

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



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

VLIV DLOUHÝCH OPTOVLÁKNOVÝCH TRAS NA POLARIZAČNÍ STAV SVĚTLA A JEJICH VYUŽITÍ PRO NAPÁJENÍ POLARIZAČNÍCH SENZORŮ

LONG OPTICAL FIBRE ROUTES INFLUENCE ON THE POLARIZING STATE OF LIGHT AND USES IT FOR
POWERING POLARIZATION SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marco Panascí

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2021

Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Marco Panasci

ID: 195408

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Vliv dlouhých optovláknových tras na polarizační stav světla a jejich využití pro napájení polarizačních senzorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem diplomové práce je analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsoby zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli. Práce se zabývá teorií změn polarizačních stavů v běžných komunikačních vláknech a má za cíl navrhnout uspořádání optovláknových komponent tak, aby polarizační vlastnosti světla na konci trasy byly dále použitelné pro senzorické účely.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Collett, E. Field Guide to Polarization, SPIE Vol. FG05, 2005, ISBN: 9780819458681

[2] Filka, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, Brno, CENTA 2009 ISBN: 9788086785141

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce řeší vliv dlouhých optovláknových tras na polarizační stav světla a jejich využití pro napájení polarizačních senzorů. Cílem diplomové práce bylo navrhnout uspořádání optovláknových komponent tak, aby polarizační vlastnosti světla na konci trasy byly dále použitelné pro sensorické účely. Byly navrženy čtyři dílčí měření s dlouhou trasou (v laboratorním uspořádání, pokládkou v zemi, na závěse, při působení vnějšího vlivu) a jedno měření bez trasy při působení vnějšího vlivu. Celkové výsledky měření demonstrovují, že pro funkční napájení sensorických systémů s dlouhou trasou lze použít vybudované stávající jednovidové vlákno (uloženo pokládkou v zemi), do kterého by se multiplexoval zdroj světla pro daný sensorický systém. V diskuzi jsou rozebrány všechny typy měření a porovnávány mezi sebou. V závěru je zrekapitulován celkový výsledek a jsou zde popsány aplikace, u kterých by takový sensorický systém mohl být použit.

KLÍČOVÁ SLOVA

optické vlákno, jednovidové vlákno, vlákno zachovávající polarizaci, PANDA vlákno, optický sensorický systém, sensorické vlákno, polarizace, multiplexer, DWDM, Stokesovy vektory, Jonesovy vektory, Poincarého koule, laserová dioda, napájení dlouhých tras, polarimetr, pokládka v zemi, závěs, laboratorní uspořádání, vnější vliv

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the influence of long fiber optic paths on the polarization state of light and their use for powering polarization sensors. The aim of the diploma thesis was to design the arrangement of optical fiber components so that the polarization properties of light at the end of the path are further usable for sensory purposes. Four partial measurements with a long path (in a laboratory setting, laying in the ground, on a curtain, under the influence of external influence) and one measurement without a path under the influence of external influence were designed. The overall measurement results demonstrate that for the functional power supply of long-distance sensor systems, an existing single-mode fiber can be used (laid by laying in the ground), into which a light source for a given sensor system would be multiplexed. In the discussion, all types of measurements are analyzed and compared with each other. Finally, the overall result is summarized and applications are described in which such a sensor system could be used.

KEYWORDS

optical fiber, single-mode fiber, polarization-maintaining fiber, PANDA fiber, optical sensor system, sensor fiber, polarization, multiplexer, DWDM, Stokes vectors, Jones vectors, Poincaré sphere, laser diode, long-distance power supply, polarimeter, laying in the ground, hinge, laboratory arrangement, external influence

PANASCÍ, Marco. *Vliv dlouhých optovláknových tras na polarizační stav světla a jejich využití pro napájení polarizačních senzorů*. Brno, 2020, 88 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Vliv dlouhých optovláknových tras na polarizační stav světla a jejich využití pro napájení polarizačních senzorů“ 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 prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. a konzultantovi doc. Ing. Martinovi Kyselákovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, rady a podnětné návrhy k práci. Také bych chtěl poděkovat svoji rodině ke stálé podpoře při studiu.

