabilitu vlnové délky laseru a tím i přesné měření. Emitovaná vlnová délka není z viditelného spektra, a proto je nezbytné použít k detekci interferovaných pásků detekční obvod (např. fotodiodu a osciloskop) pro prohlédnutí interferogramu. Obecně, nízký kontrast interferenčních proužků značí potřebu nějaké úpravy.

Interferometr s dlouhými větvemi musí splňovat podmínku koherentní délky (délka trasy interferujících paprsků musí být menší než koherentní délka zdroje), jinak není dosaženo interference. Nejlepší koherentní délkou se vyznačují lasery. Např. jednovidový He–Ne laser má koherentní délku až 100 m a LED diody disponují pouze délkou několik centimetrů. DFG laser má koherentní délku až desítky kilometrů.

Stabilita vlnové délky ovlivňuje přímo přesnost výsledku. Změna délky měřící větve interferometru je násobek vlnové délky, jak můžeme vidět ve vzorci:

$$\Delta l = 0,5 \cdot \lambda \cdot n, \quad (5.7)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka a  $n$  je množství napočítaných interferenčních maxim. Je nutné dávat pozor na starší lasery, protože výsledná vlnová délka nemusí být stejná jako udávaná na přístroji. Dále je nutné znát nestabilitu vlnové délky laseru k vyhodnocení přesnosti měření závislé na vlnové délce. Když tolerance neznáte, je možné je vypočítat podle vztahu:

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_c^2}{c} \Delta f, \quad (5.8)$$

kde  $f$  je výstupní frekvence laseru a  $c$  je rychlost světla [13].

## Izolátor

Vláknový optický izolátor je jednoduché zařízení se dvěma porty. Pracuje na tom principu, že světlo může postupovat jen jedním směrem a ne opačným. Často se používá k prevenci zpětné reflexe do zdroje, čímž předchází nestabilitě a degradaci zdroje záření.

## 5.2.2 Detekce interferenčních minim a maxim

Mohou být použity různé metody detekce v závislosti na vlastnostech měřeného signálu a použitého zdroje záření. Obecně, detekci interferenčních proužků umožňuje

několik zařízení jako fotodioda, fotonásobič, fotovodivý detektor, CCD senzor nebo pyroelektrický detektor.

Fotodiody jsou nejpobulárnější a universální detektory, pokrývající velký rozsah vlnových délek. Fotovodivé detektory jsou užívány v infračervené oblasti. Pyroelektrické detektory jsou velmi citlivé nad infračervenou oblastí, ale navíc reagují na změny osvětlení. Nicméně, nejpropracovanější detekční zařízení předpokládá integraci detektoru v obvodu na zpracování signálu zahrnující jeho zesílení, Fourierovu transformaci signálu přijatelnou pro monitorování frekvenčních změn měřeného procesu a k tomu převedení měřeného signálu pro přenos (vzorkování, kvantování, kódování, atd.). Jedno z nejlevnějších řešení je použití fotodiody s operačním zesilovačem a zpracování signálu v počítači. Pro velmi pomalé průběhy s pomalou změnou interferenčních obrazců s frekvencí menší než 1 Hz je dostačující použít spektrální analyzátor. Nejdostupnější optická vlákna stejně jako vláknové optické komponenty jsou navrženy pro pracovní rozsah 1300 – 1500 nm.

Když se změní délka optické trasy měřené větve, mění se i rozdělení interferenčních minim a maxim v pozorované oblasti, toto rozdělení se mění v čase, což se při zobrazení na osciloskopu jeví jako změna frekvence výsledného signálu, který vyhodnocujeme. Je možné monitorovat jejich posuny, směr a hustotu. Pro některé aplikace při měření pomalých průběhů je dostačující spektrální analyzátor, ale signály které vyžadují rychlé vzorkování, zesílení a nízký šum je optimální řešení fotodioda s operačním zesilovačem a osciloskop.

Počet vzorků zaznamenaných detektorem za jednotku času musí být minimálně dvakrát vyšší než nejvyšší frekvence vyskytující se v detekovaném signálu za jednotku času, což znamená že musí být dodržen Nyquistův teorém [13]:

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_{\max}, \quad (5.9)$$

kde  $f_{vz}$  je vzorkovací kmitočet a  $f_{\max}$  je nejvyšší frekvenční složka obsažena v signálu.

