



# 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

## DETEKCE VIBRACÍ POMOCÍ OPTICKÝCH VLÁKEN

FIBRE OPTIC VIBRATION DETECTION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Monika Vlková**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Dejdar**

**BRNO 2023**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

**Studentka:** Monika Vlková

**ID:** 229233

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## Detekce vibrací pomocí optických vláken

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je teoretický rozbor problematiky šíření paprsku v optickém vlákně. Detailně analyzována bude polarizace světla ve vlákně, vliv působení vibrací na polarizaci. V rámci praktické části práce budou na vybrané trase provedena měření stavu polarizace v optickém vlákně. Jednotlivá měření budou porovnávána a realizována nejméně s dvěma různými AD převodníky a bude porovnána jejich kvalita. Dále bude vytvořen anotovaný dataset pro možnosti automatické detekce událostí, které mohou zapříčinit narušení bezpečnosti objektů s vláknovými spoji.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 26.5.2023

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Dejdar

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

### 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**

Hlavním záměrem této bakalářské práce je měření stavu polarizace při manipulaci s telekomunikační infrastrukturou za účelem zabezpečení fyzické vrstvy. Teoretická část je věnována optickým sensorům. Konkrétněji jsou rozebrány optické senzory vibrací pracující na principech několika metod, mezi které patří OTDR, FBG, interferometrie a polarizace. Dále jsou zde popsány typy polarizovaného světla a možné způsoby polarizace. Praktická část této práce se zabývá měřením stavu polarizace v optickém vlákne. Měření bylo provedeno celkem pro tři různé AD převodníky. Pomocí naměřených dat byla následně porovnána a vyhodnocena jejich kvalita. Výstupem práce je anotovaný dataset pro účely automatické detekce událostí.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Dvojlom, frekvence, optické vlákno, polarizace, senzor, vibrace.

## **ABSTRACT**

The main focus of this bachelor thesis is the measurement of the polarization state during the manipulation of telecommunication infrastructure in order to secure the physical layer. The theoretical part is devoted to optical sensors. More specifically, optical vibration sensors working on the principle of several methods including OTDR, FBG, interferometry and polarization are discussed. The types of polarized light and possible methods of polarization are also described. The practical part of this thesis focuses on the measurement of the polarization state in an optical fiber. Measurements have been performed for a total of three different AD convertors. Using the measured data, the quality of the convertors was then compared and evaluated. The final output of this thesis is an annotated dataset for automatic event detection purposes.

## **KEYWORDS**

Birefringence, frequency, optical fiber, polarization, sensor, vibration.

VLKOVÁ, Monika. *Detekce vibrací pomocí optických vláken*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 50 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Dejdar

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Monika Vlková  
**VUT ID autora:** 229233  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2022/23  
**Téma závěrečné práce:** Detekce vibrací pomocí optických vláken

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma 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 autorky\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Dejdarovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost, ochotu a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Optické senzory</b>	<b>11</b>
1.1 Typy optických sensorových systémů	11
1.2 Optické senzory vibrací	11
1.2.1 Snímače založené na zpětném rozptylu	12
1.2.2 Snímače s Braggovou mřížkou	14
1.2.3 Interferometry	16
1.2.4 Snímače založené na detekci polarizace	17
<b>2 Polarizace</b>	<b>19</b>
2.1 Typy polarizovaného světla	19
2.1.1 Lineárně polarizované světlo	20
2.1.2 Kruhově polarizované světlo	20
2.1.3 Elipticky polarizované světlo	21
2.2 Způsoby polarizace světla	21
2.2.1 Polarizace odrazem a lomem	21
2.2.2 Polarizace průchodem	22
2.2.3 Polarizace rozptylem	24
2.2.4 Polarizace dvojlomem	24
2.2.5 Dichroismus	25
2.3 Interference polarizovaného světla	26
2.3.1 Interference v rovnoběžném svazku	26
2.3.2 Interference ve sbíhavém svazku	27
<b>3 Realizace náměru pro dataset</b>	<b>29</b>
3.1 Trasa měřeného vlákna	29
3.2 Zapojení měřicí sestavy	30
3.3 Naměřená data	31
3.3.1 Měření při otevírání a zavírání poklopu od šachty	31
3.3.2 Měření při poklepech na víko šachty	32
3.3.3 Měření při přímé manipulaci s kabeláží	33
3.3.4 Měření při odpojování a zapojování konektoru měřeného vlákna	33
<b>4 Zpracování naměřených dat</b>	<b>35</b>
4.1 Vznik datasetu	35
4.1.1 Popis prostředí programu	35
4.1.2 Postup vytvoření datasetu	36

4.1.3	Dataset . . . . .	38
4.2	Filtrace šumu . . . . .	38
4.2.1	Spektrogram . . . . .	38
4.2.2	Filtr-horní propust . . . . .	40
4.3	Porovnání kvality použitých AD převodníků . . . . .	42
	<b>Závěr</b>	<b>45</b>
	<b>Literatura</b>	<b>46</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>49</b>

# Seznam obrázků

1.1	OTDR . . . . .	13
1.2	fázové OTDR . . . . .	14
1.3	Braggova mřížka . . . . .	15
1.4	Sagnac . . . . .	16
1.5	Machův–Zehnderův interferometr . . . . .	17
1.6	Michelsonův interferometr . . . . .	17
2.1	Poincarého koule . . . . .	20
2.2	Brewsterův úhel . . . . .	22
2.3	Malusův zákon . . . . .	23
2.4	Interference polarizovaného světla v rovnoběžném svazku . . . . .	27
2.5	Interference polarizovaného světla ve sbíhavém svazku . . . . .	27
3.1	Trasa měřeného optického vlákna . . . . .	29
3.2	Schéma zapojení měřicí sestavy . . . . .	30
3.3	Otevírání a zavírání poklopu . . . . .	31
3.4	Poklepy na víko šachty . . . . .	32
3.5	Poklepy na víko šachty-označení . . . . .	32
3.6	Manipulace s kabeláží . . . . .	33
3.7	Odpojování a zapojování konektoru . . . . .	34
3.8	Odpojování a zapojování konektoru-ukázka . . . . .	34
4.1	Prostředí programu . . . . .	35
4.2	Prostředí programu . . . . .	36
4.3	Poklepy na víko šachty-označení začátku . . . . .	37
4.4	Poklepy na víko šachty-označení ukončení . . . . .	37
4.5	Ukázka datasetu . . . . .	38
4.6	Spektrogram signálu při poklepech na víko šachty . . . . .	39
4.7	Spektrogram signálu při manipulaci s vedením . . . . .	39
4.8	Spektrogram vyfiltrovaných dat pro manipulaci s vedením . . . . .	41
4.9	Spektrogram vyfiltrovaných dat pro poklepy na víko šachty . . . . .	42

# Úvod

Detekce vibrací pomocí optických vláken má díky své vysoké přesnosti a dalším výhodám spoustu praktických využití. Jedním ze sektorů, kde je možné snímání vibrací využít je například detekce pohybujících se osob nebo objektů, dalším příkladem může být ochrana budov nebo zabezpečení různých infrastruktur. Konkrétním odvětvím, jemuž budou věnovány následující stránky, je detekce vibrací na základě snímání polarizace pro účely zabezpečení telekomunikačních infrastruktur na fyzické vrstvě.

Cílem práce je popsat vlastnosti polarizovaného světla a na jejich základě uvažovat výhody a nevýhody použití této metody při detekci vibrací. Praktická část bude věnována měření stavu polarizace při manipulaci s optickým vláknem pro tři různé AD převodníky a vytvoření datasetu pro automatickou detekci událostí.

První kapitola se bude zabývat optickými senzory a základními čtyřmi metodami pro snímání vibrací. Mezi tyto metody patří reflektometrie, metoda založená na Braggových mřížkách, interferometrie a polarizace. V další kapitole bude popsána teorie polarizace a její vlastnosti. Třetí kapitola bude věnována praktické části této práce. Praktická část se bude skládat ze dvou kapitol, z nichž první je samotné měření. Měření bude uskutečněno pro celkem čtyři různé zásahy do telekomunikační infrastruktury na tři různé AD převodníky. V poslední řadě bude z naměřených dat porovnána kvalita použitých převodníků. Pro každý druh zásahu do vedení bude provedeno sto náměrů, z nichž následně dojde k vytvoření anotovaného datasetu.

# 1 Optické senzory

Významný rozkvět optoelektroniky a komunikací pomocí optických vláken v posledních desetiletích přispěl k využití optických vláken i pro jiné funkce než je přenos dat. Výsledkem bylo jejich použití při navrhování snímacích systémů. I přes nespočet výhod mezi které patří vysoká citlivost, šířka frekvenčního pásma, malé rozměry, nízká váha nebo odolnost vůči elektromagnetickému rušení a okolním vlivům, které optické senzory přinášejí, není v dnešní době možné plně nahradit doposud používané elektromechanické senzory. Důvodem tohoto tvrzení je mnohem nižší cena dosavadních senzorů. Uplatnit optické senzory jde ale tam, kde elektromechanické nelze použít například kvůli velkým rozměrům [1, 2].

## 1.1 Typy optických sensorových systémů

Optické senzory lze rozdělit do skupin podle různých kritérií a parametrů [2].

### Na základě umístění senzoru

- Vnitřní optické senzory - snímání probíhá uvnitř optického vlákna.
- Vnější optické senzory - optické vlákno pouze přenáší informaci.

### Na základě typu senzoru

- Bodové senzory.
- Kvazi-distribuované (vícebodové) senzory.
- Distribuované senzory.

### Na základě modulace optického signálu

- Amplitudové.
- Fázové.
- Polarizační.
- S modulací vlnové délky.
- S modulací časového rozšíření impulzu.

### Na základě působení fyzikální veličiny prostřednictvím změn

- Indexu lomu.
- Absorpce.
- Emise/fluorescence.

## 1.2 Optické senzory vibrací

Vibrace jsou přirozeným jevem vyskytujícím se všude kolem nás, jejich snímáním můžeme detekovat různé abnormální jevy, které nás mohou předběžně varovat či informovat o událostech, které budou následovat. Tato kapitola se bude konkrétně zabývat snímáním vibrací pomocí optických senzorů. V dnešní době již existuje

spousta senzorů založených především na indukčních, magnetostrikčních, kapacitních, piezoelektrických vibračních systémech. Jejich nevýhodou ale je, že se nedokáží vyrovnat s rušením způsobeným elektromagnetickým polem. Odolnost proti elektromagnetickému rušení je právě jedna z výhod, kterou optické systémy mají ve svém seznamu. Jako další by se mohla zmínit např. flexibilní délka, nízká hmotnost, jednoduchá instalace nebo bezpečnost přenosu signálu.

Základním principem, na kterém je založeno fungování optických snímačů je modulace vlastností světla. Mezi tyto vlastnosti patří intenzita, stav polarizace, fáze nebo frekvence světla.

Optické systémy snímající vibrace jsou doposud složeny především z bodových, kvazi-distribovaných (vícebodových) nebo distribuovaných senzorů. Bodové senzory jsou založeny na snímání veličin pouze v jednom bodě, používány převážně pro snímání tlaku a teploty. Vícebodové snímače mají více prvků fungujících na stejném principu jako bodové senzory. Distribuované snímače snímají různé veličiny z celého vlákna.

Aby bylo možné snímat vibrace pomocí optických senzorů je nutné použít správnou metodu. Mezi základní moderní metody pro snímání vibrací patří [3]

- metoda založená na reflektometrii (OTDR),
- metoda založená na Braggových mřížkách (FBG),
- metoda založená na interferometrii a
- metoda založená na polarizaci.

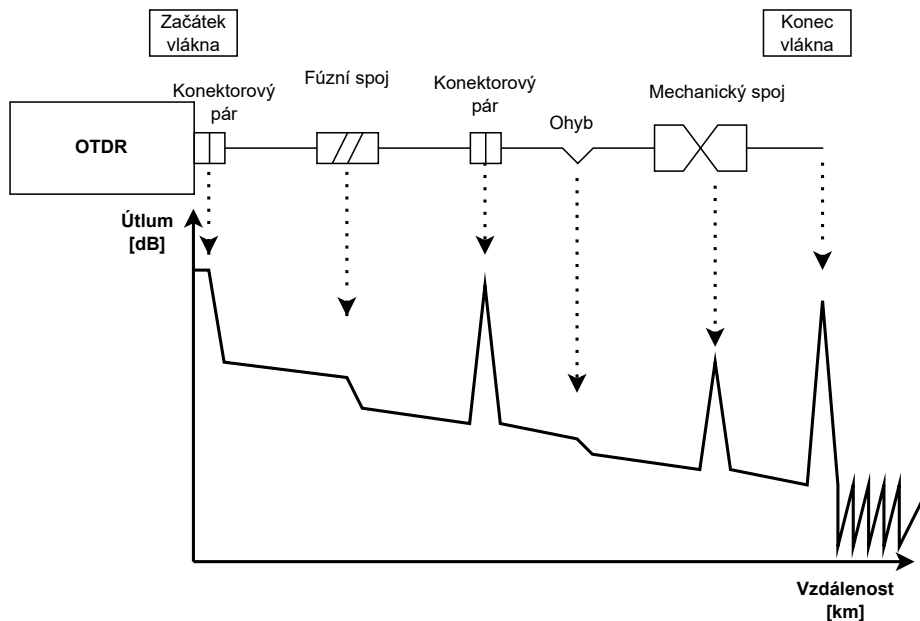
### 1.2.1 Snímače založené na zpětném rozptylu

Vlivem světla proudícím skrz optické vlákno vznikají dva druhy rozptylů. Prvním z nich jsou elastické rozptyly, mezi které patří Rayleighův rozptyl a druhým typem jsou neelastické rozptyly, mezi které můžeme zařadit Brillouinův a Ramanův rozptyl. Příčinou Rayleighova rozptylu jsou mikroskopické změny v hustotě optického vlákna, Brillouinův rozptyl je způsoben zvukovými vlnami a Ramanův rozptyl způsobují dvoufotonové přechody mezi dvěma stacionárními vibračními stavy molekuly. Vzniklé rozptyly se šíří do všech směrů a část z nich i zpět proti směru vyslaného paprsku. Na základě tohoto principu existuje spousta metod pomocí nichž se měří vlastnosti vedení.

Nejnámějším přístrojem je OTDR, zkratka pro Optical Time Domain Reflectometer. Pomocí OTDR je možné detekovat délku optického kabelu, celkový útlum optického kabelu a lokalizovat bod zlomu [4]. Mezi další principy vycházející z OTDR patří např. fázové OTDR ( $\phi$ -OTDR), polarizační OTDR (POTDR) nebo frekvenční OTDR (BOTDA).