Obsah

Úvod	12
1 Optická vlákna	14
1.1 Vlákna zachovávající polarizaci	15
2 Polarizované světlo	17
2.1 Zázračná délka	17
2.2 Lineárně polarizované světlo	18
2.3 Kruhově polarizované světlo	20
2.4 Elipticky polarizované světlo	21
2.5 Poincarého koule	22
2.6 Stokesovy vektory	24
2.7 Jonesovy vektory	26
3 Optické senzorické systémy	28
3.1 Polarizačně modulovaný senzor	30
3.1.1 Senzory využívající změny polarizace světla	32
4 Laserová dioda	33
5 Měření dlouhé trasy v laboratorním uspořádání	34
5.1 Měření s jednovidovým vláknem 10,125 km	34
5.1.1 Návrh zapojení pracoviště	34
5.1.2 Měření dlouhé 24 hodin (jednovidové vlákno 10,125 km)	36
5.1.3 Měření dlouhé 60 hodin (jednovidové vlákno 10,125 km)	39
5.2 Měření s jednovidovým vláknem 40 km	42
5.2.1 Návrh zapojení pracoviště	42
5.2.2 Měření dlouhé 24 hodin (jednovidové vlákno 40 km)	42
5.2.3 Měření dlouhé 60 hodin (jednovidové vlákno 40 km)	45
5.2.4 Změna zdroje světla pro měření dlouhých tras	47
5.2.5 Měření dlouhé 65 hodin (jednovidové vlákno 40 km)	49
6 Měření dlouhé trasy pokládkou v zemi	52
6.1 Měření trasy Šumavská–Bohunice (48,3 km)	52
7 Měření dlouhé trasy na závěse	55
7.1 Měření na závěsném kabelu (6,8 km)	55

8	Reakce senzoru bez dlouhé trasy při působení vnějšího vlivu	59
8.1	Reakce senzoru po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C	59
8.2	Reakce senzoru po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C	63
9	Reakce senzoru s dlouhou trasou při využití vlnového multiplexu a při působení vnějšího vlivu	66
9.1	Reakce senzoru s dlouhou trasou při využití vlnového multiplexu a bez přiložení kádinky s vodou	66
9.2	Reakce senzoru s dlouhou trasou při využití vlnového multiplexu a po přiložení kádinky s vodou s teplotou 24 °C	69
9.3	Reakce senzoru s dlouhou trasou při využití vlnového multiplexu a po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C	73
9.4	Reakce senzoru s dlouhou trasou při využití vlnového multiplexu a po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C	76
10	Diskuze	79
	Závěr	83
	Literatura	85
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	87

Seznam obrázků

1.1	Struktura optického vlákna.	14
1.2	Vlákna zachovávající polarizaci (a, PANDA b, bow-tie c, eliptické jádro). [6]	16
2.1	Polarizace světla (a, lineární horizontální b, lineární vertikální). [9] . .	19
2.2	Polarizace světla (a, lineární ve směru $+45^\circ$ b, lineární ve směru -45°). [9]	20
2.3	Polarizace světla (a, kruhová levotočivá b, kruhová pravotočivá). [9] .	21
2.4	Elipticky polarizované světlo. [9]	21
2.5	Stavy polarizovaného světla na Poincarého kouli. [11]	23
2.6	Stupeň polarizace v jednotlivých částech Poincarého koule. [9]	23
2.7	Stokesovy vektory v jednotlivých částech Poincarého koule. [11] . . .	26
3.1	Základní blokové schéma senzoru. [4]	28
3.2	Optický sensorický systém vlastní. [4]	29
3.3	Optický sensorický systém nevlastní. [4]	29
3.4	Zázněžová délka u optického vlákna. [6]	31
4.1	Laserová dioda.	33
5.1	Schéma zapojení měření s jednovidovým vláknem s délkou 10,125 km.	34
5.2	Průběh teploty při 24 hodinovém měření (6. 2.–7. 2. 2020).	36
5.3	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 24 h.	37
5.4	Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 24 h.	38
5.5	Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 24 h.	38
5.6	Průběh teploty při 60 hodinovém měření (8. 2.–10. 2. 2020).	39
5.7	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 60 h.	40
5.8	Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 60 h.	41
5.9	Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 60 h.	41
5.10	Schéma zapojení měření s jednovidovým vláknem s délkou 40 km. . .	42
5.11	Průběh teploty při 24 hodinovém měření (23. 1.–24. 1. 2020).	43
5.12	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 24 h.	44
5.13	Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 24 h.	44