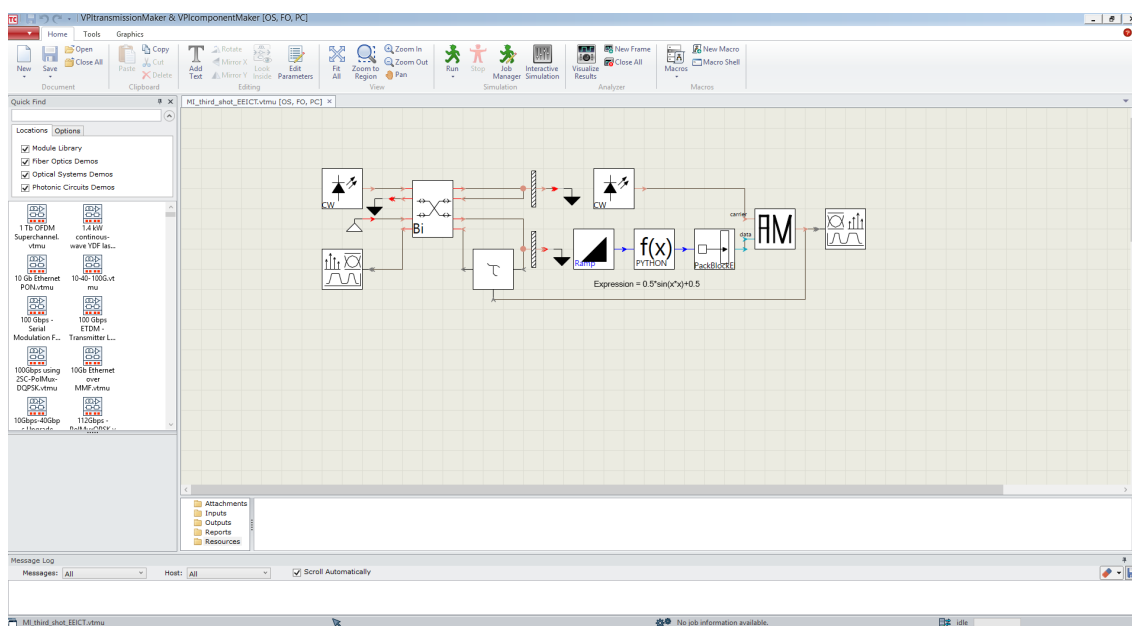
Michelsonův vláknový interferometr není schopný měřit absolutní hodnoty jako teplotu a délku, ale je velmi přesný pro měření malých změn těchto veličin. Dále se používá k měření vibrací a mechanického namáhání.

## 6 SIMULACE

Simulace je provedena v programu VPIphotonics, což je profesionální simulační software podporující aktivní či pasivní integrované fotonické obvody, aplikace optických vláken, optické přenosové systémy, síťové aplikace a jejich následnou analýzu.

### 6.1 VPIphotonics

Na obr. 6.1 vidíme základní uživatelské rozhraní programu VPIphotonics. Ovládání programu je velice intuitivní a níže popíšu nejdůležitější prvky programu.



Obr. 6.1: Uživatelské rozhraní VPIphotonics.

V horní části okna se nacházejí nástroje pro správu projektu, jako je vytvoření nového projektu, uložení nebo otevření projektu stávajícího. Dále se v položkách Tools a Graphics nacházejí nástroje pro úpravu grafického vzhledu námi vytvořené simulace a možnost exportovat simulaci do dalších programu. Nejdůležitější z horní lišty je tlačítko Run, které spouští simulaci, a v kterém můžeme nastavit parametry simulace, jako je například počet průběhů simulace, atd.

V levé části okna je knihovna prvků, které můžeme použít do simulace. Prvky můžeme vybírat podle složek do kterých jsou rozděleny nebo podle klíčových slov, které napíšeme do pole Quick find. Na pracovní plochu dostaneme prvek jednoduchým uchopením a přetažením myší.



Uprostřed se nachází pracovní plocha, kam umísťujeme a propojujeme zvolené prvky. Zde je důležité dodržovat barvy vstupů a výstupu bloků tak, aby na vstup jedné barvy byl přiveden signál z výstupu stejné barvy.

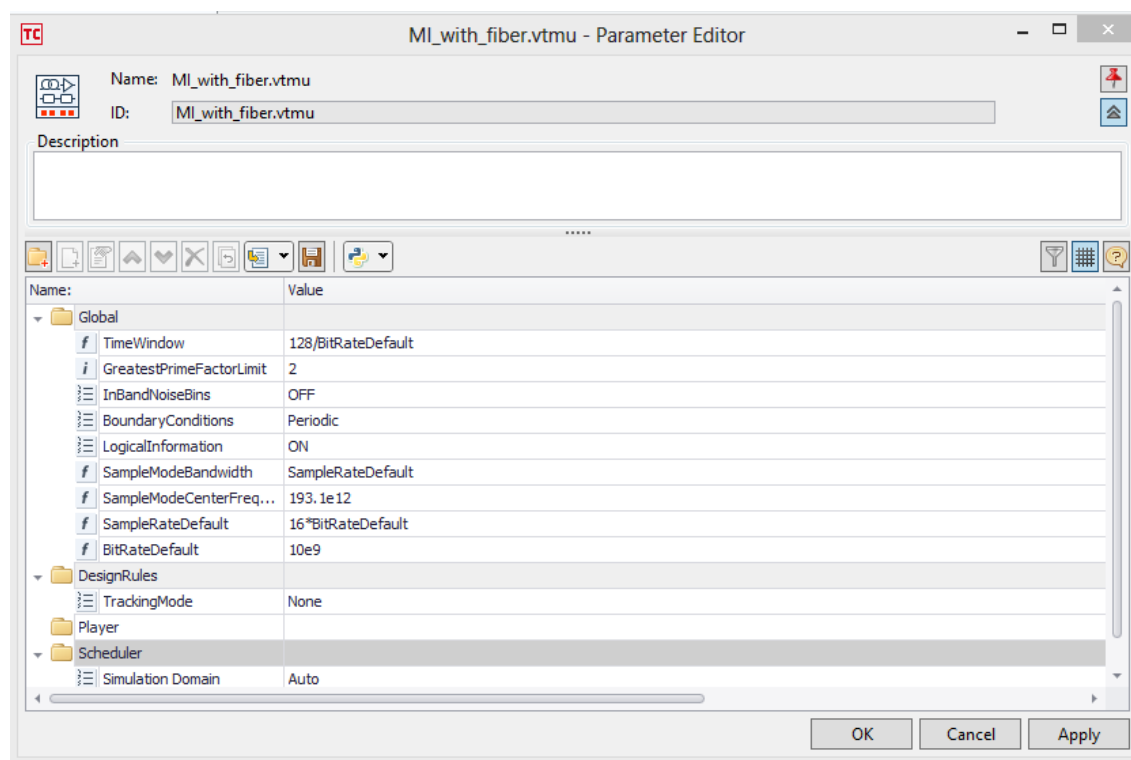
Význam barev:

- červená - optický signál,
- světle modrá - elektrický signál,
- tmavě modrá - matematický signál,
- žlutá - bitová posloupnost.