## Princip fungování OTDR

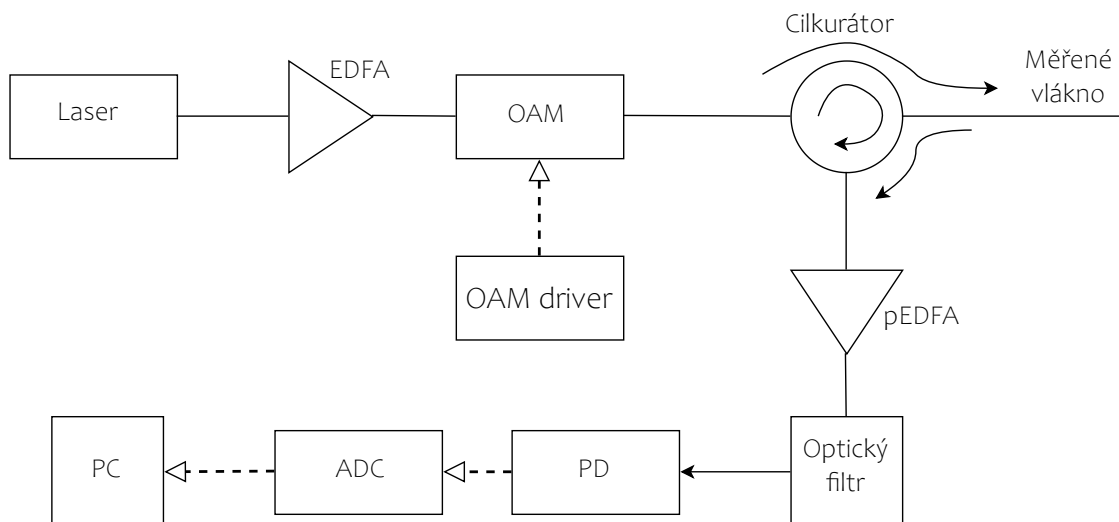
Významnými jevy zajišťující správné fungování přístroje OTDR jsou Rayleighovo rozptýlení a Fresnelův odraz. Fresnelův odraz vzniká v místech se skokovou změnou indexu lomu, mezi taková místa patří např. konektory, sváry, konec vlákna apod. Na základě těchto jevů se vyslaný signál do vlákna vrátí zpět k měřicímu přístroji, ten následně zpětně odraženou energii vyhodnotí v závislosti na čase. Pomocí rychlosti šíření potom dokáže zjistit téměř přesné místo rozptylového centra [5]. Na obrázku 1.1 je zobrazena ukázka analýzy OTDR.



Obr. 1.1: Výsledek analýzy OTDR [6].

## $\Phi$ -OTDR

Fázové OTDR je vhodné pro snímání vibrací právě pro svoji schopnost detekovat akustické nárazy do kabelu. Každá vibrace je doprovázena akustickou vlnou, která zapříčiňuje fázový posuv zpětného rozptýlení a vznik lokálních interferometrů ve vlákne, což se ukazuje na změně amplitudy signálu. Pomocí tohoto přístroje lze detekovat akustické vibrace na vzdálenosti přesahující 50 km. Další schopností je určit téměř přesnou polohu vzruchu a klasifikovat příčinu. Tento systém se využívá zejména pro ochranu objektů, budov a nebo pro monitorování telekomunikačního vedení [2]. Stejně jako OTDR pracuje na základě Rayleighova zpětného rozptýlení. Schéma principu fungování fázového OTDR je možné spatřit na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Schéma principu fungování  $\Phi$ -OTDR [7].

Zdrojem záření je vysoce koherentní laser s úzkou šířkou čáry. Vyslaný paprsek je následně zesílen pomocí vláknového zesilovače (EDFA). Zesílené záření je poté modulováno pomocí akusticko-optického modulátoru na zkušební impulzy, které jsou přes cirkulátor vedeny do měřeného vlákna. Zpětně rozptýlené záření prochází znovu přes cirkulátor, tentokrát ale v opačném směru do zesilovače (p-EDFA). Následně je paprsek veden přes optický filtr, který zajišťuje odstranění superluminiscence (světlo produkované spontánní emisí) z dále zpracovávaného záření. V neposlední řadě vstupuje přes fotodiodu do analogově-digitálního převodníku a posledním krokem je zpracování v osobním počítači [7].

### 1.2.2 Snímače s Braggovou mřížkou

Systémy založené na Braggových mřížkách neboli FBG senzory patří do kategorie bodových snímačů. Jednotlivé body snímání jsou umístěny uvnitř optického vlákna, délka snímání určitého bodu se pohybuje v řádech milimetrů. Existují dva způsoby měření, prvním z nich, tzv. single-end, je zapojení pouze jednoho senzoru do vedení. Druhým typem je sériové zapojení několika senzorů v jednom vlákně. Jednotlivé senzory jsou tvořeny pomocí Braggových mřížek, tyto mřížky zajišťují periodickou změnu indexu lomu optického vlákna, což má za následek periodické změny intenzity a fáze světelného záření. Periodické seskupení mřížek vytváří rozložené Braggovo zrcadlo neboli Distributed Bragg reflector (DBR), sloužící pro odrazení určitých vlnových délek a ponechání ostatních.

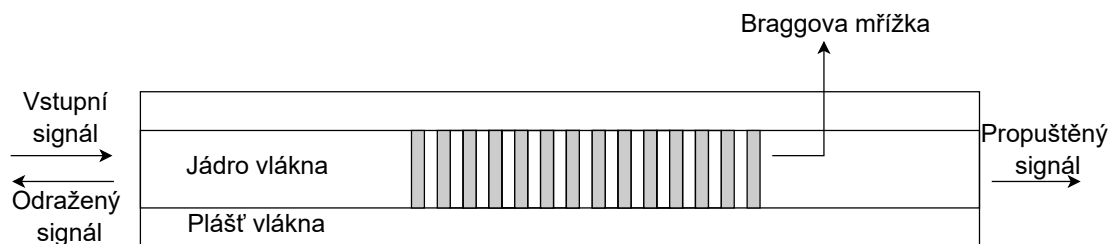
Podstatnou veličinou v problematice týkající se FBG principů je takzvaná Brag-

gova vlnová délka, značící se jako  $\lambda_B$ . Je to hodnota, při které dochází k nejsilnějšímu vzájemnému působení, kdy se světlo odráží s největší efektivitou. Braggova vlnová délka se dá vyjádřit následujícím vztahem

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1.1)$$

kde  $n_{\text{eff}}$  je efektivní index lomu vlákna a  $\Lambda$  značí periodu mřížkování. Změna každé z těchto veličin způsobí posuv vlnové délky Braggovy mřížky. K takové situaci může například dojít při určitém vnějším vzruchu, jako je třeba deformace, změna teploty, napětí, atd.

Celý systém zobrazený na obrázku 1.3 tedy funguje tak, že signál vstupující do optického vlákna doputuje k Braggovým mřížkám. Zde dojde k odrazu signálu s vlnovou délkou, která se blíží hodnotě Braggovy vlnové délky. Zbylé signály jsou přes mřížky propuštěny a šíří se dále optickým vedením. Při určité změně původních podmínek, například zvýšení teploty, dojde k již zmíněnému posuvu Braggovy vlnové délky, což senzor zachytí prostřednictvím zpětně odražených paprsků a jejich vyhodnocením.



Obr. 1.3: Braggova mřížka [8].

Pro zpracování a vyhodnocení signálu získaného z FBG senzoru slouží FBG interogátory. Tyto přístroje obsahují vlastní zdroj širokospektrálního záření a pomocí fotodetektorů nebo CCD snímačů následně vyhodnocují odražené záření od rozloženého Braggova zrcadla.

- V případě FBG interogátoru s CCD snímačem dochází k dopadu odražených paprsků na difrakční mřížku, která způsobí dopad paprsků na různá místa CCD snímače. Jednotlivé polohy dopadu pak demonstrují konkrétní vlnovou délku FBG mřížky. Výhodou této metody vyhodnocování je rychlost, naopak nevýhodnou je špatná přesnost a rozlišení.
- Interogátory s laditelným laserem a fotodetektory jsou schopny koncentrovat energii záření do úzkého svazku, což vede ke zlepšení odstupu signálu od šumu (OSNR). Fotodetektory vyhodnocují dopadající odražené paprsky. V případě, že se vlnová délka záření vyslaného z laseru rovná Braggově vlnové délce, fotodetektor zaznamená záření s maximální intenzitou [8, 9].

### 1.2.3 Interferometry

Senzory snímání vibrací založené na interferometrii fungují na principu zaznamenávání změny fáze optické vlny. Fázové zpoždění výstupní světelné vlny  $\phi$  šířící se jednovidovým optickým vláknem o určité délce  $L_0$  lze spočítat pomocí následujícího vzorce:

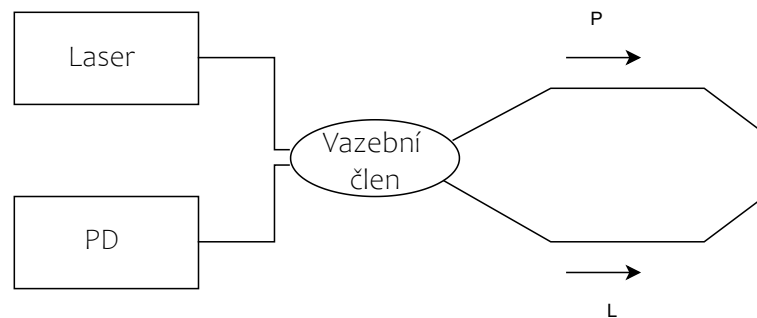
$$\phi = (2\pi n/\lambda_0) L_0 = \beta L_0, \quad (1.2)$$

kde  $\lambda_0$  značí vlnovou délku ve vakuu,  $n$  udává index lomu jádra vlákna a  $\beta$  je koeficient šíření ve vlákně.

Při vnějším vzruchu v podobě vibračního signálu se v místě poruchy vytvoří tlak  $P$ , který následně způsobí změnu délky vlákna, indexu lomu jádra vlákna a vlivem deformačního, fotoelastického a Poissonova efektu se změní i průměr jádra.

Mezi nejčastěji používané interferometry pro detekci vibrací se řadí Sagnac, Machův–Zehnderův a Michelsonův interferometr [3].

#### Sagnac



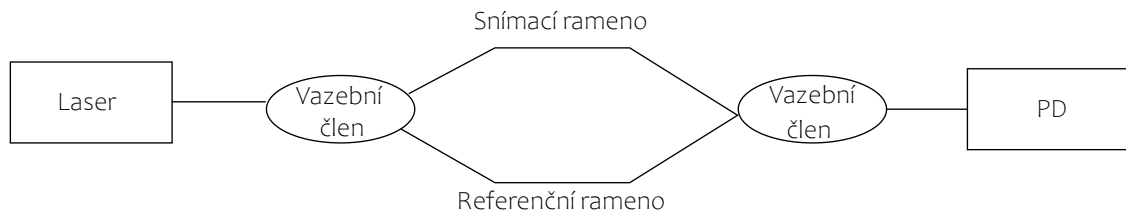
Obr. 1.4: Schéma Sagnac senzoru se smyčkovou konfigurací [3].

Schéma Sagnac senzoru je zobrazeno na obrázku 1.4. Vstup laseru je rozdělen pomocí vazebního členu na dva paprsky s různým směrem šíření. První z paprsků je pravotočivý (P) a druhý levotočivý (L). Následně jsou paprsky opětovně spojeny a pomocí fotodetektoru (PD) převedeny na elektrické výstupy.

#### Machův–Zehnderův interferometr

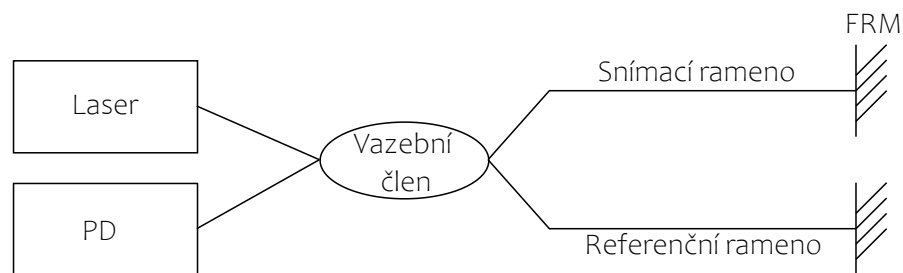
Jak je zobrazeno na obrázku 1.5, světlo získané z laserového zdroje je pomocí vazebního členu rozděleno na dva samostatně se šířící paprsky. Jeden z paprsků je odkloněn od vnějších změn vibrací (referenční rameno) a druhý paprsek je těmto změnám vystaven (snímací rameno). Změny indexu lomu a vlnové délky způsobí

fázové modulace mezi rameny, ty jsou následně převedeny na modulace intenzity a pomocí fotodetektoru dekodovány.



Obr. 1.5: Základní schéma pro Machův-Zehnderův interferometr [3].

### Michelsonův interferometr



Obr. 1.6: Základní schéma pro Michelsonův interferometr [3].

Světlo získané z laserového zdroje je pomocí vazebního členu rozděleno na snímací a referenční rameno. Tyto paprsky jsou následně odraženy od Faradayova rotujícího zrcadla (FRM). Odražené paprsky jsou dále dekodovány pomocí fotodetektoru. Schéma Pro Michaelsonův interferometr je možné pozorovat na obrázku 1.6.

#### 1.2.4 Snímače založené na detekci polarizace

Polarizace je jednou z vlastností optických vln, na základě které lze detekovat různé podněty vzruchů působících na optické vedení, jako je například tlak, akustické vibrace nebo teplotní změny. Pro detekci změn polarizace je nutno použít polarimetr nebo jiné zařízení, které dokáže zaznamenat tyto změny. Polarimetr by měl být schopen pozorovat velmi rychlé polarizační přechodové jevy. Obvykle používanými

zařizeními jsou inline polarimetry založené na snímání polarizačně závislého rozptýleného světla z nakloněných vláknových mřížek nebo balanční fotodetektory umožňující měřit změny polarizace přímo. Cenově dostupnější jsou polarimetry pracující na principu polarizačního děliče paprsku [10, 11].

### Princip detekce polarizace

Detekce polarizace probíhá na principu změn indexu lomu jádra vlákna, tyto změny jsou definovány řeckým písmenem  $\beta$ , nazývaným konstanta šíření. Změny indexu lomu jádra způsobují dvojlom, který může být vnitřní nebo vnější. Vnitřní dvojlom způsobují vlastnosti samotného vlákna, kdežto vnější dvojlom je vyvolán vnějšími faktory. Vyvolaný dvojlom, ať už vnitřní či vnější, je příčinou rozdílné rychlosti šíření záření podél ortogonálních os  $x$  a  $y$ . Následkem toho je polarizační vidová disperze. Fáze uvnitř optického vlákna lze vypočítat pomocí následujícího vzorce:

$$\phi = \beta L, \quad (1.3)$$

kde  $\beta = kn$ ,  $k$  je optické vlnové číslo a dá se vypočítat jako  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $n$  je značka pro efektivní index vedeného módu a  $L$  značí délku vlákna [10, 11].

