

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Tomáš Holík



# 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 VLÁKNOVÉ SENZORY

DISTRIBUTED FIBER OPTIC SENSORS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Holík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2018

# Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Tomáš Holík

**ID:** 164597

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Distribuované optické vláknové senzory

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je detailní teoretický rozbor problematiky optické interferometrie, polarizace a rozptylů v optickém vlákne. Důraz bude kladen na možnost využití jednotlivých technik pro senzorické aplikace. Na základě teoretického rozboru bude provedena realizace vybraných typů senzorických systémů a srovnání, jak v laboratorních, tak reálných podmínkách.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

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

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

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Münster, Ph.D.

**Konzultant:**

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

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **ABSTRAKT**

Práce pojednává o možnostech využití optického vlákna jako senzoru. Úvod práce je věnován základům optiky. Dále se práce zabývá problematikou optické interferometrie, polarizace a rozptyly v optickém vláknu. Hlavním výstupem práce je porovnání měření akustických vibrací pomocí interferometrické a polarizační metody a dále měření na reálné trase ve městě Brno.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Analog Discovery 2 NI, distribuovaný optický vláknový senzor, interferometrie, polarizace, rozptyl záření v optickém vláknu

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the possibility of using optical fiber as a sensor. The introduction of the thesis is devoted to the foundations of optics. In addition, the thesis deals with optical interferometry, polarization and dispersion in optical fiber. The main output of the thesis is the comparison of acoustic vibration measurements using interferometric and polarization methods and further measurements on the real route in Brno.

## **KEYWORDS**

Analog Discovery 2 NI, Distributed fiber optic sensor, interferometry, polarization, scattering in optical fiber

HOLÍK, Tomáš. *Distribuované optické vláknové senzory*. Brno, Rok, 83 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Distribuované optické vláknové senzory“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom 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

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora



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

Brno .....

.....

podpis autora



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Základy optiky</b>	<b>13</b>
1.1 Vlnová optika . . . . .	13
1.2 Koherence světla . . . . .	14
1.2.1 Časová koherence . . . . .	14
1.2.2 Prostorová koherence . . . . .	14
1.3 Interference světla . . . . .	14
1.3.1 Youngův pokus . . . . .	15
1.4 Zdroje vysílání . . . . .	16
<b>2 Optická interferometrie</b>	<b>17</b>
2.1 Interferometry . . . . .	17
2.1.1 Mach–Zehnderův interferometr . . . . .	17
2.1.2 Michelsonův interferometr . . . . .	18
2.1.3 Sagnacův interferometr . . . . .	18
2.1.4 Fabry–Perotův interferometr . . . . .	19
2.1.5 Polarizační interferometr . . . . .	19
2.2 Optické vláknové interferometrické senzory . . . . .	20
<b>3 Polarizace světla</b>	<b>22</b>
3.1 Polarizace . . . . .	22
3.2 Elipticky polarizované světlo . . . . .	23
3.3 Lineárně polarizované světlo . . . . .	23
3.4 Kruhově polarizované světlo . . . . .	24
3.5 Poincarého koule . . . . .	25
<b>4 Rozptyl záření</b>	<b>27</b>
4.1 Rayleighův rozptyl . . . . .	28
4.1.1 Příklad zapojení pro měření Rayleighova rozptylu . . . . .	29
4.2 Ramanův rozptyl . . . . .	30
4.2.1 Stokesova složka Ramanova rozptylu . . . . .	31
4.2.2 Anti–Stokesova složka Ramanova rozptylu . . . . .	32
4.2.3 Příklad zapojení pro měření Ramanova rozptylu . . . . .	33
4.3 Brillouinův rozptyl . . . . .	34
4.3.1 Příklad zapojení pro měření Brillouinova rozptylu . . . . .	35
4.4 Využití rozptylů záření v oblasti distribuovaných optických vláknových senzorů . . . . .	35

<b>5</b>	<b>Měření akustických vibrací</b>	<b>37</b>
5.1	Schéma zapojení . . . . .	38
5.2	Popis měření . . . . .	39
5.2.1	Referenční měření . . . . .	39
5.2.2	Měření v plastovém sudu . . . . .	39
5.3	Analog Discovery 2 NI a program Waveforms . . . . .	41
5.4	Získané poznatky . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Měření polarizace</b>	<b>50</b>
6.1	Schéma zapojení . . . . .	51
6.1.1	Polarizační coupler . . . . .	52
6.1.2	Balanční detektor . . . . .	52
6.2	Měření akustických vibrací . . . . .	52
6.3	Měření okolních vibrací . . . . .	57
<b>7</b>	<b>Měření na reálné trase</b>	<b>62</b>
7.1	Schéma zapojení . . . . .	63
7.2	Popis měření . . . . .	64
7.3	Získané poznatky . . . . .	64
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>68</b>
	<b>Literatura</b>	<b>69</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>71</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>72</b>
<b>A</b>	<b>Grafy naměřených hodnot</b>	<b>73</b>
<b>B</b>	<b>Obsah přiloženého média</b>	<b>83</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Youngův pokus . . . . .	15
1.2	Spektrum polovodičových zdrojů záření [13] . . . . .	16
2.1	Mach–Zehnderův interferometr [15] . . . . .	17
2.2	Michelsonův interferometr [15] . . . . .	18
2.3	Sagnacův interferometr [15] . . . . .	18
2.4	Fabry–Perotův interferometr [6, 11] . . . . .	19
2.5	Wollastonův hranol [6] . . . . .	19
2.6	Nomarskiho polarizační interferometr [6] . . . . .	20
2.7	Interferometrické vláknové senzory [16] . . . . .	21
3.1	Trajektorie koncového bodu elipticky polarizovaného světla[15] . . . . .	23
3.2	Trajektorie koncového bodu lineárně polarizovaného světla[15] . . . . .	24
3.3	Trajektorie koncového bodu kruhově polarizovaného světla–pravá a levá[15] . . . . .	24
3.4	a) Poincarého koule, b) Body na Poincarého kouli reprezentující lineárně polarizované světlo (LP–Linearly Polarized), kruhově polarizované světlo vpravo (RCP–Right Circularly Polarized) a kruhově polarizované světlo vlevo (LCP–Left Circularly Polarized) [15] . . . . .	25
4.1	Rozptyl záření v OVS[1, 9] . . . . .	27
4.2	Vznik Rayleighova rozptylu [9, 12] . . . . .	28
4.3	Blokové schéma měření Rayleighova rozptylu [8] . . . . .	29
4.4	Vznik Ramanova rozptylu ve Stokesově oblasti [9, 12] . . . . .	32
4.5	Vznik Ramanova rozptylu v anti-Stokesově oblasti[9, 12] . . . . .	33
4.6	Blokové schéma měření Ramanova rozptylu [14] . . . . .	33
4.7	Blokové schéma měření Brillouinova rozptylu [4] . . . . .	35
5.1	Schéma zapojení měření akustických vibrací v plastovém sudu . . . . .	38
5.2	Plastový sud s HDP chráničkami . . . . .	40
5.3	Plastový sud s pískem a zeminou . . . . .	40
5.4	Plastový sud se zeminou a reproduktorem . . . . .	41
5.5	Analog Discovery 2 NI Edition . . . . .	42
5.6	Průběh signálu pro 100 Hz, referenční měření . . . . .	44
5.7	Průběh signálu pro 500 Hz, referenční měření . . . . .	45
5.8	Spektrum signálu pro 500 Hz, referenční měření . . . . .	45
5.9	Průběh signálu pro 500 Hz, 10 cm písek . . . . .	46
5.10	Spektrum signálu pro 500 Hz, 10 cm písek . . . . .	46
5.11	Průběh signálu pro 500 Hz, 10 cm písek s vodou . . . . .	47
5.12	Spektrum signálu pro 500 Hz, 10 cm písek s vodou . . . . .	47
5.13	Průběh signálu pro 500 Hz, 10 cm písek, 20 cm zemina . . . . .	48

5.14	Spektrum signálu pro 500 Hz, 10 cm písek, 40 cm zemina . . . . .	48
6.1	Schéma zapojení měření akustických vibrací polarizačním interfero- metrem . . . . .	51
6.2	Průběh signálu pro 500 Hz . . . . .	53
6.3	Spektrum signálu pro 500 Hz . . . . .	53
6.4	Průběh signálu pro 1 kHz . . . . .	54
6.5	Spektrum signálu pro 1 kHz . . . . .	54
6.6	Průběh signálu pro 3 kHz . . . . .	55
6.7	Spektrum signálu pro 3 kHz . . . . .	55
6.8	Průběh signálu pro 5 kHz . . . . .	56
6.9	Spektrum signálu pro 5 kHz . . . . .	56
6.10	Optické vlákno na zemi, chůze po místnosti . . . . .	58
6.11	Optické vlákno na zemi, klepání po optickém vláknu . . . . .	59
6.12	Optické vlákno na zemi, pohyb židlí . . . . .	60
6.13	Optické vlákno na zemi, rozpojení a spojení spojky . . . . .	61
7.1	Měřená trasa Brno . . . . .	63
7.2	Spektrum signálu v čase měření 0:46 . . . . .	65
7.3	Spektrum signálu v čase měření 4:46 . . . . .	65
7.4	Spektrum signálu v čase měření 11:20 . . . . .	66
7.5	Spektrum signálu v čase měření 15:56 . . . . .	66
7.6	Spektrum signálu v čase měření 20:10 . . . . .	67
A.1	Průběh signálu pro 1 kHz, referenční měření . . . . .	74
A.2	Spektrum signálu pro 1 kHz, referenční měření . . . . .	74
A.3	Průběh signálu pro 1 kHz, 10 cm písek . . . . .	75
A.4	Spektrum signálu pro 1 kHz, 10 cm písek . . . . .	75
A.5	Průběh signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda . . . . .	76
A.6	Spektrum signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda . . . . .	76
A.7	Průběh signálu pro 3 kHz, referenční měření . . . . .	77
A.8	Spektrum signálu pro 3 kHz, referenční měření . . . . .	77
A.9	Průběh signálu pro 3 kHz, 10 cm písek . . . . .	78
A.10	Spektrum signálu pro 3 kHz, 10 cm písek . . . . .	78
A.11	Průběh signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda . . . . .	79
A.12	Spektrum signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda . . . . .	79
A.13	Průběh signálu pro 5 kHz, referenční měření . . . . .	80
A.14	Spektrum signálu pro 5 kHz, referenční měření . . . . .	80
A.15	Průběh signálu pro 5 kHz, 10 cm písek . . . . .	81
A.16	Spektrum signálu pro 5 kHz, 10 cm písek . . . . .	81
A.17	Průběh signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda . . . . .	82
A.18	Spektrum signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda . . . . .	82

## SEZNAM TABULEK

5.1	Vrstva 10 cm (písek) . . . . .	42
5.2	Vrstva 20 cm (10 cm písek, 10 cm zemina) . . . . .	43
5.3	Vrstva 30 cm (10 cm písek, 20 cm zemina) . . . . .	43
5.4	Vrstva 40 cm (10 cm písek, 30 cm zemina) . . . . .	43
5.5	Vrstva 50 cm (10 cm písek, 40 cm zemina) . . . . .	43
6.1	Tabulka srovnání intenzit signálů interferenční a polarizační metody .	57



# ÚVOD

Distribuované optické vláknové senzory zažívají v posledních 2 desetiletích velkého rozmachu. Optická vlákna se stala nenahraditelnou součástí komunikačních tras a své nevýhodné vlastnosti jako např. citlivost na ohyby dokážeme využít ve prospěch ve snímací technice. V současné době snad již neexistuje mechanická, elektrická, chemická a jiná veličina, kterou bychom nedokázali změřit pomocí vláknových senzorů.

V teoretické části této práce byly probrány základy optiky. Práce se dále detailně zabývá optickou interferometrií, polarizací a rozptyly v optickém vlákně.

Hlavním výstupem práce je porovnání měření akustických vibrací pomocí interferenční metody (Mach–Zehnderův interferometr) a polarizační metody v laboratorních podmínkách, dále měření na reálné trase ve městě Brno (Michelsonův interferometr). Pro měření byla využita komponenta Analog Discovery 2 NI Edition, díky které bylo umožněno veškeré měření provádět na PC, jelikož má výstup na USB a pomocí programu WaveForms byly zobrazovány a následně ukládány naměřené hodnoty.

# 1 ZÁKLADY OPTIKY

Optika je věda, která se zabývá studiem zákonitostí světelných jevů, které vznikají při průchodu světla různými prostředími a jejich rozhraními v různých podmínkách, a dále také studiem vzniku a zániku světla a jeho působením na danou látku. Zpočátku se optika zabývala pouze světlem a popisem jevů, ke kterým dochází při šíření světla, avšak vlivem objevů a vynalezení dokonalejších přístrojů se optika začala rozšiřovat o další části – optiku vlnovou a kvantovou. Dále se optika zabývá také popisem a vlastnostmi elektromagnetického vlnění (infračervené, ultrafialové, rentgenové záření apod.).

Optiku můžeme rozdělit na tři části:

- **Geometrická optika** – historicky nejstarší, zabývá se šířením světla, odrazem a lomem světla.
- **Vlnová optika** – zabývá se vlnovými vlastnostmi světla a popisem chování světla při dopadu na různé překážky. Vlnová optika zahrnuje jevy, jakými jsou interference, disperze a polarizace.
- **Kvantová optika** – zabývá se jevy, které nastávají při interakci záření a látky (musí se využít kvantové fyziky pro popis těchto jevů). Mezi tyto jevy patří např. fotoelektrický jev.

## 1.1 Vlnová optika

Světlo se šíří ve formě vlnění. Ve volném prostředí (vzduch) se světelná vlna šíří konstantní rychlostí  $c_0$ . Ovšem v homogenním průhledném prostředí, jakým může být např. sklo, se světelná vlna šíří rychlostí nižší, jelikož musí být brán v potaz index lomu daného prostředí ( $n \geq 1$ ). Rychlost šíření světelné vlny v přenosovém médiu je poté vyjádřena [15]:

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

Světelná vlna je popsána matematickou skutečnou funkcí polohy  $r = (x, y, z)$  a časem  $t$ . Vlnová funkce je poté značena  $u(r, t)$ . Optickou vlnu je možné následně popsat pomocí parciální diferenciální rovnice nazývané vlnová rovnice [15]:

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = 0. \quad (1.2)$$

## 1.2 Koherence světla

Koherence je vzájemná souvislost fáze a amplitudy vlnění, a to buď z jednoho místa s určitým časovým odstupem (časová koherence) nebo vlnění vycházející ze dvou různých míst na povrchu zářícího tělesa (prostorová koherence). Koherentní vlnění jsou taková světelná vlnění (o stejné frekvenci), jejichž fázový rozdíl se v daném bodě nemění s časem. Mezi takto uvažované zdroje záření patří lasery. Zvýšení monochromatickosti a ohraničení velikosti zářící plochy zdroje vede ke zlepšení koherenčních vlastností. Velikost zářící plochy ovlivňuje prostorovou koherenci a monochromaticnost ovlivňuje časovou koherenci.

### 1.2.1 Časová koherence

Stupeň časové koherence souvisí se spektrálním složením interferujících paprsků a zjednodušeně ji lze charakterizovat pomocí tzv. koherenční délky  $\delta$ , pro kterou platí:

$$\delta = \lambda_0 \cdot \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda}, \quad (1.3)$$

kde  $\lambda_0$  značí střední vlnovou délku spektrálního oboru a  $\Delta\lambda$  charakterizuje jeho šířku.

### 1.2.2 Prostorová koherence

Stupeň prostorové koherence je spjat se statistickým charakterem světelných zdrojů. Tyto zdroje se skládají z velkého počtu atomů, které nezávisle na sobě emitují fotony v libovolných okamžicích. Zjednodušeně ji lze charakterizovat pomocí tzv. koherenční šířky  $\beta$ , pro kterou platí:

$$\beta = \lambda_0 \cdot \frac{a}{s}, \quad (1.4)$$

kde  $a$  značí vzdálenost od zdroje záření,  $s$  značí šířku zdroje záření, měřenou kolmo na směr šíření záření. Koherenční šířka poté odpovídá směru, kde měříme  $s$ .

## 1.3 Interference světla

Interference světla je jev, při kterém se nejvýrazněji projevují vlnové vlastnosti světla. O detailní popis a vysvětlení se zasloužil anglický fyzik Thomas Young, který vycházel z představy, že světlo je vlnění. Interference je založena na tom, že vlnění přicházející do určitého bodu z různých zdrojů, se v daném bodě vzájemně skládají. Pomocí interference se ve fyzice dokazuje vlnová povaha zkoumaného fyzikálního

jevu. Pokud dojde k interferenci, je vlnová povaha potvrzena. Nejvíce se toho využívá v jaderné, kvantové a částicové fyzice.

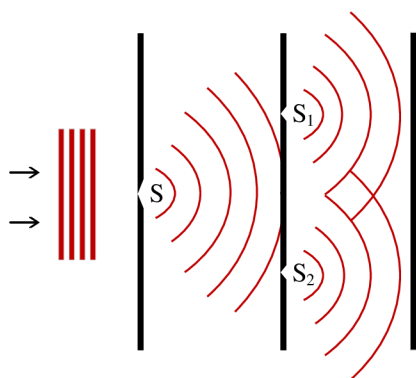
V případě, že máme současně splněny následující podmínky, dochází k interferenci vlnění:

- Uvažujeme o 2 a více vlnění,
- všechna uvažovaná vlnění mají stejnou vlnovou délku,
- mezi interferujícími vlněními je vytvořen fázový (dráhový) rozdíl,
- vlnění jsou koherentní.

Pokud mají všechna interferující vlnění stejnou vlnovou délku, bude interference nejvýraznější. Ovšem k interferenci dojde i v případě, že vlnění nemají stejnou vlnovou délku, avšak výsledný interferenční obrazec nebude tak výrazný [15].

### 1.3.1 Youngův pokus

Youngův pokus (nazýván také jako dvojštěrbínový experiment) je pokus, kterým anglický fyzik Thomas Young experimentálně dokázal, že světlo je vlnění. Princip je založen na monochromatickém záření dopadajícím na dvojštěrbinu. Vlnění, které dopadne na dvojštěrbinu se průchodem rozdělí na dvě vlny, které mezi sebou interferují a za štěrbinami umístěného stínítka vytvářejí interferenční obrazec. Interferenční obrazec (v podobě světlých a tmavých proužků) tedy vzniká vzájemným skládáním světelných vlnění z obou štěrbin. Světlý proužek odpovídá interferenčnímu maximu, to vzniká v místech, kde se vlnění střetnou se stejnou fází. Tmavý proužek odpovídá interferenčnímu minimu, které vzniká v místech, kde mají vlnění opačnou fázi.

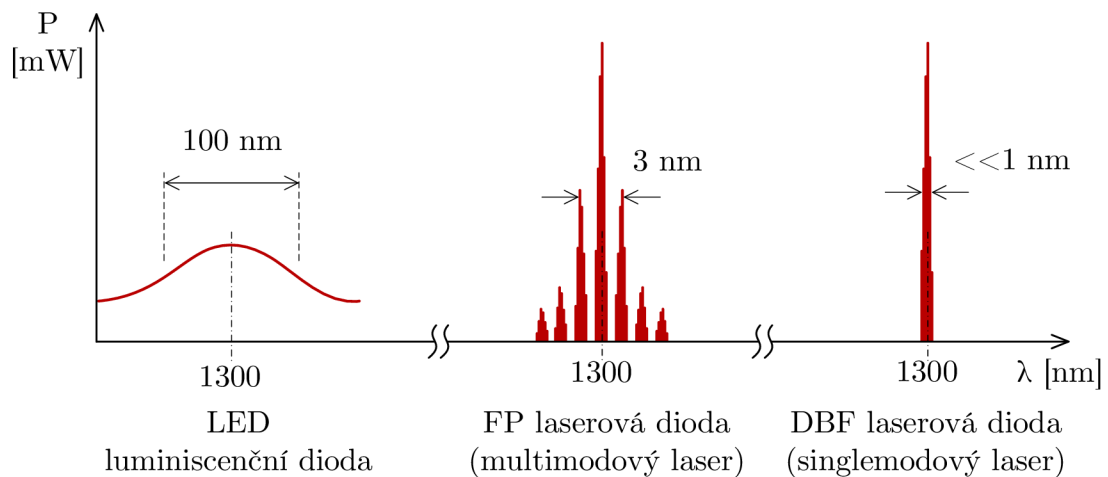


Obr. 1.1: Youngův pokus

## 1.4 Zdroje vysílání

Jako zdroj záření uvažujeme optoelektronické vysílače, jejichž úkolem je transformovat elektrický signál do podoby světelných impulzů. Zdroje záření rozdělujeme na:

- **Koherentní** – elektromagnetické záření, které má stejnou amplitudu, fázi a vlnovou délku na určité vzdálenosti (koherenční délka) nebo po určitou dobu (doba koherence). Mezi takto označované zdroje patří např. lasery s velkou koherentní délkou [15].
- **Částečně koherentní.**
- **Nekoherentní** – nedochází zde k interferenci. Zde patří např. luminiscenční diody (Superluminescent diode – SLED, Amplified spontaneous emission – ASE). Pojem luminiscence je jev, kdy atomy a molekuly nacházející se v excitovaném stavu vyzařují světelné záření [15].



Obr. 1.2: Spektrum polovodičových zdrojů záření [13]

## 2 OPTICKÁ INTERFEROMETRIE

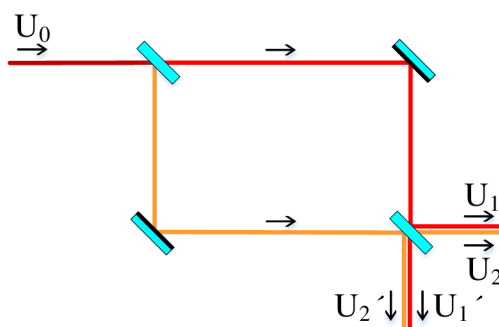
Interferometrie je optická analytická metoda, která je založená na interferenci světla. Využívá se ohybu a interference světla na štěrbině, kde se měří rozdíl indexu lomu mezi dvěma prostředími – prostředím známým (definovaným indexem lomu) a prostředím neznámým (měřeným). Na rozdíl od refraktometrie, kde se měří přímo index lomu [11, 15].

### 2.1 Interferometry

Interferometr je optický přístroj pro velmi přesná měření, který nám umožňuje provádět řadu přesných měření s využitím interferenčních jevů, které jsou způsobeny světelným zářením. Rozděluje jednu vlnu na dvě vlny pomocí děliče (optické zařízení, sloužící k rozdělení paprsku světla na dvě části např. polopropustné zrcadlo). Jednotlivé vlny zpomaluje různými vzdálenostmi a odráží je pomocí zrcadel. Následně dojde k rekombinaci pomocí stejného nebo jiného děliče paprsků a zjistí intenzitu jejich superpozice [11, 15].

Jednotlivé interferometry dělíme podle počtu interferujících vln na dvousvazkové a vícesvazkové interferometry. Mezi nejznámější dvousvazkové interferometry patří Michelsonův, Mach–Zehnderův a Sagnacův interferometr. Nejznámější vícesvazkový interferometr je Fabry–Perotův interferometr.

#### 2.1.1 Mach–Zehnderův interferometr

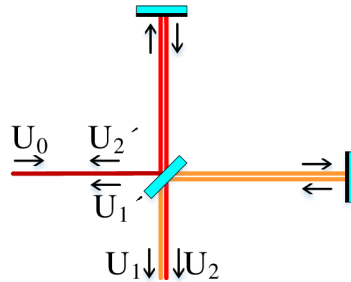


Obr. 2.1: Mach–Zehnderův interferometr [15]

Mach–Zehnderův interferometr využívá dva děliče paprsku (polopropustné zrcadla) a dvě neprostupná zrcadla k rozdělení a následné rekombinaci (slučení) paprsku. Jak můžeme vidět na obrázku 2.1, na začátku dojde k rozdělení paprsku pomocí děliče (polopropustné zrcadlo) na dvě vlny. Pomocí úhlu natočení tohoto děliče můžeme měnit vzdálenost dráhy, kterou urazí světelné paprsky. Poté následuje zrcadlo,

kteří odrazí světelný paprsek směrem k dalšímu děliči. Ten má za úkol sloučit tyto paprsky a odrazit na detektor. Nevýhodou tohoto interferometru je nutnost použít vysoce kvalitní čočky, děliče a zrcadla [6, 11].

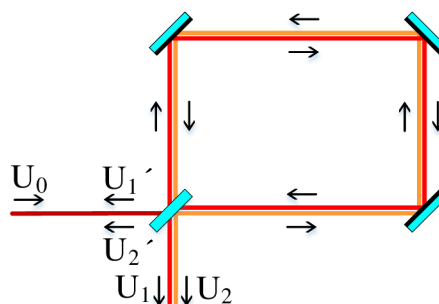
### 2.1.2 Michelsonův interferometr



Obr. 2.2: Michelsonův interferometr [15]

Michelsonův interferometr používá dělič paprsků a dvě neprostupná zrcadla. Jak je vidět (obr. 2.2), uprostřed systému je dělič paprsku, který slouží k propuštění paprsku dále na neprostupná zrcadla, která paprsek odrazí zpět na dělič a ten následně část paprsku odrazí směrem na výstup interferometru, ale část paprsku propustí také směrem ke vstupu interferometru. Michelsonův interferometr je citlivější než Mach-Zehnderův, jelikož u Michelsonova interferometru prochází světelný paprsek měřeným prostorem dvakrát [6, 11].

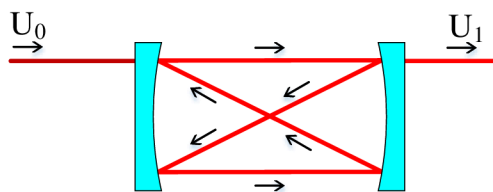
### 2.1.3 Sagnacův interferometr



Obr. 2.3: Sagnacův interferometr [15]

Sagnacův interferometr využívá jeden dělič paprsků a tři neprostupná zrcadla, jak je zřejmé z obr. 2.3. Oba dva paprsky procházejí stejnou uzavřenou cestou, avšak každý paprsek v opačném směru. Díky tomu je Sagnacův interferometr extrémně stabilní a vyrovnatelný dokonce i s širokopásmovým světelným zdrojem [6, 11].

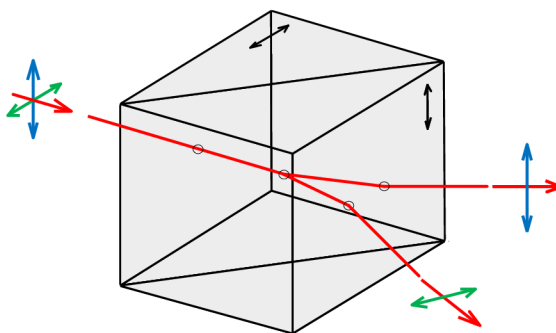
## 2.1.4 Fabry–Perotův interferometr



Obr. 2.4: Fabry–Perotův interferometr [6, 11]

Fabry–Perotův interferometr se skládá ze dvou rovnoběžných povrchů (sférická zrcadla), avšak s vysoce odrazovými poloprůhlednými povlaky. Vzdálenost je zvolena tak, aby se paprsek čtyřikrát odrazil uvnitř mezi sférickými zrcadly, a poté projde ven ve směru své původní cesty [6, 11].