5.14	Průběh teploty při 60 hodinovém měření (24. 1.–27. 1. 2020).	45
5.15	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 60 h.	46
5.16	Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 60 h.	46
5.17	Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 60 h.	47
5.18	Spektrální charakteristika laserové diody LPS-1550-FC.	48
5.19	Spektrální charakteristika SFP modulu SPS-7140WCIS.	48
5.20	Schéma zapojení měření s jednovidovým vláknem s délkou optického kabelu 40 km a délkou měření 65 h.	49
5.21	Průběh teploty při 65 hodinovém měření (5. 6.–7. 6. 2020).	50
5.22	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 65 h.	51
5.23	Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 65 h.	51
6.1	Schéma zapojení stávající trasy UNOB Šumavská – MU fakulta lékařská.	52
6.2	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase u trasy Šumavská–Bohunice (měření trvajícím 1 h).	53
6.3	Závislost stupně polarizace na čase u trasy Šumavská–Bohunice (měření trvajícím 1 h).	53
6.4	Naměřená trasa Univerzita obrany – Masarykova univerzita v Bohunicích pomocí OTDR metody.	54
7.1	Schéma zapojení stávající trasy od Botanické ulice až na Náměstí Svobody.	55
7.2	Rychlost a náraz větru 28. 2. 2020.	56
7.3	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase u závěsného kabelu (měření trvajícím 2 h).	57
7.4	Závislost elipticity na čase u závěsného kabelu (měření trvajícím 2 h).	57
7.5	Měřená trasa MU fakulta informatiky – Komerční banka na Náměstí Svobody pomocí metody OTDR.	58
8.1	Schéma zapojení měření reakce senzoru bez dlouhé trasy po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C.	60
8.2	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 0 °C).	61
8.3	Závislost elipticity na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 0 °C).	62
8.4	Závislost stupně polarizace na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 0 °C).	62

8.5	Schéma zapojení měření reakce senzoru bez dlouhé trasy po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C.	63
8.6	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 48 °C).	64
8.7	Závislost elipticity na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 48 °C).	65
8.8	Závislost stupně polarizace na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 48 °C).	65
9.1	Schéma zapojení měření reakce senzoru s dlouhou trasou bez přiložení kádinky s vodou.	67
9.2	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie a měření trvajícím 15 minut.	68
9.3	Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie a měření trvajícím 15 minut.	68
9.4	Schéma zapojení měření reakce senzoru s dlouhou trasou po přiložení kádinky s vodou s teplotou 24 °C.	69
9.5	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 24 °C a měření trvajícím 15 minut.	70
9.6	Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 24 °C a měření trvajícím 15 minut.	71
9.7	Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 24 °C a měření trvajícím 15 minut.	72
9.8	Schéma zapojení měření reakce senzoru s dlouhou trasou po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C.	73
9.9	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 48 °C a měření trvajícím 15 minut.	74
9.10	Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 48 °C a měření trvajícím 15 minut.	75
9.11	Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 48 °C a měření trvajícím 15 minut.	75
9.12	Schéma zapojení měření reakce senzoru s dlouhou trasou po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C.	76

9.13	Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 0 °C a měření trvajícím 15 minut.	77
9.14	Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 0 °C a měření trvajícím 15 minut.	78