Ve spodní části okna se nacházejí výpisy o průběhu simulace, varovné a chybové hlášení.

### 6.1.1 Nastavení simulace

Dvojklikem myši na pracovní plochu programu se dostaneme do nabídky nastavení simulace viz obr. 6.2.

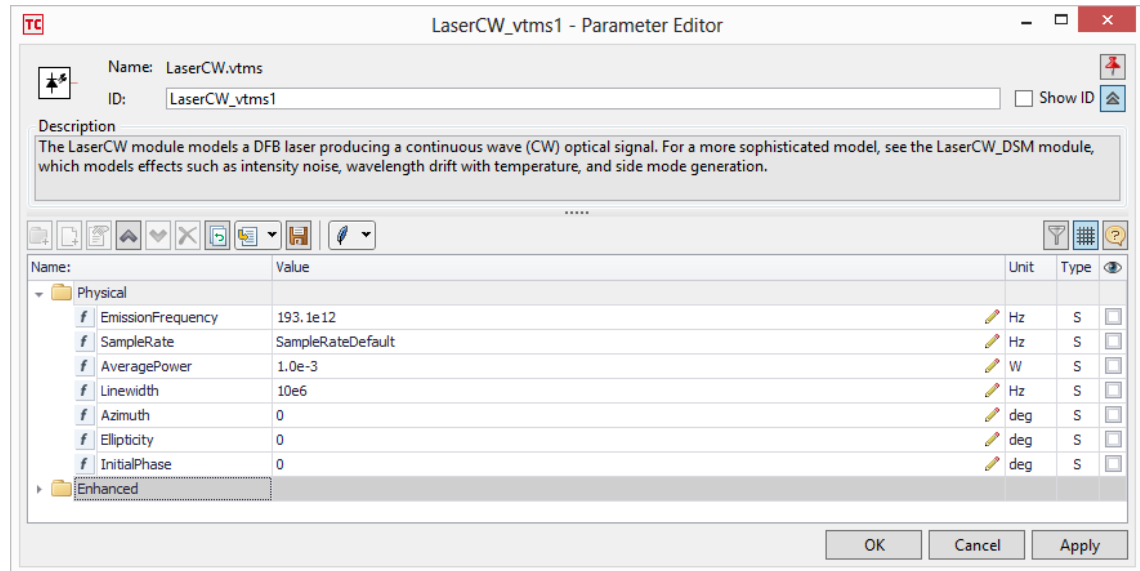


Obr. 6.2: Okno nastavení parametrů.

V tomto nastavení můžeme nastavovat obecné parametry simulace jako bitovou rychlost, časové okno nebo vzorkovací frekvenci. Toto nastavení se může hodit u simulace datových přenosů, já jsem to při simulaci interferometru nevyužil.

### 6.1.2 Nastavení prvků

Dvojklikem myši na prvek se dostaneme do okna nastavení, které je zobrazeno na obr. 6.3.



Obr. 6.3: Okno nastavení parametrů.

V okně nastavení vidíme popis prvku, jeho jméno a můžeme zde nastavovat parametry, které nám program umožňuje, což je u každého prvku individuální. Na ukázkovém obrázku je vidět nastavení DFB laseru.

### 6.1.3 VPIphotonics analyzer

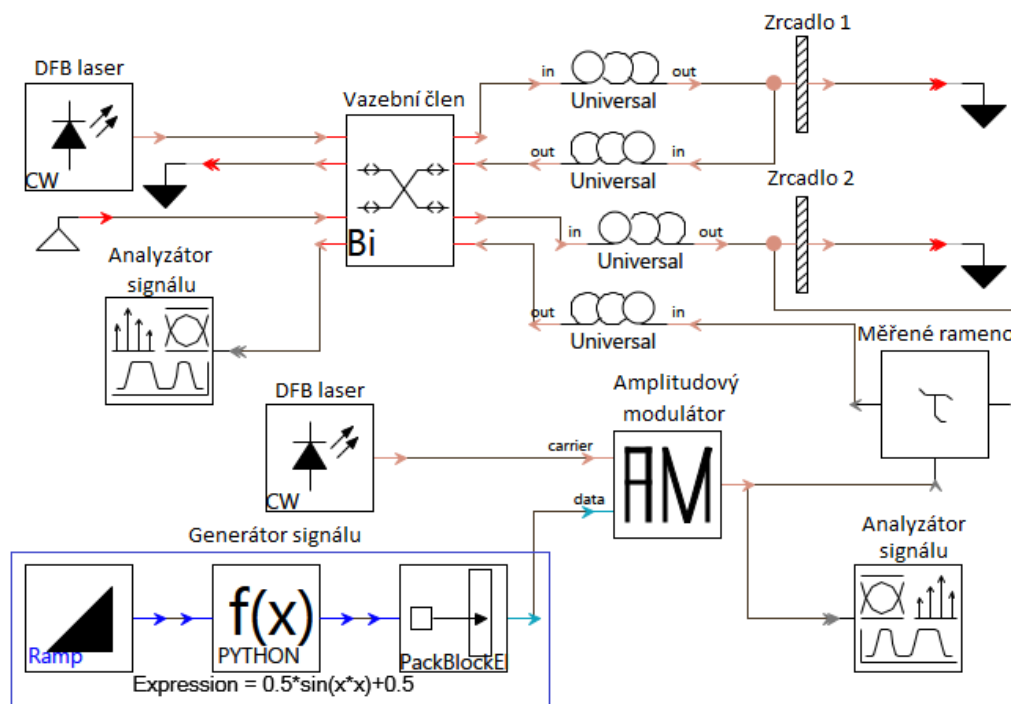
Je to program, ve kterém jsou zobrazeny výsledky, po tom co spustíme simulaci zvoleného zapojení. Výsledky zde můžeme graficky upravovat a zobrazovat různé varianty grafů.