## 2.1.5 Polarizační interferometr

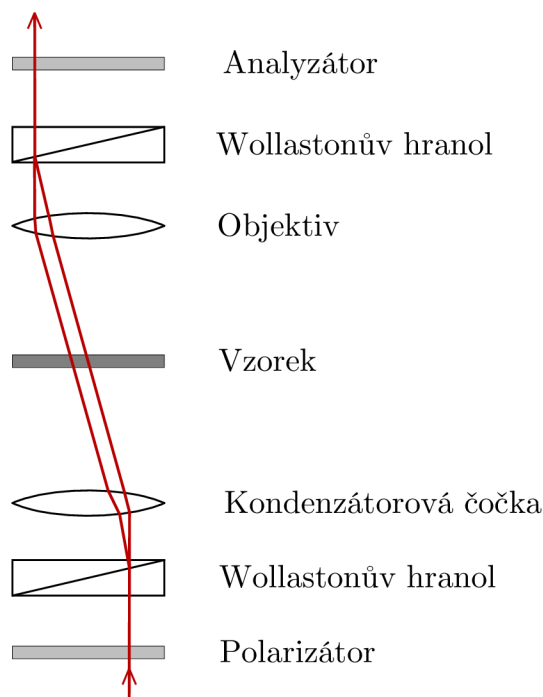


Obr. 2.5: Wollastonův hranol [6]

Polarizační interferometry využívají Wollastonův hranol (obr. 2.5). Wollastonův hranol je polarizační dělič rozdělující náhodně polarizované světlo nebo nepolarizované světlo na dva lineárně polarizované paprsky. Skládá se ze dvou pravouhlých hranolů vyrobených z dvojlomného krystalu spojenými k sobě svými bázemi. Světelný paprsek dopadá kolmo na stěnu prvního hranolu, kde poté vznikají dva paprsky (řádny a mimořádný), které jdou stejným směrem, avšak kolmo na optickou osu. Ve druhém hranolu postupují oba paprsky opět kolmo na optickou osu, avšak jelikož jsou optické osy obou hranolů kolmé navzájem, změní se paprsek řádný ve druhém hranolu na mimořádný a naopak [6].

Polarizační interferometry našly nejrozsáhlejší použití v oblasti interferenční mikroskopie. Typickým příkladem je např. Nomarskiho interferometr (obr. 2.6), který se skládá ze dvou Wollastonových polarizačních hranolů, které používá k rozdělení a následné rekombinaci světelného paprsku. Princip je založen na fázovém





Obr. 2.6: Nomarskiho polarizační interferometr [6]

zkreslení paprsku po průchodu vzorkem. Fázový paprsek je rozdělen na dva rovnoměrně rozložené ale prostorově oddělené paprsky, z nichž jeden je referenční. Konečné paprsky procházejí polarizačním filtrem (analyzátořem) a následně dochází k vyhodnocení [6].

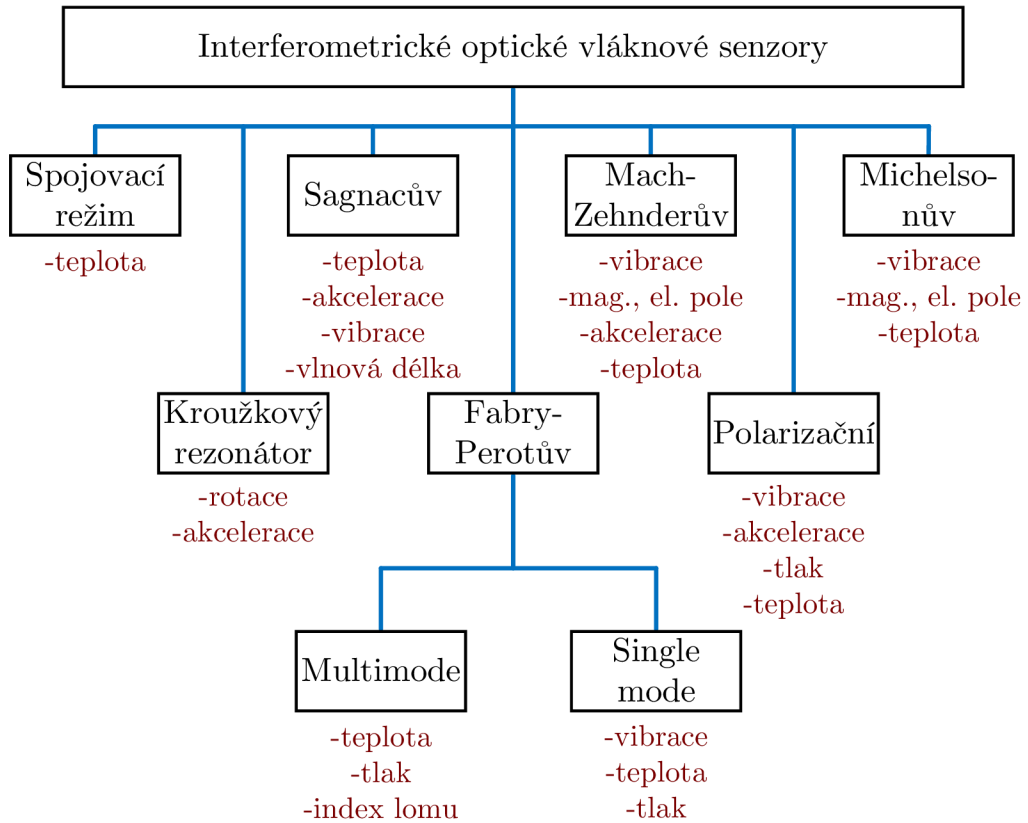
## 2.2 Optické vláknové interferometrické senzory

Nejcitlivější optické vláknové senzory jsou založeny na fázové modulaci světelné vlny, která je šířena optickým vláknem. Pomocí interferometrických metod se měří změny nebo modulace fáze světelné vlny. Snímaná veličina, která způsobuje změnu fáze může být teplota, vlhkost, síla, akustické vibrace atd. [11].

Optické vláknové interferometry lze rozdělit do tří základních skupin [11]:

- **Dvouramenný jednomódový interferometr** – využívá porovnání fáze světelné vlny, která se šíří sensorovým optickým vláknem a vlny, která je šířena vláknem referenčním. Mezi takto označované interferometry patří např. Mach–Zehnderův nebo Michelsonův interferometr.
- **Jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou** – využívá porovnání fází dvou světelných vln, které se šíří v cívice optického vlákna proti sobě. Mezi takto označované interferometry patří např. Sagnacův interferometr.

- **Mezimódový interferometr** – využívá interferenci dvou nebo více módů světelné vlny, které jsou šířeny stejným optickým vláknem. Výhodou je možnost použití mnohovídných optických vláken, ovšem nevýhodou jsou zde problémy spojené s vyhodnocováním interferenčního obrazu.



Obr. 2.7: Interferometrické vláknové senzory [16]

### 3 POLARIZACE SVĚTLA

Světlo je elektromagnetické vlnění, což znamená, že se jedná o kmitání vektoru intenzity elektrického pole  $E$  a k němu kolmého vektoru indukce magnetického pole  $B$ . Avšak oba dva tyto vektory leží v rovině kolmé ke směru šíření vlnění a spolu s vektorem ve směru šíření vytváří pravotočivou soustavu, tudíž lze uvažovat pouze o jednom z těchto vektorů a většinou se volí intenzita elektrického pole  $E$ . V případě, že povedeme rovinu kolmou ke směru šíření svazkem světla a v každém bodu roviny bude mít vektor  $E$  jiný směr a velikost, jedná se o nepolarizované světlo. O polarizovaném světle hovoříme tehdy, jestliže vektory  $E$  mají v dané rovině protínající svazek světla stejný směr. Rozdíl mezi polarizovaným a nepolarizovaným světlem pouhým okem nerozeznáme, jelikož lidské oko nedokáže rozlišit polarizované a nepolarizované světlo[2, 15].

Druhy polarizace[15]:

- **Elipticky polarizované světlo** – směr vektoru  $E$  se mění v čase a popisuje elipsu.
- **Lineárně polarizované světlo** – směr vektoru  $E$  je v konkrétní rovině neměnný.
- **Kruhově polarizované světlo** – vektor  $E$  opisuje kružnici.

#### 3.1 Polarizace

Uvažujme o monochromatické rovinné vlně s kmitočtem  $f$  a úhlovou frekvencí  $\omega = 2\pi \cdot f$ , která se šíří ve směru  $z$  s rychlostí  $c$ . Elektrické pole leží v rovině  $x - y$  a je popsáno následující rovnicí:

$$\epsilon(z, t) = \mathbf{Re} \left\{ \mathbf{A} \exp \left[ j\omega \left( t - \frac{z}{c} \right) \right] \right\}, \quad (3.1)$$

kde komplexní obálka

$$\mathbf{A} = A_x \hat{\mathbf{x}} + A_y \hat{\mathbf{y}}, \quad (3.2)$$

je vektor s komplexními složkami  $A_x$  a  $A_y$ . Zmíněné rovnice polarizace této vlny slouží k nalezení koncového bodu vektoru  $\epsilon(z, t)$  v každé pozici  $z$  jako funkci času[15].

## 3.2 Elipticky polarizované světlo

Vyjádřením a nahrazením  $A_x$  a  $A_y$  do rovnic (3.1) a (3.2), kde  $A_x = a_x e^{j\phi_x}$  a  $A_y = a_y e^{j\phi_y}$ , (z hlediska veličin a fází) získáme

$$\epsilon = \epsilon_x \hat{\mathbf{x}} + \epsilon_y \hat{\mathbf{y}}, \quad (3.3)$$

kde

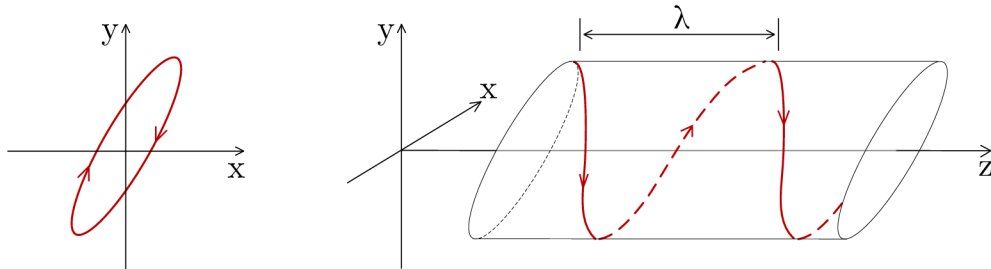
$$\epsilon_x = a_x \cdot \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{c} \right) + \phi_x \right], \quad (3.4)$$

$$\epsilon_y = a_y \cdot \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{c} \right) + \phi_y \right], \quad (3.5)$$

jsou složky  $x$  a  $y$  elektrického pole  $\epsilon(z, t)$ . Složky  $\epsilon_x$  a  $\epsilon_y$  jsou periodickými funkcemi rovnice  $t - z/c$  oscilující na frekvenci  $f$ . Rovnice (3.4) a (3.5) jsou parametrické rovnice elipsy, tudíž výsledná rovnice elipsy je

$$\frac{\epsilon_x^2}{a_x^2} + \frac{\epsilon_y^2}{a_y^2} - 2 \cos \phi \frac{\epsilon_x \epsilon_y}{a_x a_y} = \sin^2 \phi, \quad (3.6)$$

kde  $\phi = \phi_y - \phi_x$  je fázový rozdíl.



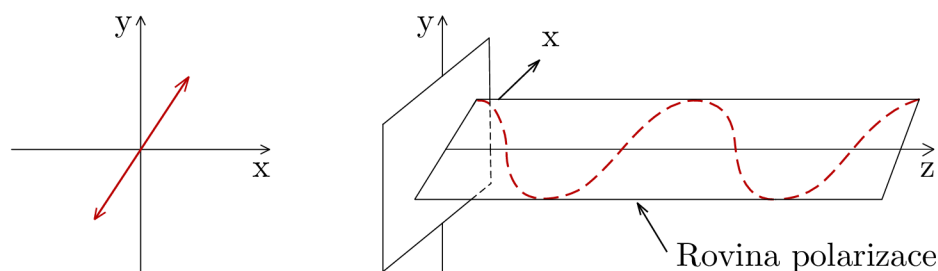
Obr. 3.1: Trajektorie koncového bodu elipticky polarizovaného světla[15]

Špička vektoru elektrického pole se při pevné hodnotě  $z$  periodicky otáčí v rovině  $x - y$  a opisuje danou elipsu. Ve stanoveném čase  $t$  se špička tohoto vektoru řídí skrz spirálovitou trajektorii v prostoru, která leží na povrchu eliptického válce. Jak vlna postupuje, elektrické pole se otáčí a pro každou vzdálenost odpovídající vlnové délce  $\lambda = c/f$ , svůj pohyb periodicky opakuje [2, 15].

## 3.3 Lineárně polarizované světlo

Světlo je lineárně polarizováno pokud dojde ke zmizení jedné ze složek ( $a_x = 0$ ), poté je světlo lineárně polarizováno ve směru složky  $y$ . Světlená vlna je lineárně

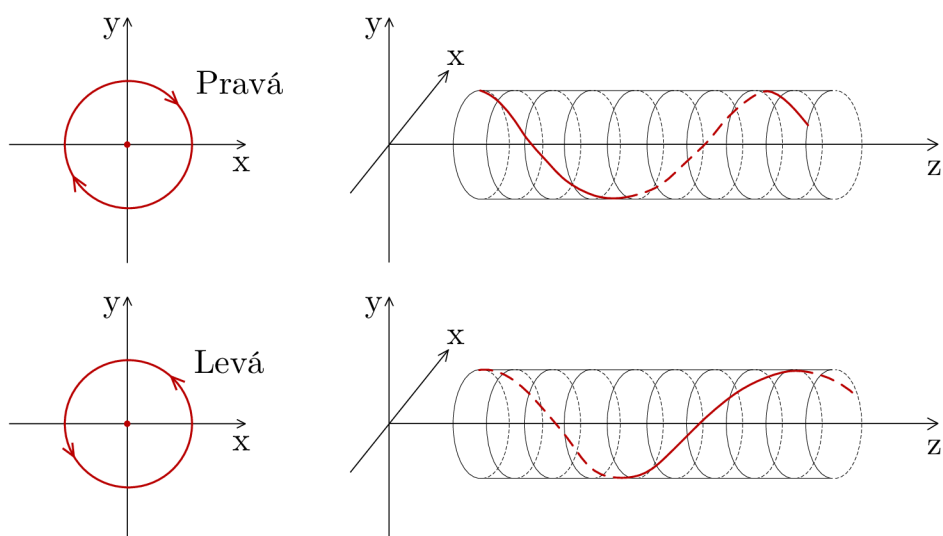
polarizována i tehdy, jestliže je fázový rozdíl  $\phi = 0$  nebo  $\pi$ . V těchto případech se elipsovité válec zhroutí do roviny [2, 15].



Obr. 3.2: Trajektorie koncového bodu lineárně polarizovaného světla[15]

### 3.4 Kruhově polarizované světlo

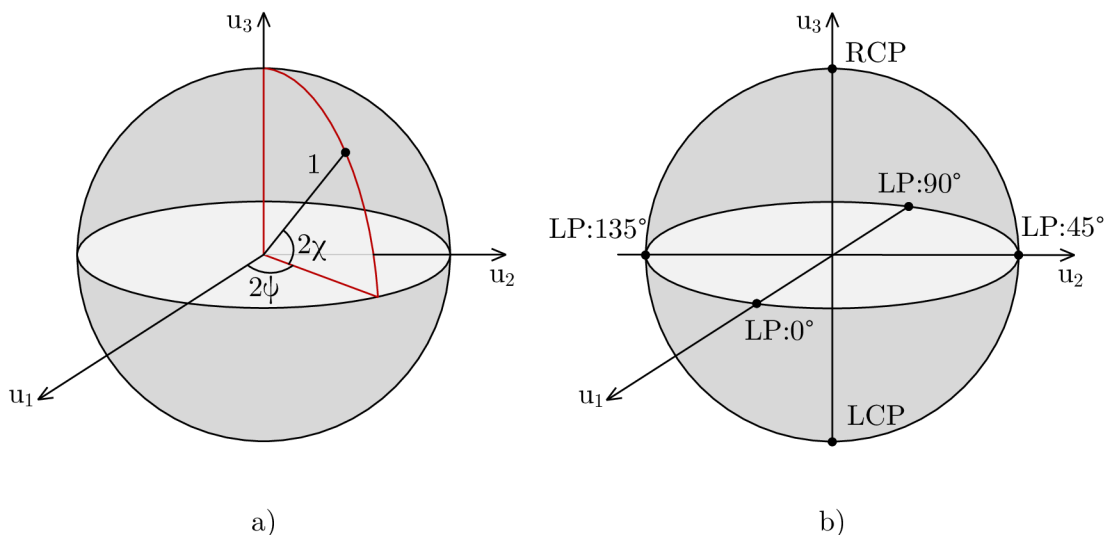
Světlo je kruhově polarizováno v případě, že se z eliptického válec stane kruhový válec a vlna je následně kruhově polarizována. Světlo může být kruhově polarizováno dvěma způsoby a to buď, kruhově polarizované světlo vpravo nebo kruhově polarizované světlo vlevo. Pokud je  $\phi = +\pi/2$ , elektrické pole se otáčí ve směru hodinových ručiček při pohledu ze směru šíření světelné vlny a jedná se o kruhově polarizované světlo vpravo (připomíná pravotočivý šroub ve směru světelné vlny). Avšak jestliže  $\phi = -\pi/2$ , elektrické pole se otáčí proti směru hodinových ručiček, jedná se o kruhově polarizované světlo vlevo [2, 15].



Obr. 3.3: Trajektorie koncového bodu kruhově polarizovaného světla–pravá a levá[15]

### 3.5 Poincarého koule

Poincarého koule je geometrické těleso, ve kterém je polarizace reprezentována bodem na povrchu Poincarého kouli se souřadnicemi  $(r = 1, \theta = 90^\circ - 2\chi, \phi = 2\psi)$  ve sférickém souřadném systému, kde každý bod na této kouli znázorňuje nějaký polarizační stav. Lineární polarizaci znázorňují body v rovině  $\chi = 0^\circ$ ,  $2\psi = 0^\circ$  a  $2\psi = 180^\circ$ . Kruhovou polarizaci vpravo a vlevo znázorňují body  $2\chi = 90^\circ$ . Všechny ostatní body na Poincarého kouli reprezentují eliptickou polarizaci [2, 15].



Obr. 3.4: a) Poincarého koule, b) Body na Poincarého kouli reprezentující lineárně polarizované světlo (LP–Linearly Polarized), kruhově polarizované světlo vpravo (RCP–Right Circularly Polarized) a kruhově polarizované světlo vlevo (LCP–Left Circularly Polarized) [15]

Dvě skutečné hodnoty veličin  $(R, \varphi)$  nebo ekvivalentní úhly  $(\chi, \psi)$  popisují stav polarizace, avšak tyto hodnoty neobsahují informace o intenzitě vlny. Informaci o intenzitě vlny obsahuje Stokesův vektor, tento vektor je sada čtyř reálných čísel  $(S_0, S_1, S_2, S_3)$ , které se nazývají Stokesovy parametry. První z těchto reálných čísel  $(S_0 = a_x^2 + a_y^2)$  je přímo úměrný optické intenzitě. Ostatní tři jsou kartézské souřadnice bodu na Poincarého kouli  $(u_1, u_2, u_3) = (\cos 2\chi \cos 2\psi, \cos 2\chi \sin 2\psi, \sin 2\chi)$ , které jsou vynásobeny  $S_0$ , platí [2, 15]:

$$S_1 = S_0 \cos 2\chi \cos 2\psi, \quad (3.7)$$

$$S_2 = S_0 \cos 2\chi \sin 2\psi, \quad (3.8)$$

$$S_3 = S_0 \sin 2\chi, \quad (3.9)$$

Stokesovy parametry mohou být vyjádřeny pomocí parametrů pole  $(a_x, a_y, \varphi)$  a ve složkách komplexní obálky  $(A_x, A_y)$ . Stokesovy parametry poté jsou [2, 15]:

$$S_0 = a_x^2 + a_y^2 = |A_x|^2 + |A_y|^2, \quad (3.10)$$

$$S_1 = a_x^2 - a_y^2 = |A_x|^2 - |A_y|^2, \quad (3.11)$$

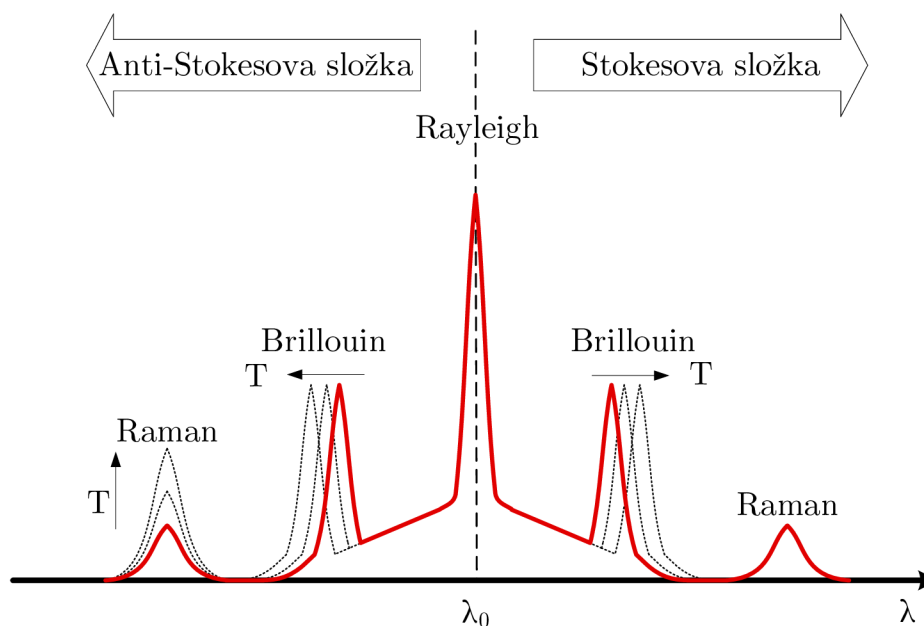
$$S_2 = 2a_x a_y \cos \varphi = 2 \mathbf{Re} \{A_x^* A_y\}, \quad (3.12)$$

$$S_3 = 2a_x a_y \sin \varphi = 2 \mathbf{Im} \{A_x^* A_y\}, \quad (3.13)$$

Platí, že  $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ , tyto Stokesovy parametry zcela definují intenzitu a stav polarizace.

## 4 ROZPTYL ZÁŘENÍ

Rozptyl záření je obecný fyzikální proces, který vzniká odchýlením částic, směrem do prostoru, od rovné trajektorie. Při průchodu zkoumanou látkou dojde nejen k absorpci záření (příp. i k fluorescenci), nýbrž také k rozptylu záření. Majoritními jevy jsou zde absorpce a fluoresce, zatímco na rozptylu záření se podílí jen malá část světelného záření vstupujícího do systému. Fluorescence je zde jevem velmi rušivým (nežádoucím). K rozptylu záření může docházet vlivem kolize, a to mezi světelným zářením a malými tuhými částicemi hmoty, příp. na molekulách. Jednotlivé rozptyly záření (viz obr. 4.1), budou popsány v dalších částech této práce.



Obr. 4.1: Rozptyl záření v OVS[1, 9]

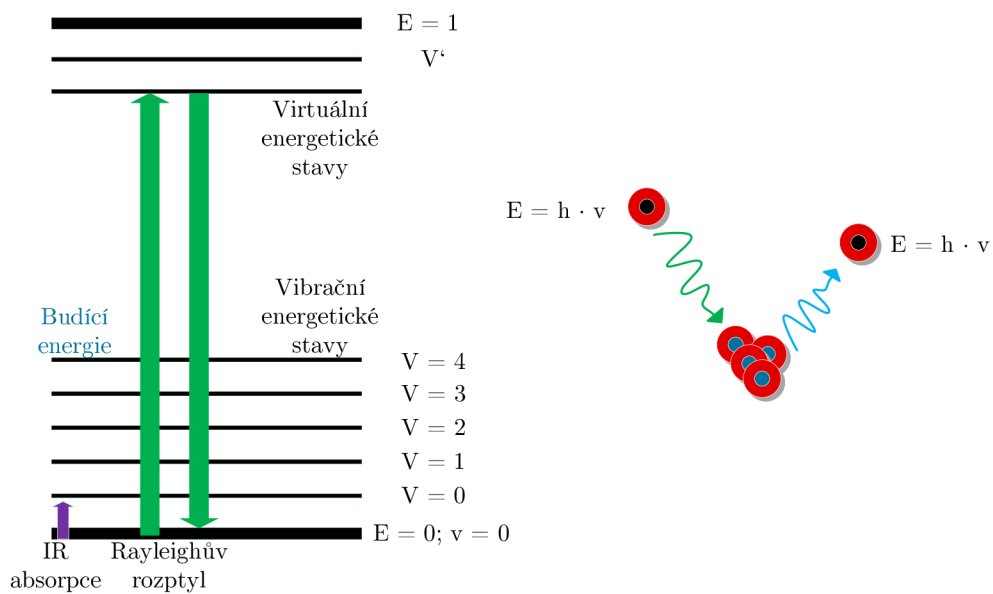
Ve fyzice rozlišujeme dva druhy rozptylu:

- **Pružný** – při pružném rozptylu se energie odraženého fotonu (ani u molekuly) nezmění a u vzniklého záření nedojde ke změně vlnové délky  $\lambda$ . Mezi takto označované rozptyly patří např. Rayleighův rozptyl.
- **Nepružný** – při nepružném rozptylu dochází k předání, části energie fotonu molekule, nebo také k přijetí části energie. Takto vzniklé záření má jinou frekvenci od budícího záření. Mezi nepružné rozptyly patří např. Ramanův rozptyl.



## 4.1 Rayleighův rozptyl

O tento jev se v roce 1899 zasloužil anglický fyzik John William Strutt, později nazýván také jako Lord Rayleigh. Ten vyšel z předpokladu, že světelné záření rozptylují přímo molekuly vzduchu a matematicky podložil, že energie rozptýleného záření silně závisí na jeho vlnové délce a to nepřímo úměrně její čtvrté mocnině a přímo úměrně osmé mocnině indexu lomu prostředí, kde dochází k lámání světelného paprsku. To znamená, že světelné záření s větší vlnovou délkou (např. červené) se rozptyluje méně než světelné záření s menší vlnovou délkou (např. modré). Tímto objevem Lord Rayleigh teoreticky popsal závislost modré oblohy, která vzniká průchodem slunečního záření zemskou atmosférou.



Obr. 4.2: Vznik Rayleighova rozptylu [9, 12]

Rayleighův rozptyl lze popsat Rayleighovým rozptylovým koeficientem [9, 10]:

$$\gamma_R = \frac{8 \cdot \pi^3}{3 \cdot \lambda^4} \cdot n^8 \cdot p^2 \cdot \beta_c \cdot k \cdot T_f \quad [\text{m}^{-1}], \quad (4.1)$$

kde  $n$  značí index lomu,  $p$  je fotoelektrický koeficient,  $\beta_c$  označuje isothermální stlačitelnost,  $k$  je Boltzmanova konstanta ( $1,380\,658 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $T_f$  značí fiktivní teplotu (pro oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$  je tato teplota rovna 1400 K).

Způsobený útlum Rayleighovým rozptylem  $\alpha_R$  [9, 10]:

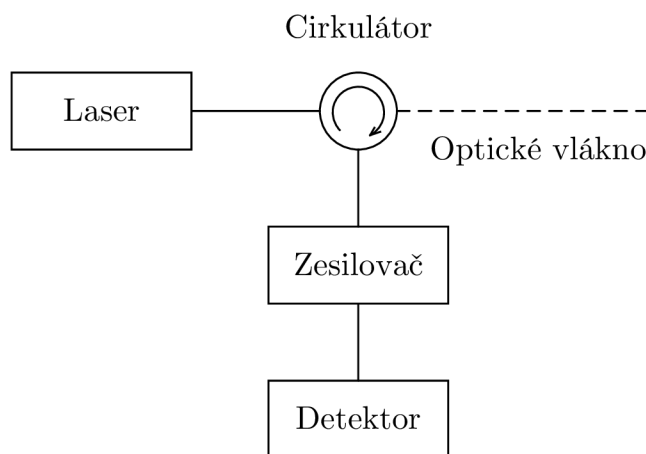
$$\alpha_R = \frac{C_1}{\lambda^4} \quad [\text{dB}], \quad (4.2)$$

kde  $C_1$  značí koeficient Rayleighova rozptylu ( $0,802 \cdot 10^{-27} \text{ dB} \cdot \text{m}^3$  pro křemenné sklo).

Rayleighův rozptyl (obr. 4.2) je elastický rozptyl nebo-li pružný. Princip Rayleighova rozptylu je založen na elastické srážce fotonů vstupujícího světelného záření s molekulou měřené fyzikální veličiny. Při této elastické srážce se energie  $E$  odraženého fotonu nezmění, což znamená, že u nově vzniklého rozptýleného světelného záření nedojde ke změně vlnové délky  $\lambda$ , oproti světelnému záření vycházejícímu ze zdroje světelného paprsku.