### Využití

Jedním z odvětví, kde se dá využít snímače založené na detekci polarizace je zajištění bezpečnosti na fyzické vrstvě v infrastrukturách optických sítí. Právě tyto snímače jsou pro zabezpečení vedení na základě detekce vibrací největším favoritem oproti ostatním již zmíněným typům. FBG senzory jsou sice vhodné pro použití v těžko přístupných místech, ale k jejich zapojení je potřeba speciální úprava vlákna. Senzory  $\phi$ -OTDR se jeví jako ideální pro požadované snímání vibrací, ale bohužel i tento typ má své nevýhody, kterými jsou příliš velké rozměry a vysoká pořizovací cena. Posledním typem snímačů pro detekci vibrací zmíněným v této práci jsou senzory založené na interferometrii, konkrétně Sagnac, Machův–Zehnderův a Michelsonův interferometr. Mezi hlavní výhody těchto sensorů patří citlivost, která se při ochraně proti neoprávněné manipulaci stává spíše nevýhodou. Dalším důvodem, proč je nevhodné použít interferometry je nutnost použít dvě vlákna [11].

Polarimetry jsou vhodným řešením díky nepříliš velké citlivosti, což je pro zabezpečení vedení proti neoprávněné manipulaci velkou výhodou. Nemají tak možnost zaznamenávat veškeré vzruchy, ale jen změny polarizace způsobené přímou manipulací s vedením. Dalším pozitivním faktorem je rozumná cena a snadná instalace do již existujícího vedení [10, 11].

Snímače založené na polarizaci se kromě detekce vibrací dají využít i pro měření například deformace, tlaku, teploty a magnetického pole [12].

## 2 Polarizace

Světlo je definováno jako elektromagnetické vlnění, které má jak částicové tak vlnové vlastnosti. Světelná energie je přenášena pomocí fotonů, což jsou elementární částice popisující kvantum elektromagnetické energie. Čím větší je frekvence šířící se světelné vlny, tím větší je energie fotonu.

Elektromagnetické vlnění je definováno jako kmitání ve směrech kolmých na trajektorii šíření elektromagnetické vlny. Obsahuje dvě složky, elektrickou a magnetickou. Vektor elektrické složky se značí  $\vec{E}$  a je kolmý na vektor magnetické složky značící se  $\vec{B}$  [13]. Elektromagnetickou vlnu lze popsat jako spojení dvou kolmých a lineárně polarizovaných složek podél osy  $x$  a  $y$ , jejichž amplitudy a počáteční fáze jsou v následujícím vztahu k intenzitě:

$$E_x = a_x \cos(\omega t - kz + \delta_x), \quad (2.1)$$

$$E_y = a_y \cos(\omega t - kz + \delta_y), \quad (2.2)$$

kde  $k$  je dáno vztahem  $k = (2\pi/\lambda_0)n$ ,  $n$  značí index lomu,  $\lambda_0$  je vlnová délka,  $z$  definuje směr šíření,  $a$  je amplituda a  $\delta_0$  udává počáteční fázi [14].

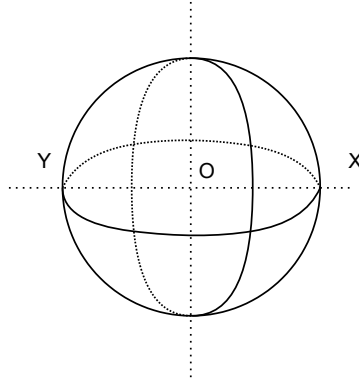
### 2.1 Typy polarizovaného světla

Při detailnějším rozboru přirozeného světla, jako je například sluneční záření, plamen svíčky nebo elektrická žárovka, lze zjistit, že každý kmitající atom sice vyzařuje lineárně polarizované světlo, ale směr vyzařované energie každého z atomů nebo molekul je různý. To znamená, že jednotlivé vibrace nelze sčítat do jediného lineárně polarizovaného signálu, a proto se přirozené světlo charakterizuje jako nepolarizované [13]. Polarizované světlo pouhým lidským okem nelze rozeznat, ale při detailnějším rozboru se dá zjistit, že oproti nepolarizovanému světlu, kde se vektor elektrické složky  $\vec{E}$  nahodile mění, má polarizované světlo tento vektor o stálé velikosti nebo kmitající pouze v jedné rovině.

V závislosti na orientaci elektrického pole rozlišujeme tři typy polarizace

- lineární polarizace,
- kruhová polarizace a
- eliptická polarizace.

Jednotlivé druhy polarizace lze snadno znázornit pomocí Poincarého koule (obr. 2.1). Body ležící na rovníku (např. X, Y) znázorňují lineárně polarizované světlo. Kruhově polarizovanému světlu náleží body na pólech koule a elipticky polarizovanému světlu náleží body pod a nebo nad rovníkem.



Obr. 2.1: Poincarého koule [15].

### 2.1.1 Lineárně polarizované světlo

Základním znakem lineárně polarizovaného světla je vektor šíření elektrického pole kmitající stále v jedné přímce. Rovina, ve které tento vektor kmitá se nazývá kmitová rovina, rovina k ní kolmá se nazývá polarizační rovina [16]. Skutečnost, že  $\vec{E}$  vibruje po trajektorii přímky lze vyjádřit i matematicky. Pokud fázový rozdíl je roven nule nebo  $\pi$  potom úpravou vztahů 2.1 a 2.2 uvedených pár odstavců výše se dá získat následující rovnice:

$$E_y = \pm \frac{E_{0y}}{E_{0x}} E_x. \quad (2.3)$$

Už na první pohled lze snadno určit, že se jedná o rovnici přímky [17]. Rozlišujeme dva typy lineárně polarizovaného světla. Prvním z nich je vertikálně lineárně polarizované světlo, jehož elektrické vektory kmitají ve vertikální rovině a směr šíření vlny je kolmý k povrchu země. Druhým typem je horizontálně lineárně polarizované světlo, jehož elektrický vektor kmitá ve vodorovné rovině a směr šíření vlny je rovnoběžný k povrchu země [16].

### 2.1.2 Kruhově polarizované světlo

Pro kruhově polarizované světlo jsou charakteristické konce vektoru  $\vec{E}$  opisující kruh. Velikost vektoru šíření elektrického pole je konstantní, dochází pouze ke změně směru šíření [16]. Fázový rozdíl vektorů je o velikosti  $\pm\pi/2$  a amplitudy jednotlivých složek se rovnají  $E_{0x} = E_{0y}$ . Úpravou vztahů 2.1 a 2.2 se lze dopracovat k následující rovnici:

$$E_x^2 + E_y^2 = E_{0x}^2. \quad (2.4)$$

Zmíněná rovnice je ve tvaru rovnice kružnice. V závislosti na směru otáčení se rozlišuje pravotočivě a levotočivě polarizované světlo. Pro fázový rozdíl rovnající se  $\pi/2$  nebo  $-3\pi/2$  dochází k rotaci ve směru hodinových ručiček a jedná se tedy o

pravotočivě polarizované světlo. Naopak levotočivě polarizované světlo nastane při fázovém rozdílu  $-\pi/2$  nebo  $3\pi/2$  [17].

### 2.1.3 Elipticky polarizované světlo

Eliptická polarizace je označována jako obecný typ polarizace, lineárně a kruhově polarizované světlo lze tedy označit jako její speciální případy.

Při eliptické polarizaci konce vektoru  $\vec{E}$  opisují elipsu. Mění se jak velikost amplitudy, tak i směr šíření vektorů elektrického pole [18]. Fázový rozdíl u elipticky polarizovaného světla je obecný, to znamená, že se nerovná násobkům  $\pi/2$  a velikosti amplitud jednotlivých složek se nerovnají  $E_{0x} \neq E_{0y}$ . Na základě těchto podmínek lze upravit základní vztahy 2.1 a 2.2 uvedené na začátku kapitoly a získat následující rovnici:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} = 1. \quad (2.5)$$

Jedná se o rovnici elipsy a stejně jako tomu bylo u kruhově polarizovaného světla, tak i u eliptické polarizace lze rozlišit dva typy polarizace na základě směru otáčení. Fázový rozdíl v rozmezí  $0 < \Delta\delta < \pi/2$  nebo  $\pi/2 < \Delta\delta < \pi$  udává pravotočivou eliptickou polarizaci, naopak při fázovém rozdílu v rozmezí  $\pi < \Delta\delta < 3\pi/2$  nebo  $3\pi/2 < \Delta\delta < 0$  dochází k levotočivé eliptické polarizaci [17].

## 2.2 Způsoby polarizace světla

K tomu, aby se z nepolarizovaného světla stalo světlo polarizované, je potřeba použít jednu z následujících metod [17].

- Polarizace odrazem a lomem.
- Polarizace průchodem.
- Polarizace rozptylem.
- Polarizace dvojlomem.
- Dichroismus.

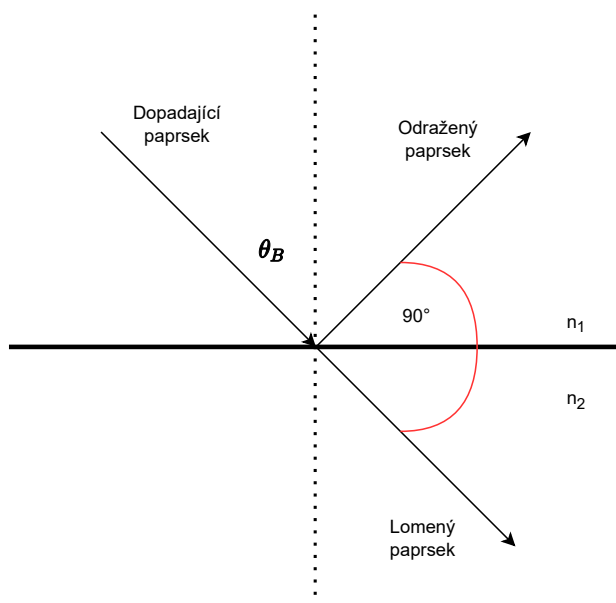
### 2.2.1 Polarizace odrazem a lomem

Dopadem a následným odrazem nepolarizovaného světla od rozhraní dvou prostředí se světlo lineárně polarizuje. Vektor šíření elektrického pole  $\vec{E}$  uvnitř odraženého paprsku kmitá kolmo k rovině dopadu, to znamená rovnoměrně s rovinou rozhraní. Polarizace odraženého světla je pouze částečná, k úplné polarizaci dojde pouze při konkrétním úhlu dopadu. Tento úhel se značí  $\theta_B$  a závisí na indexu lomu uvažovaných dvou prostředí. Závislost indexu lomu na vlnové délce způsobuje, že pro různé vlnové délky se tento konkrétní úhel liší [19]. Hodnotu požadovaného úhlu pro úplnou

polarizaci lze vypočítat pomocí Brewsterova zákona, jehož znění je následující: K maximální polarizaci dojde pokud nepolarizované světlo dopadne na rovinu rozhraní v takovém úhlu, kdy lomený paprsek s paprskem odraženým svírá úhel o velikosti  $90^\circ$  [20]. Zákon lze vyjádřit níže uvedenou rovnicí

$$\theta_B = \arctan \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.6)$$

kde  $n_1$  značí index lomu prostředí, ve kterém se nepolarizované světlo šíří a  $n_2$  reprezentuje index lomu prostředí, od kterého se světlo odráží [21]. Na obrázku 2.2 je zobrazen Brewsterův úhel.



Obr. 2.2: Brewsterův úhel [19].

Při polarizaci lomem dochází pouze k částečné polarizaci. Vektor elektrické intenzity  $\vec{E}$  kmitá rovnoběžně s rovinou dopadu, tato skutečnost potvrzuje, že vektor elektrické intenzity odraženého paprsku a lomeného paprsku jsou na sebe kolmé. Většího stupně polarizace lomem lze dosáhnout pouze vícečetným průchodem stejným prostředím [22].

## 2.2.2 Polarizace průchodem

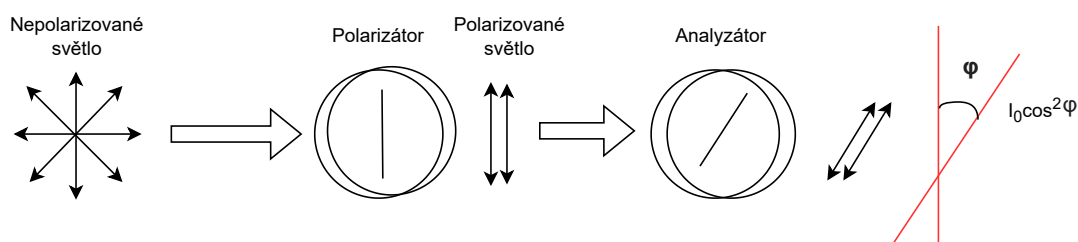
U této metody hraje klíčovou roli polaroid, což je optický přípravek pracující na bázi filtru. Uvnitř polaroidu jsou rovnoběžně uspořádané podlouhlé molekuly. V praxi se například používá perjodid síranu chininového. Při polarizaci průchodem tedy nepolarizované světlo prochází polaroidem, který propustí každou složku obsahující

vektor elektrické intenzity orientovaný ve směru polarizační roviny, což je rovina rovnoběžná s uspořádáním molekul v polaroidu, bez utlumení. Naopak světlo s vektorem  $\vec{E}$  kolmým na směr polarizační roviny přes polaroid neprojde vůbec. Jelikož je pro lidské oko polarizované světlo od nepolarizovaného nerozeznatelné, používají se dva za sebou postavené polarizátory, přičemž druhý z nich se nazývá analyzátor. Analyzátor slouží k odhalení polarizační roviny, ve které leží polarizovaná světelná vlna. Velikost amplitudy kmitů elektrické intenzity prošlých paprsků přes polarizátor lze vypočítat podle následujícího vzorce:

$$E_p = E_0 \cos(\alpha), \quad (2.7)$$

kde  $\alpha$  značí úhel mezi polarizačním směrem polarizátoru a směrem kmitů elektrického pole  $E$  [23].

### Malusův zákon



Obr. 2.3: Ukázka Malusova zákona [23].

Na obrázku 2.3 je možné vidět dva polarizátory, přičemž jeden z nich pracuje jako analyzátor. Nepolarizované světlo nejprve prochází přes první polarizátor (P), kde dochází k polarizaci. Dále se již polarizované světlo šíří k analyzátoru (A), jehož otáčením je možné regulovat intenzitu procházejícího světla. Pokud je polarizační rovina analyzátoru natočena ve stejném směru jako polarizační rovina polarizátoru projde výsledný paprsek s největší možnou intenzitou. Naopak pokud je polarizační rovina analyzátoru kolmá na roviny polarizátoru, žádné světlo přes analyzátor neprojde, výsledný paprsek tedy bude mít intenzitu  $I=0$ . Intenzitu záření, které prošlo analyzátozem, pro libovolný úhel mezi polarizačními rovinami obou polarizátorů lze vypočítat pomocí Malusova zákona, jehož podoba je následující:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi. \quad (2.8)$$

Úhel, který svírají polarizační roviny polarizátoru a analyzátoru je označen  $\varphi$ ,  $I_0$  je maximální intenzita, tzn. intenzita při  $\varphi = 0^\circ$  [23].