## 6.2 Simulace Michelsonova vláknového interferometru

Jako zdroj světelného záření je použit DFB laser, který vysílá světelný signál konstantní amplitudy a frekvence do obousměrného vazebního členu  $2 \times 2$ , který je nastaven na dělicí poměr 0,5 což znamená, že se výkon ze zdroje světelného záření rozdělí do dvou ramen v poměru 50/50, tak aby v obou ramenech interferometru

nastali stejné podmínky pro měření, čehož je v reálném zapojení velmi těžké dosáhnout, kvůli nepřesnosti vazebního členu. To nás ovšem v simulaci nemusí omezovat, jelikož je použita ideální součástka s ideálním dělicím poměrem bez útlumu.

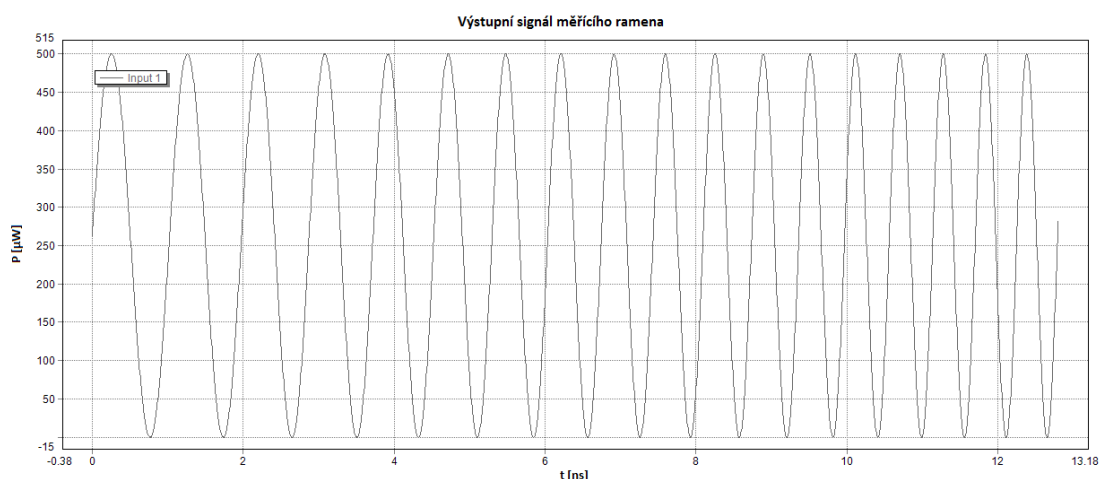
Horní rameno, ve kterém se nachází zrcadlo 1, je tzv. rameno referenční, sem signál putuje po rozdělení z vazebního členu, odrazí se od reflexní plochy a putuje zpět do vazebního členu tak, aby nebyl signál ovlivněn měřenou veličinou.



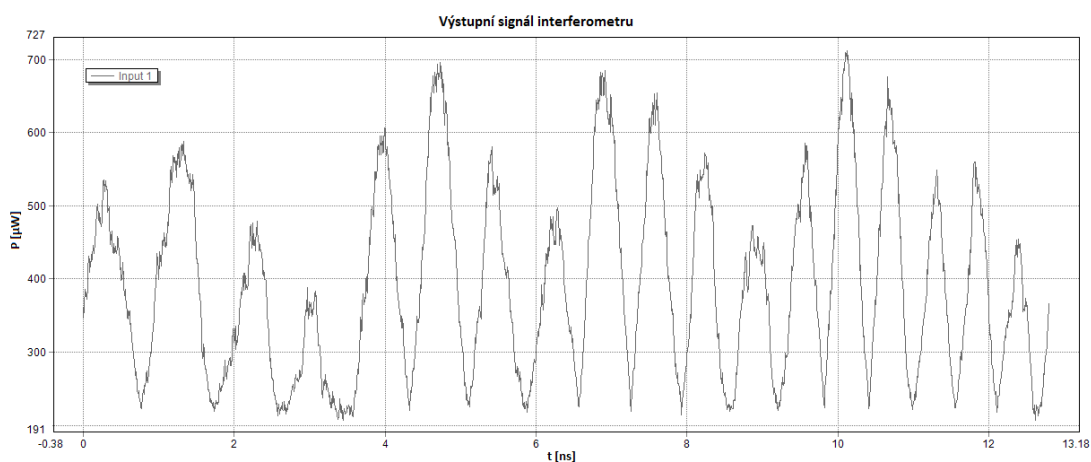
Obr. 6.4: Zapojení Michelsonova vláknového interferometru v simulačním prostředí.