Při srážce fotonu záření s molekulou se molekula na chvíli dostane na excitovanou (vyšší) vibrační energetickou hladinu, ale téměř ihned se vrací zpátky na počáteční energetickou hladinu. Jelikož zde nedochází k žádnému pohlcení, ale také ani k emisi energie, má foton po srážce stejnou energii jako před srážkou a tudíž i stejnou vlnovou délku [9, 12].

#### 4.1.1 Příklad zapojení pro měření Rayleighova rozptylu



Obr. 4.3: Blokové schéma měření Rayleighova rozptylu [8]

Na obr. 4.3 můžeme vidět jednoduché blokové schéma zapojení pro měření Rayleighova rozptylu. Jedná se o zapojení pro měření distribuovaného akustického snímání (DAS–Distributed Acoustic Sensing). Všechny systémy DAS využívají techniku nazývanou koherentní optická odezva v časové oblasti (C–OTDR) zahrnující postupný přenos krátkých pulzů vysoce koherentního světla do optického vlákna a pozorování velmi malých zpětně rozptýlených úrovní signálu. Systémy DAS nachází své uplatnění převážně v monitorování dálnic, železnic a potrubí [8].

## 4.2 Ramanův rozptyl

V případě zkoumání rozptylu světelného záření na molekulách dojdeme k závěru, že převážná většina rozptýleného záření má stejnou vlnovou délku jako záření původní (Rayleighův rozptyl). Avšak u malé části rozptýleného záření dochází ke změně vlnové délky oproti původnímu záření vyslanému ze zdroje záření. Experimentálně tento jev prokázal v roce 1928 indický vědec Chandrasekhara Venkata Raman, po kterém byl tento jev pojmenován a díky němuž získal v roce 1930 Nobelovu cenu za fyziku.

Princip Ramanova rozptylu je založen na neelastické (nepružné) srážce fotonu světelného záření a molekul. Dopadající foton získá nebo naopak předá část své energie molekule. Při této neelastické srážce nedochází ke změně kinetické energie fotonů a molekul, avšak dochází zde ke změně vnitřní energie molekul, které jsou součástí neelastické srážky. Výsledkem srážky je změna rotačně-vibračního stavu a to buď z vyššího stavu na nižší nebo naopak. Tímto způsobem vzniklý rozptyl světelného záření má rozdílnou frekvenci oproti záření budícímu a abychom mohli tuto změnu zaznamenat, musíme využívat monochromatické záření pro buzení Ramanova rozptylu [9, 17, 19].

Rozptýlené světlo Ramanova rozptylu vzniká termálně ovlivněnými vibracemi molekul. Zpětně rozptýlené záření nese informaci o teplotě v místě, kde dochází k rozptylu záření. Ve skutečnosti však má Ramanovo zpětně rozptýlené záření 2 frekvenčně posunuté složky a to: Stokesovu složku Ramanova rozptylu a Anti-Stokesovu složku Ramanova rozptylu (viz obr. 4.1). Amplituda Stokesovy složky je termálně nezávislá, ale amplituda složky Anti-Stokesovy je termálně silně závislá. Důsledkem toho je důležité, při měření pomocí Ramanova jevu, provést odfiltrování důležitých frekvenčních složek, které nesou termální informaci. Teplota se poté získá porovnáním Stokesovy složky se složkou Anti-Stokesovou.

Intenzita spektrálních pásů ve Stokesově a Anti-Stokesově oblasti Ramanova rozptylu je závislá na množství molekul, které se nachází v základním, tj. ve vyšším rotačně-vibračním stavu. Za normálních podmínek, dle Boltzmannova rozdělení, se nachází daleko větší množství molekul v základním rotačně-vibračním stavu než ve stavu vyšším rotačně-vibračním, nebo-li excitovaném. Avšak v případě, že dojde ke vzrůstu teploty, tak se tato rovnováha posunuje ve prospěch excitovaného stavu. To znamená, že při růstu teploty se počet molekul ve vyšším rotačně-vibračním stavu zvyšuje a tudíž ve stavu základním se zase snižuje.

Výsledkem je vztah udávající poměr intenzit jednotlivých pásů v obou oblastech [9, 12]:

$$\frac{I_{aS}}{I_S} = \frac{(v_0 + v_v)^4}{(v_0 - v_v)^4} \cdot e^{(-\frac{\Delta E}{k \cdot T})}, \quad (4.3)$$

kde  $I_{\text{as}}$  je intenzita pásu v Anti-Stokesově oblasti,  $I_{\text{S}}$  intenzita pásu ve Stokesově oblasti,  $\nu_0$  frekvence budícího světelného záření,  $\nu_{\text{v}}$  frekvence pásu spektrálního (frekvence Ramanova posunu),  $e$  Eulerovo číslo,  $\Delta E$  rozdíl energií základního a excitovaného vibračně-rotačního stavu,  $k$  Boltzmannova konstanta,  $T$  termodynamická teplota.

Výkon signálu, při kterém začíná docházet ke zpětnému rozptylu, lze označit jako kritický výkon a ten lze vypočítat dle následujícího vzorce [9, 10]:

$$P_{\text{SRS}} = (4,4 \cdot 10^{-3}) \cdot d^2 \cdot \lambda \cdot \alpha_{\text{dB}} \quad [\text{W}], \quad (4.4)$$

kde  $P_{\text{SRS}}$  je hodnota kritického výkonu navázaného do optického vlákna,  $d$  průměr jádra vlákna,  $\alpha_{\text{dB}}$  měrný útlum,  $\lambda$  vlnová délka.

### 4.2.1 Stokesova složka Ramanova rozptylu

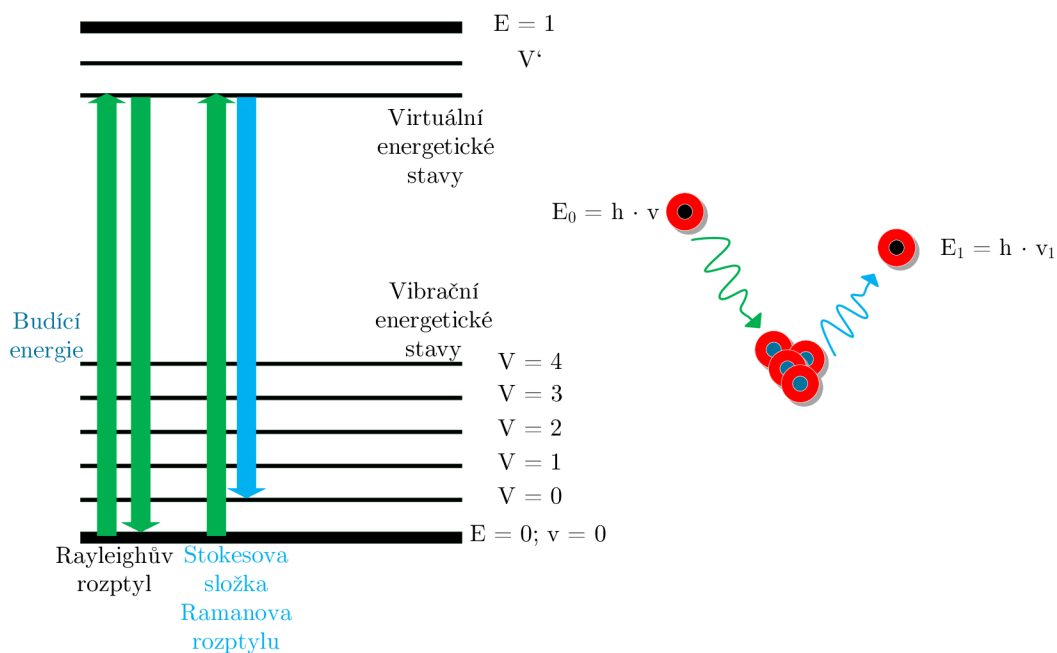
Jak již bylo zmíněno, princip Ramanova rozptylu je založen na neelastické srážce fotonu a molekul. Při srážce se molekula dostane na virtuální energetickou hladinu a následně klesne zpět na základní rotačně-vibrační energetickou hladinu. Avšak pokud molekula neklesne na počáteční (základní) energetickou hladinu, nýbrž na hladinu, která je vyšší než počáteční, jedná se o tzv. Stokesovu oblast. U stokesovy složky se jedná o posun směrem k vyšším vlnovým délkám (k nižším frekvencím). Jelikož se zde bude jednat o snížení energie fotonu, předá foton část své energie (vzorec (4.5)) molekule, která má následně energii viz vzorec (4.6). Na konci má molekula tolik energie, kolik potřebuje k přechodu do vyššího rotačně-vibračního stavu, vzorec (4.7). Takto popsanou situaci můžeme vidět na obr. (4.4) [9, 12].

$$E_0 = h \cdot \nu_0, \quad (4.5)$$

$$E_1 = h \cdot \nu_1, \quad (4.6)$$

$$\Delta E = h \cdot (\nu_0 - \nu_1) = h \cdot \Delta \nu, \quad (4.7)$$

kde  $E_0$  je energie fotonu před srážkou,  $h$  Planckova konstanta ( $6,626\,070 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ),  $\nu_0$  frekvence fotonu před srážkou,  $E_1$  energie fotonu po srážce,  $\nu_1$  frekvence fotonu po srážce,  $\Delta E$  úbytek energie fotonu způsobený srážkou (tento úbytek je roven energii potřebné k přechodu z nižšího do vyššího rotačně-vibračního stavu) a  $\Delta \nu$  frekvence Ramanova posunu (frekvence odpovídající pásu v Ramanově spektru) [9, 12].



Obr. 4.4: Vznik Ramanova rozptylu ve Stokesově oblasti [9, 12]

#### 4.2.2 Anti-Stokesova složka Ramanova rozptylu

Anti-Stokesova složka Ramanova rozptylu je založena také na neelastické srážce fotonu a molekul. Ovšem po neelastické srážce zůstane molekula s fotonem v excitovaném rotačně-vibračním energetickém stavu, který je nižší než počáteční energetický stav. Energie, kterou potřebujeme, abychom udrželi molekuly v excitovaném rotačně-vibračním energetickém stavu, je fotonu odebrána (viz vzorec (4.9)). Následně má foton (po neelastické srážce) energii nižší, než byla energie před srážkou (vzorec (4.8)). V případě, že bude mít foton energii vyšší, získá energii od molekuly a výsledná hodnota této získané energie bude stejná s energetickým kvantem, které molekula uvolní při snaze přejít z vyššího rotačně-vibračního energetického stavu do nižšího. Na konci tohoto procesu má foton vyšší energii a tedy i vyšší frekvenci, což nám dokazuje vzorec (4.10) [9, 12].

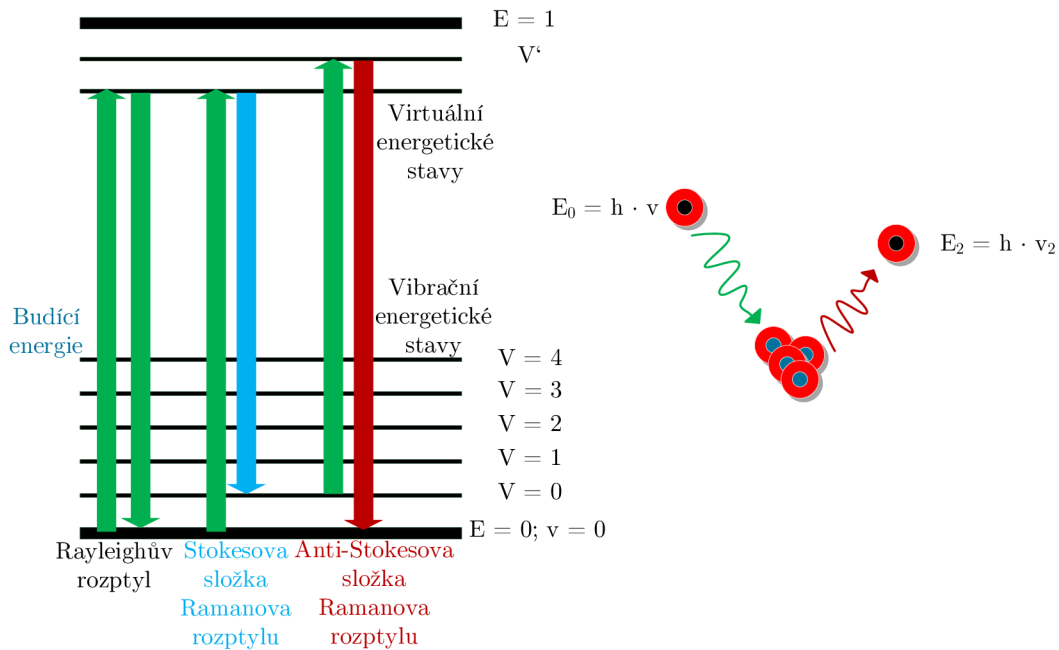
$$E_0 = h \cdot \nu_0, \quad (4.8)$$

$$E_2 = h \cdot \nu_2, \quad (4.9)$$

$$\Delta E = h \cdot (\nu_0 + \nu_2) = h \cdot \Delta \nu, \quad (4.10)$$

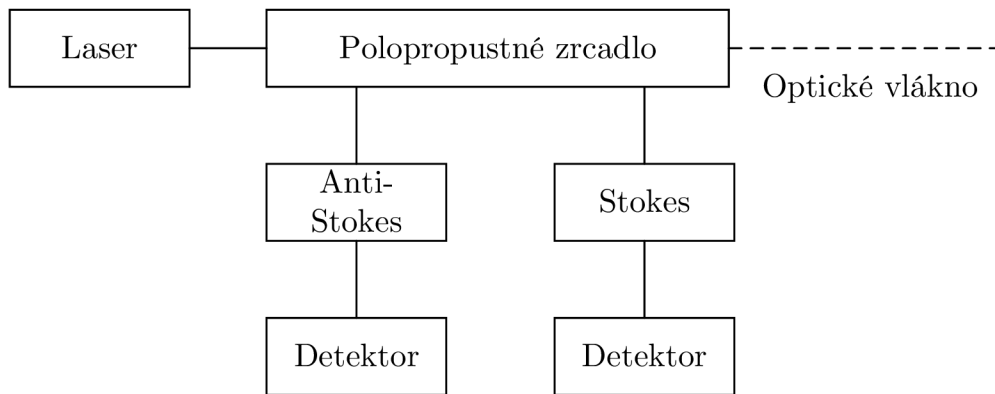
kde  $E_0$  je energie fotonu před srážkou,  $h$  Planckova konstanta,  $\nu_0$  frekvence fotonu před srážkou,  $E_2$  energie fotonu po srážce,  $\nu_2$  frekvence fotonu po srážce,  $\Delta E$  úbytek energie fotonu způsobený srážkou (tento úbytek je roven energii uvolněné při

přechodu díky srážce z vyššího do nižšího vibračně–rotačního stavu) a  $\Delta\nu$  frekvence Ramanova posunu (frekvence odpovídající pásu v Ramanově spektru) [9, 12].



Obr. 4.5: Vznik Ramanova rozptylu v anti-Stokesově oblasti[9, 12]

### 4.2.3 Příklad zapojení pro měření Ramanova rozptylu



Obr. 4.6: Blokové schéma měření Ramanova rozptylu [14]

Obr. 4.6 představuje jednoduché blokové schéma zapojení pro distribuované teplotní snímání (DTS–Distributed Temperature Sensing) využívající Ramanův rozptyl záření. Teplota ovlivňuje molekulární vibrace uvnitř optického vlákna, které mají za následek rozptyl světla. Intenzita rozptýleného Ramanova světla je přímo úměrná tepelné molekulové vibraci, díky které lze vypočítat teplotu optického vlákna.

### 4.3 Brillouinův rozptyl

Brillouinův rozptyl je jev v nelineárním optickém prostředí třetího řádu a je založen na principu šíření akustické vlny v optickém vláknu. Tento rozptyl je způsoben termálně excitovanými akustickými vibracemi, kdy máme světelný paprsek podél celého vlákna. Patří mezi kategorii nelineárních rozptylů, které jsou založeny na principu frekvenčního posunu rozptýleného světla. Akustické vibrace zde zvýší tok energie světelného záření a také rozptyl vlny. Rozdíl frekvencí bývá v řádu GHz, ovšem ke změně frekvence dochází i v případě, že dojde ke změně teploty popřípadě nějaké deformaci. Pokud porovnáme měření pomocí Ramanova rozptylu a pomocí Brillouinova rozptylu, dojdeme k závěru, že měření pomocí Brillouinova rozptylu je podstatně přesnější, stabilnější a častěji využívanější [9, 17, 19].

Brillouinův rozptyl se v optickém vláknu vyskytuje ve 2 typech [9, 7]:

- **Spontánní Brillouinův rozptyl** – vzniká v každém optickém vláknu při působení akustických vln na optické vlákno, taková hodnota bývá o 30 dB nižší než hodnota Rayleighova rozptylu.
- **Stimulovaný Brillouinův rozptyl** – vzniká při působení akustických nebo mechanických vibrací a také při působení optického záření o nadkritické hodnotě výkonu (mW) pro dané vlákno. V místě, kde dojde k působení všech veličin, dojde ke změně indexu lomu. Zde se oddělí foton od šířícího se světelného záření a směřuje poté opačným směrem, než kterým putovalo světelné záření. Takto vytvořená zpětná vlna má vliv na stabilitu a poměr šumu zdroje vysílání. Jelikož pro vznik stačí jen malá hodnota vysílacího výkonu (mW), snažíme se tento jev potlačovat. To můžeme dokázat např. zvýšením spektrální čáry.

Z toho plyne, že pokud se vstupní záření rozptýlí, aniž by se nějak výrazně změnila vlastnost optického vlákna, říká se, že rozptyl je spontánní. Avšak v případě, že se intenzita záření zvýší na takovou úroveň, kdy dojde ke změně vlastností optického vlákna a rozptýlené záření je přímo úměrné výkonu vstupního záření, dochází ke stimulování. To znamená, že přechod ze spontánního rozptylu na stimulovaný rozptyl odpovídá přechodu chování optického vlákna z lineárního na nelineární režim.

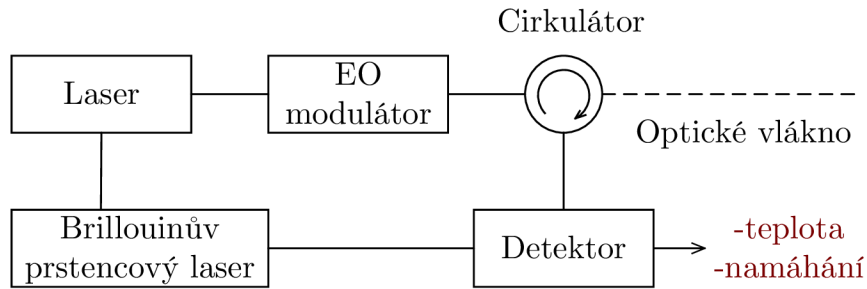
Tak jako u Ramanova rozptylu, lze i zde vypočítat hodnotu kritického výkonu vstupujícího do optického vlákna. Jedná se také o výkon signálu, při kterém dochází ke zpětnému rozptylu záření [9, 10]:

$$P_{\text{SBS}} = (4,4 \cdot 10^{-3}) \cdot d^2 \cdot \lambda^2 \cdot \alpha_{\text{dB}} \cdot v \quad [\text{W}], \quad (4.11)$$

kde  $P_{\text{SBS}}$  je hodnota kritického výkonu navázaného do optického vlákna,  $d$  průměr jádra vlákna,  $\lambda$  vlnová délka,  $\alpha_{\text{dB}}$  měrný útlum,  $v$  šířka pásma.

Z důvodu, že stimulovaný Brillouinův rozptyl je mnohem účinnější než spontánní Brillouinův rozptyl, je také více využíván k měření v oblasti distribuovaného snímání fyzikálních veličin [9, 18].

### 4.3.1 Příklad zapojení pro měření Brillouinova rozptylu



Obr. 4.7: Blokové schéma měření Brillouinova rozptylu [4]

Obr. 4.7 představuje možnost zapojení distribuovaného vláknového senzoru založeného na spontánním Brillouinovém rozptylu (DFS–Distributed Fiber Sensing). Brillouinův prstencový laser zde slouží jako optický lokální oscilátor. Detektor smíchává výstup z prstencového laseru se spontánní složkou Stokesovy složky Brillouinova rozptylu a měří teplotu příp. napětí ze smíšeného signálu [4].

## 4.4 Využití rozptylů záření v oblasti distribuovaných optických vláknových senzorů

Distribuované optické vláknové senzory se brzy stanou jednou z hlavních technologií, které budou odhalovat důležité informace o různých strukturách jakožto funkce monitorovacích sond a bude je možno spojit s oblastí přístrojové techniky, která nám poslouží při rozhodování o bezpečnosti jakékoliv struktury. Očekává se, že distribuované optické vláknové senzory budou odhalovat informace o teplotě, deformaci a vibracích z jakéhokoli místa podél celého optického vlákna pomocí rozptylu záření. Hlavním hnacím motorem těchto systémů je např. zjišťování trhlin v betonu ještě předtím, než jsou viditelné. To by mohlo zabránit úplnému zřícení budov a jiných stavebních konstrukcí [1].

Výsledkem velkého úsilí zkoumání vědců za posledních cca 20 let jsou výkony distribuovaných vláknových senzorů odpovídající v mnoha aplikacích, u kterých je vyžadována rozsáhlá oblast pokrytí s velkou přesností určení místa problému. Standardní optická vlákna bývají už nyní vestavěna do konstrukcí budov, přehrad, mostů, generátorů, ale také letadel, za účelem měření různých fyzikálních veličin. Využití



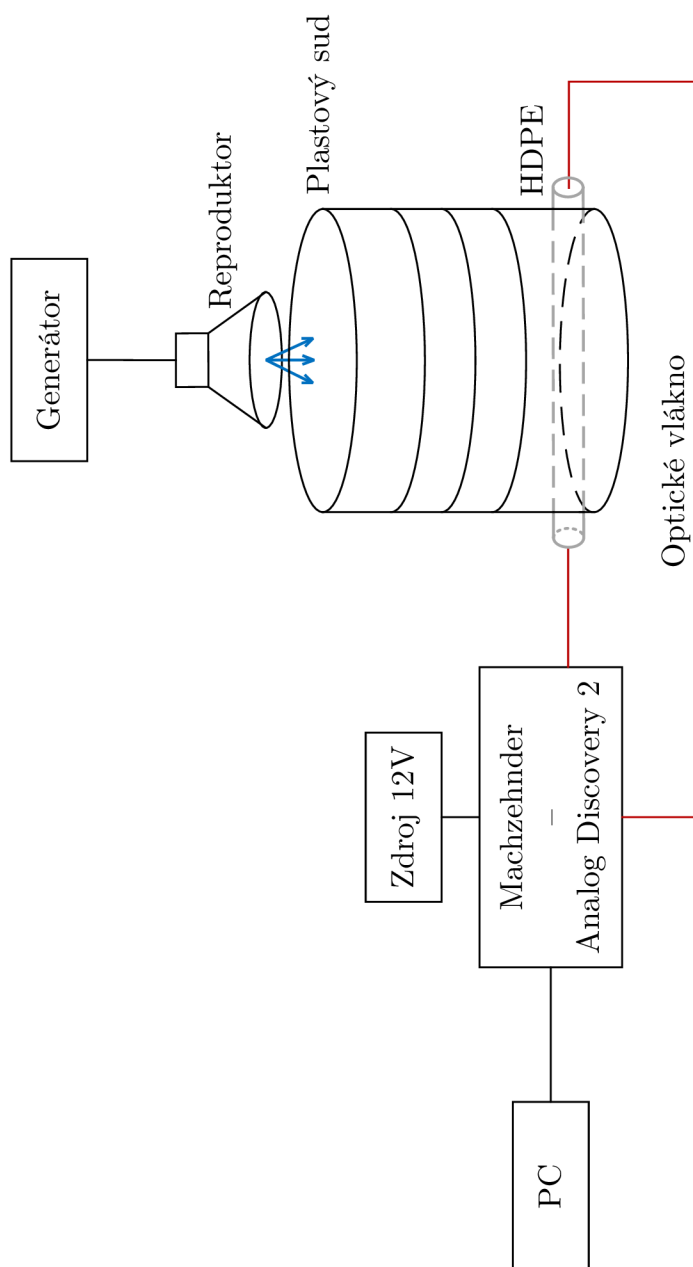
mohou nalézt distribuované optické vláknové senzory také v oblasti optických vláken, kde je možné provádět měření polarizační vidové disperze (dále jen PMD). To by mohlo vézt až k vyrobení optických vláken s nízkou PMD, které umožňují vysokorychlostní komunikační systémy [1].

Distribuovaný optický vláknový senzor si lze představit jako několik bodových senzorů rozprostřených po celé délce optického vlákna. To má za následek snížení hmotnosti i ceny celého systému, jelikož celý systém vyžaduje pouze jedno optické vlákno schopné vysílat i přijímat signál ze stejného vlákna a jeden monitor pro zobrazení jakékoli změny teploty, vibrací, napětí, příp. akustické vlny. Tato velká výhoda nízké hmotnosti dělá z distribuovaných optických vláknových senzorů, založených na rozptylu záření, největší výhodu pro použití v civilní nebo letecké dopravě [1].

## 5 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VIBRACÍ

Měření akustických vibrací bylo provedeno v kanceláři (SD5.69, Technická 12, Brno 616 00) vedoucího práce pana Ing. Petra Münstera, Ph.D., kde byl připraven plastový sud, ve kterém následně probíhalo měření. Princip měření spočíval v určení do jaké míry, postupně přisypávaná zemina s pískem a následně i s vodou, ovlivňuje (tlumí) nastavované frekvence a určit tak, zda nižší frekvence tlumí více nebo zda tlumí více frekvence vyšší.

## 5.1 Schéma zapojení



Obr. 5.1: Schéma zapojení měření akustických vibrací v plastovém sudu

## 5.2 Popis měření

Měření bylo provedeno pomocí již sestaveného Mach–Zehnderova interferometru propojeného s komponentou Analog Discovery 2 NI Edition. Celou sestavu pro měření poskytl vedoucí práce.

### 5.2.1 Referenční měření

Nejprve bylo provedeno referenční měření, se kterým se při zpracování výsledků jednotlivé hodnoty porovnávaly, aby tak bylo zjištěno do jaké míry zemina tlumí měřené frekvence. Měření trvalo 1 s a za tuto dobu měření bylo zaznamenáno 500 tis. vzorků, což odpovídá vzorkovací frekvenci 500 kSa/s. Princip referenčního měření spočíval v přímém ovlivnění optického vlákna akustickými vibracemi, tzn. optické vlákno bylo položeno přímo na reproduktor, kdy byl reproduktor položen na podlaze a vlákno bylo pomocí lepicí pásky připevněno na reproduktor.

### 5.2.2 Měření v plastovém sudu

Měření akustických vibrací (obr. 5.1) spočívalo v uložení optického vlákna do plastové chráničky (HDPE trubka o průměru 40 mm), která byla protažena a připevněna v plastovém sudu (obr. 5.2). Plastové chráničky byly zasypány nejdříve pískem do výšky 10 cm a následně byla postupně přisypávána zemina, vždy po 10 cm (obr. 5.3). Po dosypání zeminy bylo provedeno měření. Reproduktor byl položen na zeminu (obr. 5.4), na generátoru byla nastavena požadovaná frekvence a na notebooku s nainstalovaným programem WaveForms bylo spuštěno měření. Vzorkovací frekvence a doba měření byla zvolena stejná jako v případě referenčního měření.

Měření bylo provedeno dvěma způsoby uložení zeminy. V prvním měření byla zemina pouze dosypávána do plastového sudu a poté pomocí rukou udusána, aby byla zemina co nejvíce usazena a byly tak nastaveny co možná nejlepší identické podmínky uložení optického kabelu jako při reálné trase, ovšem za suchého počasí. Po prvním měření byla zemina z plastového sudu vybrána a následoval druhý způsob uložení zeminy. Ten spočíval opět v postupném dosypávání zeminy po 10 cm a následnému udusání, avšak po udusání byla zemina ještě prolita vodou (cca 0,5 l) a znovu byla udusána pro co nejlepší usednutí zeminy.