Uplatnit Malusův zákon se dá při výrobě polaroidů využívajících se pro regulaci intenzity světla. Mezi tyto nástroje patří například sluneční brýle, okenní skla nebo také fotografické či 3D filmové kamery.

### 2.2.3 Polarizace rozptylem

Polarizace rozptylem je při detailnějším pozorování kombinací polarizace odrazem nebo ohybem od malých částic. Při šíření světla v kalnějším prostředí dochází k mnohočetným odrazům a ohybům od atomů tvořících prostředí, díky tomu se světlo rozptyluje a dochází ke kmitání vektoru elektrické intenzity v jedné rovině. Polarizace tímto způsobem může mít různou úroveň, závisí na velikosti částic v prostředí, ve kterém se světlo šíří. V prostředí s částicemi větších velikostí je polarizace slabší, než při průchodu prostředím s částicemi menšího průměru. Této skutečnosti lze například využít v chemických laboratořích při práci s roztoky.

### 2.2.4 Polarizace dvojlomem

Prostředí, ve kterém se světlo šíří ve všech směrech stejnou rychlostí se nazývá izotropní. Známými izotropními prostředími je například sklo, většina kapalin a krystaly krychlových soustav. Existují i prostředí ve kterých se světlo šíří v různých směrech různou rychlostí, takovým se přiřazuje název anizotropní prostředí. Nejznámějším anizotropním krystalem je islandský vápenec. Záření dopadající na stěnu takového krystalu se rozdělí na dva světelné svazky šířící se do dvou různých směrů. Tento jev lze pozorovat například při pohledu na natištěnou přímku nebo text na papíře, přes tento krystal. Rozštěpení světla na dva svazky způsobí, že lidské oko uvidí natištěnou přímku či text dvojité. Tento jev se nazývá dvojlom světla. Známým pojmem je také umělý dvojlom, takového dvojlomu lze dosáhnout pokud z izotropního prostředí pomocí mechanického, magnetického nebo elektrického působení uměle vytvoříme anizotropní prostředí [22].

Dvojlomu světla jsou kromě islandského vápence schopny i jiné krystalické látky. U těchto látek, ale dvojlom není tak výrazný. Při průchodu světelného záření některými krystaly nedochází ke štěpení světelného paprsku do všech směrů. Pokud existuje jeden směr, kterým se světelné svazky v určité krystalické látce nešíří, nazývá se tato látka jednoosá. Pro dvojosé krystalické látky existují dva směry, ve kterých se rozštěpené paprsky nešíří. Mezi jednoosé krystaly patří čtverečné a šesterečné soustavy, například křemen nebo již zmíněný islandský vápenec. Mezi dvojosé se řadí kosočtverečné, jednoklonné a trojklonné soustavy [24]. Při dopadu světelného paprsku na krystal ve směru optické osy, což je rovina, jejíž směrem se světelné svazky nešíří, k dvojlomu nedojde. Konkrétně u islandského vápence tuto rovinu tvoří tělesová úhlopříčka klence spojující vrcholy s tupými úhly.

Světelné svazky, na které se záření procházející krystalem rozdělí mají své názvy. První z nich se nazývá řádný paprsek a značí se písmenem  $o$  (*ordinarius*), tento paprsek se šíří anizotropním prostředím stejně jako v izotropním, splňuje zákon lomu, to znamená, že se šíří stejnou rychlostí ve všech směrech. Druhým paprskem je paprsek mimořádný značený písmenem  $e$  (*extraordinarius*), šíření tohoto paprsku již nesplňuje zákon lomu a jeho rychlost šíření je v různých směrech různá. Roviny polarizace řádného a mimořádného paprsku jsou na sebe kolmé, řádný paprsek má vektor elektrické intenzity kolmý k optické ose a mimořádný paprsek má tento vektor rovnoběžný s optickou osou. Pomocí následujících vzorců lze vypočítat index lomu jednotlivých paprsků. Pro řádný paprsek platí:

$$n_o = \frac{c}{v_{\perp}}, \quad (2.9)$$

pro mimořádný paprsek platí:

$$n_e = \frac{c}{v_{\parallel}}. \quad (2.10)$$

Ve vztahu pro výpočet indexu lomu řádného paprsku je  $v_{\perp}$  značka pro rychlost šíření tohoto paprsku a stejně tak ve druhém vztahu je  $v_{\parallel}$  značka pro rychlost šíření mimořádného paprsku.  $c$  značí v obou vztazích rychlost šíření světla ve vakuu.

Jednoosé krystaly se dělí na dva typy, jedním z nich je negativní jednoosý krystal, druhým je pozitivní jednoosý krystal. Či se jedná o negativní nebo pozitivní krystal lze určit pomocí míry dvojlomu, která se spočítá, jako rozdíl indexů lomu řádného a mimořádného paprsku, následujícím vzorcem

$$\Delta n = n_e - n_o. \quad (2.11)$$

Pro negativní jednoosý krystal platí, že rychlost šíření mimořádného paprsku je větší než řádného, tudíž výsledný rozdíl  $\Delta n$  výjde záporný. Naopak u pozitivních jednoosých krystalů je rychlost šíření mimořádného paprsku nižší než řádného, z toho vyplývá, že výsledný rozdíl indexů lomu bude pozitivní. Tyto již zmíněné skutečnosti lze znázornit na náčrtu elementárních vlnoploch nebo na Poincarého kouli. Pro negativní jednoosý krystal platí, že vektor elektrického pole  $\vec{E}$  se šíří rychleji, a proto se směr optické osy nazývá rychlá osa a směr kolmý k optické ose pomalá osa. Pro pozitivní jednoosý krystal se vektor elektrického pole  $\vec{E}$  šíří pomaleji, směr optické osy je tedy pomalá osa a směr kolmý na optickou osu se nazývá rychlá osa. Příkladem negativního jednoosého krystalu je například kalcit nebo turmalín, mezi pozitivní jednoosé krystaly se řadí například křemen nebo rutil ( $\text{TiO}_2$ ) [25].

## 2.2.5 Dichroismus

Dichroismus neboli polarizace absorpcí spočívá v absorbování jednoho světelného svazku získaného ze štěpení při průchodu světelného záření anizotropním prostře-

dím. Světlo procházející anizotropním prostředím může být pohlceno s různou intenzitou. Dojde-li k pohlcení téměř veškeré intenzity jednoho svazku a druhý prostředím projde zcela bez zeslabení, lze o získaném paprsku říci, že je lineárně polarizovaný. Příkladem takového anizotropního prostředí je krystal turmalín [26].

## 2.3 Interference polarizovaného světla

Pojmem interference se rozumí vzájemné prolínání a ovlivňování světelných vln. Pomocí interference lze dokázat, že světlo má vlnové vlastnosti. Prolínáním jednotlivých světelných vln dochází k vzájemnému zesilování či zeslabování, což vede k vytváření interferenčních obrazců. Důležitou podmínkou pro vznik interferenčního obrazce je vzájemná koherence. Pokud jsou dvě světelné vlny koherentní rozumí se tím, že se šíří se stejnou frekvencí a jejich fázový rozdíl se v daném místě nemění. Běžné zdroje světla jako je například slunce nebo žárovka nejsou schopny vytvořit interferenční obrazce, jelikož nesplňují podmínku koherence. Jednotlivé atomy tvořící takové záření chaoticky vyzařují světlo o různé frekvenci. Zdrojem vzájemně koherentních paprsků může být například laser nebo bodový zdroj světla.

Z teorie koherence a poznatků o běžných zdrojích světla vyplývají tři zákony pro interferenci polarizovaného světla.

- Dva světelné svazky lineárně polarizované ve dvou navzájem kolmých rovinách nejsou schopny interference.
- Dva lineárně polarizované světelné svazky pocházející z koherentních zdrojů jsou schopny interference stejně jako přirozené světlo.
- Dva lineárně polarizované světelné svazky pocházející ze dvou navzájem kolmých složek přirozeného světla nejsou schopny interference ani v případě ztožnění jejich rovin polarizace.

Interference polarizovaného světla vzniká v anizotropním prostředí, jsou dva typy takové interference. Jedním z nich je interference, ke které dochází při šíření dvou rovnoběžných paprsků, druhý jev interference nastane při šíření dvou sbíhavých paprsků.

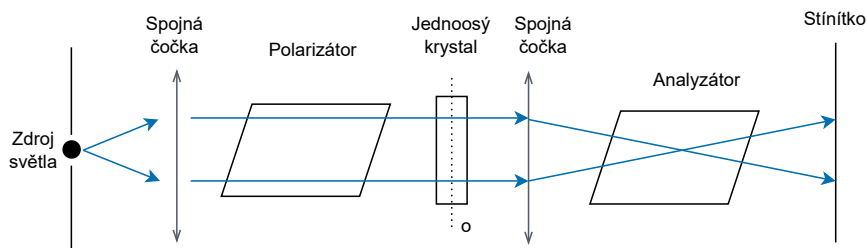
### 2.3.1 Interference v rovnoběžném svazku

Schéma pro pozorování interference polarizovaného světla v rovnoběžném svazku je zobrazeno na obrázku 2.4. Sbíhavé světelné svazky šířící se ze zdroje světla jsou pomocí spojné čočky změněny na rovnoběžné a následně lineárně polarizované polarizátorem. Polarizované světlo se dále šíří přes jednoosý krystal, jehož optická osa je rovnoběžná s přední stěnou krystalu. Důsledkem kolmého dopadu paprsků na krystal vznikají dvě vlnění polarizované v navzájem kolmých rovinách. Důsledkem

stejného směru a rozdílné rychlosti šíření vzniká mezi paprsky fázový rozdíl daný vztahem

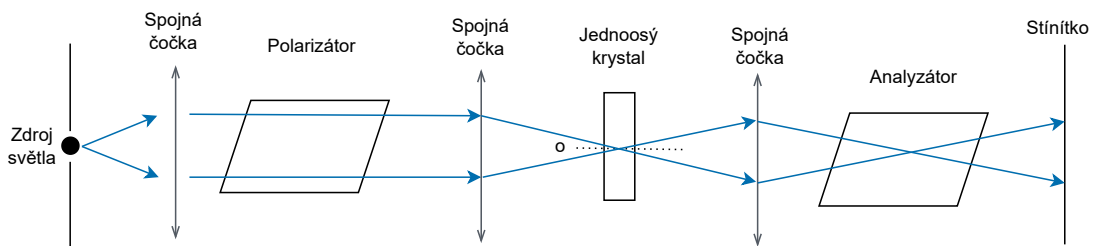
$$\varphi = \frac{2\pi d(n_o - n_e)}{\lambda}, \quad (2.12)$$

kde  $d$  je tloušťka destičky krystalu,  $n_o$  a  $n_e$  značí indexy řádného a mimořádného paprsku a  $\lambda$  je vlnová délka. Rovnoběžné paprsky získané průchodem krystalu jsou pomocí spojné čočky změněny na sbíhavé a následně vedeny přes analyzátor a zobrazeny na stínítku. Jelikož analyzátor propouští pouze průměty amplitud obou vlnění do jedné roviny a obě vlnění vznikly ze stejného lineárně polarizovaného světla vzniká na stínítku interferenční obrazec.



Obr. 2.4: Schéma pro pozorování interference polarizovaného světla v rovnoběžném svazku [15].

### 2.3.2 Interference ve sbíhavém svazku



Obr. 2.5: Schéma pro pozorování interference polarizovaného světla ve sbíhavém svazku [15].

Jak je vidět na obrázku 2.5, sbíhavé světelné svazky šířící se ze zdroje světla jsou pomocí spojné čočky změněny na rovnoběžné a následně lineárně polarizované polarizátorem. Přes další spojnou čočku se světelné paprsky šíří ke krystalu, jehož optická osa je totožná s osou kuželu procházejícího světla. Světelný paprsek dopadající na krystal svírá s jeho optickou osou určitý úhel  $\psi$ , výsledný fázový rozdíl

vzniklých dvou vlnění lze tedy vypočítat pomocí následujícího vzorce:

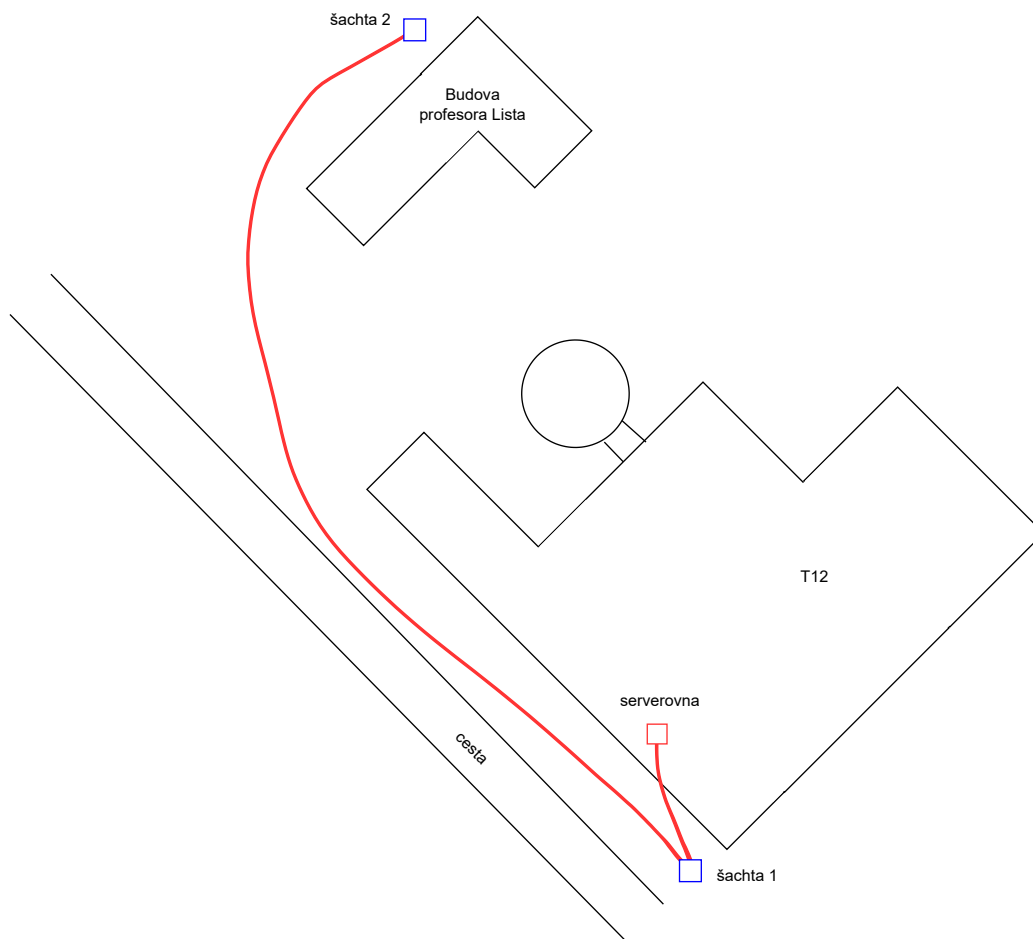
$$\varphi = 2\pi d \frac{n_1 - n_2}{\lambda \cos \psi}, \quad (2.13)$$

kde  $n_1$  a  $n_2$  jsou indexy lomu řádného a mimořádného paprsku a  $\frac{d}{\cos \psi}$  značí dráhu, kterou světelný paprsek zdolá průchodem destičky krystalu o tloušťce  $d$ . Výsledný interferenční obrazec zobrazující se na stínítku má podobu střídavě tmavých a světlých kroužků pro monochromatické světlo a barevných kroužků pro bílé světlo [15].