Úvod

Optická vlákna jsou základem dnešních telekomunikačních přenosů. Jejich využití ale je možné i v senzorických systémech, které se rychle vyvíjejí. Základní využití optického vlákna jako senzorický systém může být například při zabezpečení nebo kontrole určitého místa (například místo nebezpečí výbuchu, kde mohou být pouze dielektrická zařízení). Na vlákno působí vnější vlivy (například teplota), které jsou zpracovány a vyhodnoceny. Podle toho senzor určí, zda v daném místě je potřeba vyvolat poplach nebo popřípadě kontaktovat obsluhu. Problém těchto senzorů nastává v jejich napájení. Vysílací část senzoru nemusí být vždy blízko kontrolované místnosti. Proto, když je vysílací část umístěna daleko od kontrolovaného místa (klidně i více kilometrů), je potřeba zaručit kvalitu přenosu k senzoru, aby nedošlo ke zkreslení vysílacího signálu a případně k falešnému poplachu. Toho lze docílit tím, že se může použít jako přenosové médium vlákno zachovávající polarizaci, které tuto kvalitu přenosu zaručí. Problém je v tom, že tato speciální vlákna jsou velice drahá a pro případného investora tohoto senzorického systému cenově nevýhodná.

Diplomová práce se zabývá vlivem dlouhých optovláknových tras na polarizační stav světla a jejich využitím pro napájení polarizačních senzorů. Cílem diplomové práce je analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsoby zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli a je potřeba navrhnout uspořádání optovláknových komponent tak, aby polarizační vlastnosti světla na konci trasy byly dále použitelné pro senzorické účely. Výzkumy ve společnosti se spíše zabývají pouze částí, kde je připojeno jen senzorické optické vlákno (popřípadě s krátkou trasou). Ale přenosové části (dlouhé trasy) nebyla věnována ve společnosti pozornost, a proto je velký motivační prvek zkoumat něco nového a zjistit, zda dlouhé trasy (jednovidová vlákna) se mohou použít jako přenosové trasy k senzorickému optickému vlákně, čímž se ušetří peníze. Hlavním faktorem také je, že je potřeba vytvořit vlastní soubor měření a zanalyzovat je.

Teoretická část diplomové práce se zabývá důkladnějším popisem vláken zachovávajících polarizaci a optických senzorických systémů. Také je popsána teorie polarizovaného světla, kde je dán důraz na matematický popis Jonesových a Stokesových vektorů a zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli.

V praktické části jsou navrženy a zpracovány vlastní soubory měření, u kterých figurovaly dlouhé trasy jednovidových vláken v laboratorním uspořádání (trasy dlouhé 10,125 km a 40 km). U všech měření je analyzována změna polarizace a stupeň polarizace na optickém jednovidovém vlákně.

Dále je změřena polarizace stávajících nainstalovaných tras v Brně, kde jednovidové optické vlákno bylo uloženo pokládkou v zemi nebo bylo zavěšeno na střeších budov. Záměrem tohoto měření bylo zjištění, zda lze napájet senzor pomocí pokládky v zemi, popřípadě zavěšeným kabelem na budovách.

Po aplikování měření na stávajících trasách se další měření zabývá reakcí senzoru (bez trasy, senzor je připojen přímo ke zdroji světla), na který působí vnější vlivy (kádinka s vodou 0 °C a 48 °C). U všech měření je analyzována změna polarizace a stupeň polarizace na optickém jednovidovém vlákne, případně pouze u vlákna zachovávajícího polarizaci (na senzoru).

Poslední praktická část je tvořena převážně poznatky z předešlých kapitol, kdy senzor je napájen pomocí dlouhé trasy (10 km). Do dlouhé trasy je multiplexováno více vlnových délek (více zdrojů) a jedním výstupem z demultiplexeru je napájen senzor. Myšlenkou této poslední části je zjistit, zda lze napájet senzor pomocí stávajících dlouhých tras, tím pádem by nebylo potřeba vybudovat novou trasu pro napájení senzoru.