Obr. 5.2: Plastový sud s HDP chráničkami



Obr. 5.3: Plastový sud s pískem a zeminou



Obr. 5.4: Plastový sud se zeminou a reproduktorem

### 5.3 Analog Discovery 2 NI a program Waveforms

Analog Discovery 2 NI Edition (obr. 5.5) je zařízení o kapesní velikosti, které přeměňuje jakýkoli počítač na pracovní stanici elektrotechniky. Jelikož lze toto zařízení připojit k počítači (pomocí USB), umožňuje nám vytvářet a testovat analogové a digitální obvody v libovolném prostředí s funkcí zásobníku laboratorních zařízení jakými jsou např. dvoukanálový osciloskop, dvoukanálový generátor vlnových délek, šestnácti kanálový logický analyzátor, spektrální analyzátor aj. K ovládní Analog Discovery 2 NI Edition se v počítači využívá program WaveForms, pomocí kterého lze ovládat např. výše zmíněný osciloskop (funkce Scope) a všechny jeho funkce jako zobrazení FFT, histogram apod. Vzorkovací rychlost lze nastavit až na 100 MSa/s v reálném čase. Tento program je volně dostupný na internetových stránkách společnosti Digilent.





Obr. 5.5: Analog Discovery 2 NI Edition

## 5.4 Získané poznatky

Jednotlivé náměry byly zpracovány a vyhodnoceny v programu Matlab. Získané hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách. Tabulky znázorňují vždy vrstvu dosypu nad optickým kabelem protaženým HDPE chráničkou a poté zda se jedná o hodnoty referenčního měření, měření s udusanou zeminou nebo měření s udusanou zeminou a následným prolitím vodou.

Tab. 5.1: Vrstva 10 cm (písek)

<b>10 cm</b>	referenční	zemina udusána	zemina s vodou
f [Hz]	$ Y(f) $	$ Y(f) $	$ Y(f) $
500	0,0658	0,0098	0,00356
1k	0,0172	0,00172	0,00171
3k	0,00807	0,000019	0,000013
5k	0,00557	0,0000062	0,0000384

Tab. 5.2: Vrstva 20 cm (10 cm písek, 10 cm zemina)

<b>20 cm</b>	referenční	zemina udusána	zemina s vodou
f [Hz]	$ Y(f) $	$ Y(f) $	$ Y(f) $
500	0,0658	0,00043	0,00643
1k	0,0172	0,001285	0,00505
3k	0,00807	0,000185	0,000565
5k	0,00557	0,0000135	0,00005

Tab. 5.3: Vrstva 30 cm (10 cm písek, 20 cm zemina)

<b>30 cm</b>	referenční	zemina udusána	zemina s vodou
f [Hz]	$ Y(f) $	$ Y(f) $	$ Y(f) $
500	0,0658	0,001965	0,00145
1k	0,0172	0,00106	0,0101
3k	0,00807	0,000127	0,0002468
5k	0,00557	0,00000815	0,000089

Tab. 5.4: Vrstva 40 cm (10 cm písek, 30 cm zemina)

<b>40 cm</b>	referenční	zemina udusána	zemina s vodou
f [Hz]	$ Y(f) $	$ Y(f) $	$ Y(f) $
500	0,0658	0,00013137	0,0007692
1k	0,0172	0,000959	0,00848
3k	0,00807	0,0003715	0,000258
5k	0,00557	0,0000297	0,0000871

Tab. 5.5: Vrstva 50 cm (10 cm písek, 40 cm zemina)

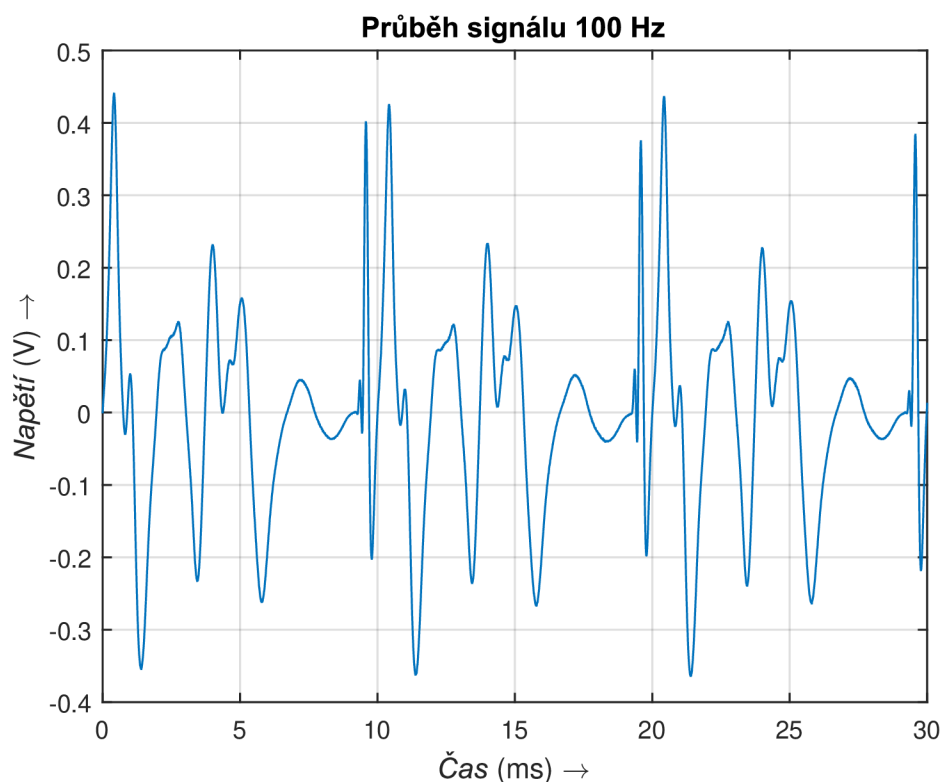
<b>50 cm</b>	referenční	zemina udusána	zemina s vodou
f [Hz]	$ Y(f) $	$ Y(f) $	$ Y(f) $
500	0,0658	0,001253	0,00062
1k	0,0172	0,000966	0,005402
3k	0,00807	0,0001254	0,0000973
5k	0,00557	0,0000265	0,00003975



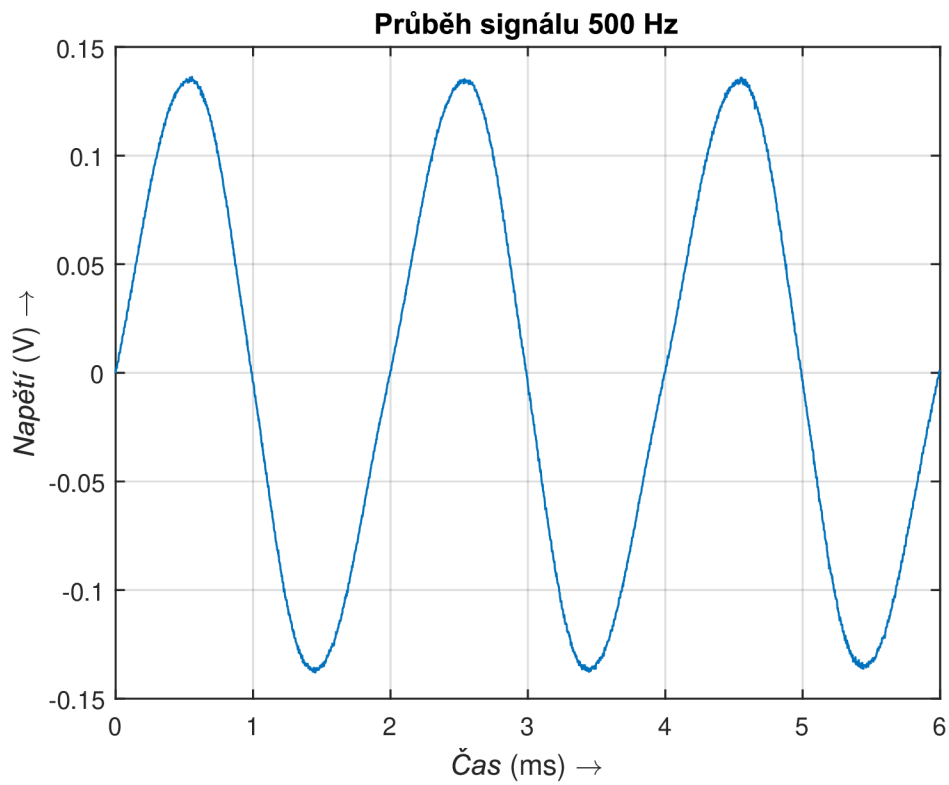
Tabulka (5.1) označuje první měření. Nejprve bylo optické vlákno protaženo HDPE chráničkou a poté byla do plastového sudu nasypána první vrstva (10 cm písku). Z tabulky je zřejmé, že intenzita na jednotlivých frekvencích, po zasypaní pískem a udusání, je menší než tomu bylo při referenčním měření, kdy bylo vlákno ovlivňováno přímo. Následně po zalití cca 0,5l vody tato intenzita ještě o něco klesne.

Tabulka (5.2) značí druhé měření. Nyní byl plastový sud dosypán 10 cm zeminy a udusán. Princip měření, jenž byl popsán výše se opakoval a hodnoty byly zaznamenány do tabulky. Z tabulky bylo vyzorováno, že po dosypání zeminy se intenzity na jednotlivých měřených frekvencích příliš nelišily.

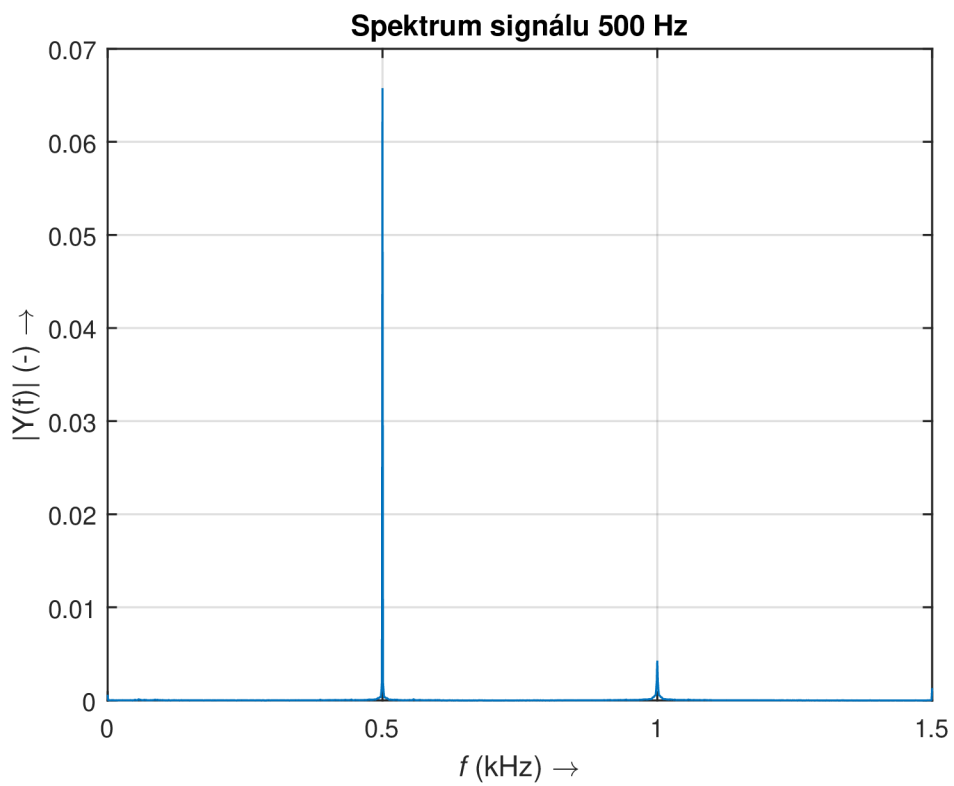
Jednotlivá další měření byla provedena obdobným způsobem jako dvě výše zmíněná měření. Z porovnání všech tabulek lze vynést závěr, že nejvíce byla utlumena intenzita frekvencí po prvním dosypání a to pískem. Při následných dosypech 10 cm zeminy a měření sice intenzita někdy klesá, ale v některých případech je dokonce i vyšší. Proto bylo dosaženo závěru, že při stejné vrstvě zeminy a písku tlumí písek více.



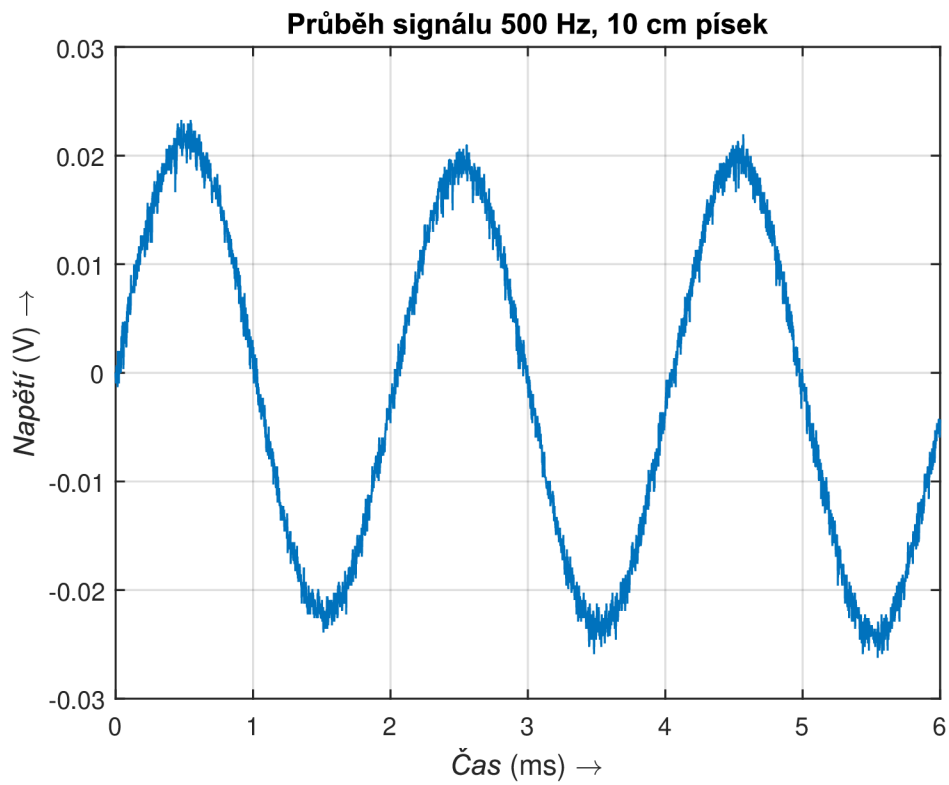
Obr. 5.6: Průběh signálu pro 100 Hz, referenční měření



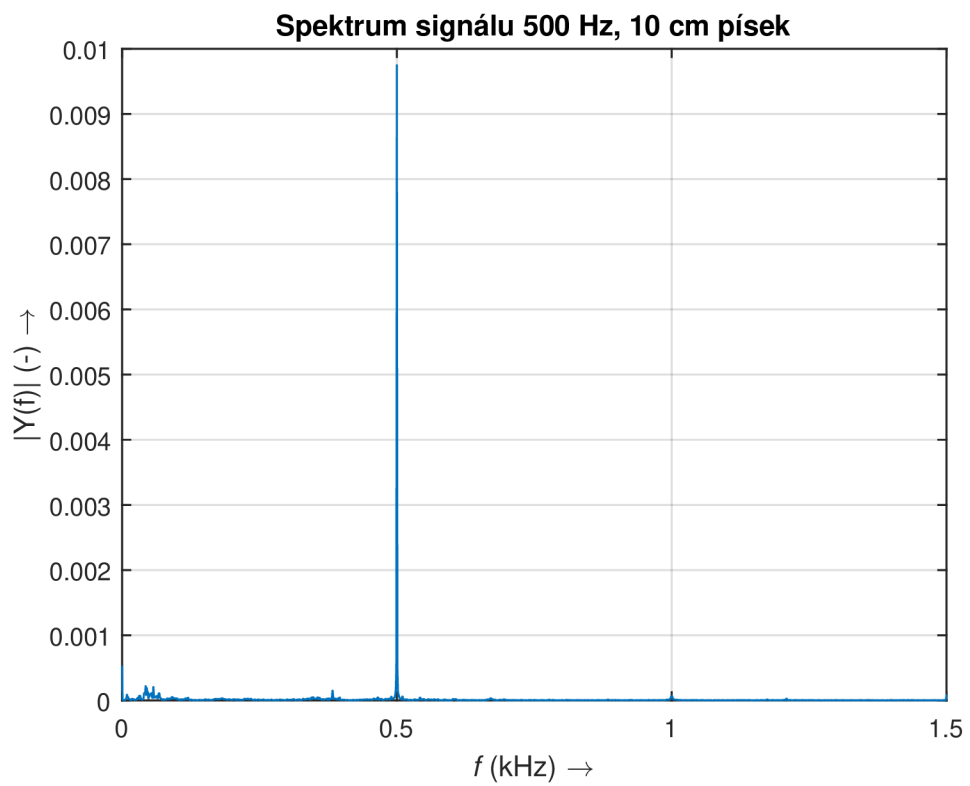
Obr. 5.7: Průběh signálu pro 500 Hz, referenční měření



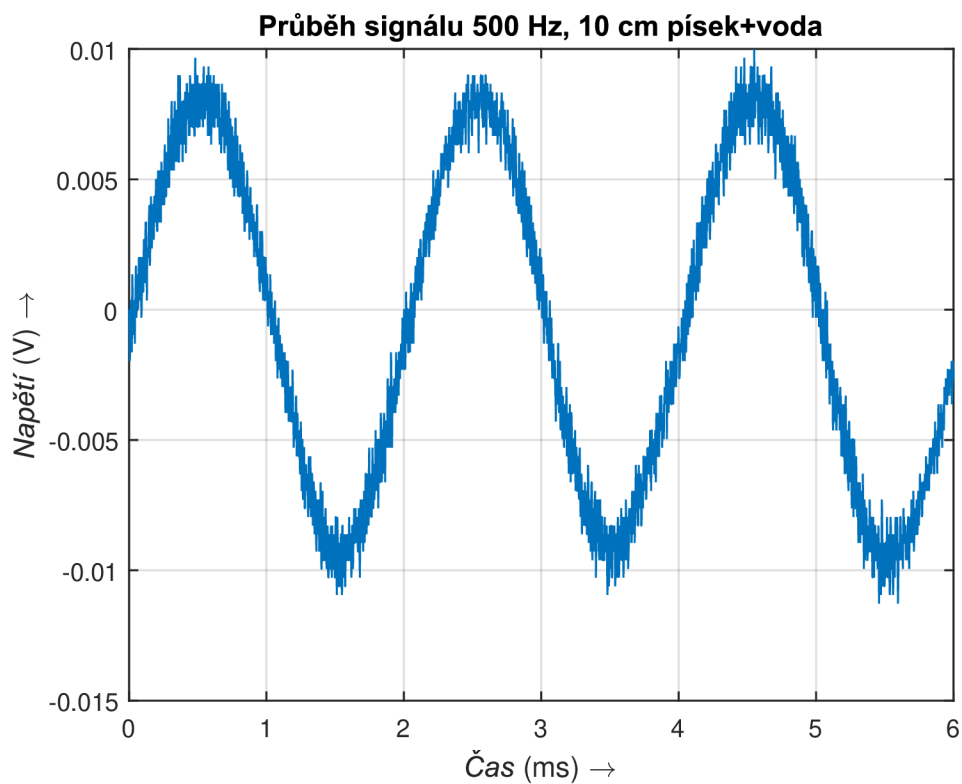
Obr. 5.8: Spektrum signálu pro 500 Hz, referenční měření



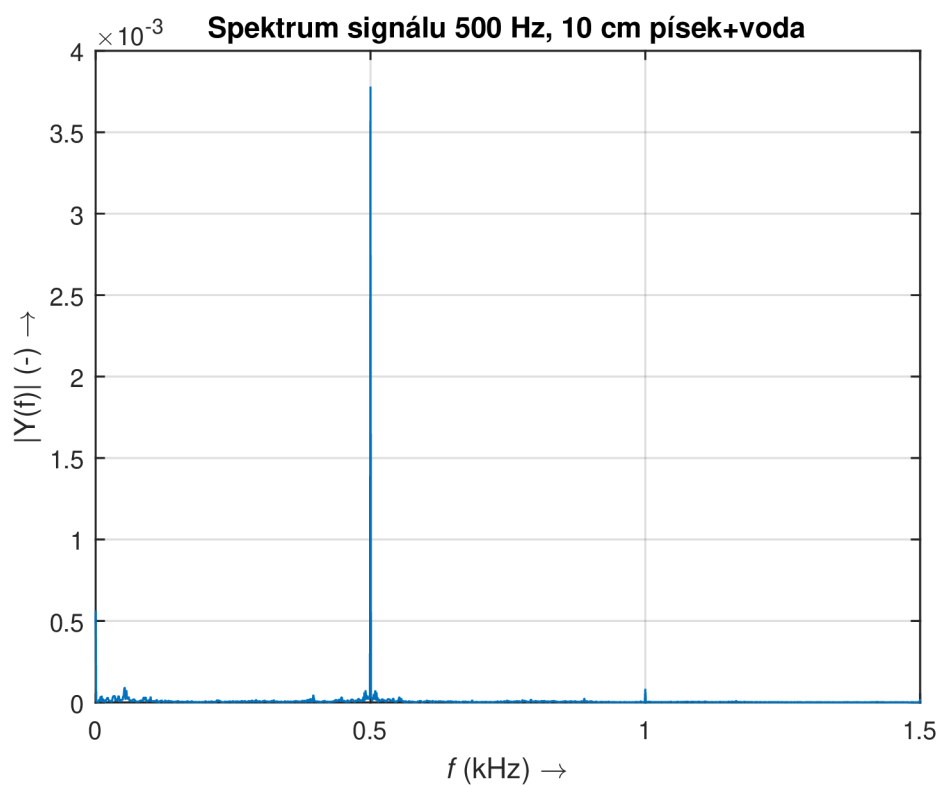
Obr. 5.9: Průběh signálu pro 500 Hz, 10 cm písek



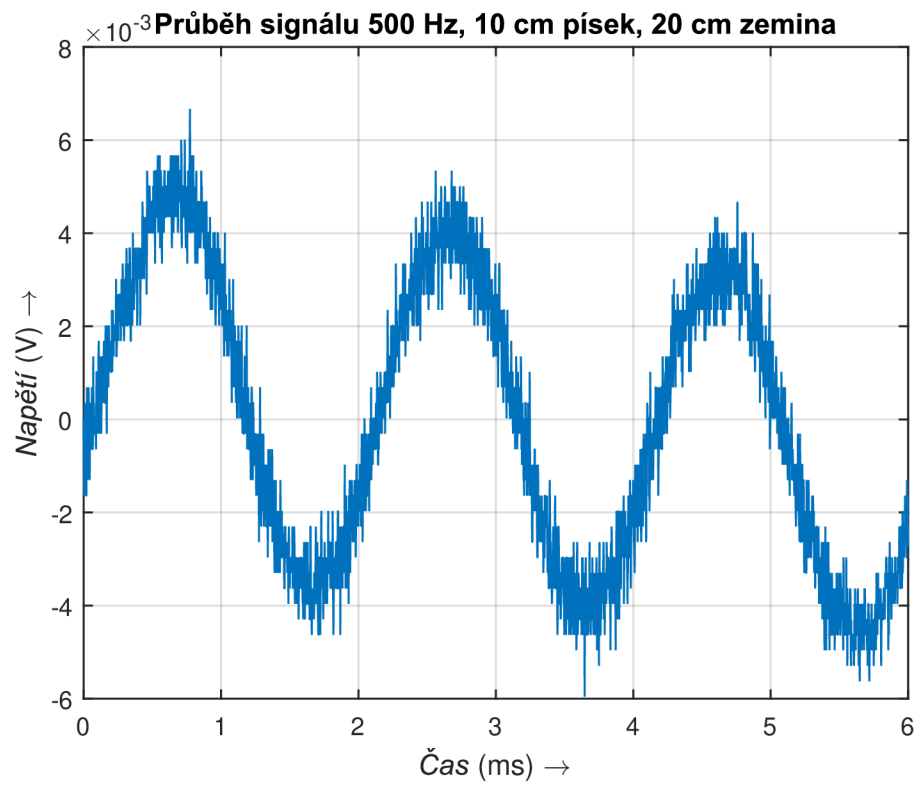
Obr. 5.10: Spektrum signálu pro 500 Hz, 10 cm písek



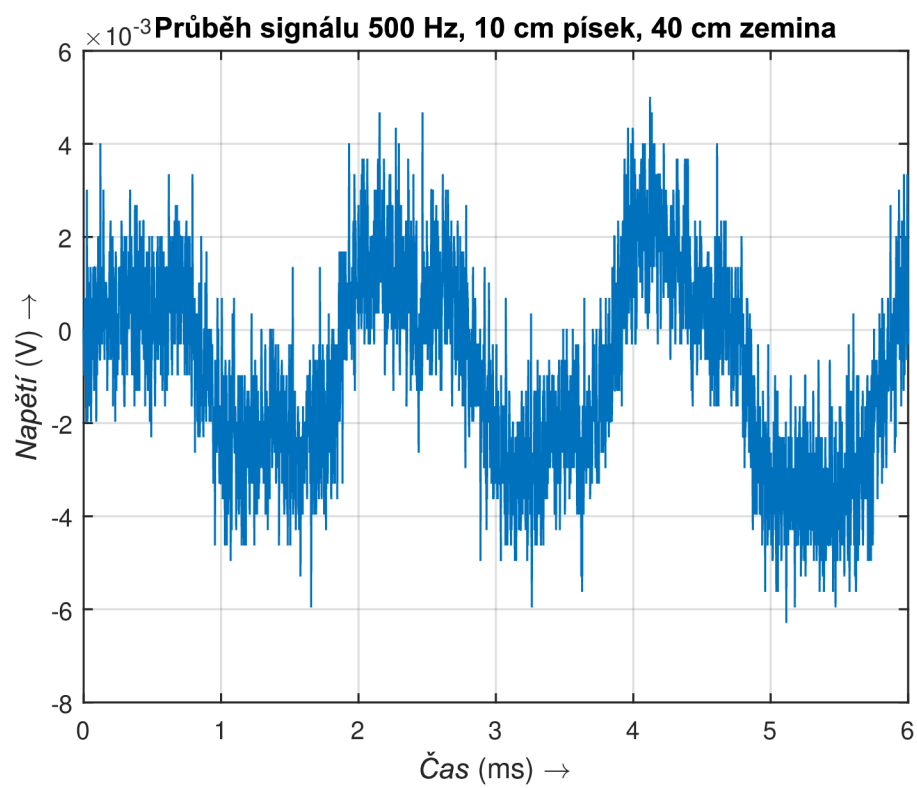
Obr. 5.11: Průběh signálu pro 500 Hz, 10 cm písek s vodou



Obr. 5.12: Spektrum signálu pro 500 Hz, 10 cm písek s vodou



Obr. 5.13: Průběh signálu pro 500 Hz, 10 cm písek, 20 cm zemina



Obr. 5.14: Spektrum signálu pro 500 Hz, 10 cm písek, 40 cm zemina

Pro porovnání byla vybrána frekvence 500 Hz. Na této frekvenci lze nejlépe provést analýzu a následné porovnání naměřených hodnot, protože v grafech průběhu signálu lze pouhým okem vidět rozdíly, které byly způsobeny přidáváním jednotlivých vrstev. Grafy pro měřené frekvence 1 kHz, 3 kHz a 5 kHz jsou uvedeny v příloze A.