Spodní rameno je tzv. měřící rameno, kam signál putuje, odrazí se od zrcadla 2 a putuje zpět do vazebního členu, ale někde po cestě je ovlivněn měřenou veličinou. V tomto případě simulují působení vibrací či pnutí o sinusovém průběhu na optické vlákno. Toho je v simulačním prostředí docíleno tak, že je generován sinusový signál vzrůstající frekvence v generátoru signálu, který se skládá ze tří bloků. V prvním bloku se vytváří proměnná  $x$ , která je postupně inkrementovaná v průběhu simulace, ve druhém bloku se počítá matematická funkce  $0,5 \cdot \sin(x^2) + 0,5$  a třetí blok už jen převádí matematický signál na signál elektrický, který je možno dále zpracovávat. Matematická funkce je volena tak, aby co nejvíce odpovídala realitě, kdy  $\sin(x^2)$  je sinusový průběh vzrůstající frekvence. Když vynásobíme  $\sin(x^2)$  mocnitelem 0,5, docílíme poloviční amplitudy signálu a když k této funkci přičteme 0,5, posuneme frekvenční osu průběhu do poloviny osy amplitudy, aby bylo možno signál modulovat na signál optický.

Takto vytvořený elektrický signál je přiveden do amplitudového modulátoru, kde je převeden na signál optický, pomocí druhého DFB laseru, který je nastaven na poloviční výkon než laser první, z důvodu rozdělení výkonu ve vazebním členu. Signál je pomocí členu  $\tau$  přiveden jako výstup měřícího ramena do vazebního členu viz obr. 6.5, kde signály z obou ramen interferují a na výstupu jsou měřeny fázové rozdíly ramen analyzátozem signálu. Toto složitě řešení je použito z důvodu, že Michelsonův vláknový interferometr je schopen měřit velmi malé změny měřené veličiny nikoliv hodnoty absolutní.



Obr. 6.5: Výstupní signál měřícího ramena.



Obr. 6.6: Výstupní signál Michelsonova interferometru.

Pro přenos signálu je v simulaci použito standardní telekomunikační optické vlákno. Jelikož se jedná o simulaci, nemusíme se zabývat řadou věcí, které podstatně ovlivňují reálné zapojení přístroje, protože je použito ideálních součástek.

Nemusíme se zabývat udržení stejné polarizace světla v ramenech interferometru, nerovnoměrným rozdělením výkonu ve vazebním členu nebo koherentní délkou použitého laseru.

Trojúhelníkové značky jsou v simulaci použity jako ošetření nepoužitých vstupů a výstupů.

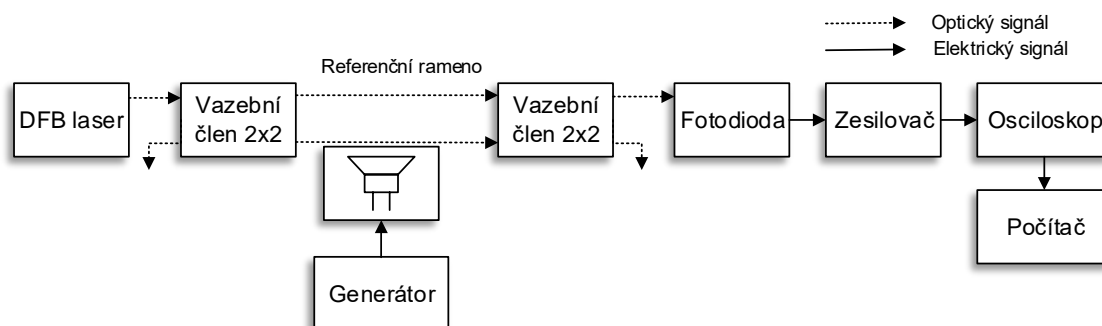
Na obr. 6.6 můžeme vidět výstupní signál Michelsonova interferometru s použitím 1 km optického vlákna. Z grafu je vidět, že frekvence a pozice minim a maxim odpovídají měřicímu ramenu. Je zde vidět určité zkreslení z důvodů nelineárních jevů v použitém optickém vláknu.

Jelikož se jedná pouze o simulaci, je třeba si pravdivost údajů ověřit měřením na reálném zapojen.

## 7 MĚŘENÍ MACH-ZEHNDEROVA INTERFEROMETRU

Základní princip Mach-Zehnderova interferometru byl popsán v kapitole 4.3.6 a pracuje na podobné principu jako Michelsonův interferometr. Světelný paprsek ze zdroje je rozdělen ve  $2 \times 2$  vazebním členu v poměru 50/50 do dvou nezávislých ramen. Jedno z ramen je tzv. referenční a druhé je měřící, na které působí měřená veličina. Tady nastává změna oproti Michelsonovu interferometru, kde se paprsky odrážejí od zrcadel, putují zpět a interferují ve stejném vazebním členu, ve kterém byly rozděleny. U Mach-Zehnderova interferometru se paprsky neodrážejí, ale putují přímo do druhého  $2 \times 2$  vazebního členu, kde interferují a stejně jako u MI se vyhodnocuje fázový posun světelného signálu z důvodu změny optické trasy, která je ovlivněna měřenou veličinou působící na měřící rameno.