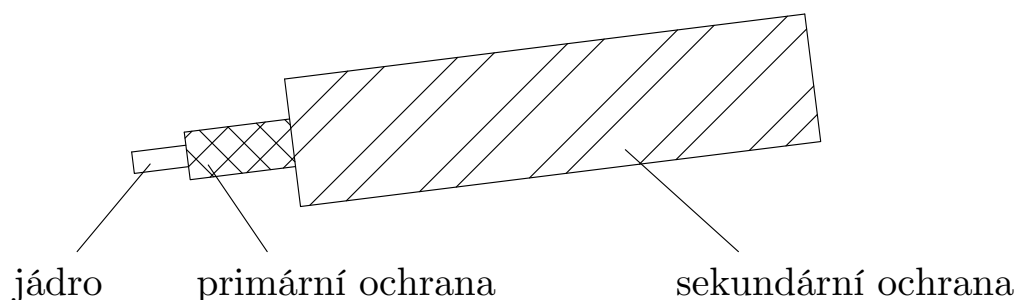
Na konci této diplomové práce je otevřena diskuze, ve které jsou rozebrány a porovnávány jednotlivé výsledky měření. Je zde popsána i hypotéza, která má vysvětlit chování polarizace ve vlákne při působení vnějších vlivů na vlákno.

1 Optická vlákna

V dnešní době se optická vlákna [1, 2, 3, 4] začínají používat více než metalické kabely (hlavně v přístupových sítích). Zaručují oproti metalickým kabelům mnoho výhod (například vyšší přenosové rychlosti, složitější způsob na odposlech, přenos po optickém kabelu není rušen elektromagnetickými vlnami, nízký útlum). Pro přenos informace v optickém vlákně se používá optické záření s vlnovou délkou světla, která je umístěna v oblasti 130 nm až 1600 nm (nejmenší ztráty, minimální hodnoty absorpčních ztrát a materiálová disperze je také minimální). Zdrojem záření může být laserová dioda nebo luminiscenční dioda. Pro komunikaci je zapotřebí vysílač a přijímač. Optický kabel se skládá z vláken. Vlákna jsou tvořená z jádra a z primární a sekundární ochrany (1.1). Vlákně a ochrana jsou tvořeny z křemičitého skla, ale mohou být i případy, kdy je vytvořeno z plastu (POF vlákna). Konstrukce vlákna určuje, jakou přenosovou vlastnost optické vlákno má. Optická vlákna se dělí na čtyři typy:

- jednojádřová vlákna,
- mnohójádřová vlákna se skokovým indexem lomu,
- mnohójádřová vlákna s gradientním indexem lomu,
- speciální vlákna (vlákna zachovávající polarizaci).

Jednotlivé typy optických vláken se liší například počtem jádřů, vlnovou délkou optického záření a také například konstrukcí vlákna. Pro účely praktické části diplomové práce bude rozebrán v další části pouze typ vláken zachovávajících polarizaci.



Obr. 1.1: Struktura optického vlákna.

1.1 Vlákna zachovávající polarizaci

Vlákna zachovávající polarizaci [5] patří pod typ speciálních optických vláken. Jsou ale tvořena obdobně jako jednovidová optická vlákna. Vlákno zachovávající polarizaci udrží stav polarizace po celou dobu přenosu. Dvě ortogonální osy ve vláknech zachovávající polarizaci se nazývají rychlá a pomalá osa. Paprsek vedený v ose s vyšším indexem lomu (pomalá osa) bude mít nižší rychlost než paprsek v rychlé ose. Ve zvláštním případě světla vyzařovaného s jeho elektrickým polem vyrovnaným s hlavní osou materiálu je světlo nerušeně vedeno se svým polarizačním stavem. Dvojlom v těchto vláknech je definován jako délka vlákna L_b (záznějová délka). Ta určuje, po jaké délce je rozdíl fázového posunu mezi ortogonálními osami 2π . K požadovaným vlastnostem vlákna zachovávajícího polarizaci je potřeba buď mít nekruhové jádro nebo mít ve vláknech obvodové napětí. Tím pádem se dva ortogonální módy šíří různou fázovou rychlostí. Dvojlom ve vláknech lze poté spočítat dle vzorečku