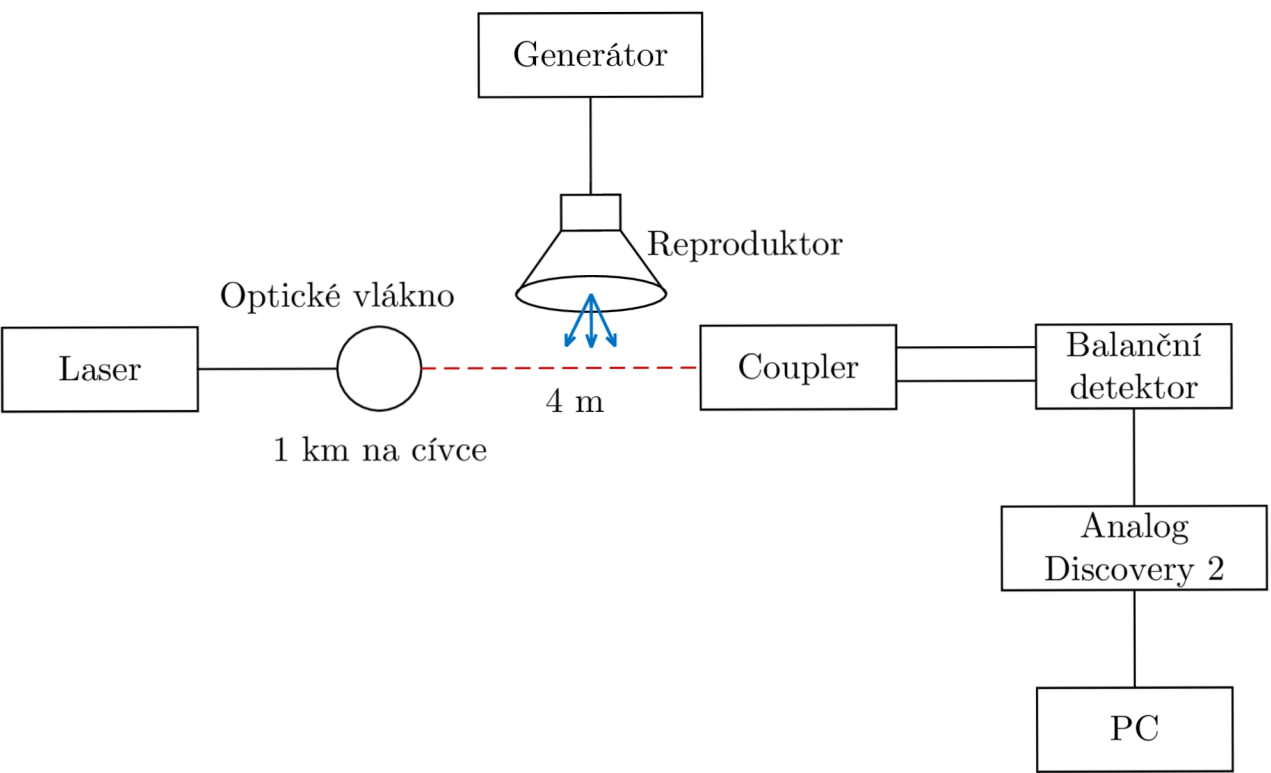
Z výše uvedených grafů je zřejmé, že intenzita signálu klesá s postupným přisypáváním jednotlivých vrstev písku a zeminy. Největší pokles intenzity (utlumení signálu) byl zaznamenán po zasypání první vrstvou, což byla vrstva 10 cm písku. Intenzita signálu klesne i po prolití vodou a následnému udusání písku. Po přisypávání dalších vrstev sice hodnota intenzity dále klesá, avšak již ne v takovém poměru jako při poklesnutí po zasypání pískem. V grafech průběhů signálů lze pozorovat mírné zašumění měřeného signálu po zasypání optického vlákna uloženého v HDPE chráničce jednotlivými vrstvami. Zpracováním naměřených hodnot a následnou analýzou bylo dosaženo závěru, že vrstva 10 cm písku tlumí nejvíce.

Grafy uvedené v příloze A znázorňují výše zmíněné frekvence. Z grafů průběhů signálů lze u referenčního měření poměrně snadno odvodit i frekvenci, která byla měřena. Ovšem pro měření, kdy již bylo vlákno zasypáno vrstvou písku je velmi obtížné pouhým okem odhadnout měřenou frekvenci, jelikož byla časová osa zvolena tak, aby znázorňovala vždy 3 periody daného signálu.

## 6 MĚŘENÍ POLARIZACE

Měření bylo provedeno v laboratoři Optiky, místnost SC5.52 (Technická 12, Brno 616 00). Měření probíhalo pomocí polarizační metody zapojené dle schématu (obr. 6.1). Měřeny byly akustické vibrace generované pomocí reproduktoru a dále bylo zkoumáno a proměřeno do jaké míry je daná sestava pro měření citlivá na okolní vibrace.

## 6.1 Schéma zapojení



Obr. 6.1: Schéma zapojení měření akustických vibrací polarizačním interferometrem



### 6.1.1 Polarizační coupler

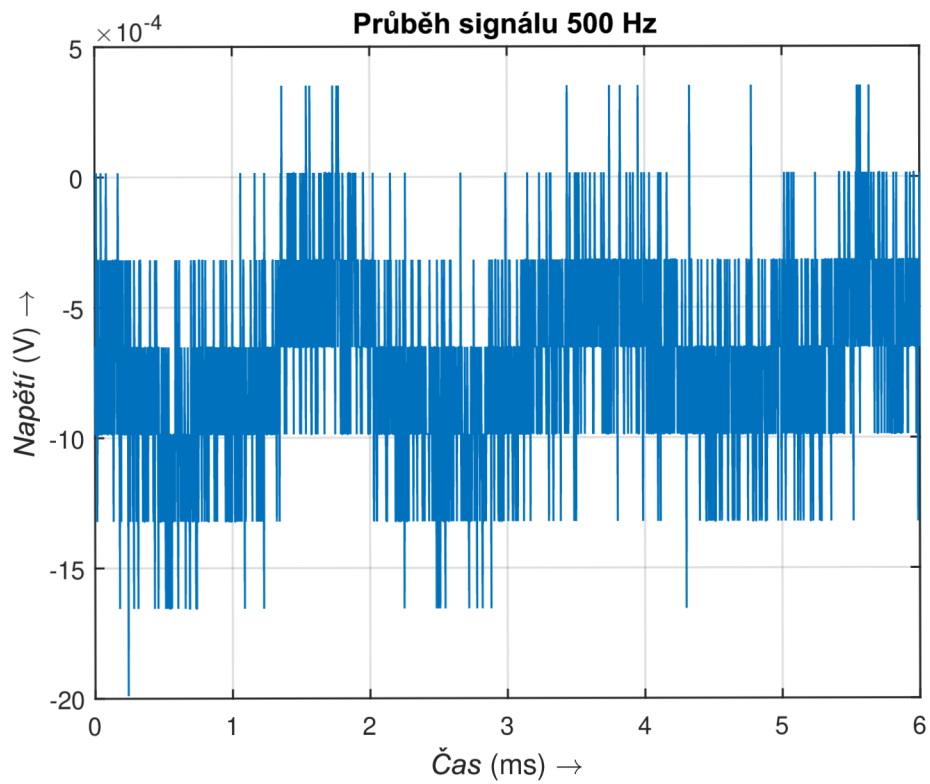
Jedná se o zařízení, které se využívá k rozdělení paprsků. Jde o dva hranoly slepené dohromady (Wollastonův hranol obr. 2.5), které příchozí světelný paprsek rozdělí do dvou polarizací (vertikální a horizontální), kde každá část putuje jiným směrem.

### 6.1.2 Balanční detektor

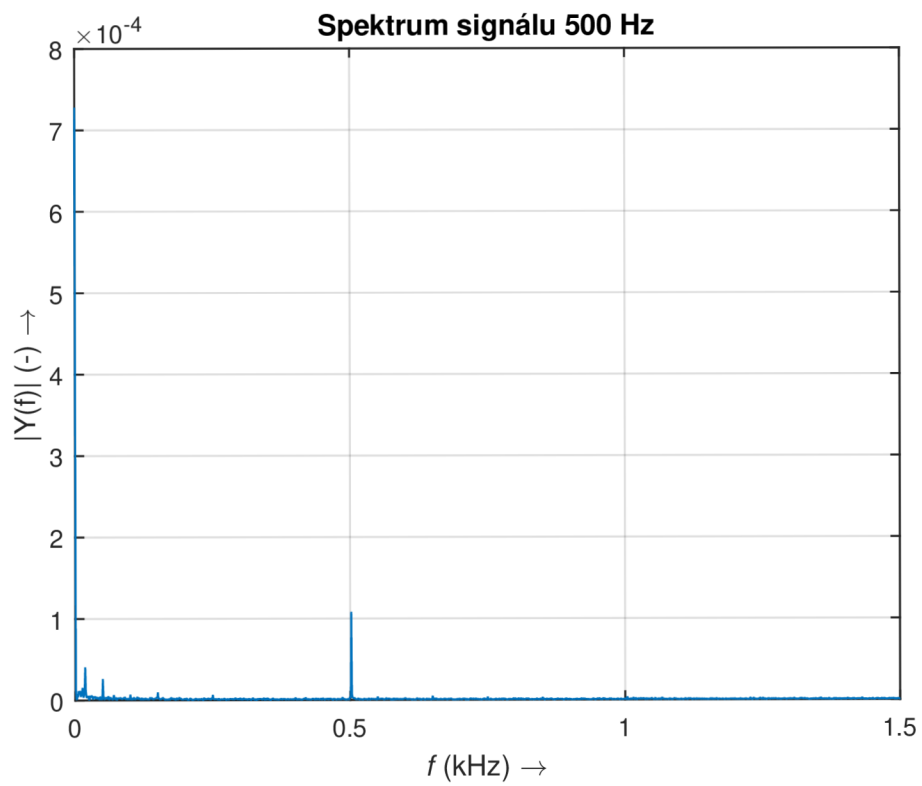
Jako balanční detektor byl využit od firmy Thorlabs Balanced Amplified Photodetectors PDB470AC. Tento fotodetektor působí jako balanční (vyvážený) přijímač. Princip spočívá v odečtení obou optických signálů od sebe navzájem, což má za následek zrušení společného šumu. Fotodetektor je tvořen dvěma vyváženými fotodiodami a vysokofrekvenčním transimpedančním zesilovačem s velmi nízkou hlučností. Dvě fotodiody jsou přizpůsobeny pro dosažení co nejlepšího poměru odstranění společného šumu.

## 6.2 Měření akustických vibrací

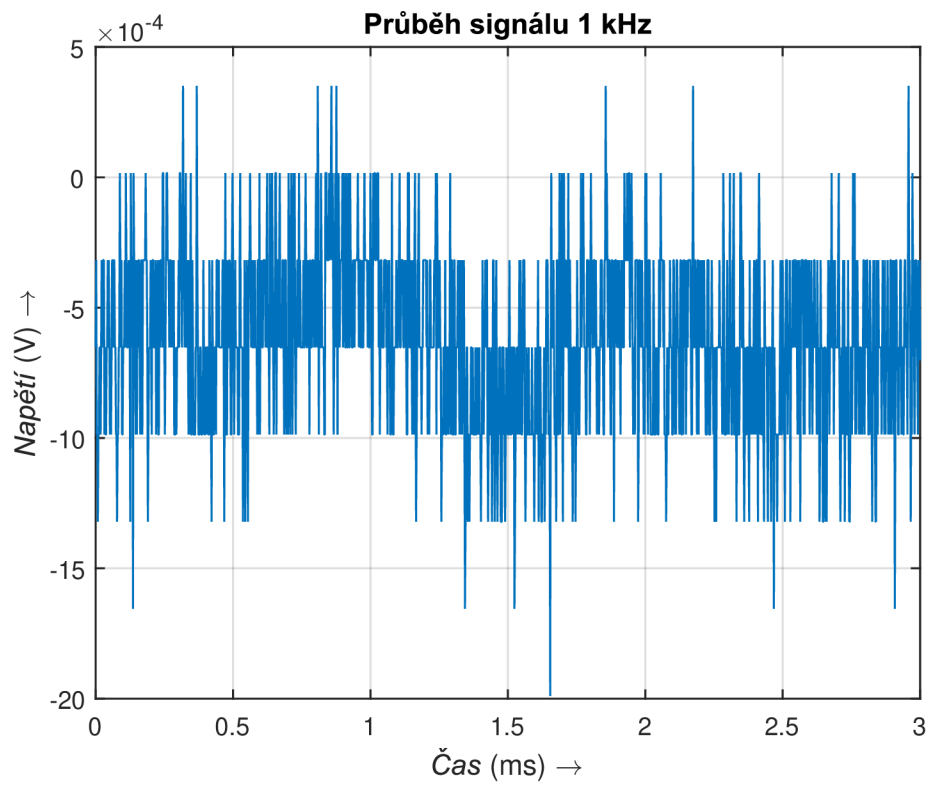
Měření akustických vibrací bylo realizováno pomocí schématu zapojení obr. 6.1. Princip měření spočíval v postupném nastavování jednotlivých frekvencí na generátoru. Měřicí soustava byla tentokrát uložena na stole, oproti měření s Mach–Zehnderovým interferometrem, kdy byla soustava položena na zemi. Hodnoty frekvencí byly zvoleny stejné jako při referenčním měření pomocí Mach–Zehnderova interferometru, aby bylo možno provést srovnání s polarizační metodou. Doba měření i vzorkovací frekvence byla zvolena stejná jako u měření pomocí Mach–Zehnderova interferometru.



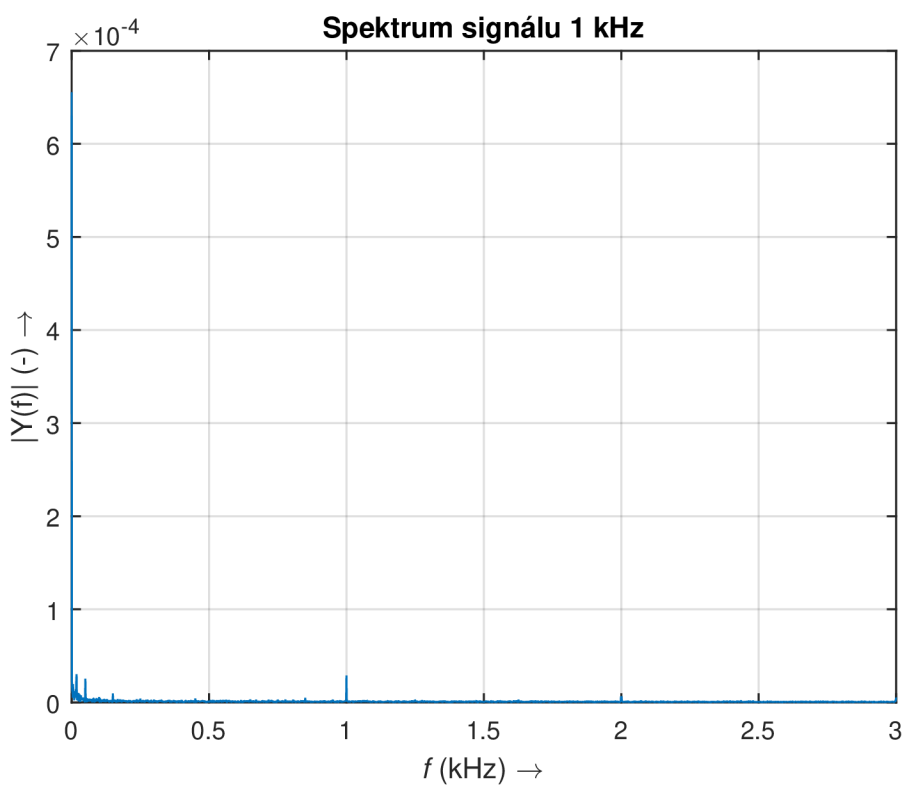
Obr. 6.2: Průběh signálu pro 500 Hz



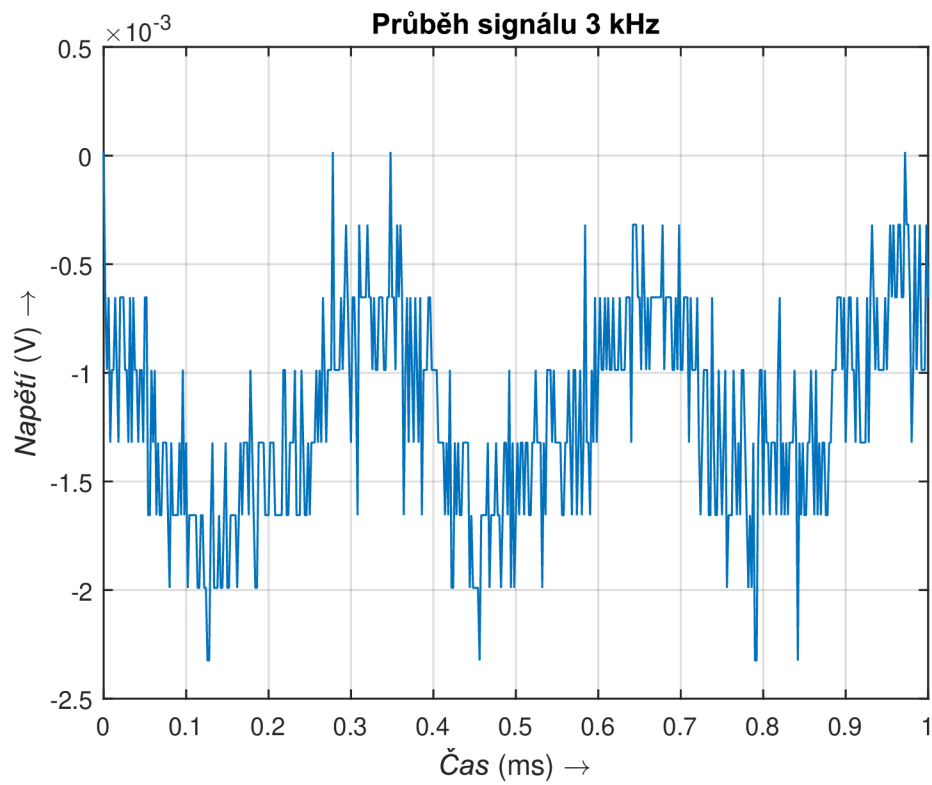
Obr. 6.3: Spektrum signálu pro 500 Hz



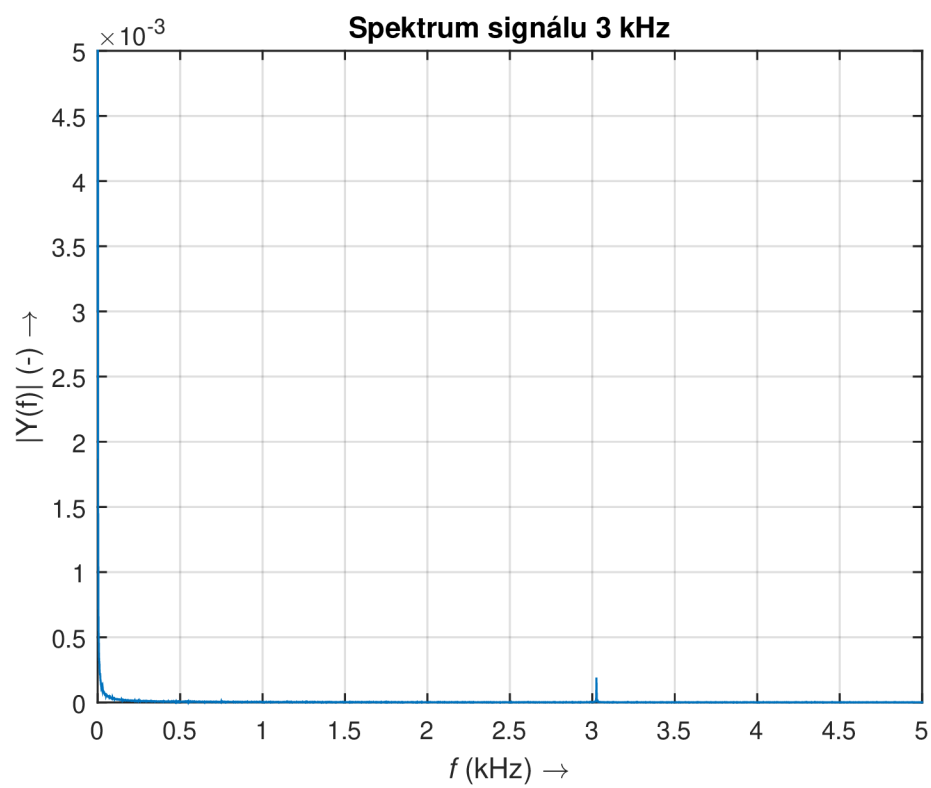
Obr. 6.4: Průběh signálu pro 1 kHz



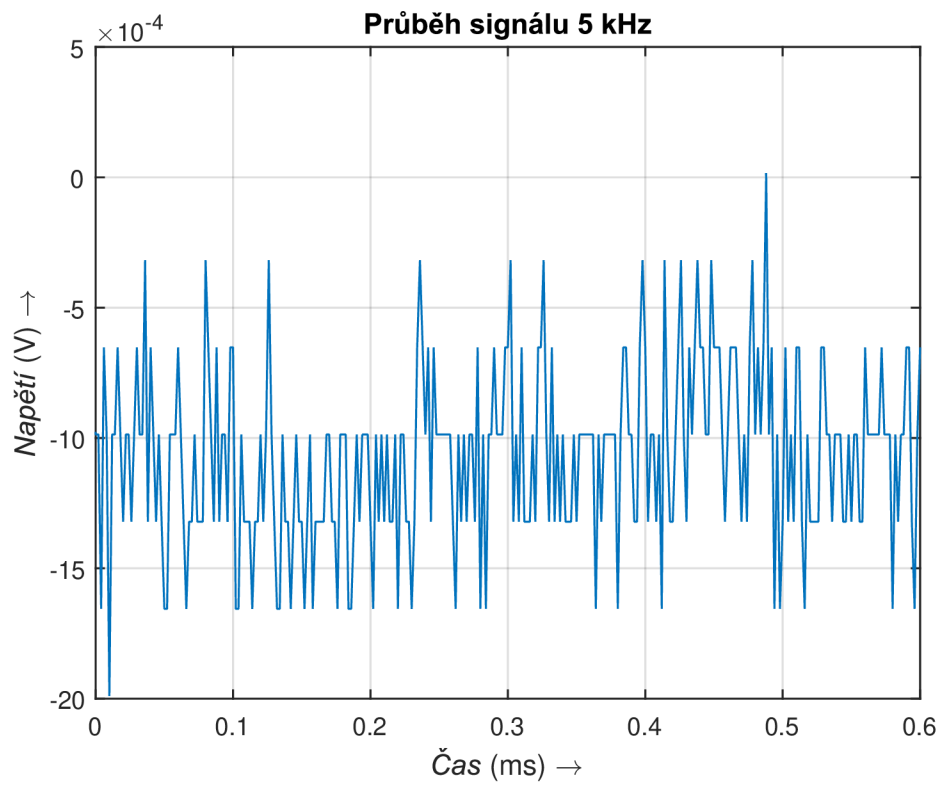
Obr. 6.5: Spektrum signálu pro 1 kHz



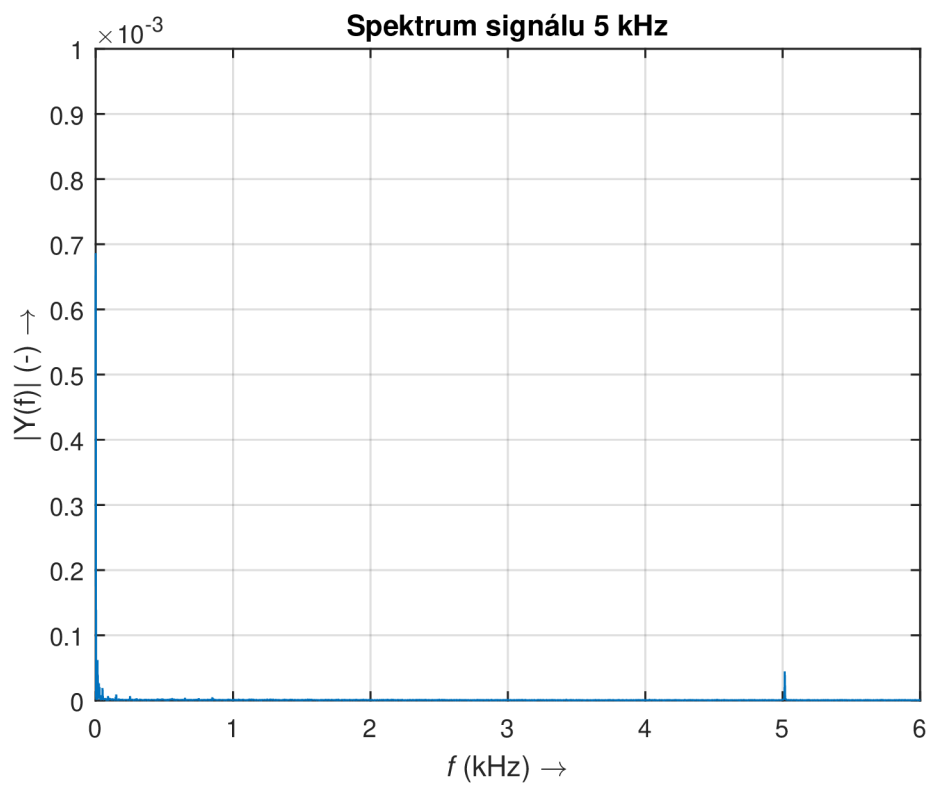
Obr. 6.6: Průběh signálu pro 3 kHz



Obr. 6.7: Spektrum signálu pro 3 kHz



Obr. 6.8: Průběh signálu pro 5 kHz



Obr. 6.9: Spektrum signálu pro 5 kHz

Tab. 6.1: Tabulka srovnání intenzit signálů interferenční a polarizační metody

	f [Hz]	500	1k	3k	5k
<b>Interferenční m.</b>	Y(f)	0,0658	0,0172	0,00807	0,00557
<b>Polarizační m.</b>	Y(f)	0,000108	0,0000029	0,00019	0,0000444

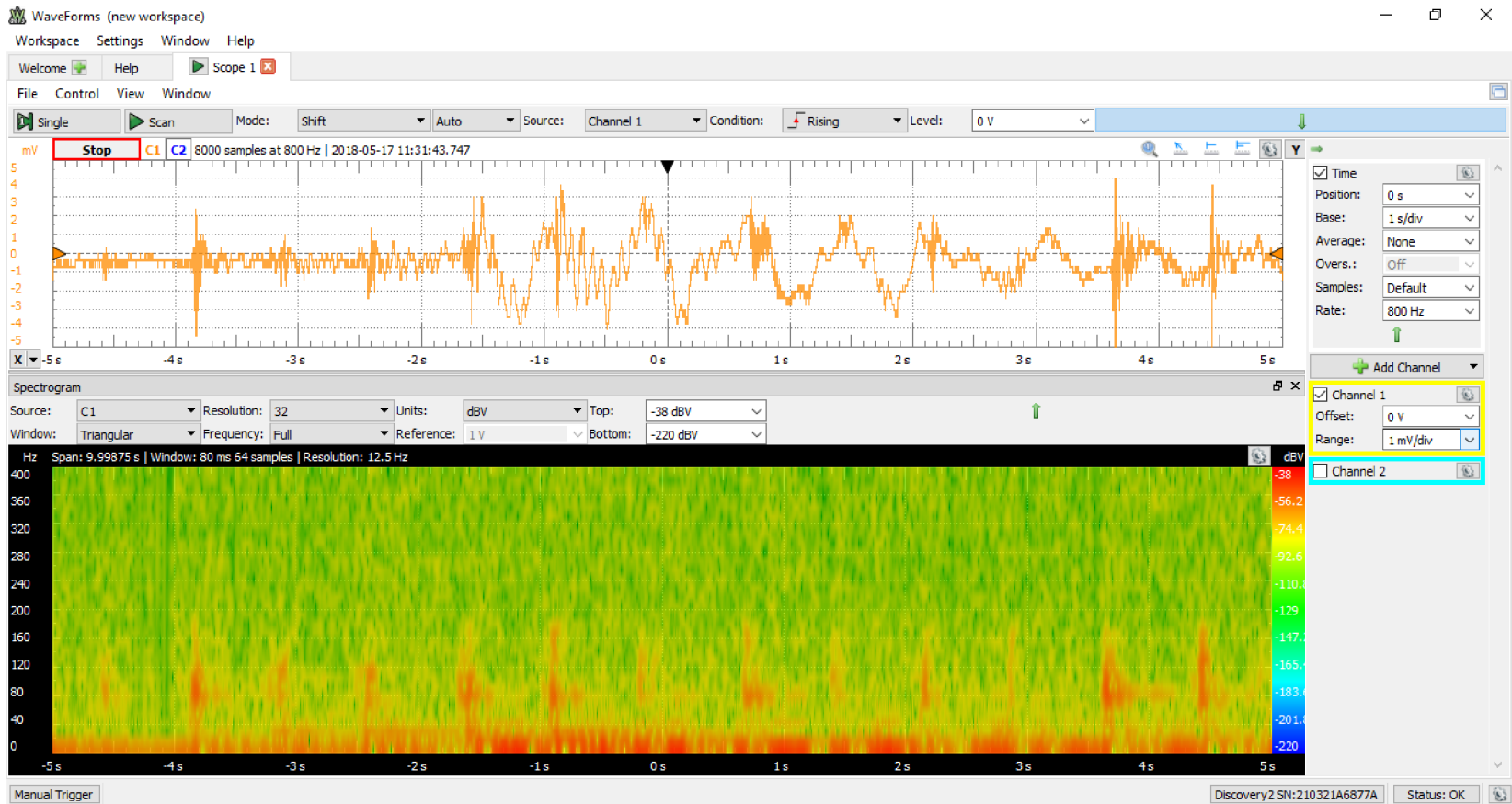
Analýzou výsledků měření pomocí polarizační metody bylo zjištěno, že měření pomocí interferenční metody mělo silnější detekovaný signál (tabulka 6.1), tudíž bylo měření pomocí Mach–Zehnderova interferometru citlivější než pomocí polarizační metody. U měření pomocí interferometrické metody (referenční měření) byl průběh signálu mnohem hladší než tomu bylo u měření pomocí polarizace, což lze vypočítat ve grafech uvedených výše.