### 3 Realizace náměru pro dataset

Následující odstavce se zabývají snímáním polarizovaného světla za účelem rozpoznat jednotlivé manipulace s telekomunikační infrastrukturou. Jelikož po délce trasy potenciálně zabezpečeného vedení se vyskytuje spousta jevů, které by mohly ovlivňovat měřicí systém, byla zvolena metoda pracující na základě snímání polarizace. Důvodem této volby je potřeba izolovat snímání pouze na přímou manipulaci s kabeláží, k čemuž je právě tato metoda, díky své nepříliš vysoké citlivosti, nejvhodnější. Aby bylo možné detekovat narušení již instalované telekomunikační infrastruktury, bylo potřeba provést několik měření, na jejichž základě bude zabezpečovací systém schopen rozeznat manipulaci s vedením.

#### 3.1 Trasa měřeného vlákna

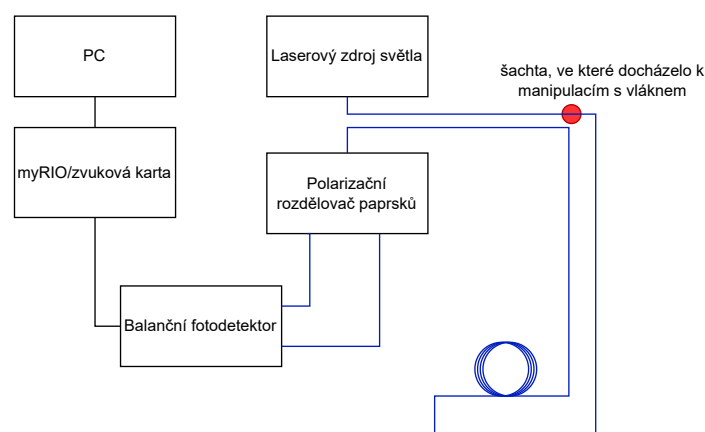


Obr. 3.1: Trasa měřeného optického vlákna.

Trasa měřeného vlákna je zobrazena na obrázku 3.1. Měření se provádělo na optickém vlákně umístěném v blízkosti Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT. Počátek měřené trasy se nachází v serverovně, kde je také zapojen měřicí systém, dále pokračuje skrz celou budovu ven a zase zpět. Serverovna se nachází v pátém patře budovy, vlákno odtud prochází stropem přes celou chodbu a následně podél svislé stoupačky do nižších pater. Z budovy je vlákno vyvedeno ven a pod úroveň terénu směřuje do šachty umožňující přístup k vedení (šachta 1) a následně podél cesty kolem budovy profesora Lista do šachty 2, kde je stočeno a vede stejnou trasou zpět do serverovny.

### 3.2 Zapojení měřicí sestavy

Měření bylo uskutečněno pro celkem tři různé přípravky určené pro sběr dat. Prvním použitým přípravkem je myRIO 1900. Jedná se o rekonfigurovatelné I/O zařízení s vstupy a výstupy na obou stranách ve formě MXP a MPS konektorů. Vstupy a výstupy jsou jak analogové, tak i digitální. Zařízení je dále vybaveno dvoujádrovým procesorem ARM Cortex-A9 a programovatelným obvodem FPGA s 28 000 logickými bloky. Zařízení lze programovat prostřednictvím LabVIEW nebo jazyka C. Hlavní výhodou přípravku myRIO 1900 jsou malé rozměry a přijatelná cena. Mezi důležité parametry přípravku patří vzorkovací frekvence, která činí 500 kS/s a rozlišení 12 b [27]. Dalším použitým přípravkem pro následné porovnání kvality byla zvuková karta Komplete Audio 2 od výrobce Native Instruments se vzorkovací frekvencí 192 kHz a rozlišením 24 b [28]. Třetím přípravkem, pomocí něhož bylo uskutečněno měření a vytvořen dataset, je zvuková karta Icusbaudio 2D od výrobce Startech. Vzorkovací frekvence této karty činí 96 kHz a rozlišení 24 b [29].



Obr. 3.2: Schéma zapojení měřicí sestavy pro snímání vibrací na základě polarizace.

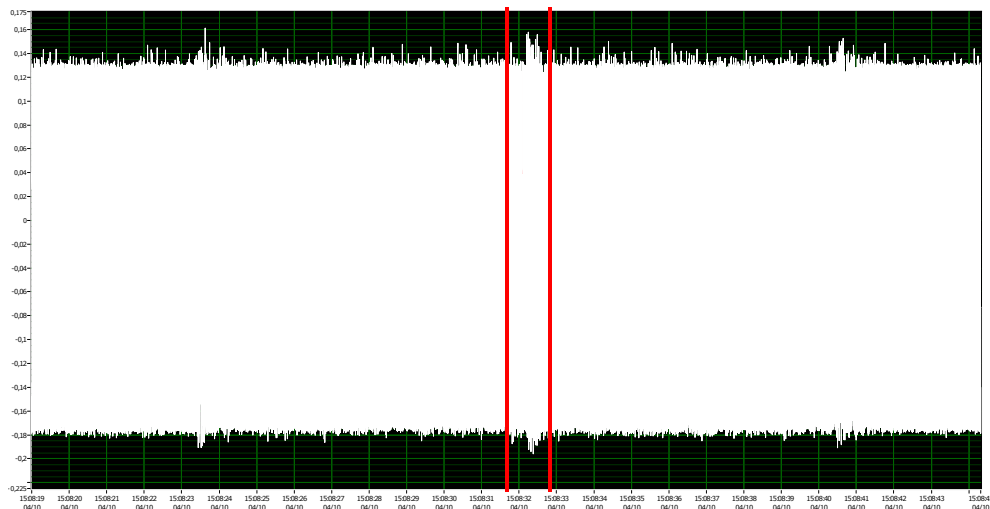
Jak je ukázáno na schématu 3.2, systém určený k měření změn polarizace ve vlákně se skládá ze dvou částí. První z nich je určená ke zpracování naměřených dat (počítač, myRIO/zvuková karta) a druhou část tvoří laserový zdroj, polarizační dělič svazku a balanční fotodetektor. Optické vlákno je znázorněno pomocí modré barvy, černá propojení označují jiné druhy signálu. Červená tečka znázorňuje místo prováděných měření (šachta 1 na obrázku 3.1).

### 3.3 Naměřená data

Provedeny byly celkem čtyři druhy měření. Stav polarizace byl snímán pro otevírání a zavírání šachty určené pro zajištění přístupu obsluhy k vedení, dále pro poklepy na víko šachty, přímou manipulaci s kabeláží a nakonec pro zapojování a vypořádání konektoru optického vlákna v serverovně. Pro každé z uvedených druhů měření bylo provedeno celkem sto náměrů pro každý AD převodník.

#### 3.3.1 Měření při otevírání a zavírání poklopu od šachty

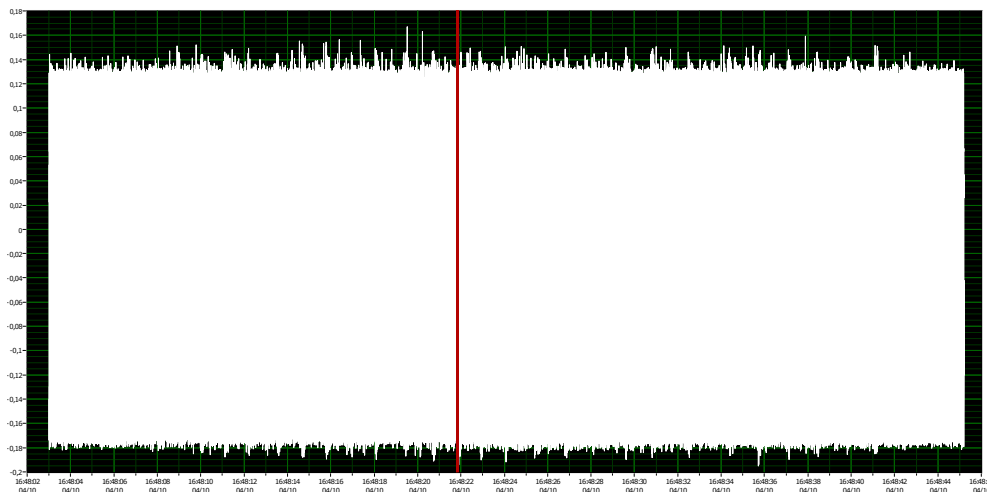
Na obrázku 3.3 je možné pozorovat změnu polarizace při prudším přiklopení poklopu od šachty (označeno červenými přímkami). Při otevírání poklopu nedošlo k výrazným výkyvům polarizace, stejně tak při nedůrazném přiklopení. Jednotlivé úkony prováděné během měření nebyly jednoznačně rozeznatelné, tudíž se toto měření stalo neadekvátním pro následné použití.



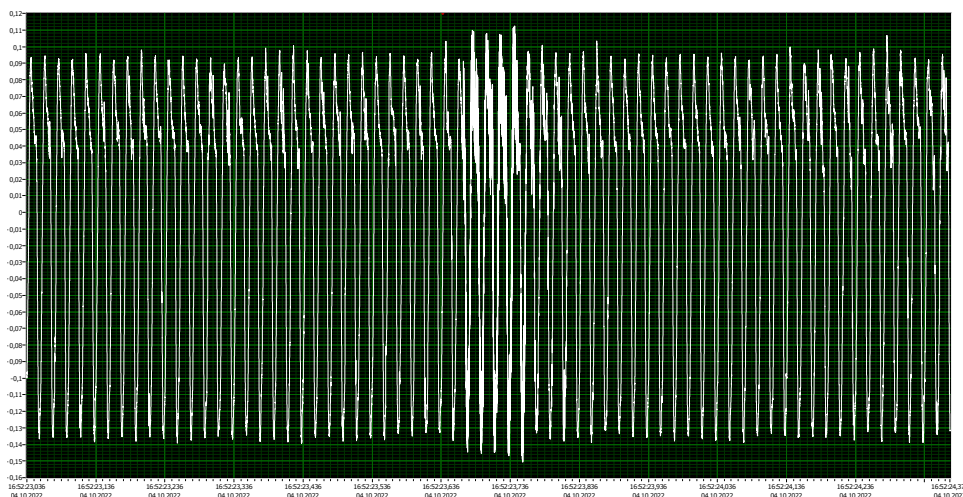
Obr. 3.3: Výsledný graf pro měření při otevírání a zavírání poklopu.

### 3.3.2 Měření při poklepech na víko šachty

Oproti prvnímu měření byly výsledky znatelnější a jednotlivé poklepy se pomocí kurzoru daly označit. Na obrázku číslo 3.4 je možné vidět graf pro změnu polarizace během celého měření. Na první pohled jsou jednotlivé úkony nerozeznatelné, ale při přiblížení, jak ukazuje obrázek 3.5, je možné pozorovat výrazné změny polarizace. Červená přímka je kurzor, pomocí něhož se označovaly souřadnice pro dataset.



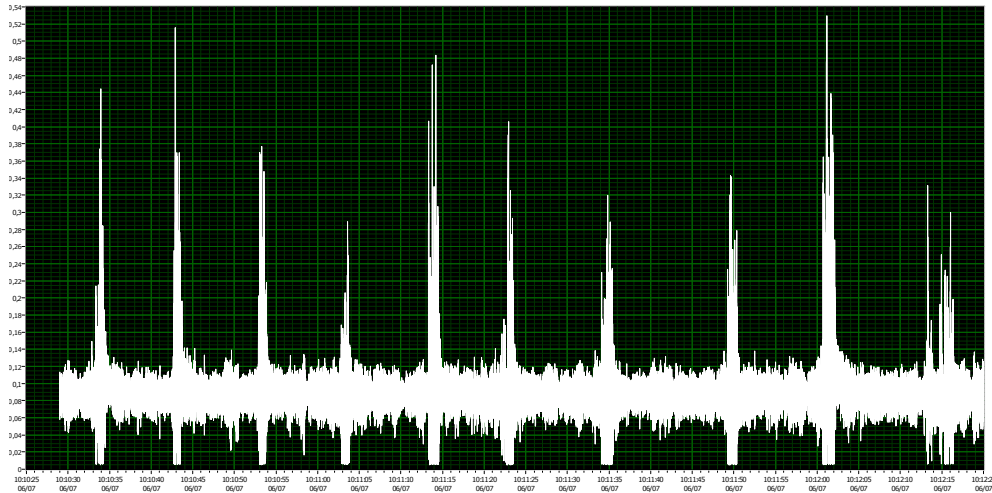
Obr. 3.4: Výsledný graf pro měření při poklepech na víko šachty.



Obr. 3.5: Ukázka označení začátku poklepu kurzorem.