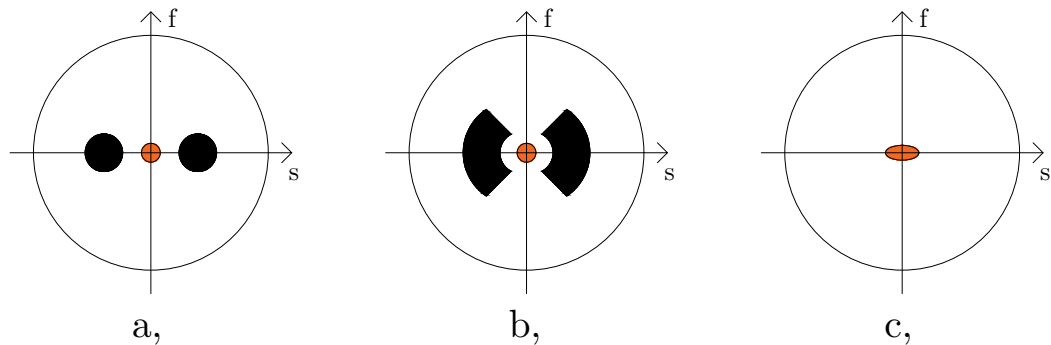
$$B = n_s - n_f, \quad (1.1)$$

kde B je dvojlom ve vláknech, n_s je index lomu v pomalém módu a n_f je index lomu v rychlém módu (písmena v indexech jsou převzatá z anglických názvů slow a fast).

Pokud je vlákno vystaveno velké mechanické poruše [6], která je srovnatelná s délkou L_b , tak může dojít k silné energetické vazbě mezi dvěma ortogonálními osami. Proto se doporučuje, aby hodnota L_b byla menší. V důsledku toho bude dosaženo zachování polarizace u vláken s kratšími záznějovými délkami, mnohem kratšími než 10 cm. Pro zavedení dvojlomů v optických vláknech, existují dvě hlavní metody. První z nich je změna geometrie ve vláknech v oblasti jádra tak, že se ztratí kruhová symetrie a vytvoří se dvě osy s různými indexy lomu. Tato geometrická dvojlomná vlákna jsou známá pod pojmem eliptická vlákna. Mají záznějovou délku řádově několik milimetrů. Takový efekt lze způsobit už při výrobě vlákna nebo při instalaci vlákna.

Druhou metodou lze do vlákna zavést lineární dvojlom, který na jádro působí asymetrickým napětím (stresovými prvky), tím pádem mění index lomu jádra. Toho je dosaženo tak, že se zavedou vysoce dotované prvky kolem jádra. Tyto typy vláken mají také záznějovou délku řádově několik milimetrů. Příklad vláken zachovávající polarizaci lze vidět na obrázku (1.2) (PANDA, eliptické jádro, bow-tie). V PANDA vláknech [7, 8] (které je použito v diplomové práci) jsou ve vláknech vyvrtnané dvě velikostně stejné díry vedle jádra. Do těchto děr jsou vloženy skleněné tyče dotované borem a oxidem křemičitým, které vybuzují napětí (čím větší napětí, tím je větší rozdíl mezi rychlostmi světla mezi dvěma osami, a tím i vyšší dvojlom). PANDA vlákno

bylo vynalezeno japonskou firmou Nippon Telegraph and Telephone. V praxi se nejvíce používá pomalá osa, protože je méně citlivá ke ztrátám zapříčiněnými ohyby.



Obr. 1.2: Vlákna zachovávající polarizaci (a, PANDA b, bow-tie c, eliptické jádro). [6]

Zpoždění mezi dvěma režimy [5] se nazývá polarizační disperze a může ovlivnit výkonnost komunikačních spojů. Vlákna mají vysoký útlum kvůli zvýšeným hladinám dopantu v jádru.