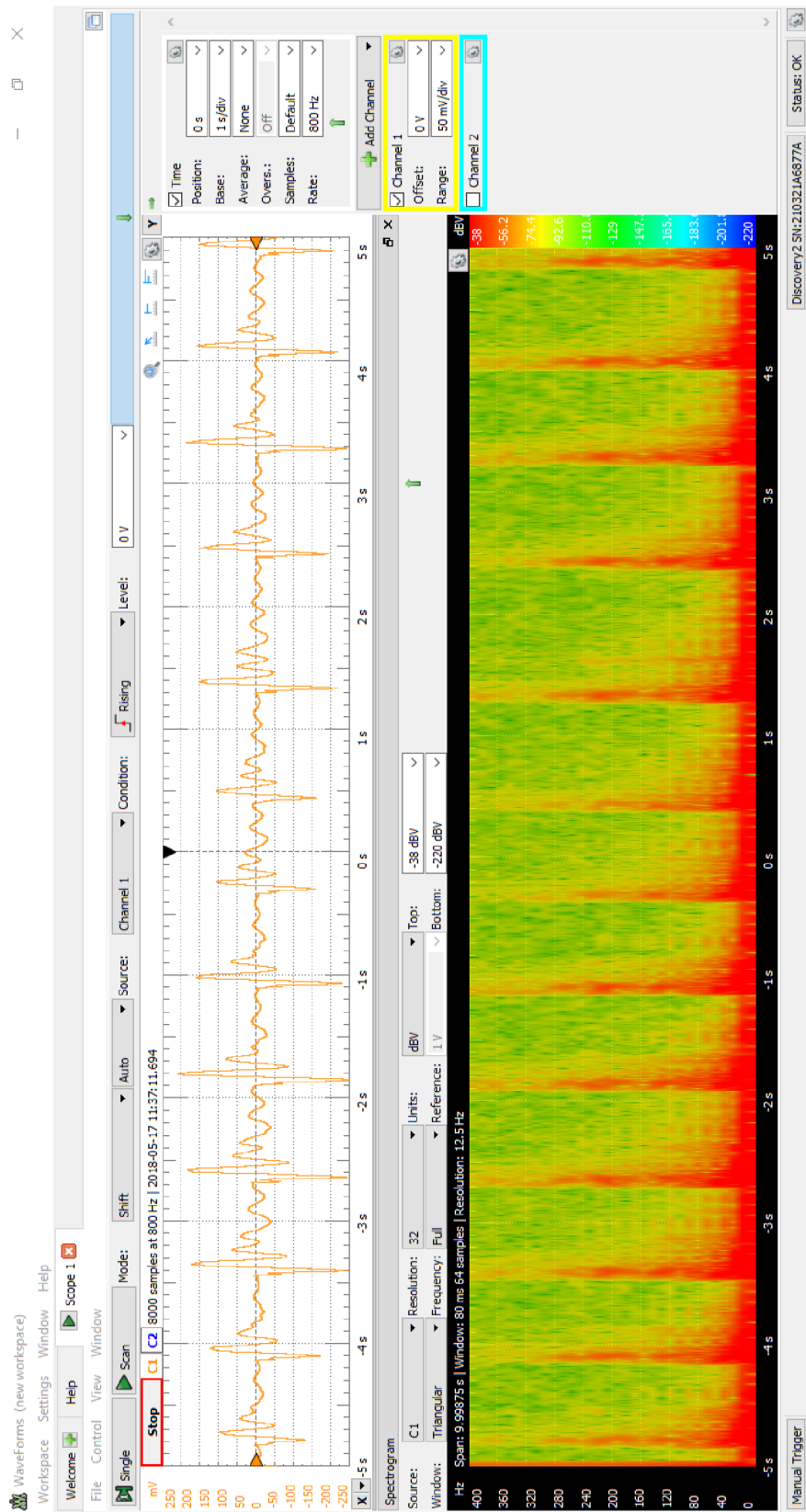
### 6.3 Měření okolních vibrací

Pro měření okolních vibrací bylo schéma zapojení obdobné jako u měření akustických vibrací (obr. 6.1), avšak s tím rozdílem, že optické vlákno nyní nebylo položeno na reproduktoru, nýbrž bylo optické vlákno položeno na zemi a pomocí něj byly detekovány různé okolní vibrace. Následující obrázky byly vytvořeny vyfotografováním, neboli tiskem obrazovky při jednotlivých měřeních.

Obrázek 6.10 znázorňuje měření, které bylo schopno detekovat chůzi po místnosti, kde bylo měření prováděno. Na obrázku lze vidět průběh signálu a dále spektrogram. Další obrázky představují další měření, které byly vykonány. Například detekování klepání na optické vlákno (obr. 6.11), pohyb židlí (odsunutí a zasunutí) v místnosti (obr. 6.12). Poslední obrázek 6.13 představuje rozpojení a následné spojení spojky optického vlákna.

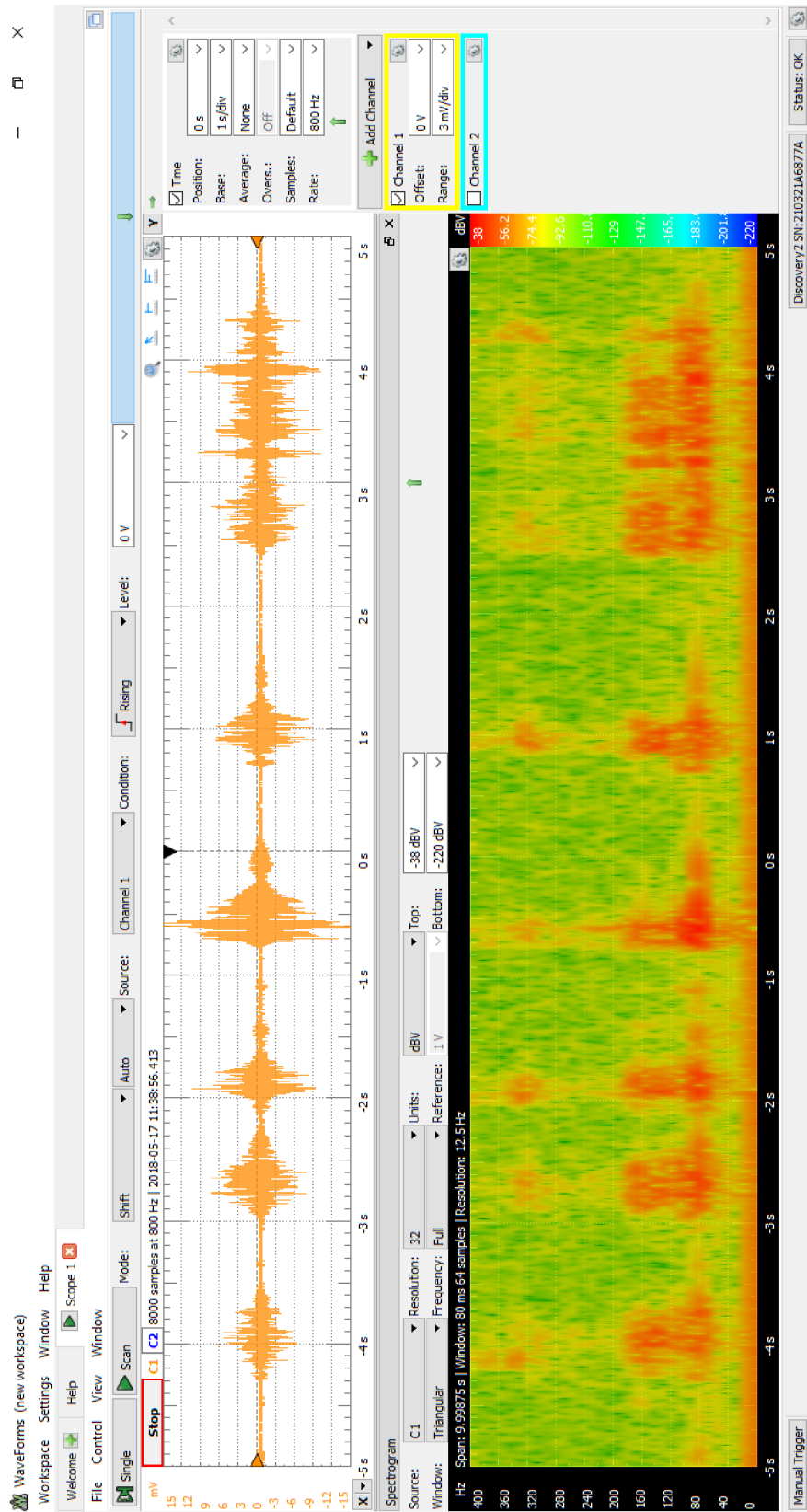
Obr. 6.10: Optické vlákno na zemi, chůze po místnosti



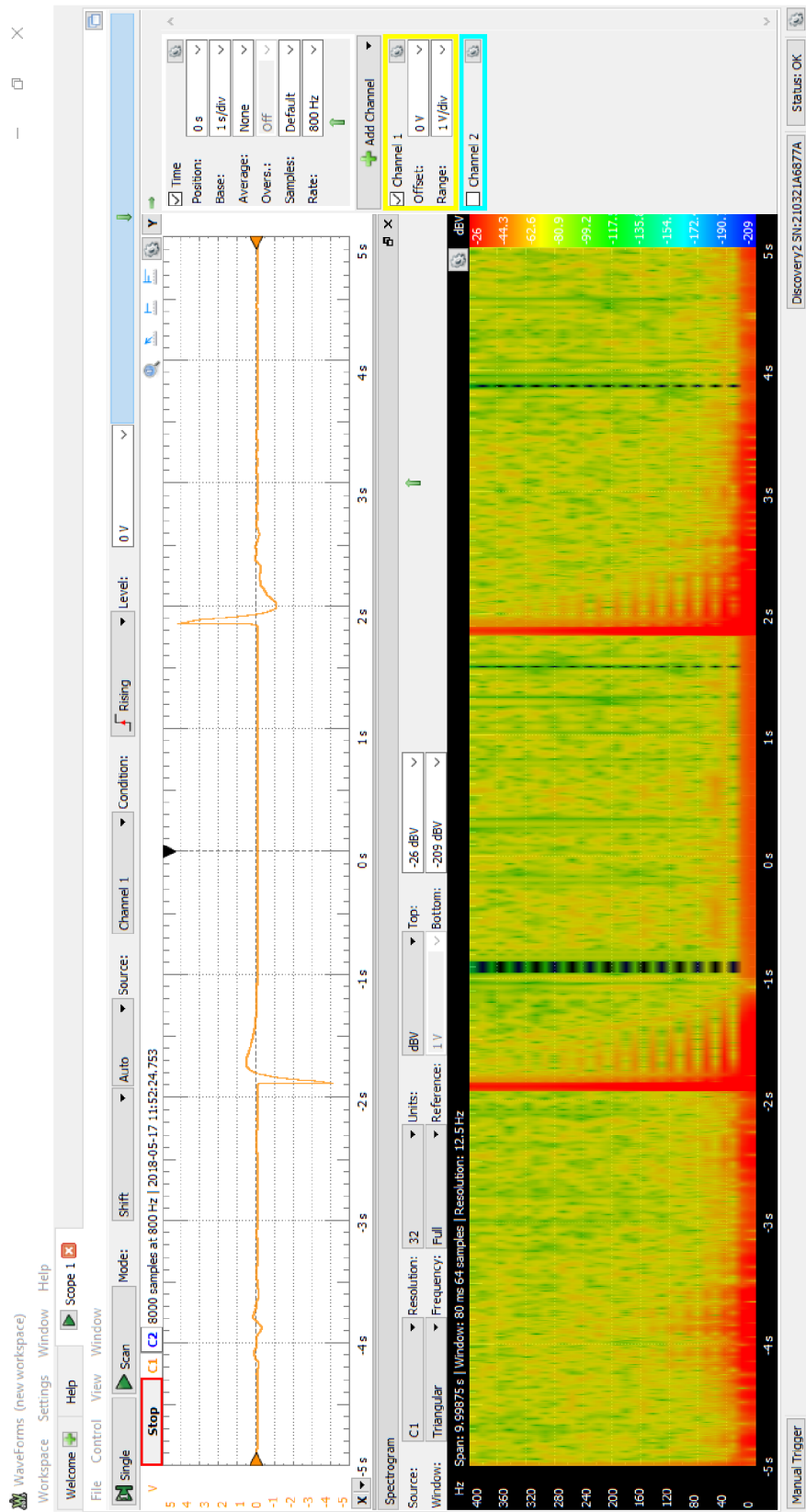


Obr. 6.11: Optické vlákno na zemi, klepání po optickém vláknu





Obr. 6.12: Optické vlákno na zemi, pohyb židlí

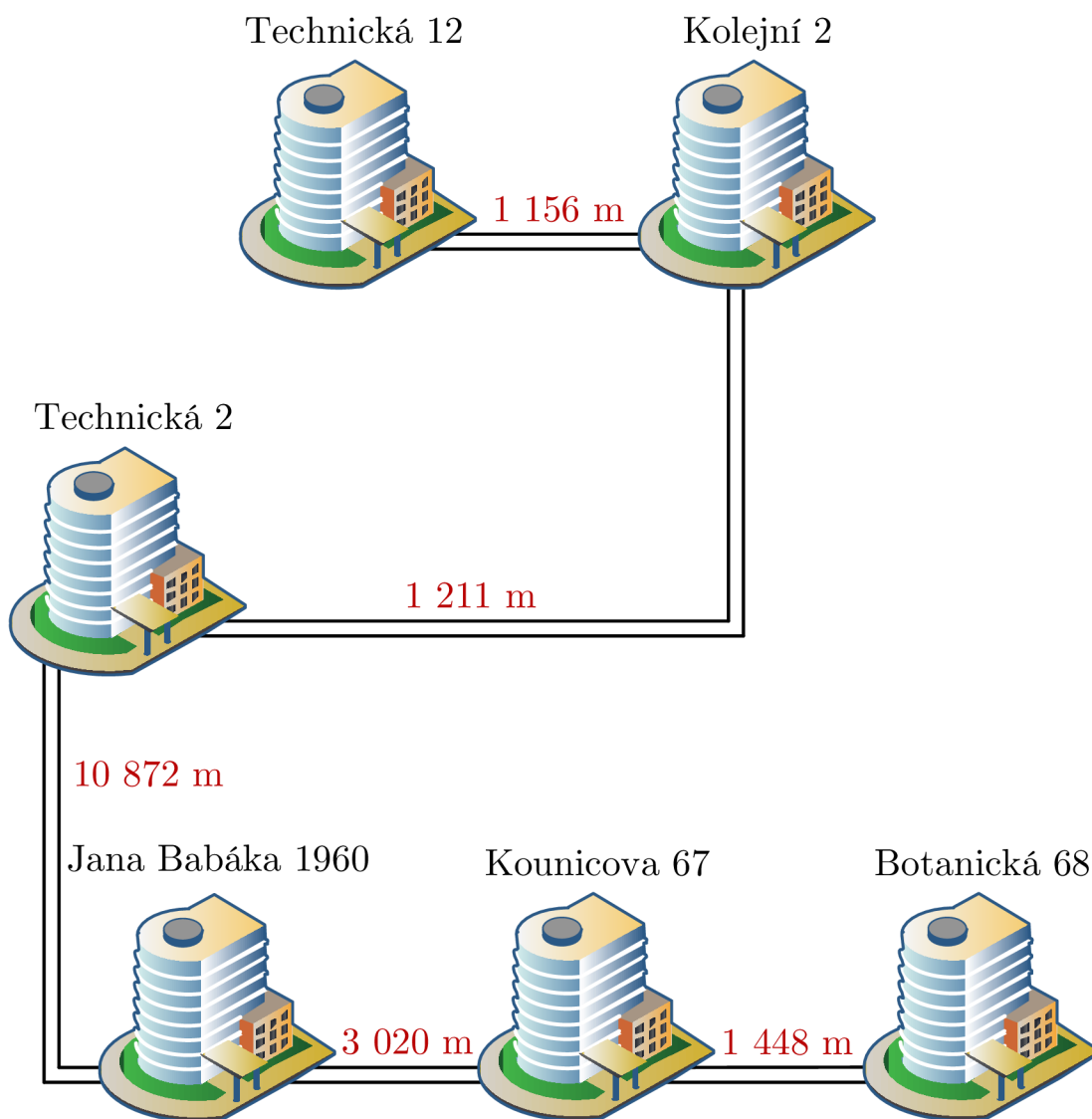


Obr. 6.13: Optické vlákno na zemi, rozpojení a spojení spojky

## 7 MĚŘENÍ NA REÁLNÉ TRASE

Měření na reálné trase bylo provedeno v laboratoři Optiky, v místnosti SC5.52 (Technická 12, Brno 616 00). Princip měření spočíval v nastavení programu WaveForms a funkce Scope. Celková doba měření byla cca 24 hodin. Úkolem bylo zjistit jaké frekvence se vyskytují na dané reálné trase ve městě Brno. Tyto frekvence dále porovnat, zda se vyskytují na trase pouze přes den nebo i v noci. Při zpracování výsledků případně zjistit, zda lze z naměřených hodnot určit frekvenční rozsah projíždějící tramvaje.

## 7.1 Schéma zapojení



Obr. 7.1: Měřená trasa Brno

## 7.2 Popis měření

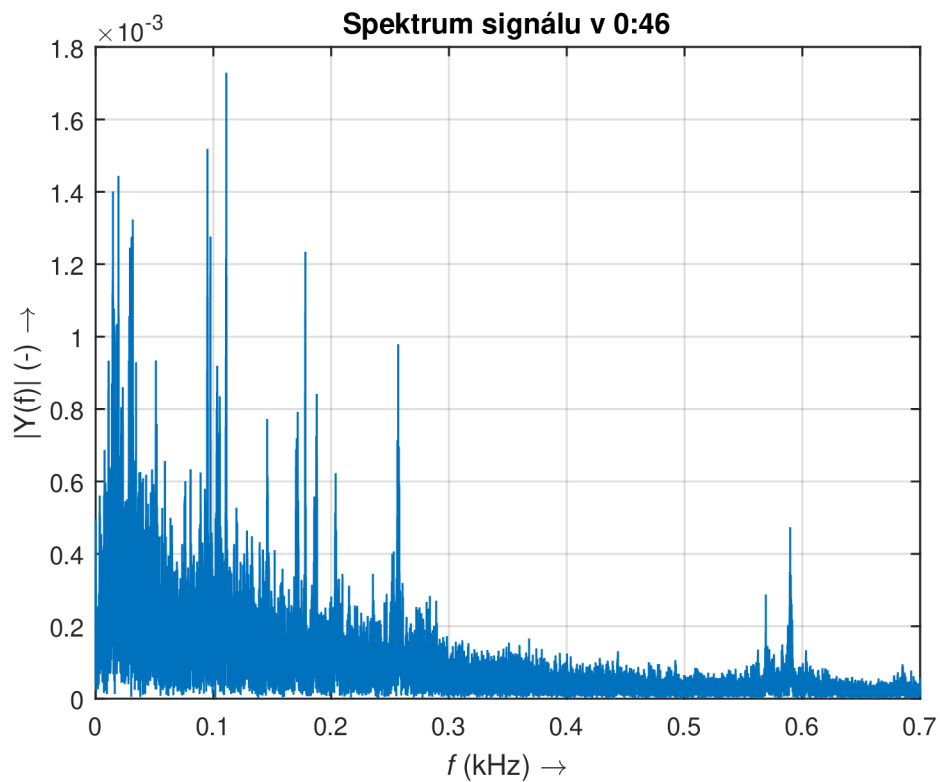
Měření na reálné trase v Brně bylo uskutečněno pomocí sestrojeného Michelsonova interferometru zapojeného s komponentou Analog Discovery 2 NI Edittion.

Pro ovládání komponenty Analog Discovery 2 byl využit volně dostupný program WaveForms. Dostupná vzorkovací rychlost daného programu, která je podporována komponentou Analog Discovery 2 je až 10 MSa/s v reálném čase, avšak dobu měření již nelze nastavit dle vlastního uvážení, jelikož Analog Discovery 2 nemá dostatečnou paměť. Proto pro naše měření byla nastavena vzorkovací rychlost 5 kHz a počet vzorků byl programem nastaven na 8192, což odpovídalo době měření přibližně 1,6 s. Vzhledem k tomu, že bylo vyžadováno měření delšího časového úseku, musela být využita měřící smyčka. Tato měřící smyčka lze vytvořit v programu WaveForms pomocí doplňující funkce zvané Logging. V případě, že je tato funkce využita, lze smyčku nastavit na měření opakované až 10000 krát. Tudíž celková doba měření tak byla 4 hodiny 35 minut a za tuto dobu bylo vytvořeno 10000 souborů, kde každý jeden soubor obsahoval dobu měření 1,6 s s počtem vzorků 8192. Po této době bylo měření ukončeno a muselo se tak zapnout nové měření. Jelikož některá měření byla provedena v pozdních nočních a brzkých ranních hodinách, bylo měření ovládáno přes vzdálenou plochu pomocí programu TeamViewer, protože notebook, na kterém bylo spuštěno měření, byl uložen spolu s Mach–Zehnderovým interferometrem v serverovém rozvaděči v laboratoři Optiky.

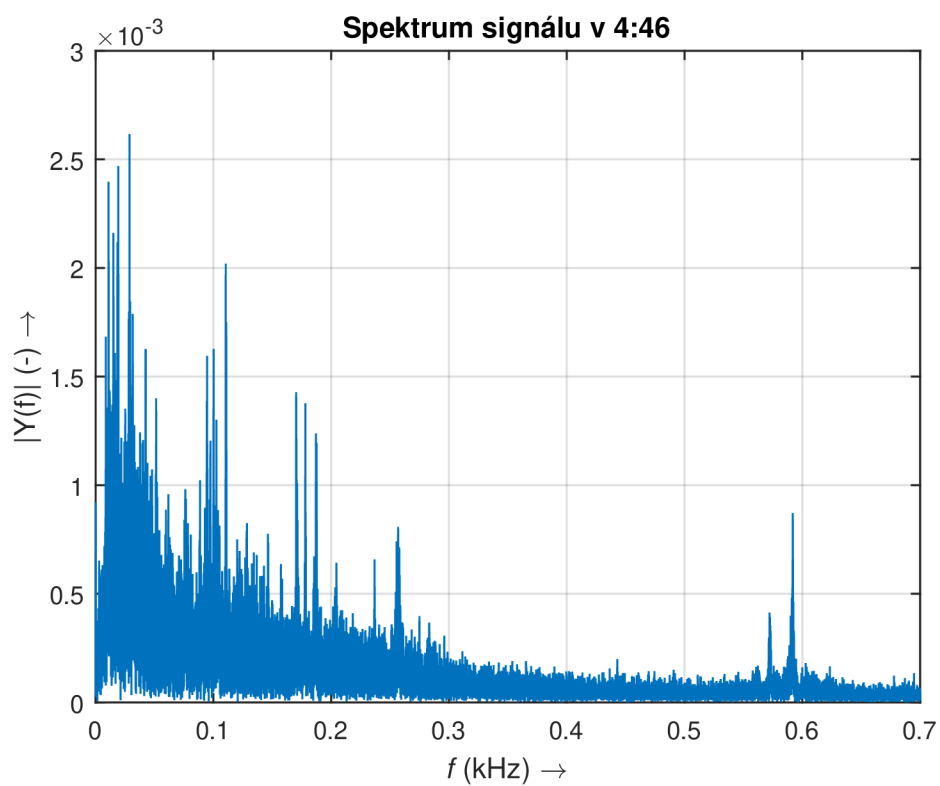
Pro zpracování výsledků byla však doba jednotlivých měření (1,6 s) příliš krátká, proto bylo vybráno 5 náhodných časových úseků z celkových cca 24 hodin, kdy bylo spojeno 20 souborů do jednoho a byl vytvořen soubor s celkovou dobou měření cca 32 s, který byl dále zpracováván.

## 7.3 Získané poznatky

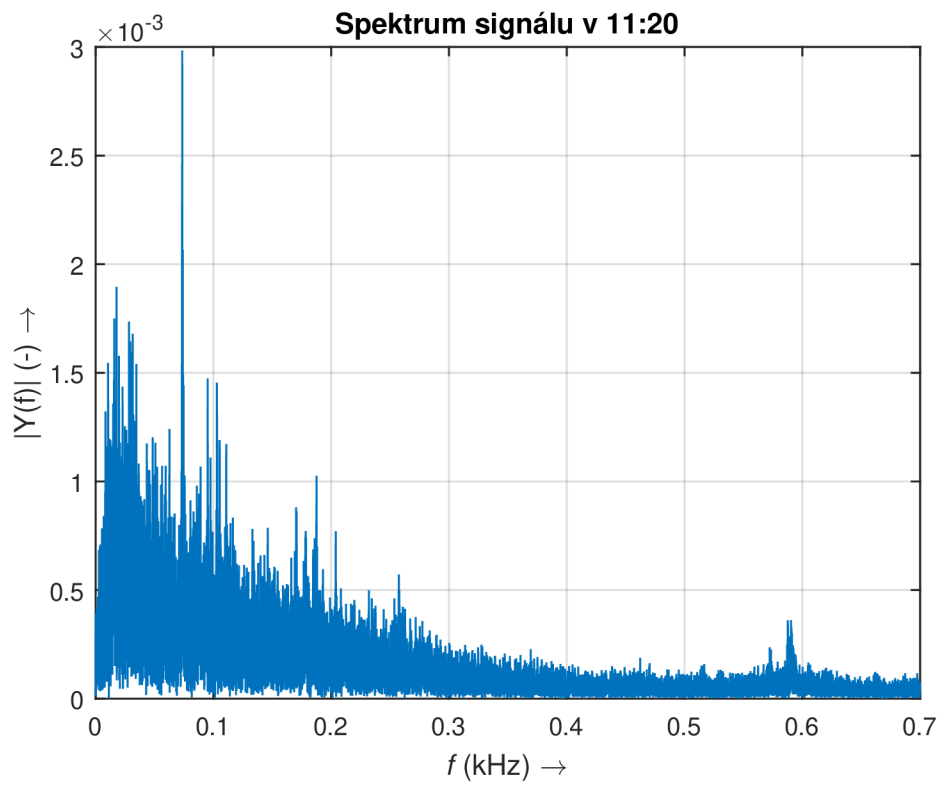
Zpracování jednotlivých náměrů a zobrazení jednotlivých grafů spekter signálů bylo provedeno pomocí programu Matlab.