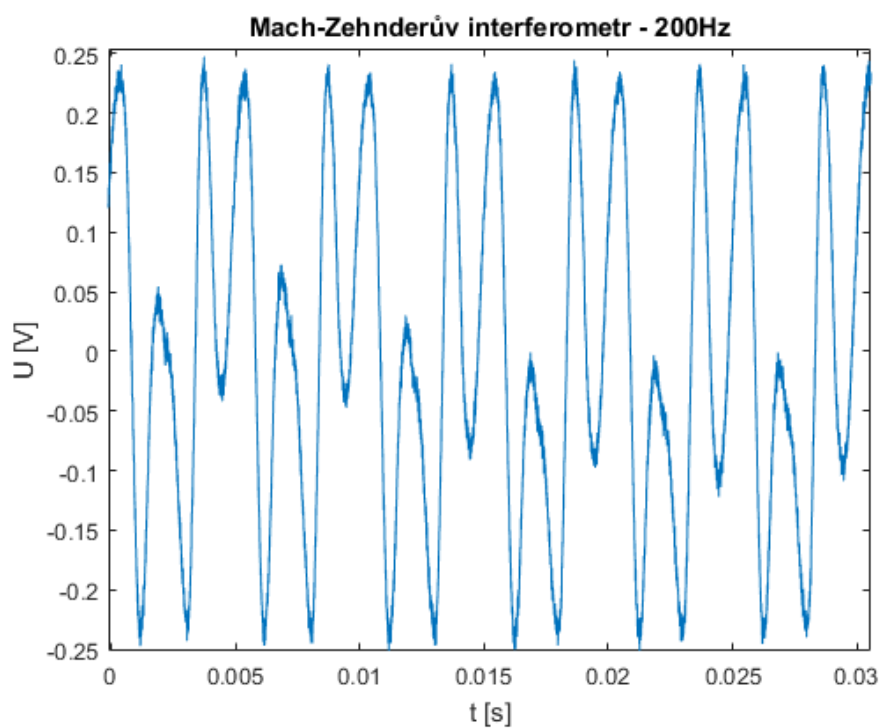
Na obr. 7.1 je zobrazeno blokové schéma Mach-Zehnderova interferometru, kterým bylo provedeno měření.



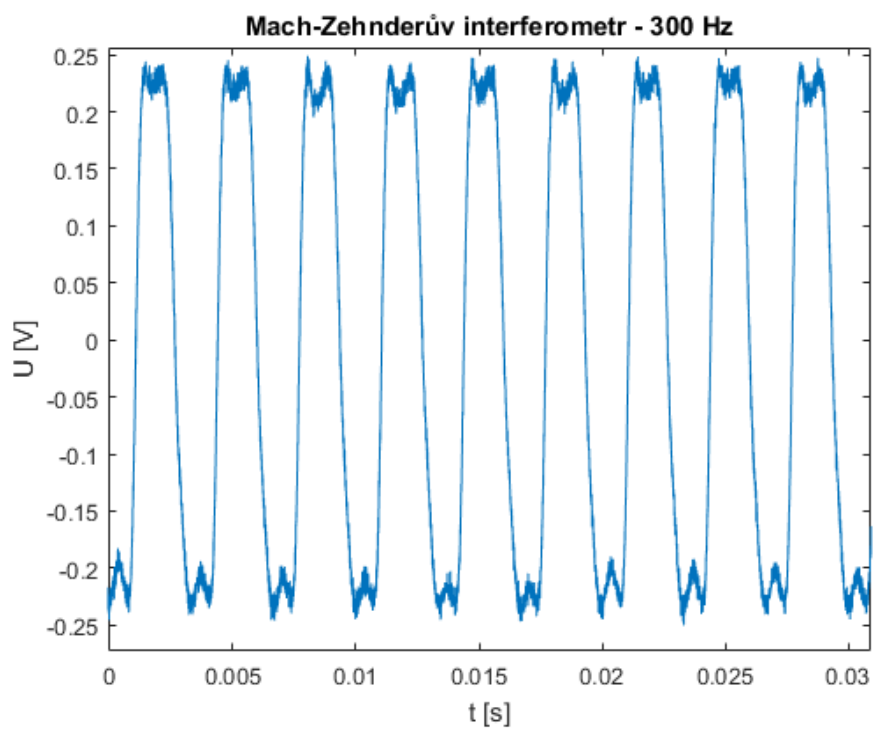
Obr. 7.1: Blokové schéma měřeného zapojení Mach-Zehnderova interferometru.

Jako zdroj světelného záření byl použit DFB laser, který vyzařoval paprsek o vlnové délce 1550 nm. Světelný paprsek je rozdělen ve vazebním členu do referenčního a měřícího ramena v poměru 50/50. Zde je signál veden telekomunikačním jednovláknovým vláknem a následně přiveden do druhého vazebního členu, kde světelné paprsky interferují a vyhodnocují se zde fázové změny, ovlivněné změnou optické trasy měřeného ramena. Z druhého vazebního členu je optický signál převeden na signál elektrický fotodiodou, zesílen a zobrazen na osciloskopu. Z osciloskopu je možno si naměřená data převést do počítače, kde se data dají zpracovat například pomocí matematického programu Matlab a vykreslit do grafů.

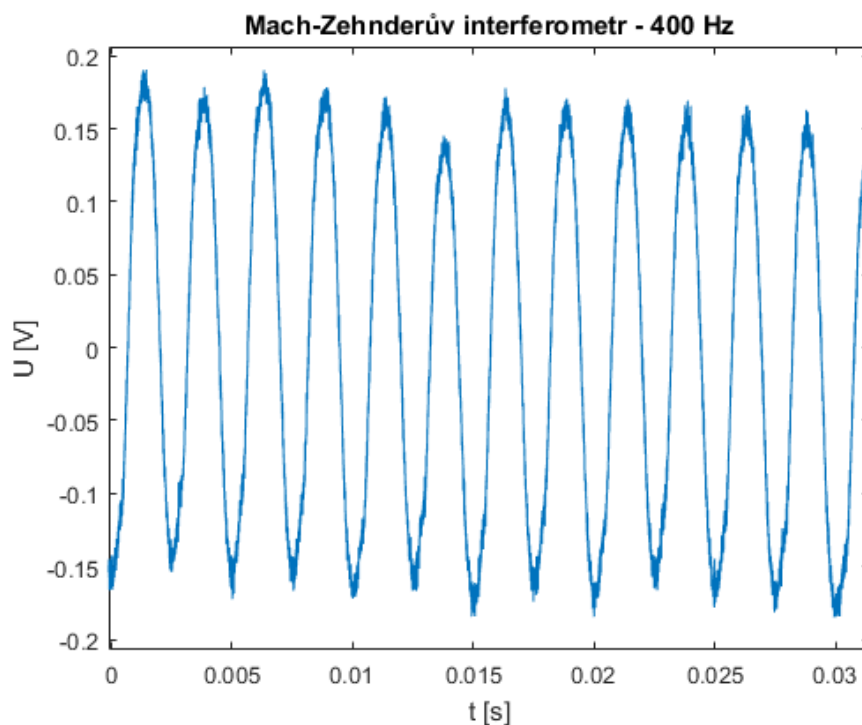
Měřil se vliv vibrací reproduktoru na optické vlákno. Kdy byl reproduktor přímo položen na vláknu měřícího ramena a byl napájen sinusovým signálem o různých frekvencích.