### 3.3.3 Měření při přímé manipulaci s kabeláží

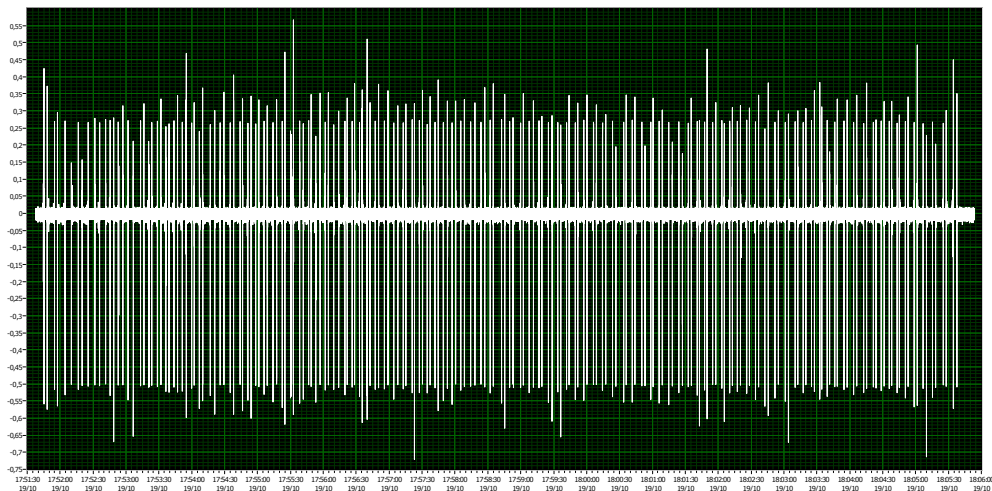
Změny polarizace způsobené rozkmitáním kabelu s optickým vláknem byly dostatečně velké na to, aby přehlušily šum klidového stavu. Proto při přímé manipulaci s optickým vedením bylo na naměřených výsledcích přesně vidět jednotlivé zásahy i bez nutnosti velkého přiblížení grafu. Výsledný graf je zobrazen na obrázku 3.6, kde je možné spočítat přesný počet zásahů do vedení.



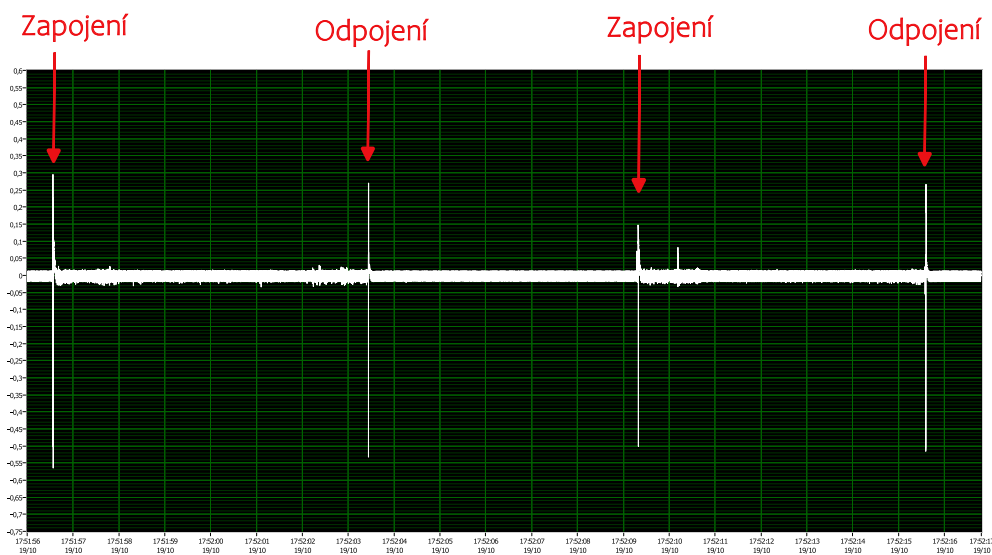
Obr. 3.6: výsledný graf pro měření při manipulaci s kabeláží.

### 3.3.4 Měření při odpojování a zapojování konektoru měřeného vlákna

Poslední měření zaznamenávalo změny polarizace při odpojování a zapojování konektoru optického vlákna přímo v serverovně. Na obrázku 3.7 je možné spatřit výsledný graf, na němž jsou jednotlivé úkony jasně rozeznatelné. Na obrázku 3.8 jsou zobrazené přiblížené výsledky pro jednotlivá zapojení a odpojení konektoru. Po zapojení jsou vidět drobné výkyvy způsobené průchodem signálu měřicí soustavou, po odpojení je zaznamenán absolutní klid.



Obr. 3.7: Výsledný graf pro odpojování a zapojování optického kabelu.



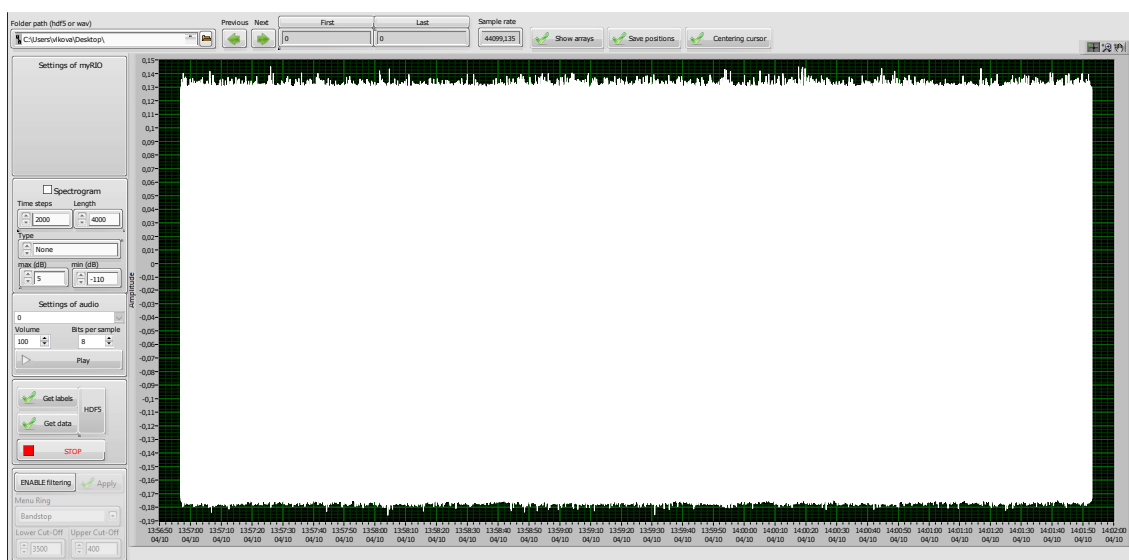
Obr. 3.8: Ukázka jednotlivých amplitud pro zapojení a odpojení konektoru.

## 4 Zpracování naměřených dat

Naměřená data se následně zpracovala pro vytvoření anotovaného datasetu pro možnosti automatické detekce událostí, které mohou zapříčinit narušení bezpečnosti objektů s vláknovými spoji. Následně byla data vyfiltrována od šumu. Z vyfiltrovaných hodnot byly vygenerovány spektrogramy pro lepší znázornění změn stavů měřeného polarizovaného světla pro jednotlivé zásahy do vedení. V poslední řadě byly výsledky vyhodnoceny a porovnány mezi použitými AD převodníky. Na základě těchto vyhodnocení byla porovnána kvalita jednotlivých přípravků.

### 4.1 Vznik datasetu

Na následujícím obrázku 4.1 je zobrazeno prostředí, ve kterém probíhalo označování změn polarizace pro jednotlivé úkony měření. Graf otevřený v programu na obrázku je naměřen při klidovém režimu bez zasahování do měřené infrastruktury.



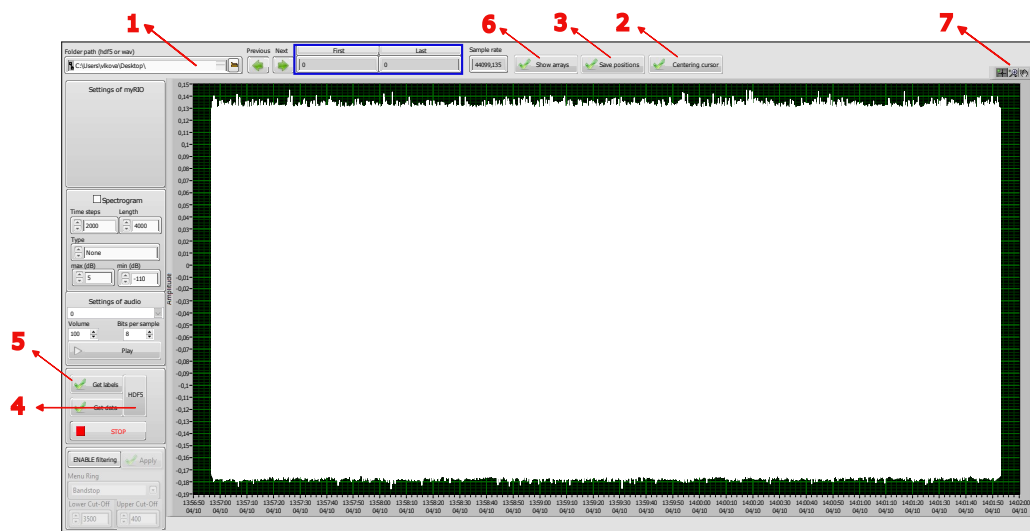
Obr. 4.1: Ukázka prostředí a výsledný graf pro klidový režim.

#### 4.1.1 Popis prostředí programu

Na obrázku č. 4.2 je možné spatřit již zmíněné prostředí, ve kterém došlo k zaznamenávání souřadnic jednotlivých úkonů. Důležitá pole pro ovládání programu jsou označena následujícími čísly.

- 1 Lišta určená k výběru souboru pro otevření.
- 2 Pole, jehož funkcí je přesunout kurzor doprostřed grafu.

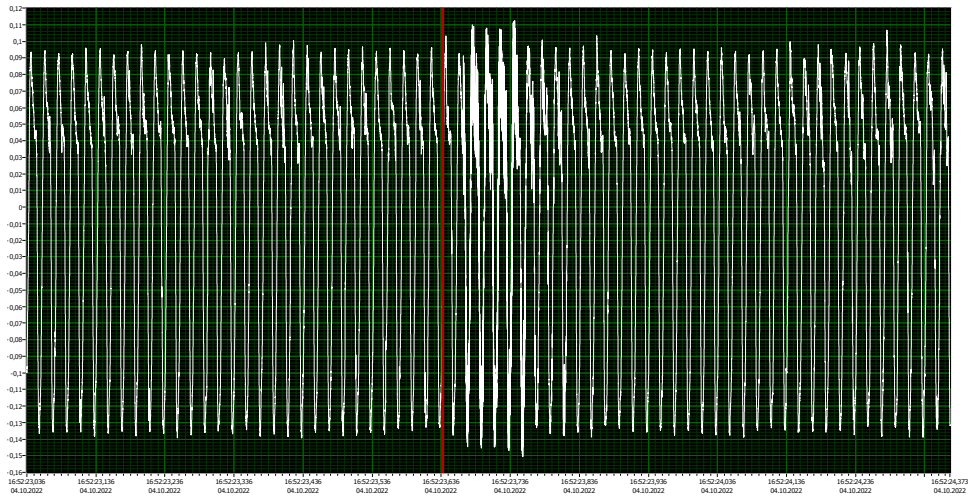
- 3 Pole sloužící k uložení souřadnic zapsaných v modře zaznačeném okně. „First“ označuje souřadnici počátku úkonu, „Last“ naopak značí ukončení úkonu. Po stisknutí políčka „Save positions“ se tyto souřadnice uloží do seznamu.
- 4 Pole sloužící pro výběr formátu, ve kterém se vytvořený seznam souřadnic uloží.
- 5 „Get Labels“ uloží seznam ve vybraném formátu do určené složky.
- 6 Pole umožňující zkontrolovat seznam zapsaných souřadnic.
- 7 Pole sloužící pro přepnutí kurzoru myši do režimu pro
  - posouvání kurzoru,
  - změnu zobrazení grafu (např. přiblížení, oddálení atd.),
  - orientaci v grafu.



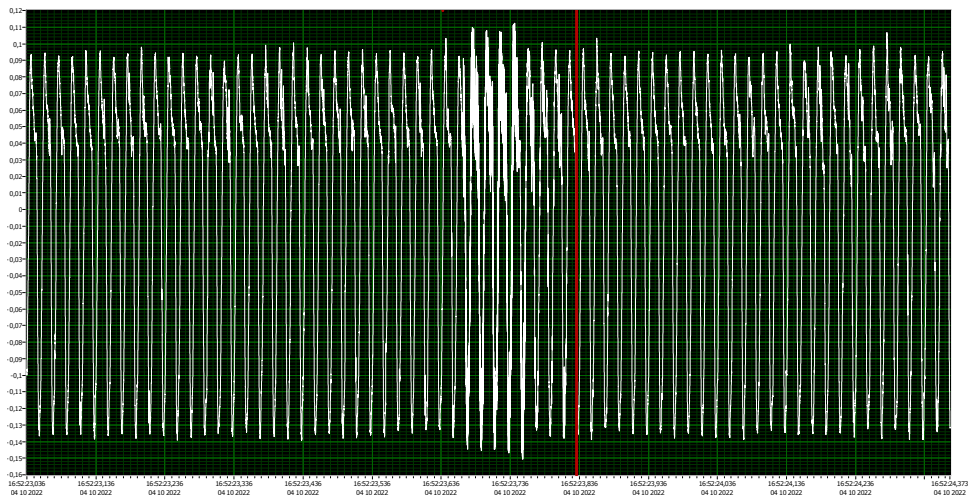
Obr. 4.2: Popis prostředí pro zaznamenávání souřadnic pro dataset.

### 4.1.2 Postup vytvoření datasetu

Pro vznik datasetu bylo nutné označit souřadnice jednotlivých úkonů. Označování probíhalo pomocí kurzoru. Kurzor byl nastaven do požadované polohy (začátek nebo konec změny polarizace zásahu do vedení), souřadnice této polohy byly následně uloženy do seznamu, z něhož byl později vytvořen dataset.



Obr. 4.3: Ukázka označení začátku poklepu kurzorem.



Obr. 4.4: Ukázka označení ukončení poklepu kurzorem.

Na obrázku 4.3 je zobrazen příklad označení začátku úkonu. Konkrétně se jedná o přiblížený graf pro jeden poklep na víko šachty. Na následujícím obrázku 4.4 je zobrazena ukázka označení souřadnic pro ukončení tohoto úkonu.

Zapsané souřadnice se ukládají do seznamu pomocí pole „Save positions“. Seznam je možné zobrazit pomocí pole označeného „Show arrays“. Polem označeným „Get labels“ se následně ukládá do souboru typu CSV a vzniká z něj požadovaný dataset.

### 4.1.3 Dataset

Výstupem z naměřených dat je dataset sloužící pro automatické detekce událostí. Na následujícím obrázku 4.5 je možné vidět ukázkou datasetu vytvořeného pro měření poklepů na víko. V levém sloupci jsou zaznamenány souřadnice začátku každého poklepu, v pravém sloupci jsou zaznačeny souřadnice ukončení změny polarizace při poklepu.

```
                                pokl epy1
Fi rst ;Last
308219, 000000; 314336, 000000
355592, 000000; 363278, 000000
404691, 000000; 411279, 000000
461476, 000000; 469320, 000000
513712, 000000; 520301, 000000
562345, 000000; 569911, 000000
613610, 000000; 619633, 000000
662560, 000000; 671053, 000000
722473, 000000; 731892, 000000
779143, 000000; 786091, 000000
828818, 000000; 835900, 000000
876620, 000000; 881609, 000000
927802, 000000; 935367, 000000
987032, 000000; 995080, 000000
1048193, 000000; 1058172, 000000
1104305, 000000; 1114541, 000000
1170380, 000000; 1177179, 000000
1225012, 000000; 1231751, 000000
1298179, 000000; 1313797, 000000
1381875, 000000; 1388819, 000000
1442918, 000000; 1450626, 000000
1501008, 000000; 1509718, 000000
1558758, 000000; 1565993, 000000
1621197, 000000; 1627226, 000000
1678142, 000000; 1685378, 000000
```

Obr. 4.5: Ukázkou datasetu získaného z měření poklepů na víko.