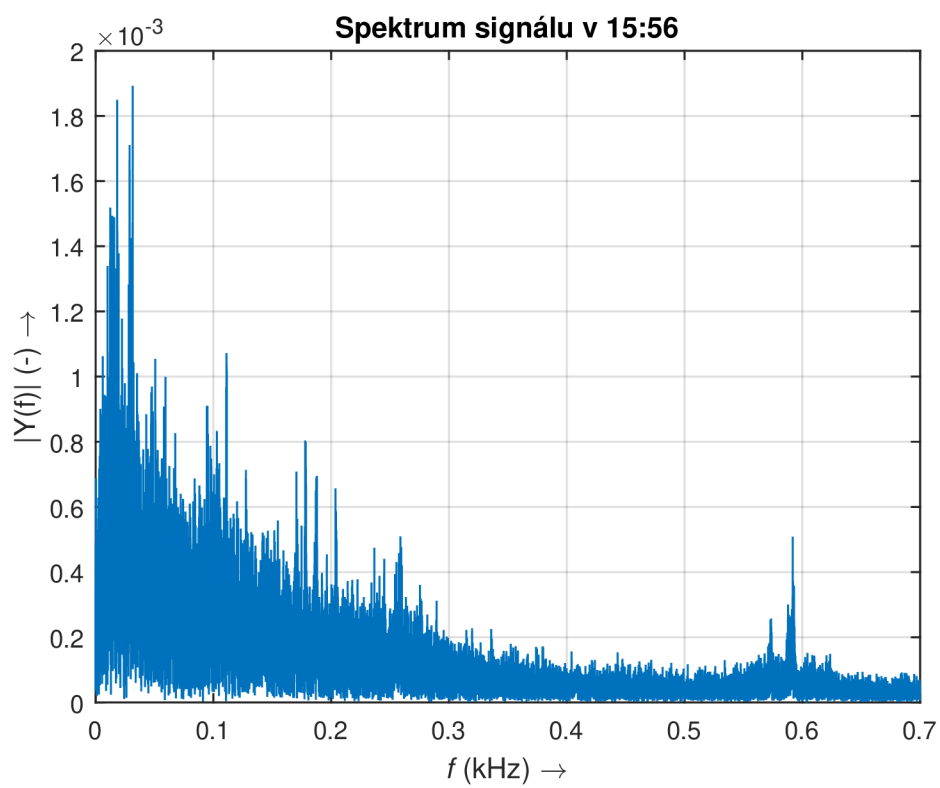
Obr. 7.2: Spektrum signálu v čase měření 0:46



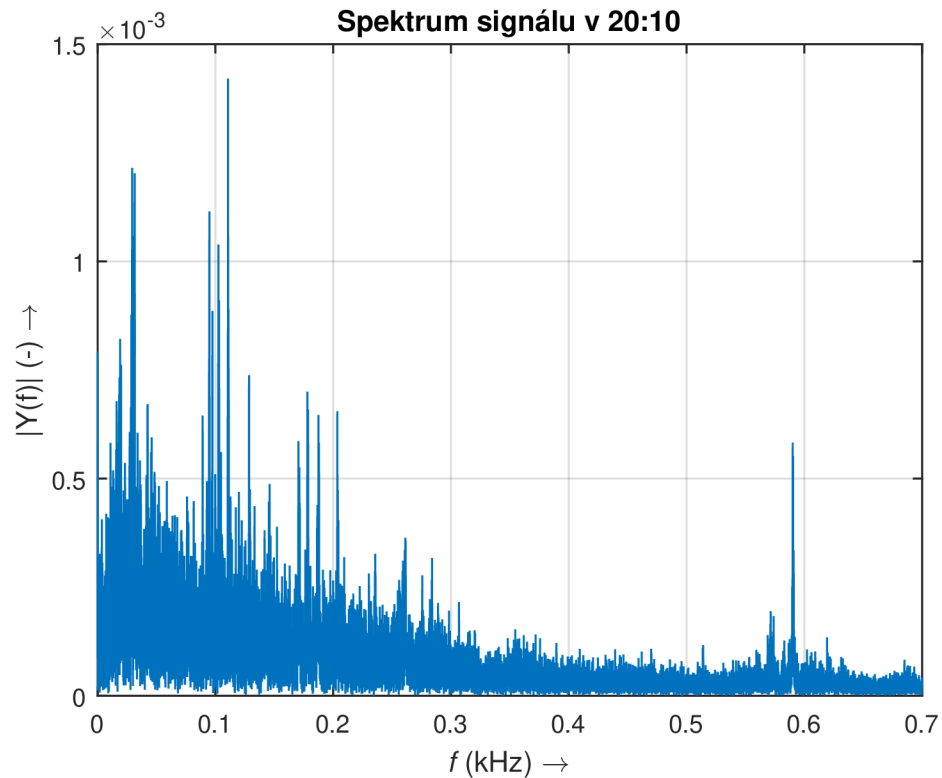
Obr. 7.3: Spektrum signálu v čase měření 4:46



Obr. 7.4: Spektrum signálu v čase měření 11:20



Obr. 7.5: Spektrum signálu v čase měření 15:56



Obr. 7.6: Spektrum signálu v čase měření 20:10

Z vytvořených grafů spekter signálů bylo vypořováno, že se v grafech objevují frekvence, které jsou společné pro všechna provedená měření. Tyto společné frekvence mohou představovat např. chlazení (větrák) v serverovém rozvaděči nebo chlazení notebooku, na kterém bylo provedeno měření. Tyto frekvence jsou cca 100 Hz, 250 Hz a 590 Hz. Po provedené analýze jednotlivých měření nelze s jistotou určit, jaké frekvence odpovídají projíždějící tramvaji, jelikož frekvence, jejichž intenzita převyšuje nad ostatní, jsou pro všechny měření stejné. Z provedených měření byla však ověřena skutečnost, že ve večerních a nočních hodinách je provoz po městě Brno menší než přes den a tudíž i hodnoty intenzit všech frekvencí jsou nižší než tomu bylo přes den.



## 8 ZÁVĚR

Práce je věnována distribuovaným optickým vláknovým sensorům. Takto konstruované vláknové senzory poskytují informace o měřené veličině po celé délce optického vlákna. Lze si takové vlákno představit jako několik tisíc sensorů rozprostřených po celé délce optického vlákna.

V práci jsou postupně probrány základy optiky, optická interferometrie, polarizace a rozptyly v optickém vláknu. Zmíněny a popsány jsou zde jednotlivé typy interferometrů, dále Rayleighův rozptyl, Ramanův rozptyl a Brillouinův rozptyl. V kapitole polarizace jsou popsány jednotlivé druhy polarizace a Poincarého koule.

Porovnáním měření pomocí interferenční a polarizační metody bylo dosaženo závěru, že citlivější pro přijímaný signál je metoda interferenční. V našem případě byl využit princip Mach–Zehnderova interferometru. I přes to, že polarizační metoda byla méně citlivá než interferenční metoda, byla polarizační metoda dostačující pro měření okolních vibrací, např. pohyb po místnosti apod.

Měřením na reálné trase bylo ověřeno, že provoz v nočních hodinách je menší než přes den, avšak z naměřených hodnot a dosažených grafů nelze s jistotou určit přesnou nebo alespoň přibližnou frekvenci projíždějící tramvaje. Frekvence, jež se opakují pro všechna měření (cca 100 Hz, 250 Hz a 590 Hz), jsou s největší pravděpodobností např. chlazení v serverovém rozvaděči, příp. chlazení notebooku.

Měření akustických vibrací je velmi náchylné na okolní vibrace, tudíž jakýkoliv záchvěv je ihned zaznamatelný a ovlivňující probíhající měření. Z tohoto důvodu bývá měření akustických vibrací zatíženo chybami.

## LITERATURA

- [1] BAO, X. – CHEN, L. *Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors* [online]. Basel, 2012, [cit. 2017-10-16]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/218S1TV>>.
- [2] COLLETT, E. *Field Guide to Polarization*. Washington, 2009, 150s., ISBN 0-8194-5868-6.
- [3] DUŠEK, M. – MAZANEC, M. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů*. Brno: 2012. Učební texty k semináři. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] GENG, J. – JIANG, S. – SPIELBERG, CH. *Distributed fiber sensor based on spontaneous brilluoin scattering* [online]. Tucson, 2007, 15 s. [cit. 2017-11-27]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/2BvW7du>>.
- [5] HA LEE, B. – HO KIM, Y. – SEOB PARK, K. *Interferometric Fiber Optic Sensors* [online]. Basel, 2012 [cit. 2017-10-7]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/2ydt7bD>>.
- [6] HARIHARAN, P. Handbook of Optics, In *Interferometers* [online]. Sydney, 1995. Kapitola 21. [cit. 2017-10-20]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/2xkA47I>>.
- [7] HARUN, S. W. – YASIN, M. – RAHMAN, H. A. – AROF, H. – AHMAD, H. Fiber Optic Temperature Sensors, In *Optical Fiber Communications and Devices* [online]. Rijeka: InTech Europe, 2012. Kapitola 17. s. 361–380. [cit. 2017-10-17]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1j4TdT3>>.
- [8] HILL, D. *Fiber Sensing: Optical fiber monitors the arterial networks of commerce* [online]. Hampshire, 2015, 10 s. [cit. 2017-11-27]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/2ijyyN7>>.
- [9] HOLÍK, T. *Distribuovaný teplotní senzor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2016. 81 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, PhD.
- [10] HYNEK, J. *Rozprostřené optické vláknové senzory na dlouhé vzdálenosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2013. 95 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, PhD.
- [11] KANG, J. U. Fiber Optic Sensing and Imaging, In *Fiber Optic Interferometric Devices*. New York, 2013, 171s., ISBN 978-1-4614-7482-1.

- [12] LÁTAL, J. – KOUDELKA, P. – HANÁČEK, F. *Využití distribuovaných opto-vláknových systémů při detekci průvanů v jeskynních systémech* [online]. Brno: Elektrověda, 2010, [cit. 2017-10-15]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1N8p0AC>>.
- [13] LUKÁŠ, M. *Parametry laserových diod a jejich měření* [online]. Brno: Elektrověda, 2002, [cit. 2017-12-7]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/2BTutY7>>.
- [14] Optical Sensor Systems Consulting and Development. *Fiber optic temperature sensors* [online]. [cit. 2017-11-27]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/2zJX147>>.
- [15] SALEH, B. E. A. – TEICH, M. C. *Fundamentals of Photonics—2nd edition*. New Jersey: Wiley and Sons, 2013, 1200 s., ISBN 9781118585818.
- [16] UDD, E. – SPILLMAN, W. B. *Fiber optic sensors : an introduction for engineers and scientists—2nd ed..* New Jersey: Wiley and Sons, 2011, 506 s., ISBN 978-1-118-01408-0.
- [17] UKIL, A. – BRAENDLE, H. – KRIPPNER, P. *Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications* [online]. 2012, [cit. 2017-10-16]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1X4dIg2>>.
- [18] WANG, J. *Distributed Pressure and Temperature Sensing Based on Stimulated Brillouin Scattering* [online]. Blacksburg: Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2013, 56 s. [cit. 2017-10-17]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1QJ5UQY>>.
- [19] WAYNANT, R. W. – EDIGER, M. N. *Electro-Optics Handbook—2nd ed.* [online]. New York, 2000, [cit. 2017-10-16]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1MyUR7Y>>.
- [20] YUAN, D. – DONG, Y. – LIU, Y. – LI, T. *Mach-Zehnder Interferometer Biochemical Sensor Based on Silicon-on-Insulator Rib Waveguide with Large Cross Section* [online]. Basel, 2015 [cit. 2017-10-7]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/2zbJ68y>>.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

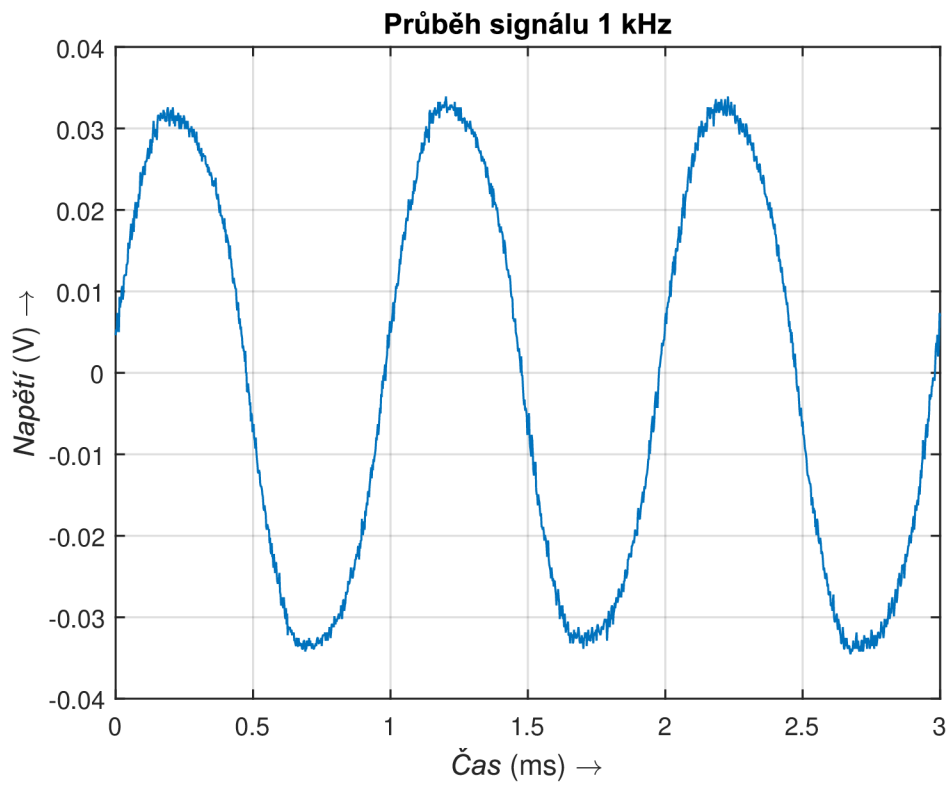
ASE	zesílená spontánní emise – Amplified Spontaneous emission
C-OTDR	koherentní optická reflektometrie v časové oblasti – Coherent Optical Time Domain Reflectometry
DAS	distribuovaný akustický senzor – Distributed Acoustic Sensing
DBF	laserová dioda s distribuovanou zpětnou vazbou – Distributed Feedback Laser
DFS	distribuovaný vláknový senzor – Distributed Fiber Sensing
DTS	distribuovaný teplotní senzor – Distributed Temperature Sensing
FP	Fabry-Perotova laserová dioda – Fabry-Perot Laser Diode
LCR	kruhová polarizace vlevo – Left Circularly Polarized
LP	lineární polarizace – Linearly Polarized
PMD	polarizační vidová disperze – Polarisation Mode Dispersion
RCP	kruhová polarizace vpravo – Right Circularly Polarized
SLED	Superluminiscenční dioda – Superluminescent diode
$e$	Eulerovo číslo
$h$	Planckova konstanta
$k$	Boltzmannova konstanta

## SEZNAM PŘÍLOH

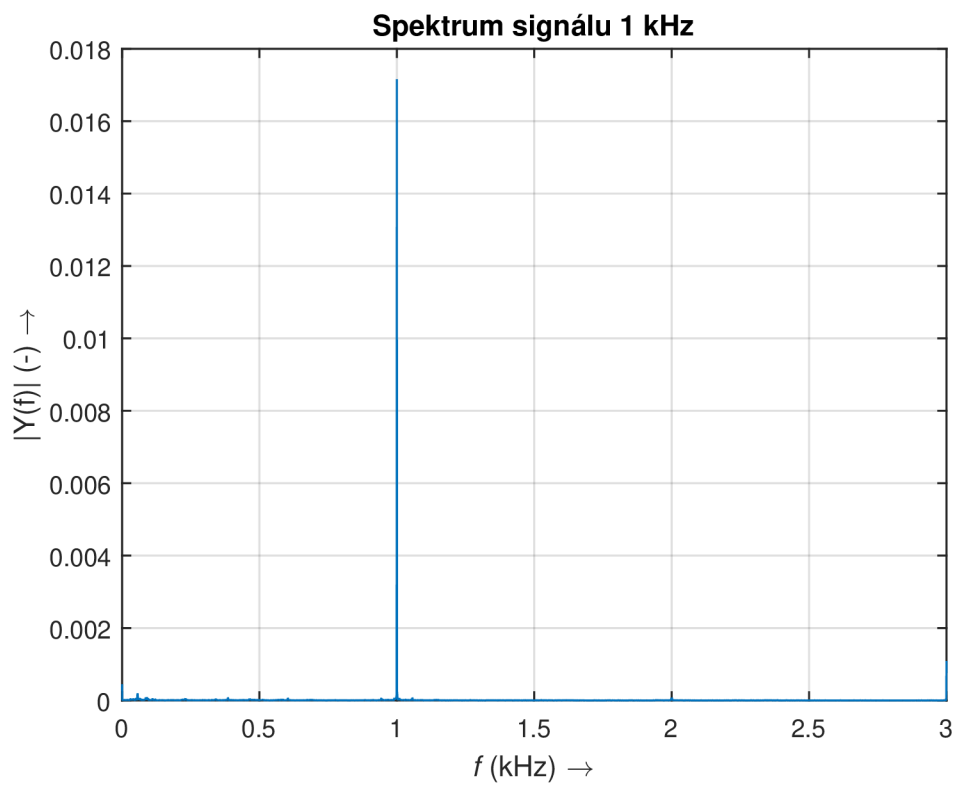
A Grafy naměřených hodnot	73
B Obsah přiloženého média	83

## A GRAFY NAMĚŘENÝCH HODNOT

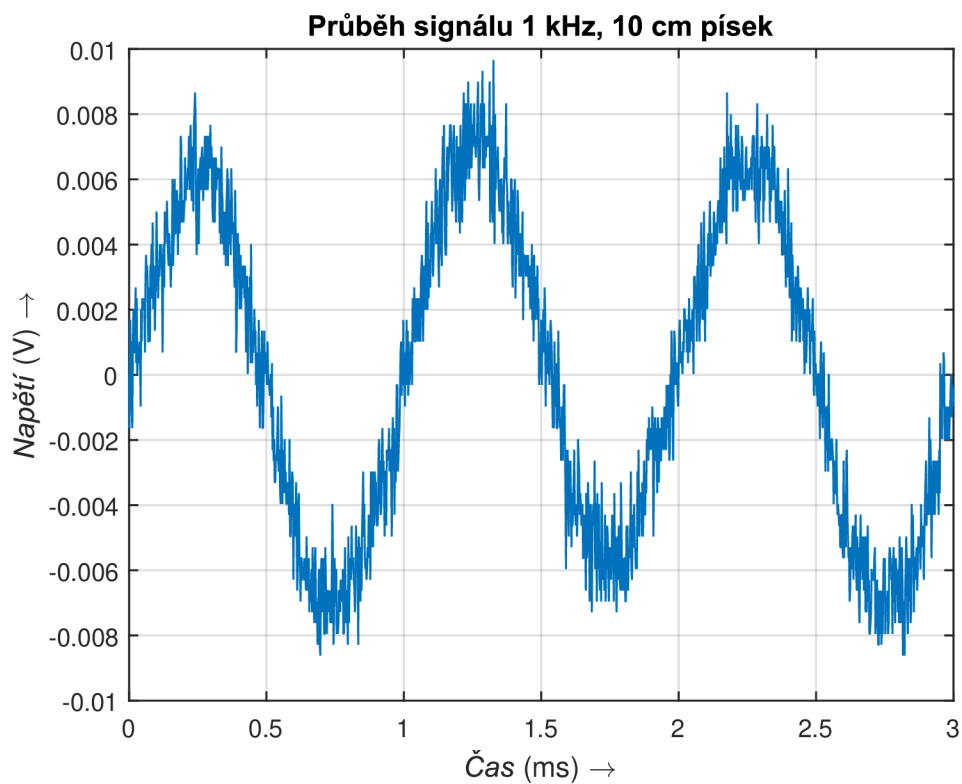
Příloha (A) obsahuje jednotlivé grafy naměřených hodnot, vytvořených pomocí programu Matlab. Tyto grafy znázorňují měření akustických vibrací pomocí interferometrické metody využívající princip Mach–Zehnderova interferometru.



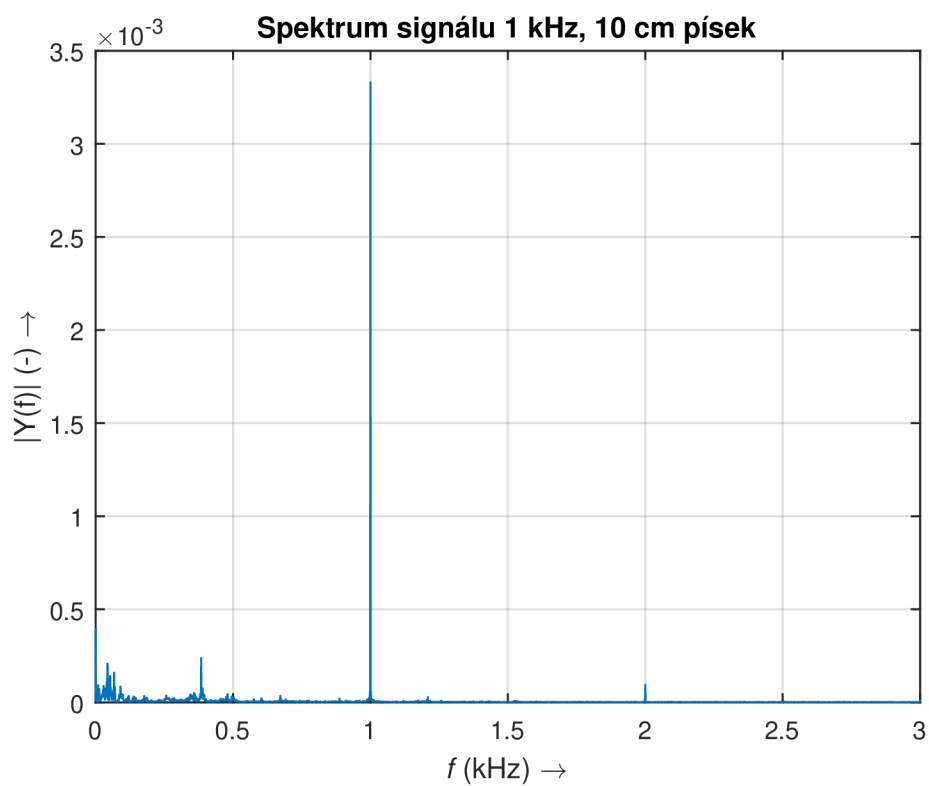
Obr. A.1: Průběh signálu pro 1 kHz, referenční měření



Obr. A.2: Spektrum signálu pro 1 kHz, referenční měření

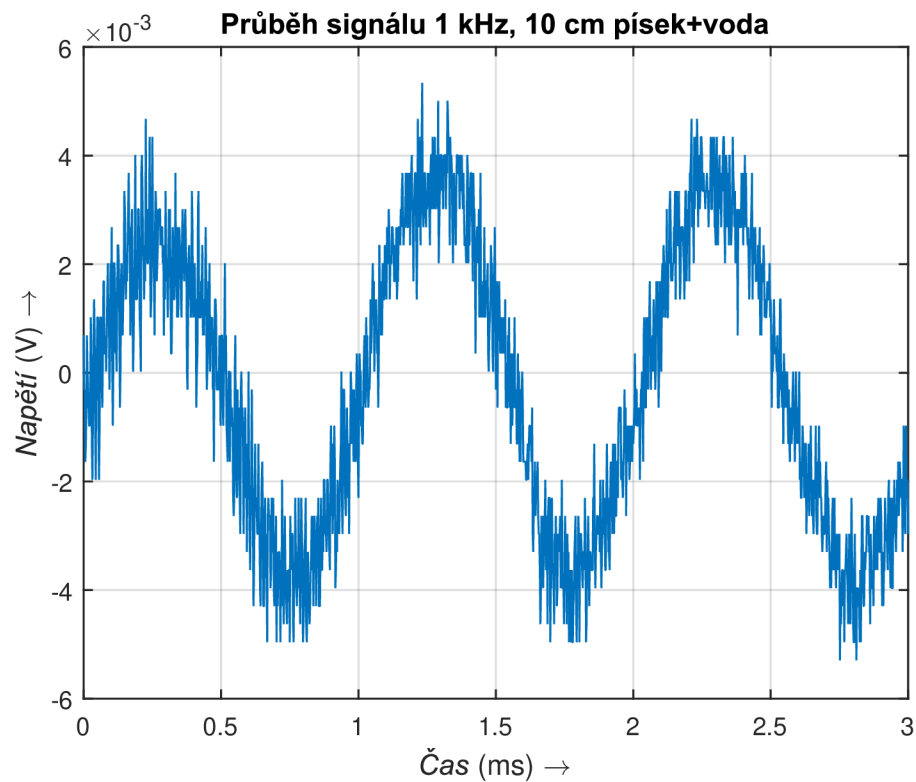


Obr. A.3: Průběh signálu pro 1 kHz, 10 cm písek

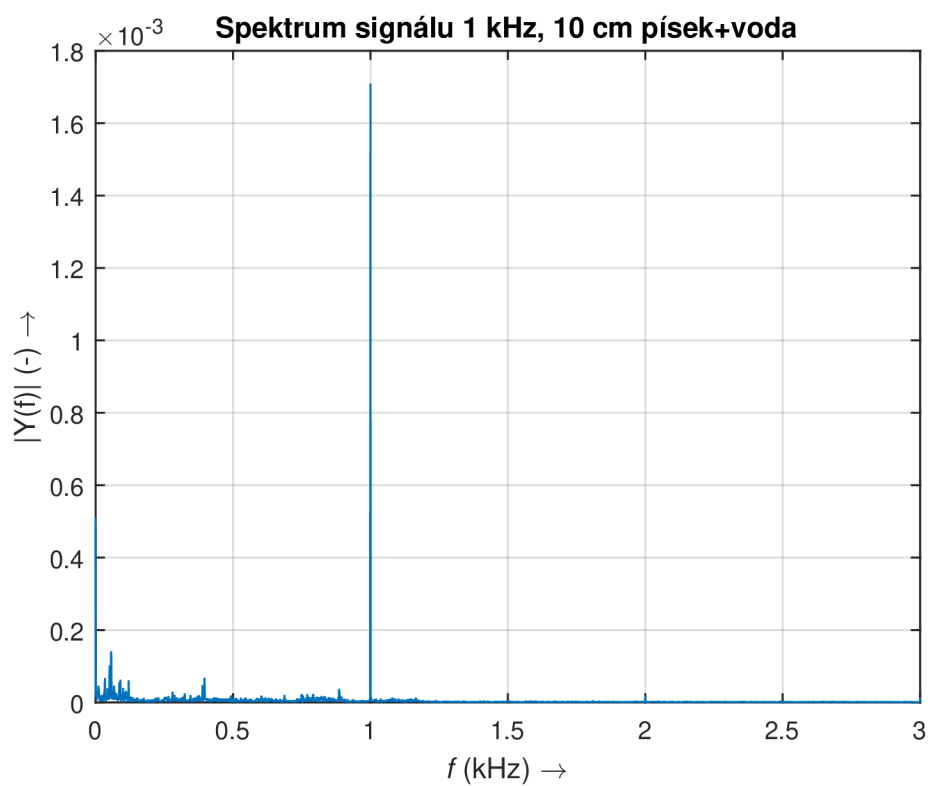


Obr. A.4: Spektrum signálu pro 1 kHz, 10 cm písek

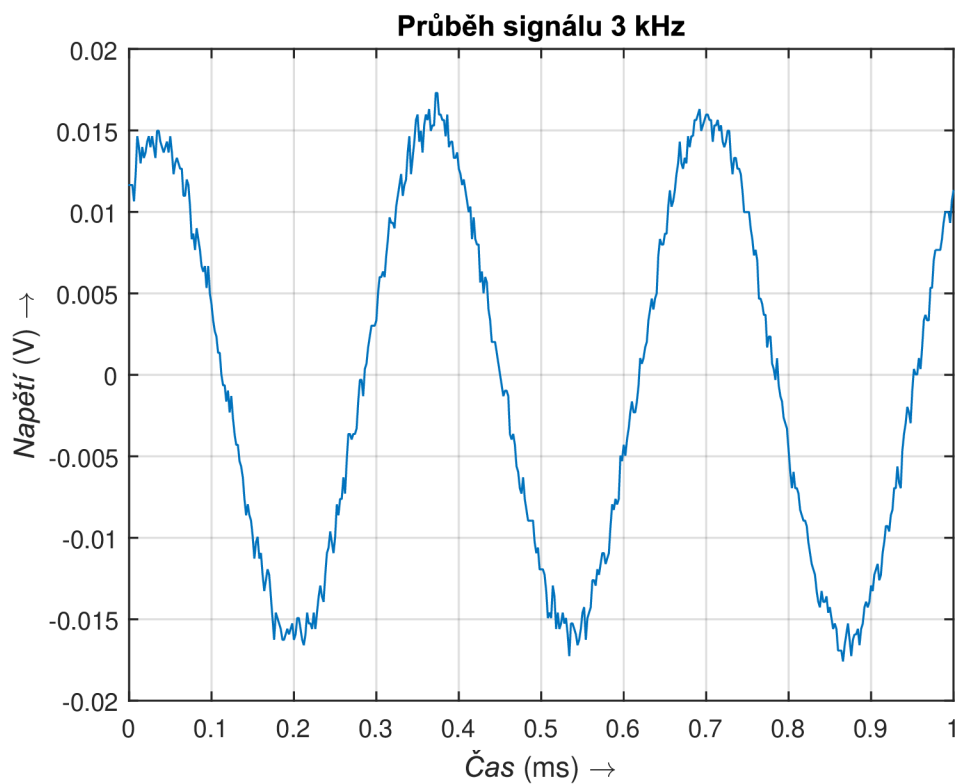




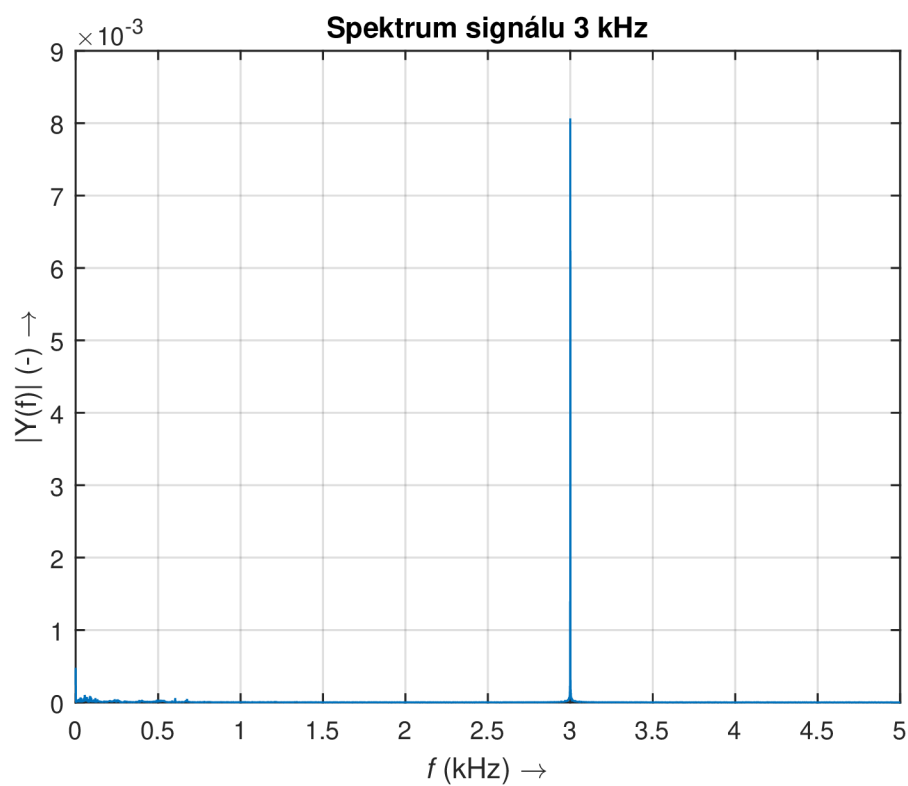
Obr. A.5: Průběh signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda



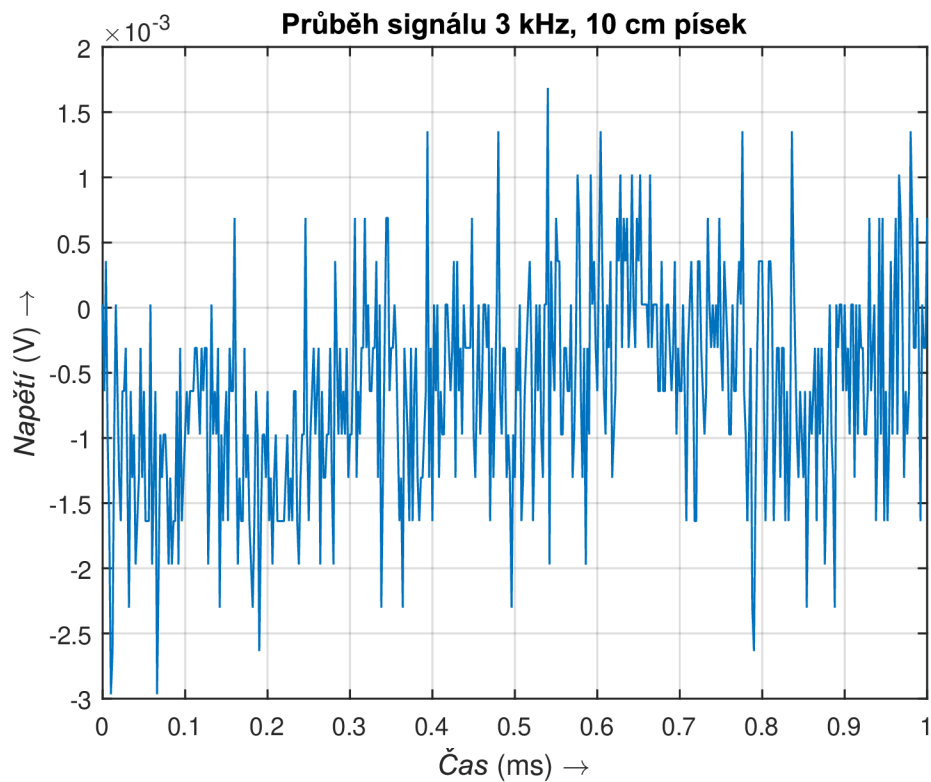
Obr. A.6: Spektrum signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda



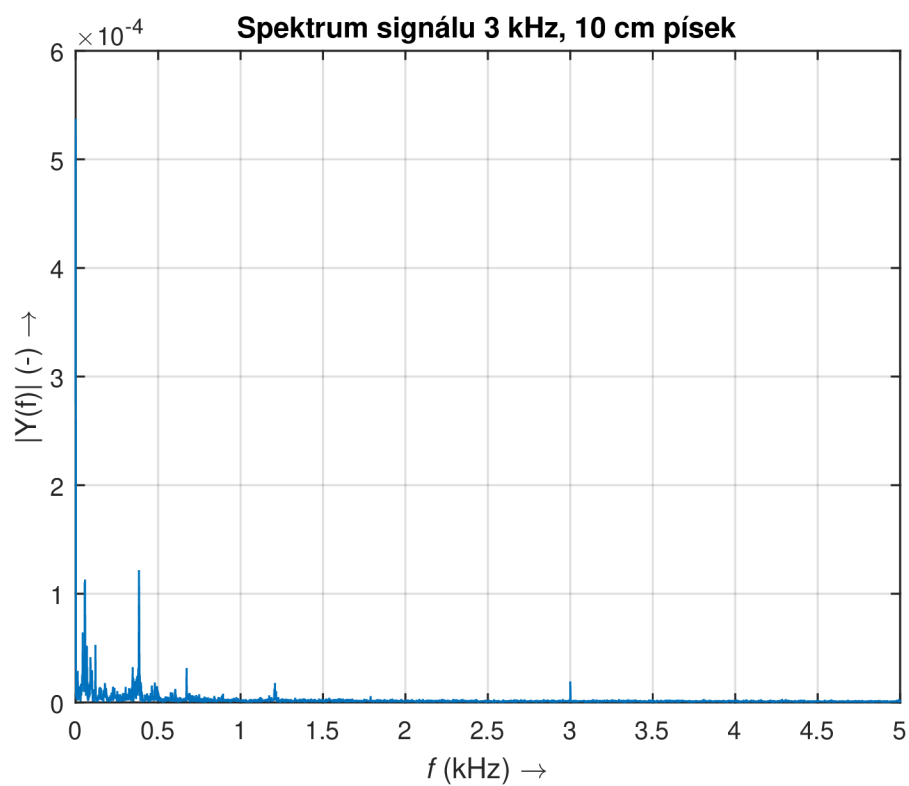
Obr. A.7: Průběh signálu pro 3 kHz, referenční měření



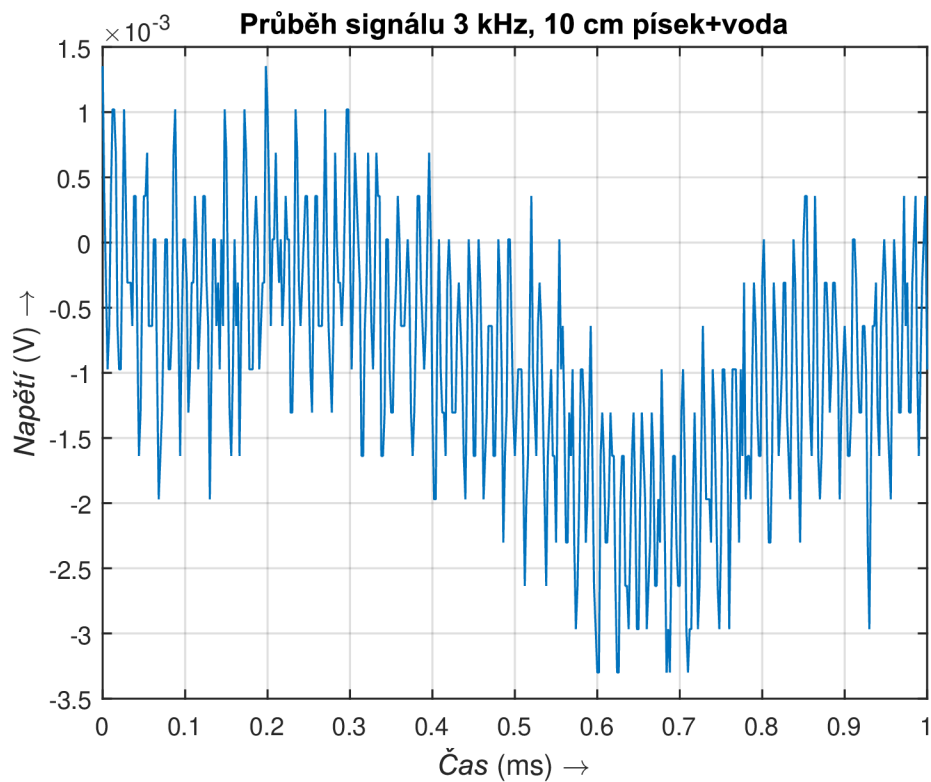
Obr. A.8: Spektrum signálu pro 3 kHz, referenční měření



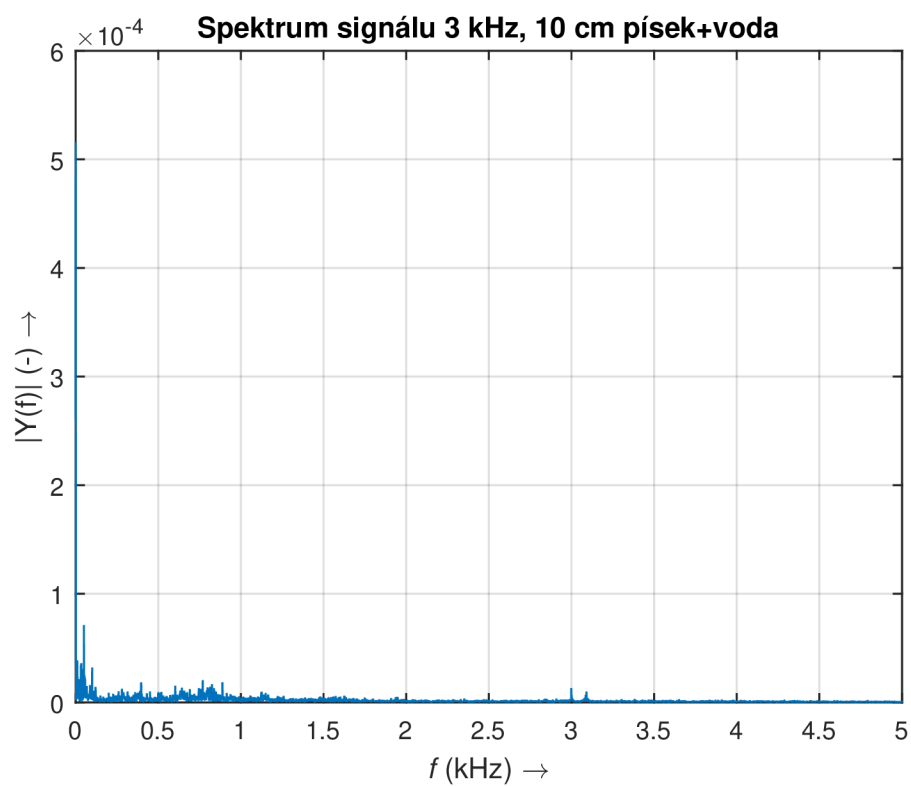
Obr. A.9: Průběh signálu pro 3 kHz, 10 cm písek



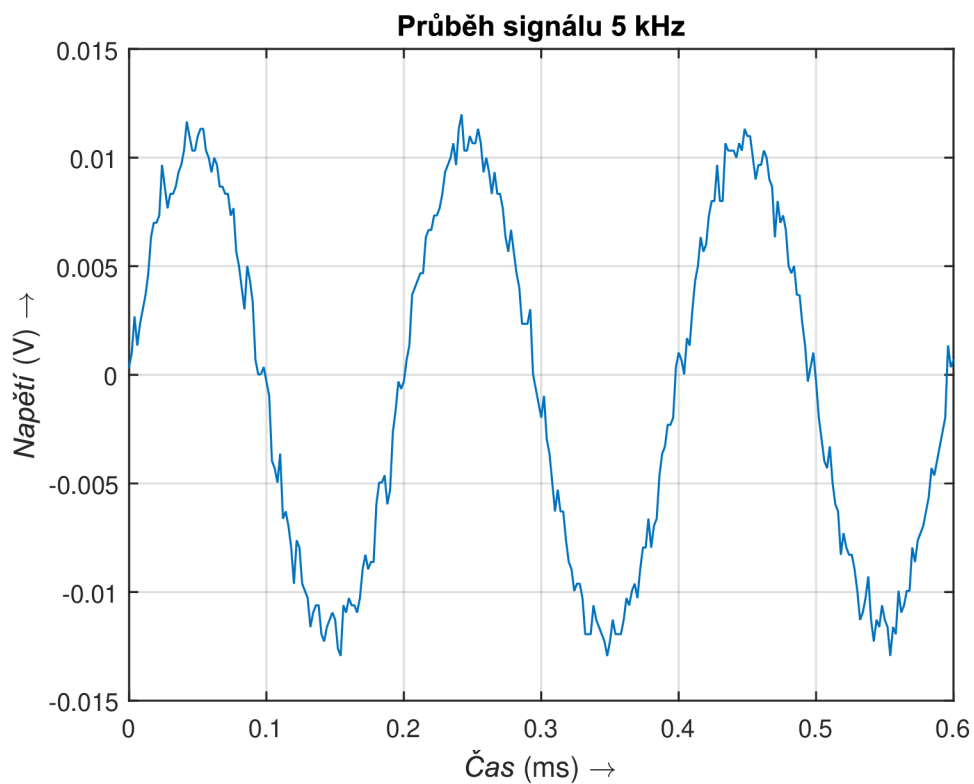
Obr. A.10: Spektrum signálu pro 3 kHz, 10 cm písek



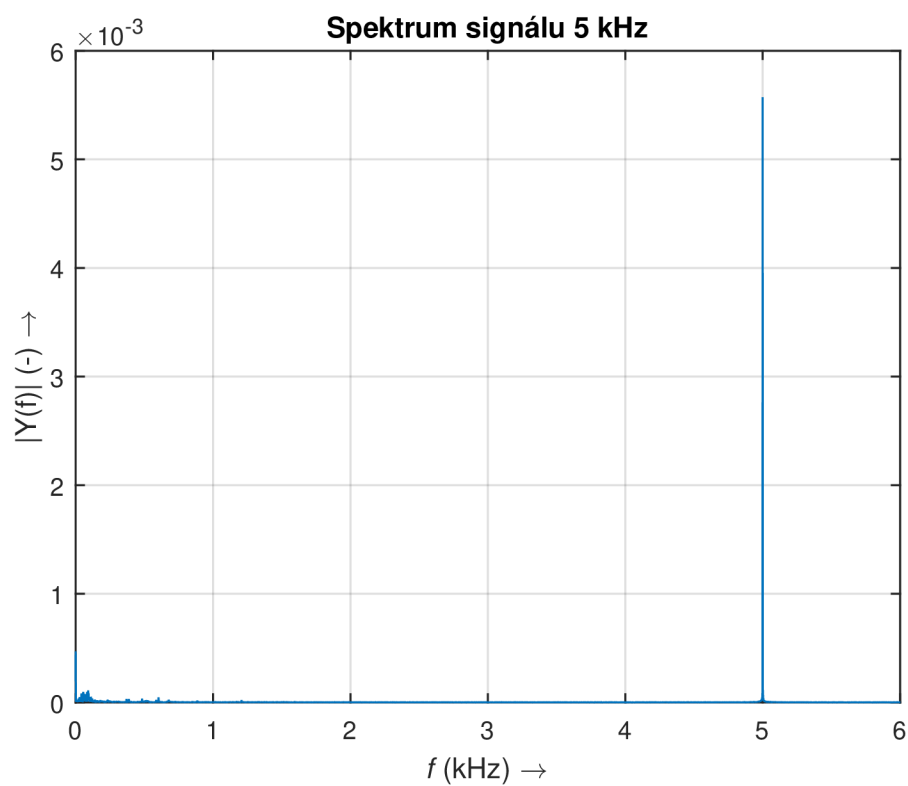
Obr. A.11: Průběh signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda



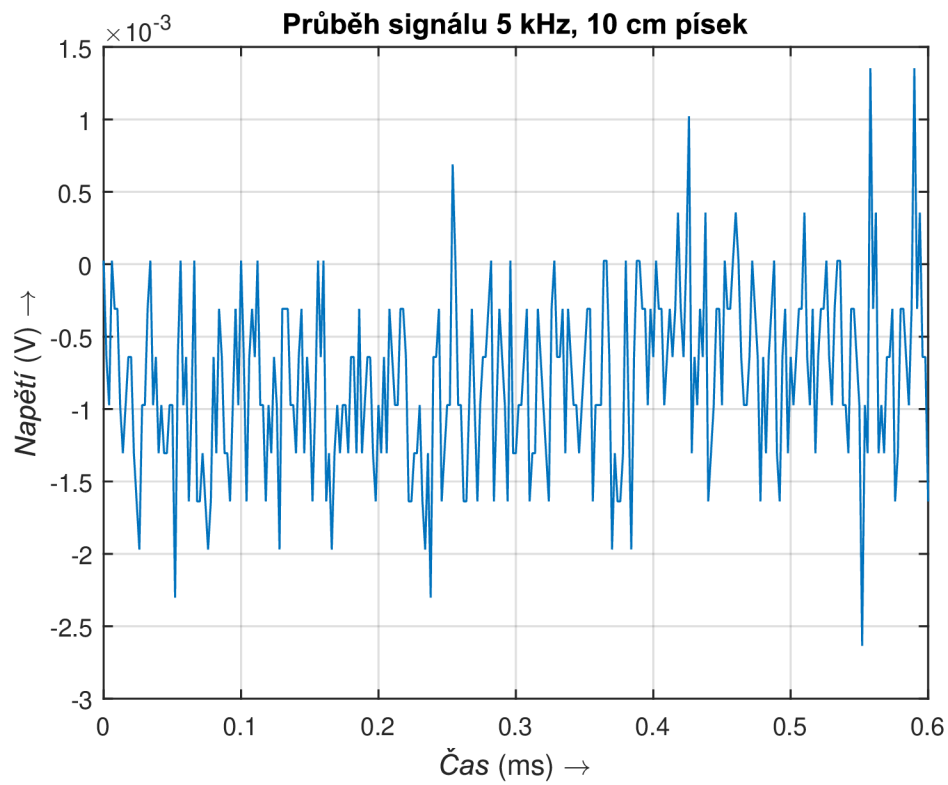
Obr. A.12: Spektrum signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda



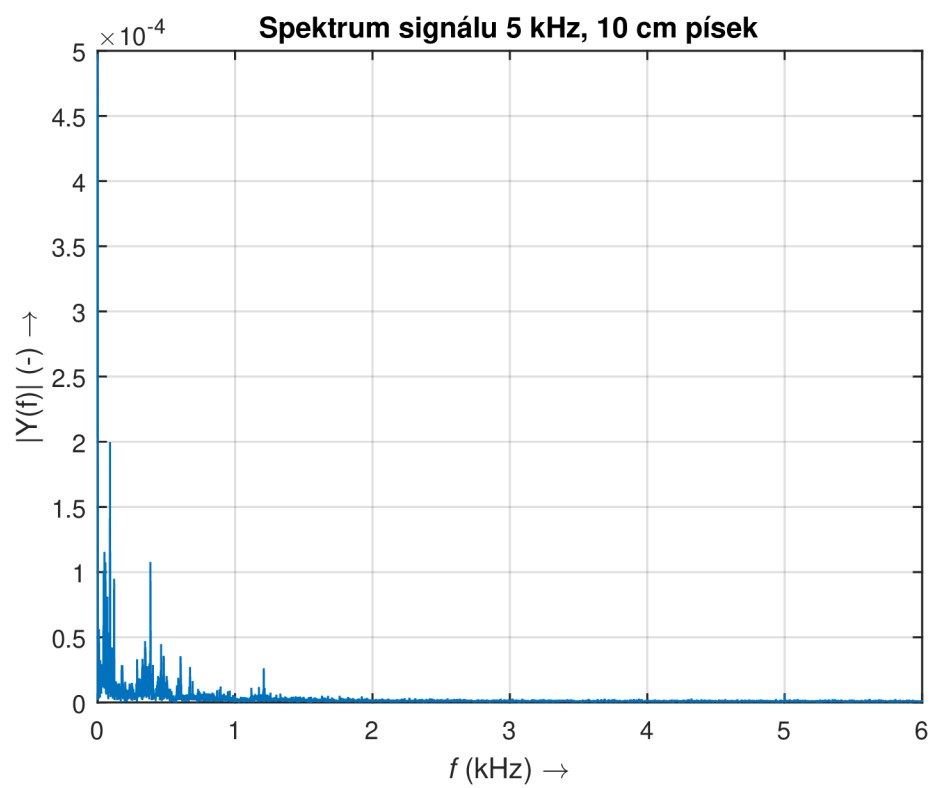
Obr. A.13: Průběh signálu pro 5 kHz, referenční měření



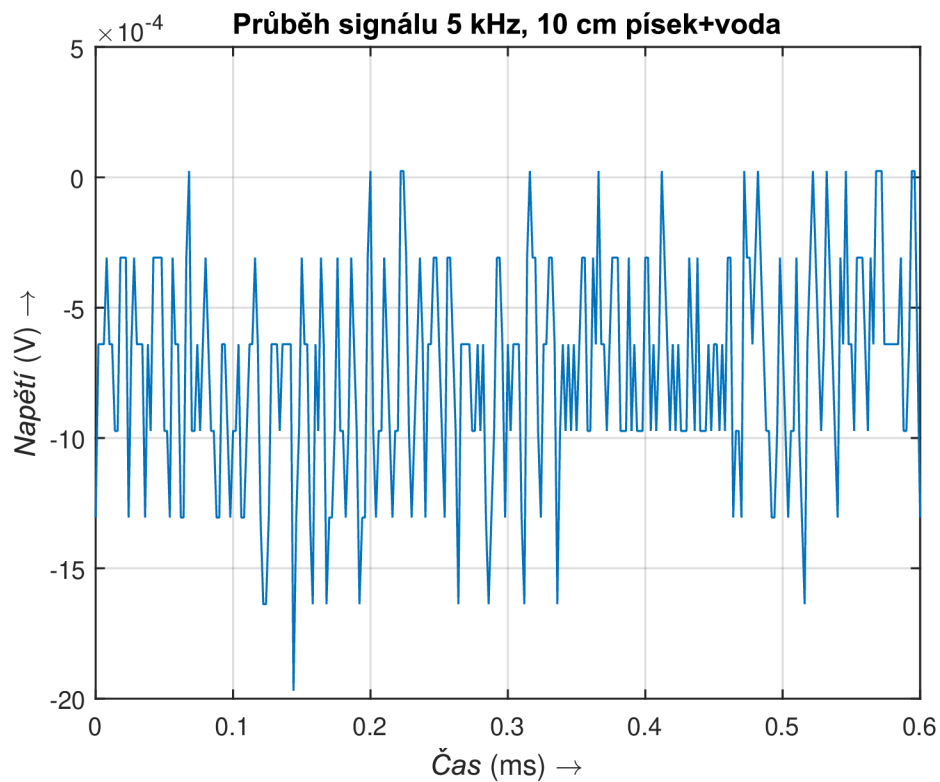
Obr. A.14: Spektrum signálu pro 5 kHz, referenční měření



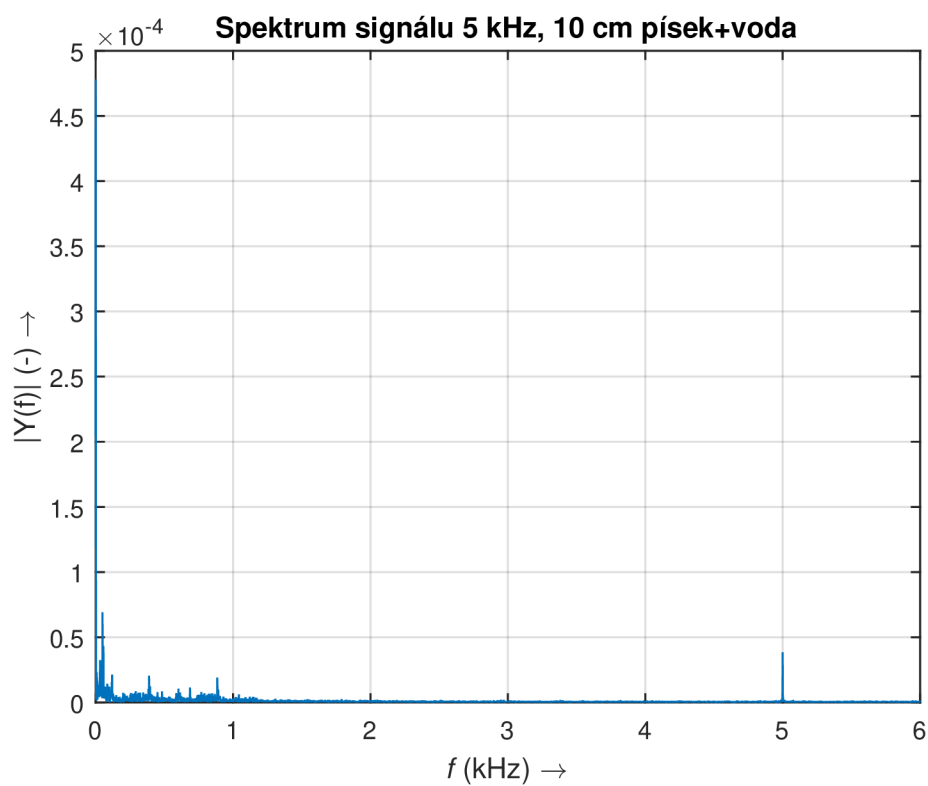
Obr. A.15: Průběh signálu pro 5 kHz, 10 cm písek



Obr. A.16: Spektrum signálu pro 5 kHz, 10 cm písek



Obr. A.17: Průběh signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda



Obr. A.18: Spektrum signálu pro 1 kHz, 10 cm písek+voda

## B OBSAH PŘILOŽENÉHO MÉDIA

Příložené DVD obsahuje tyto adresáře:

1. Grafy.
2. Náměry.
3. Práce.

Adresář grafy obsahuje podadresáře:

1. Interferenční metoda – grafy pro měření akustických vibrací interferenční metodou.
2. Měření přes noc – grafy pro měření přes noc.
3. Měření sud – grafy pro měření v plastovém sudu.
4. Měření sud s vodou – grafy pro měření v plastovém sudu s vodou.
5. Polarizace – grafy pro měření okolních vibrací.
6. Polarizační metoda – grafy pro měření akustických vibrací polarizační metodou.

Adresář náměry obsahuje podadresáře:

1. Měření přes noc – naměřené hodnoty při měření na reálné trase.
2. Měření sud – naměřené hodnoty při měření v plastovém sudu.
3. Polarizace – naměřené hodnoty polarizační metody.

V každém podadresáři s náměry je vždy přiložen soubor M-file, ve kterém je uložena funkce pro nahrávání dat a následné vytvoření grafů z naměřených hodnot. Verze Matlab2015a.

Adresář práce obsahuje soubor .pdf s elektronickou verzí práce.