Parametr h charakterizuje vlákno zachovávající polarizaci. Popisuje, jaká je křížová vazba výkonu v horizontálním módu do vertikálního módu. Čím více se zvětšuje délka vlákna, tím více se zvětšuje křížová vazba. Pro kvalitní vlákno zachovávající polarizaci by měl parametr h být od $5 \cdot 10^6/\text{m}$ do $2 \cdot 10^5/\text{m}$. Citlivost vlákna se dá zlepšit s vysokým dvojlomem, krátkou záznějovou délkou a malou h hodnotou. Vlákno s vysokým dvojlomem může mít stavební poruchy, které mohou zvýšit jak křížovou vazbu, tak parametr h .

Vlákna s nízkým dvojlomem jsou náchylnější na vnější rušení (například ohyby). V praxi jsou ale tato vlákna používána méně. Oproti tomu vlákna s vysokým dvojlomem jsou v praxi více využívána. Vykazují oproti vláknům s nízkým dvojlomem vyšší ztráty kvůli velkému rozdílu indexu lomu mezi jádrem a pláštěm.

2 Polarizované světlo

Světlo lze považovat za příčnou elektromagnetickou vlnu [9, 10], která se skládá z elektrického a magnetického pole. Tato pole kmitají v příčném směru ke směru šíření světla. Elektrická intenzita je kolmá ke směru šíření a magnetická intenzita je kolmá ke směru šíření i k elektrické intenzitě. Nepolarizované světlo má náhodnou velikost a náhodný směrem elektrické intenzity. Pokud se omezí elektrická intenzita, aby měla stálou velikost i směr, tak se bavíme o polarizovaném světlu. Polarizace popisuje, jestli je světlo polarizované nebo nepolarizované a jakou orientaci má daná polarizace světla. Ve vakuu se rychlost světla šíří nejrychleji. Monochromatické světlo má stálou frekvenci, vlnovou délku a kosinusové elektrické pole. Světlo z laserů je skoro monochromatické. Monochromatické světlo může být lineárně polarizované, kruhově polarizované nebo elipticky polarizované.

Maxwellovy elektromagnetické rovnice [11] dokáží popsat optické pole. Těmito rovnicemi lze popsat jak magnetické pole, tak i elektrické pole. Elektrické pole je pro optiku důležitější než magnetické pole, proto se bere v úvahu pouze elektrické pole. Optické pole má ortogonální příčné složky. Propagace se zde vybírá podle z-směru, tím pádem se vytvoří rovnice, které popisují chování polarizovaného světla v optickém vlákně

$$E_x(z, t) = E_{0x} \sin(\omega t - kz + \delta_x), \quad (2.1)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \sin(\omega t - kz + \delta_y), \quad (2.2)$$

kde E_{0x} a E_{0y} jsou amplitudy pro jednotlivé příčné složky, δ_x a δ_y jsou fáze složek, $\omega t - kz$ je koeficient šíření vlny ve směru osy z . Pomocí poměru amplitudy elektrických intenzit a jejich fáze se určují druhy polarizací. Popis jednotlivých polarizací vychází z obecné rovnice elipsy (řešením je poté lineární polarizace nebo kruhová).

2.1 Záznějová délka

Dvojlom a záznějová délka [11] jsou velmi důležité vlastnosti optického vlákna. Popisují rozdíl indexů lomů ve směru x-ové a y-ové osy. Rychlost šíření pro jednotlivé osy je

$$v_x = \frac{c}{n_x}, \quad (2.3)$$

$$v_y = \frac{c}{n_y}. \quad (2.4)$$

V konečné fázi se naleznou propagační konstanty β_f a β_s , které určují fázovou rychlost v x-ové a y-ové složce pro optické pole

$$\beta_f = \frac{n_x \omega}{c}, \quad (2.5)$$

$$\beta_s = \frac{n_z \omega}{c}. \quad (2.6)$$

Zkratka f a s se přiřazuje rychlé nebo pomalé ose (f jako fast, s jako slow). Vlna v rychlé ose osciluje rychleji než v pomalé. Ale po nějakém úseku se obě vlny ve stejném čase potkají se stejnou oscilací. Dvojlom ve vlákně je poté definovaný jako