## 4.2 Filtrace šumu

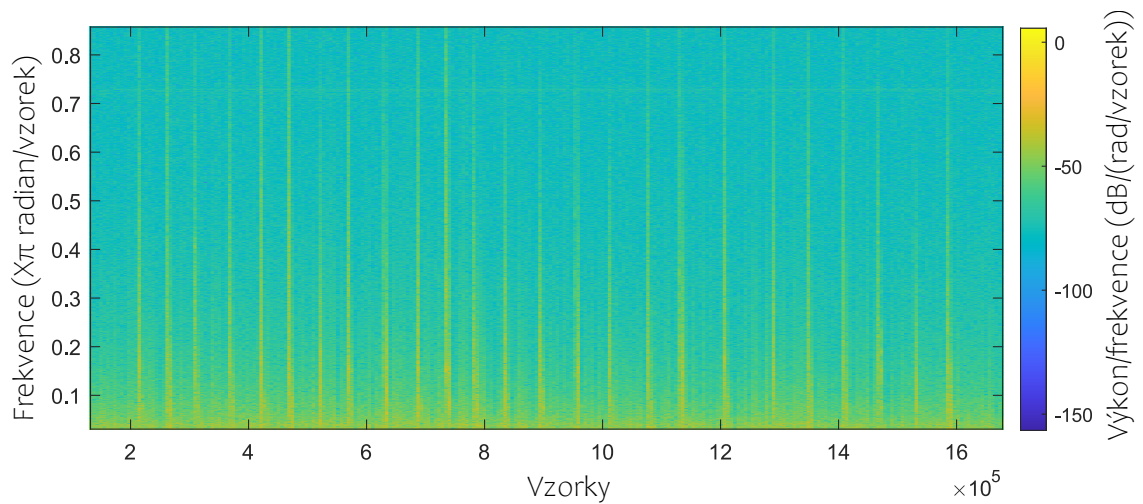
Pro lepší viditelnost změn intenzit polarizace při narušování telekomunikační infrastruktury byla naměřená data prostřednictvím programu MATLAB upravena. Pomocí horní propusti byly vyfiltrovány nízké frekvence, díky čemuž byl odstraněn šum.

### 4.2.1 Spektrogram

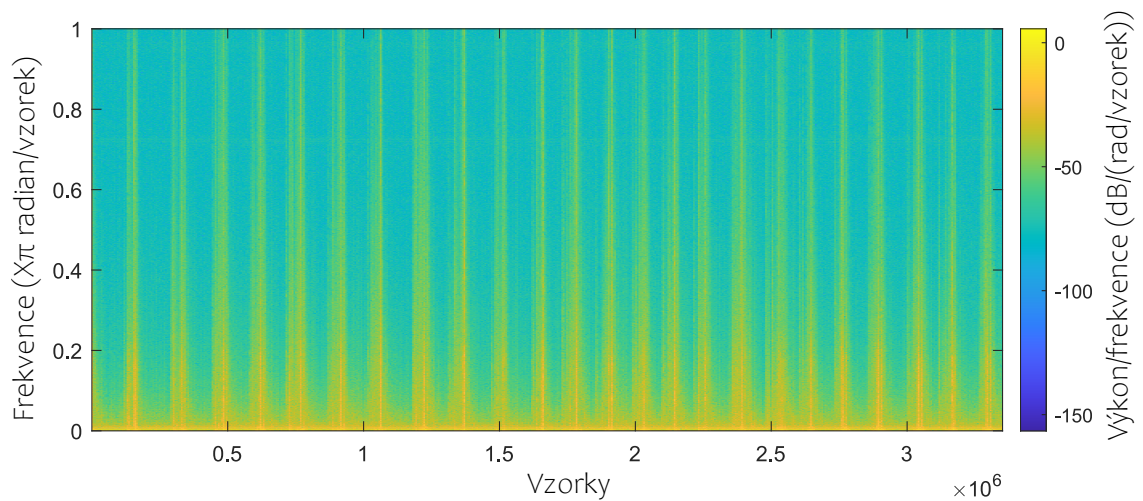
Spektrogram je grafické zobrazení zvuku získané pomocí Fourierovy transformace. Udává intenzitu frekvenčních složek v čase. Na svislé ose je zobrazena frekvence, čas na vodorovné a intenzita je definovaná zbarvením daného bodu.

Aby bylo možné lépe rozeznat jednotlivé zásahy do vedení byly z naměřených dat vygenerovány spektrogramy. Parametry spektrogramů na obrázcích níže byly

zvoleny následovně: velikost okna - 6000 vzorků, překrytí - 100 vzorků. Zvolený počet vzorků ovlivňuje frekvenční rozlišení spektrogramu. Na obrázku 4.7 je zobrazen spektrogram dvaceti pěti náměrů pro přímou manipulaci s vedením, na obrázku 4.6 je zobrazen spektrogram pro dvacet pět poklepů na víko. Jsou zde jasně viditelné odlišnosti. Rozdíly jsou patrné, jak u velikosti frekvence, kdy u přímé manipulace jsou zaznamenané frekvence jednoznačně vyšší, tak u intenzity. Hodnota intenzity je znázorněna barevnou škálou definovanou v pravé části spektrogramu.



Obr. 4.6: Spektrogram signálu při poklepech na víko šachty.



Obr. 4.7: Spektrogram signálu při manipulaci s vedením.

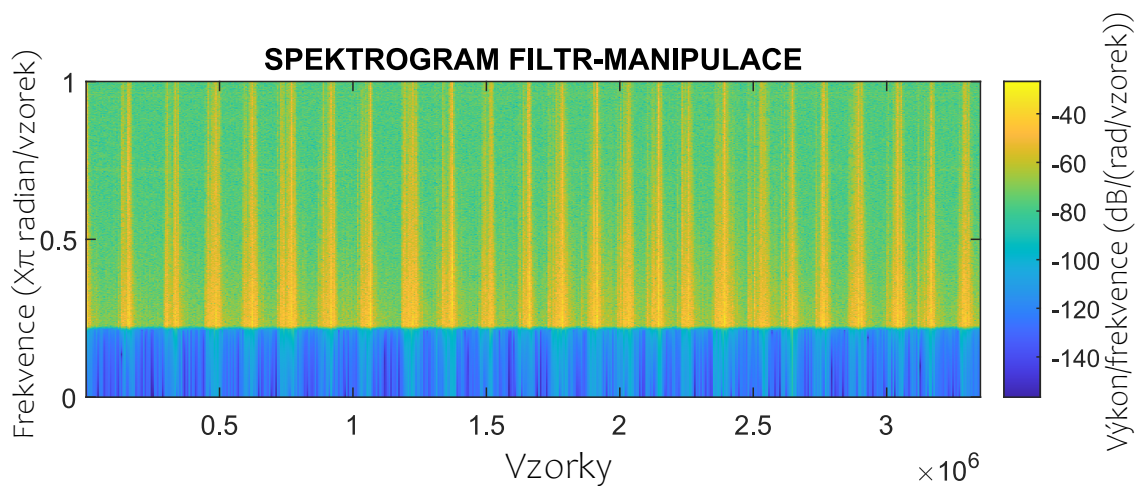
## 4.2.2 Filtr-horní propust

Pomocí následujícího skriptu 4.1 byly vyfiltrovány nízké frekvence za účelem potlačení šumu.

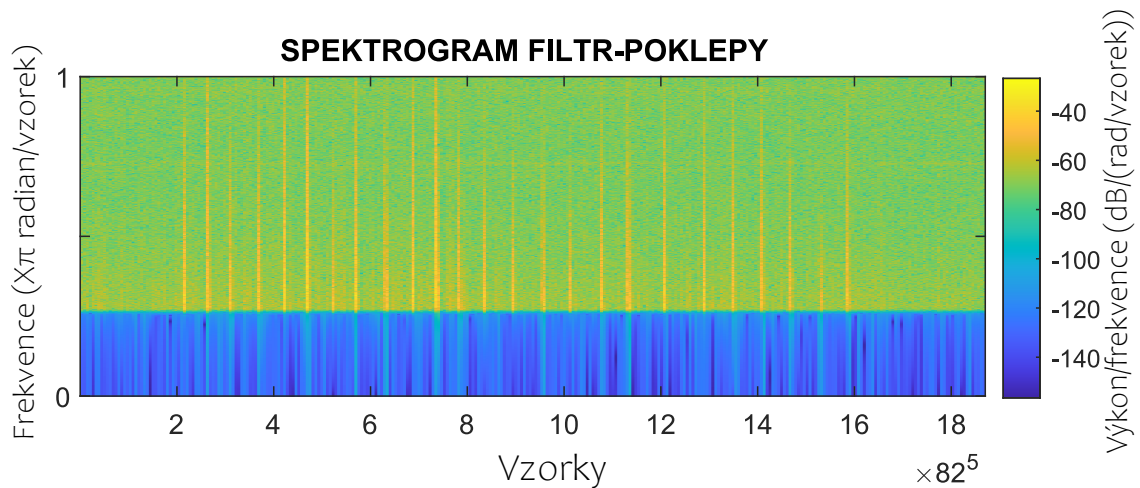
Výpis 4.1: Filtrace šumu přes horní propust.

```
1 %načtení souboru
2 filename = 'manipulace.wav';
3 [y,Fs] = audioread(filename);
4
5 %spektrogram signálu
6 f1=figure;
7 movegui(f1,'east');
8 set(gcf,'color','white')
9 nexttile
10 spectrogram(y,6000,100,6000,'yaxis');
11 ax=gca;
12 title('SPEKTROGRAM')
13
14 %ořez
15 cutData = y((Fs * (10 + 1)): Fs*87,1);
16
17 %Filtrace
18 highfiltr= filter(highpassfilter, cutData);
19 sound(highfiltr,Fs);
20
21 %ulozi filtr
22 audiowrite('filtr7k.wav',highfiltr,Fs)
23
24 %spektrogram vyfiltrovaného signálu
25 nexttile
26 spectrogram(highfiltr,6000,100,6000,'yaxis');
27 title('SPEKTROGRAM FILTR')
28
29 %funkce horní propust
30 function Hd = highpassfilter
31 Fs = 44100; % Sampling Frequency
32 N = 100; % Order
33 Fc =7000; % Cutoff Frequency
34 h = fdesign.highpass('N,F3dB', N, Fc, Fs);
35 Hd = design(h, 'butter');
36 end
```

V první řadě bylo potřeba načíst soubor s naměřenými daty. Dále byl z těchto dat vygenerován spektrogram. Pro lepší viditelnost změn byl původní soubor ořezán pouze na dvacet pět zásahů do vedení. Nízké frekvence byly z ořezaných dat vyfiltrovány pomocí funkce „Highpassfilter“. Proměnná  $F_s$  nastavuje vzorkovací frekvenci. Proměnná  $N$  nastavuje řád filtru. Čím vyšší číslo je zde nastaveno, tím větší je potlačení frekvencí pod mezní hodnotou.  $F_c$  je mezní frekvence filtru. Tato hodnota byla volena na základě subjektivního zhodnocení audio nahrávek naměřených dat. Pro nižší nastavenou mezní frekvenci nebyl zásah do vedení slyšet čistě, byl rušen šumem. Při nastavení vyšší mezní frekvence nebylo po spuštění nahrávky téměř nic slyšet. Z vyfiltrovaných dat byl opět vytvořen spektrogram. Na obrázku 4.8 je zobrazen spektrogram filtrace pro měření přímé manipulace s vedením s mezní frekvencí 7000 Hz. Na obrázku 4.9 je možné pozorovat výslednou filtraci pro data získaná z měření pro poklepy na víko s mezní frekvencí 6000 Hz.



Obr. 4.8: Spektrogram vyfiltrovaných dat pro manipulaci s vedením.



Obr. 4.9: Spektrogram vyfiltrovaných dat pro poklepy na víko šachty.

### 4.3 Porovnání kvality použitých AD převodníků

Na kvalitu jednotlivých AD převodníků má vliv velké množství faktorů. Mezi nejdůležitější tři byla zařazena vzorkovací frekvence, rozlišení a poměr signál/šum (SNR).

Vzorkovací frekvence udává počet vzorků odebraných za sekundu při převodu analogového signálu na signál digitální. Čím vyšší má přípravek vzorkovací frekvenci, tím vyšší je rozlišovací schopnost digitálního signálu. S pojmem vzorkovací frekvence také úzce souvisí Nyquistova frekvence, jejíž hodnota je definována vztahem

$$f_{\max} < f_s/2, \quad (4.1)$$

kde  $f_{\max}$  je Nyquistova a  $f_s$  vzorkovací frekvence. Při překročení této hodnoty dojde při převodu analogového signálu na digitální ke zkreslení. Tomuto zkreslení se říká aliasing.

Rozlišení AD převodníků udává počet diskretních úrovní, do kterých je analogový signál při převodu kvantován. Stejně jako u vzorkovací frekvence platí, že čím vyšší rozlišení, tím vyšší kvalita převodu.

Hodnota SNR udává poměr výkonu signálu k výkonu šumu. Čím vyšší je hodnota SNR, tím je vyšší výkon signálu a je lépe rozeznatelný od šumu. Hodnota SNR se obvykle udává v decibelech (dB). Výsledkem výpočtu SNR může být kladné i záporné číslo. Kladný výsledek značí, že hodnota signálu převyšuje šum, naopak u záporného výsledku šum přehluší signál.

Vzorkovací frekvence a rozlišení u jednotlivých převodníků definuje výrobce. Hodnota SNR byla spočítána pomocí programu MATLAB prostřednictvím následujícího skriptu 4.2.