Obr. 7.2: Výstupní signál Mach-Zehnderova interferometru při 200 Hz.



Obr. 7.3: Výstupní signál Mach-Zehnderova interferometru při 300 Hz.



Obr. 7.4: Výstupní signál Mach-Zehnderova interferometru při 400 Hz.

Přiložené grafy zobrazují výstup osciloskopu při zvolených frekvencích. Na obr. 7.2 můžeme vidět měřený signál frekvence 200 Hz, kde jsou z důvodu zpětných odrazů od podložky vidět změny fáze průběhu, ty jsou v grafu zobrazeny viditelnými výkyvy, které jdou od maximálního napětí do oblasti k nule a zpět, to jak od maximálních kladných tak i od maximálních záporných hodnot.

Na obr. 7.3 a 7.4 jsou zobrazeny průběhy měření při 300 Hz a 400 Hz, frekvence těchto průběhů přesně odpovídá budící frekvenci reproduktoru a průběhy nejsou ani nijak značně ovlivněny zpětnými odrazy či vnějšími vlivy z místnosti.

Jak je vidět výsledky simulace a reálného měření jsou velmi podobné, simulaci můžeme používat ke zkoumání chování interferometru při změně vlastností optického vlákna či jeho délky.



## ZÁVĚR

Postupně byly v práci popsány základní principy přenosu světelného signálu optickým vláknem. Rozdělení optického vlákna a jeho lineární a nelineární jevy, především pak Rayleighův, Ramanův a Brillouinův rozptyl, na kterých se zakládají distribuované optické vláknové senzory. V práci jsem zmínil i nejvyužívanější zdroje světelného záření (LED diodu a laser) a detektory (PIN a lavinovou diodu).

Dále jsou v práci rozděleny optické vláknové senzory podle řady různých kritérií (měřená veličina, princip, typ senzoru, ...).

Následně se práce věnuje rozprostřeným optickým vláknovým sensorům a popisuje rozdělení a principy, na kterých každé zařízení pracuje, jsou zde zobrazeny i bloková schémata jednotlivých přístrojů. Je zmíněno i pro jaké měření jsou měřicí systémy využívány.

V práci je popsán Michelsonův interferometr a detailně rozebrána jeho modifikace v podobě Michelsonova vláknového interferometru. Je zde popsán princip na jakém tento interferometr pracuje, podrobně rozebrány součástky, ze kterých se skládá, tak aby bylo výsledné zapojení funkční a schopno měřit námi požadované veličiny. Michelsonův vláknový interferometr je navrhnout a odsimulován v simulačním prostředí VPIphotonics.

V závěru se věnuji Mach-Zehnderovu vláknovému interferometru, přičemž je popsán jeho princip a podobnost s Michelsonovým vláknovým interferometrem, zobrazeno blokové schéma měřeného zapojení a zobrazeny výsledky měření, které proběhlo na tomto zapojení.

## LITERATURA

- [1] AMBROŽ, Jan. *Měření optických přenosových tras: bakalářská práce* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2009. 69 s. Vedoucí práce byl Ing. Pavel Reichert.
- [2] BEJČEK, Ludvík. *Optoelektronické snímače* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2009. Skripta.
- [3] ČERVENKA, Vladimír. *Návrh metody pro stanovení významů polarizační vlnové disperze: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2007. 74 s. Vedoucí práce byl Ing. Martin Kyselák.
- [4] DUŠEK, Martin a Michal MAZANEC. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů: <http://www.safibra.cz>*. [online]. 29. června 2012. Safibra, s.r.o., Říčany, 2012. Dostupné z URL: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_06\\_1206.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf)
- [5] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 315 s. ISBN 80-01-02057-6.
- [6] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: M. Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [7] GALLO, Martin. *Optické vláknové senzory: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 87 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Münster.
- [8] HÁJEK, Martin a Petr HOMOLEČEK. *Chromatická disperze jednovlnových optických vláken a její měření*. s. 6. Dostupné z URL: <http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/chrom-disperze.pdf>
- [9] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000, xvi, 328, [28] s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [10] HYNEK, Jiří. *Návrh a realizace programu pro měřicí přístroj EXFO FTB-5700: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 47 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Münster, Ph.D.