#### Výpis 4.2: Výpočet SNR.

```

1 %načtení souboru
2 [y,Fs] = audioread('manipulace_Startech.wav');
3 [x,Fsx] = audioread('manipulace_NI.wav');
4 data = h5read('manipulace_myRIO.hdf5','/0-0');
5
6 %výpočet vzorků v 1ms
7 durationInSamples = round(Fs * 0.001);
8 durationInSamples1 = round(Fsx * 0.001);
9
10 %začátek intervalu signálu
11 startsignalS = 659464;
12 startsignalN = 932644;
13 startsignalm = 374951;
14 stopsignalm = startsignalm + 100;
15
16 %začátek intervalu šumu
17 startsumS = 164199;
18 startsumN = 381256;
19 startsumm = 49644;
20 stopsumm = startsumm + 100;
21
22 %intervaly signálu a šumu
23 signalS = y(startsignalS:startsignalS+durationInSamples-1);
24 signalN = x(startsignalN:startsignalN+durationInSamples1-1);
25 signalm = data(startsignalm:stopsignalm);
26
27 sumS = y(startsumS:startsumS+durationInSamples-1);
28 sumN = x(startsumN:startsumN+durationInSamples1-1);
29 summ = data(startsumm:stopsumm);
30
31 %výpočet SNR
32 SNR_startech = snr(signalS,sumS)
33 SNR_NI = snr(signalN,sumN)
34 SNR_myRIO = snr(signalm,summ)

```

Po načtení jednotlivých souborů s naměřenými daty byl podle datasetu vybrán časový úsek o délce 1 ms, na kterém se nachází amplituda signálu zásahu do vedení. Stejně dlouhý úsek byl vybrán i z části signálu, kdy k žádným zásahům nedocházelo. Takto ořezaná data se následně vložila do funkce *snr* pomocí níž došlo k výpočtu výsledné hodnoty poměru signálu a šumu. Hodnota SNR byla spočítána pro pět

zásahů do vedení pro každý převodník. Získané hodnoty byly následně zprůměrovány za účelem co nejpřesnějších výsledků. Vypočtená data jsou zobrazena v tabulkách 4.1 a 4.2.

<b>AD převodník</b>	<b>1.</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>	<b>4.</b>	<b>5.</b>
myRIO 1900	0,5619 dB	1,6764 dB	1,5101 dB	1,1661 dB	1,3317 dB
Komplete Audio 2	4,4400 dB	5,2545 dB	5,3141 dB	4,4529 dB	5,0280 dB
Icusbaudio 2D	3,8110 dB	2,7820 dB	4,6158 dB	3,6290 dB	3,5220 dB

Tab. 4.1: Hodnoty SNR pro pět zásahů do vedení.

<b>AD převodník</b>	<b>Průměr</b>
myRIO 1900	1,24924 dB
Komplete Audio 2	4,89790 dB
Icusbaudio 2D	3,67196 dB

Tab. 4.2: Průměr vypočítaných hodnot SNR.

Pro přehledné porovnání jednotlivých parametrů převodníků slouží tabulka 4.3. Přípravek myRIO má sice nejvyšší uvedenou vzorkovací frekvenci, ale zbylé parametry jsou v porovnání s ostatními převodníky horší. Nejlepších výsledků dosáhla zvuková karta Komplete Audio 2. Na druhé místo mezi těmito přípravky se řadí zvuková karta Icusbaudio 2D. Jak předepsané parametry, tak naměřené hodnoty jsou o něco horší v porovnání s převodníkem Komplete Audio 2, naopak při porovnání s přípravkem myRIO mají hlavně naměřená data o dost vyšší kvalitu.

<b>AD převodník</b>	<b>Vzorkovací frekvence</b>	<b>Rozlišení</b>	<b>SNR</b>
myRIO 1900	500 kHz	12 bit	1,24924 dB
Komplete Audio 2	192 kHz	24 bit	4,89790 dB
Icusbaudio 2D	96 kHz	24 bit	3,67196 dB

Tab. 4.3: Porovnání parametrů použitých AD převodníků.

## Závěr

Tato bakalářská práce byla především zaměřena na polarizaci a její využití při detekci vibrací v optických vláknech. První kapitola se věnovala optickým sensorům, zejména sensorům určeným pro snímání vibrací. Byly zde uvedeny čtyři nejmodernější užívané metody pro detekci vibrací a jejich výhody a nevýhody použití. Pro budoucí účely této práce byla jako nejvhodnější vyhodnocena metoda založená na sledování změn polarizace. Druhá kapitola byla zaměřena na teorii polarizace. Východiskem této kapitoly je přehled tří základních typů polarizovaného záření a příklady možností polarizovat nepolarizované světlo. Praktická část této bakalářské práce spočívala v zajištění náměrů výkyvů polarizace způsobených vibracemi při manipulaci s optickým vláknem. Z naměřených výsledků je možné určit, že nejvíce viditelné změny polarizace oproti klidovému režimu způsobilo odpojování a zapojování konektoru optického vlákna. Podstatně méně se změna polarizace projevovala při přímé manipulaci s kabeláží, téměř k nerozeznatelným výsledkům dospělo měření založené na otevírání a zavírání poklopu od šachty určené k zajištění přístupu obsluhy k optickému vedení. Jelikož nebylo možné označit jednotlivé úkony v naměřených výsledcích při otevírání a zavírání poklopu, bylo toto konkrétní měření vyhodnoceno jako neadekvátní pro vytvoření datasetu. Každé z těchto uvedených měření bylo provedeno s použitím celkem tří různých AD převodníků. Jako použitý přípravek s nejlepší kvalitou byla v porovnání s ostatními vyhodnocena zvuková karta Komplete Audio 2 od výrobce Native Instruments. Poměr signálu a šumu byl spočítán jako 4,89790 dB. O něco horší výsledky se projevíly u zvukové karty Icusbaudio 2D od výrobce Startech, kde bylo SNR rovno 3,67196 dB. Jednoznačně nejhorším použitým AD převodníkem pro toto měření bylo zařízení myRIO 1900, jehož SNR bylo spočítáno jako 1,24924 dB. Šum zapříčiněný nekvalitními přípravky se z naměřených dat odstranil pomocí filtrace přes horní propust. Pro měření přímé manipulace s kabeláží byla jako nejlepší hodnota mezní frekvence filtrace vyhodnocena 7000 Hz, pro měření poklepů na víko 6000 Hz. Vzhledem k velmi silnému signálu získanému z měření pro zapojování a odpojování konektoru, filtrace těchto dat nebyla potřebná. Konečným výstupem této bakalářské práce je anotovaný dataset obsahující sto souřadnic začátků a ukončení úkonů pro čtyři druhy měření s použitím celkem tří různých převodníků.

## Literatura

- [1] GHOLAMZADEH, Bahareh a Hooman NABOVATI. *Fiber Optic Sensors* [online]. 29. 6. 2008, 11 [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: doi:10.5281/zenodo.1076166
- [2] ŠIFTA, Radim. *Praktické využití a princip činnosti optovláknových FBG senzorů* [online]. 25.1.2021 [cit. 2022-11-23]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromaterialy/21770-prakticke-vyuziti-a-princip-cinnosti-optovlaknovych-fbg-senzoru>
- [3] LIU, Xin, Baoquan JIN, Qing BAI, Yu WANG, Dong WANG a Yuncai WANG. Distributed Fiber-Optic Sensors for Vibration Detection. *Sensors* [online]. 2016, **16**(8) [cit. 2022-11-23]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s16081164
- [4] K čemu se používá optický reflektometr s časovou doménou. In: *FOCC* [online]. 21. 8. 219 [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: <http://m.cz.opticalpatchcable.com/info/what-is-an-optical-time-domain-reflectometer-u-38651370.html>
- [5] Working Principle and Characteristics of OTDRs. In: *VIAVI* [online]. [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: <https://www.viavisolutions.com/en-us/working-principle-and-characteristics-otdrs>
- [6] Optická vlákna. *SPOJE.NET* [online]. [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: [https://wiki.spoje.net/doku.php/howto/network/fiber\\_optics](https://wiki.spoje.net/doku.php/howto/network/fiber_optics)
- [7] STEPANOV, Konstantin V., Andrey A. ZHIRNOV, Kirill I. KOSHELEV, Anton O. CHERNUTSKY, Roman I. KHAN a Alexey B. PNEV. Sensitivity Improvement of Phi-OTDR by Fiber Cable Coils. *Sensors* [online]. 2021, **21**(21) [cit. 2022-11-23]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21217077
- [8] CHEN, Jinjie, Bo LIU a Hao ZHANG. Review of fiber Bragg grating sensor technology. *Frontiers of Optoelectronics in China* [online]. 2011, **4**(2), 204-212 [cit. 2022-11-23]. ISSN 1674-4128. Dostupné z: doi:10.1007/s12200-011-0130-4
- [9] ŠIFTA, Radim. *Optovláknové senzory a možnosti jejich využití* [online]. 20. 1. 2021 [cit. 2022-11-23]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromaterialy/21750-optovlaknove-senzory-a-moznosti-jejich-vyuziti>
- [10] BARCIK, Peter a Petr MUNSTER. Measurement of slow and fast polarization transients on a fiber-optic testbed. *Optics Express* [online]. 2020, **28**(10) [cit. 2022-11-23]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.390649

- [11] TOMASOV, Adrian, Petr DEJDAR, Peter BARCIK, Petr MUNSTER a Tomas HORVATH. *FiberGuard: Fiber cable anomaly detection using simple state of polarization analyzer and machine learning algorithms* [online]. 2021, 11 [cit. 2022-11-25].
- [12] DEJDAR, Petr, Vojtech MYSKA, Petr MUNSTER a Radim BURGET. Trains Detection Using State of Polarization Changes Measurement and Convolutional Neural Networks. *2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)* [online]. IEEE, 2021, 2021-3-22, 1-4 [cit. 2022-11-25]. ISBN 978-1-7281-5099-4. Dostupné z: doi:10.1109/INERTIAL51137.2021.9430469
- [13] BENNETT, Jean M. Polarization Introduction. *Encyclopedia of Modern Optics* [online]. Elsevier, 2005, 2005, 148-161 [cit. 2022-11-26]. ISBN 9780128149829. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-809283-5.00691-1
- [14] KUMAR, Arun a Ajoy K GHATAK. *Polarization of light with applications in optical fibers*. Bellingham: SPIE Press, 2011. Tutorial texts in optical engineering. ISBN 978-081-9482-150.
- [15] ŠTRBA, Anton, Vladimír MESÁROŠ a Dagmar SENDERÁKOVÁ. *Svetlo: vlny, lúče, fotony*. Nitra: Enigma, 2011. ISBN 978-80-89132-83-6.
- [16] ACHARYA, Raghavi. 3 Typy polarizace: Podrobná fakta. In: *Lambdageeks* [online]. 2022 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://cs.lamdageeks.com/polarization-types/>
- [17] *Polarizované světlo* [online]. s. 14 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/sci/podzim2010/F3060/7.Polarizace.pdf>
- [18] Introduction to Polarization. In: *Edmundoptics* [online]. [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/optics/introduction-to-polarization/>
- [19] Polarizace odrazem a lomem. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/463-polarizace-odrazem-a-lomem>
- [20] GREGERSEN, Erik. Brewster-s law. *Encyclopedia Britannica* [online]. 29 Mar. 2022 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/Brewsters-law>
- [21] CHIEN, Dao Ngoc, Kazuo TANAKA a Masahiro TANAKA. Guided wave equivalents of Snell-s and Brewster-s Laws. *Optics Communications* [online].

- 2003, **225**(4-6), 319-329 [cit. 2022-11-26]. ISSN 00304018. Dostupné z: doi: 10.1016/j.optcom.2003.08.024
- [22] Polarizace světla. *ELUC* [online]. [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1700>
- [23] *Polarizované světlo Malusův zákon a Brewsterův úhel* [online]. [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <http://fyzika.feec.vutbr.cz/vyuka/fp2/42/nav-42fin2-Polarizovan%C3%A9%20sv%C4%9Btlo-2013-18.pdf>
- [24] Rozdíl mezi jednoosými a dvouosými krystaly. In: *LAFAYETTEFIREFIGHTERS.COM* [online]. 14. května 2018 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://lafayettefirefighters.com/cs/difference-between-uniaxial-and-biaxial-crystals>
- [25] *Světlo v anizotropním prostředí* [online]. s. 15 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: [http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Svetlo\\_v\\_anizotropnim\\_prostredi.pdf](http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Svetlo_v_anizotropnim_prostredi.pdf)
- [26] *Optické vlastnosti* [online]. [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: [http://mineralogie.sci.muni.cz/kap\\_4\\_3\\_optika/polarizace.htm](http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_4_3_optika/polarizace.htm)
- [27] MyRIO Student Embedded Device. *Ni* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/hardware/products/myrio-student-embedded-device.html>
- [28] Komplete Audio 2 | Native Instruments. *Shop.disk.cz* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://shop.disk.cz/native-instruments-komplete-audio-2/>
- [29] USB Stereo Audio Adapter External Sound Card with SPDIF Digital Audio. *Farnell* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1754505.pdf>

## Seznam symbolů

$a$	Amplituda
$\vec{B}$	Vektor magnetické složky elektromagnetického vedení
$c$	Rychlost šíření světla
$d$	Tloušťka destičky krystalu
$\vec{E}$	Vektor elektrické složky elektromagnetického vedení
$I$	Intenzita záření
$I_0$	Maximální intenzita
$k$	Optické vlnové číslo
$L_0$	Délka optického vlákna
$n$	Index lomu jádra vlákna
$n_{eff}$	Efektivní index lomu vlákna
$v_{\perp}$	Rychlost šíření řádného paprsku
$v_{\parallel}$	Rychlost šíření mimořádného paprsku
$\beta$	koeficient šíření ve vlákne
$\Delta\delta$	Fázový rozdíl
$\delta_0$	Počáteční fáze
$\theta_B$	Brewsterův úhel
$\Lambda$	Perioda mřížkování
$\lambda_0$	Vlnová délka ve vakuu
$\lambda_B$	Braggova vlnová délka
$\pi$	Matematická konstanta - Ludolfovo číslo
$\varphi$	Úhel, který svírají roviny polarizátoru a analyzátoru
$\phi$	Fázové zpoždění výstupní světelné vlny v jednovidovém vlákne
$\omega$	Úhlová rychlost

## Seznam zkratek

<b>AD</b>	Analogově-digitální–Analog to Digital.
<b>BOTDA</b>	Frekvenční OTDR–Brillouin Optical Time Domain Reflectometry.
<b>CCD</b>	Snímač s vázanými náboji–Charge-Coupled Device.
<b>DBR</b>	Rozložené Braggovo zrcadlo–Distributed Bragg Reflector.
<b>FBG</b>	Optické vláknové mřížky–Fiber Bragg Grating.
<b>FPGA</b>	Číselné integrované obvody–Field Programmable Gate Array.
<b>FRM</b>	Faradayovo rotující zrcadlo–Faraday Rotator Mirror.
<b>I/O</b>	Vstup/Výstup–Input/Output.
<b>OSNR</b>	Odstup signálu od šumu–Optical Signal-to-Noise Ratio.
<b>OTDR</b>	Optický reflektometr–Optical Time Domain Reflectometry.
<b>PD</b>	Fotodetektor–PhotoDetector.
<b>POTDR</b>	Polarizační OTDR–Polarization Optical Time Domain Reflectometry.
$\phi$ - <b>OTDR</b>	Fázové OTDR–Phase Optical Time Domain Reflectometry.