- [11] HYNEK, Jiří. *Nelineární charakter optického prostředí: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 95 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Münster.
- [12] KOČÍ, R. *Nejistoty interferometrických měření: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 82 s. Vedoucí práce byla Ing. Marie Havlíková, Ph.D.
- [13] LUCKI Michal, BOHAC Leos a Richard ZELENY. *Fiber Optic and Free Space Michelson Interferometer — Principle and Practice, Optical Sensors - New Developments and Practical Applications*, InTech, 2014, ISBN: 978-953-51-1233-4.
- [14] MARRET Doug. *Construction of an All-Fiber-Optic Michelson Interferometer*. 2012, Dostupné z URL: [http://www.conspiracyoflight.com/FO\\_MM/FOMM.html](http://www.conspiracyoflight.com/FO_MM/FOMM.html)
- [15] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna: verze 2.1.3: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. 2006. 167 s. Vedoucí práce Doc. Ing. Vladimír Vašíček CSc.
- [16] NOVÁK, Michal. *Návrh stabilizovaného optického zdroje: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. 30 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [17] STŘÍTESKÁ, Renata. *Moderní metody měření teploty: diplomová práce*. Brno: Masarykova universita Brno. 2010. 96 s. Vedoucí práce byl doc. RNDr. Zdeňek Bochníček, Dr.
- [18] *Interferometric Fiber Optic Sensors*. Zpracoval kolektiv autorů. 2012, 20 s. Dostupné z URL <<http://www.mdpi.com/1424-8220/12/3/2467>>.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

|            |                                     |
|------------|-------------------------------------|
| $E$        | elektrická intenzita                |
| $B$        | magnetická indukce                  |
| $t$        | čas                                 |
| UV         | ultrafialové – ultraviolet          |
| $c$        | rychlost světla                     |
| $n$        | index lomu                          |
| $v$        | rychlost                            |
| $\theta_1$ | vstupní úhel světelného paprsku     |
| $\theta_2$ | výstupní úhel světelného paprsku    |
| $T$        | perioda signálu                     |
| $\omega$   | úhlová rychlost                     |
| $\lambda$  | vlnová délka                        |
| $f$        | frekvence                           |
| $D_j$      | průměr jádra optického vlákna       |
| $D_p$      | průměr pláště optického vlákna      |
| $\Phi_B$   | mezní úhel šíření                   |
| $A$        | útlum                               |
| $P$        | výkon                               |
| $l$        | délka vlákna                        |
| $\beta$    | mezní úhel šíření                   |
| $x_1$      | dráha referenčního paprsku          |
| $x_2$      | dráha měřícího paprsku              |
| $f_{vz}$   | vzorkovací frekvence                |
| $f_{max}$  | maximální frekvenční složka spektra |

|       |   |
|-------|---|
| DS    | posunutí disperze – Dispersion-Shifted  |
| PMD   | polarizační vidová disperze – Polarization Mode Dispersion  |
| SPM   | vlastní fázová modulace – Self-Phase Modulation   |
| XPM   | křížová fázová modulace – Cross-Phase Modulation  |
| FWM   | čtyřvlnné směšování – Four-Wave Mixing  |
| LED   | elektroluminiscenční dioda – Light-Emitting Diode   |
| LD    | laserova dioda – Laser Diode  |
| Laser | Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation   |
| P-N   | polovodičový přechod  |
| GaAs  | arsenid galia   |
| Ge    | germanium   |
| Si    | křemík  |
| OVS   | optický vláknový senzor   |
| OTDR  | Optical Time Domain Reflectometry   |
| BOTDR | OTDR založeno na Brillouinovu roptylu – Brillouin Optical Time Domain Reflectometry                           |
| POTDR | OTDR založeno na polarizační reflektometrii v časové oblasti – Polarization Optical Time Domain Reflectometry |
| MZI   | Mach-Zehnderův interferometr – Mach-Zehnder Interferometer  |
| LPG   | dlouhé periody mřížek – Long Period Gratings  |
| MI    | Michelsonův interferometr – Michelson Interferometer  |
| SI    | Sagnacův interferometr – Sagnac Interferometer  |
| PC    | Polarizační kontrolér – Polarization Controller   |
| FPI   | Fabry-Perotův interferometr – Fabry-Perot Interferometer  |
| PM    | vlákno udržující polarizaci – Polarization-Maintaining  |
| FRM   | Faradayovo otočné zrcadlo – Faraday Rotator Mirror  |

DFB      distribuovaný odezvoový laser – Distributed-Feedback Laser  
CCD      součástka na snímání obrazu – Charge-Coupled Device

# SEZNAM PŘÍLOH

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>A</b> | <b>Obsah přiloženého CD</b>                | <b>63</b> |
| A.1      | Vlastní elektronická verze práce . . . . . | 63        |
| A.2      | Složka Matlab . . . . .                    | 63        |
| A.3      | Složka VPIphotonics . . . . .              | 63        |
| A.4      | Složka Grafy a obrázky . . . . .           | 63        |

## **A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD**

### **A.1 Vlastní elektronická verze práce**

Obsahuje soubor BP.pdf s elektronickou verzí bakalářské práce.

### **A.2 Složka Matlab**

Obsahuje grafy měření MZI vykreslené v prostředí MATLAB:

- MZI\_100Hz.fig
- MZI\_200Hz.fig
- MZI\_300Hz.fig
- MZI\_350Hz.fig
- MZI\_400Hz.fig
- MZI\_600Hz.fig

### **A.3 Složka VPIphotonics**

Obsahuje soubor se simulací Michelsonova vláknového interferometru spustitelnou pouze v programu VPIphotonics:

- Michelson\_interferometer.vtmu

### **A.4 Složka Grafy a obrázky**

Obsahuje obrázky a grafy, které jsou výstupem simulace Michelsonova vláknového interferometru:

- 1km\_vlakno.png
- 10km\_vlakno.png
- 25km\_vlakno.png
- AM\_vystup.png