$$B = \frac{\beta_f - \beta_s}{k}. \quad (2.7)$$

V bodech, kde se zobrazí maximální intenzita vlny, se nazývá zázněj a rozdíl mezi nimi je záznějová délka. Rovnice pro záznějovou délku je

$$L_B = \frac{2\pi}{\beta_f - \beta_s}. \quad (2.8)$$

Tato rovnice ale charakterizuje záznějovou délku pro vlny ve stejné fázi. Pro optické vlákno je lepší záznějovou délku definovat pro rozdílnou rychlost šíření (odlišné indexy lomu)

$$\beta_f - \beta_s = \frac{\omega \Delta n_f}{c} - \frac{\omega \Delta n_s}{c} = \frac{\omega \Delta n_{eff}}{c}, \quad (2.9)$$

kde n_{eff} je rozdíl indexu lomů. V telekomunikacích je tento index o mnoho menší než index mezi jádrem a pláštěm. Záznějová délka je teď definována pomocí rozdílů indexu lomů

$$L_B = \frac{\lambda}{n_{eff}}. \quad (2.10)$$

2.2 Lineárně polarizované světlo

Jak bylo řečeno, lineární polarizované [9, 11] světlo je definováno z obecné rovnice elipsy. Proto lineárně polarizované světlo je jedním ze zdeformovaných stavů polarizační elipsy. Lineárně polarizované světlo má rozdílné amplitudy, ale stejnou fázi. Základem lineárně polarizovaného světla jsou rovnice

$$E_x(z, t) = E_{0x} \sin(\omega t - kz + \delta_x), \quad (2.11)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \sin(\omega t - kz + \delta_y). \quad (2.12)$$

Pokud E_{0y} se rovná 0, tak $E_y(z, t)$ se také rovná 0 a zbyde pouze rovnice

$$E_x(z, t) = E_{0x} \sin(\omega t - kz + \delta_x), \quad (2.13)$$

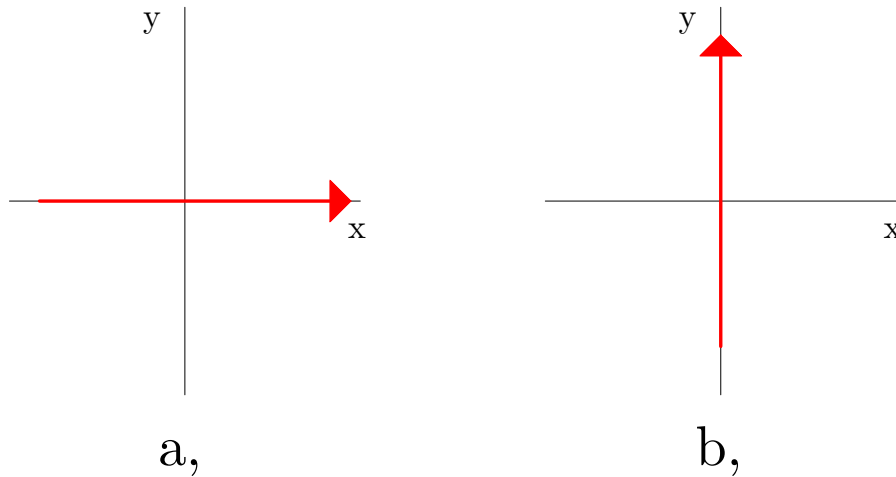
$$E_y(z, t) = 0. \quad (2.14)$$

Tím pádem optické pole kmitá pouze ve směru x-ové osy a tento jev se nazývá lineární polarizace ve směru x (lineárně horizontální polarizované světlo (2.1)). Pokud ale nastane, že E_{0x} se rovná 0, tak $E_x(z, t)$ je také rovno 0 a rovnice se pozmění na

$$E_x(z, t) = 0, \quad (2.15)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \sin(\omega t - kz + \delta_y). \quad (2.16)$$

Zde optické pole kmitá pouze ve směru y-ové ose a lze říci, že světlo je lineárně polarizované ve směru y (lineárně vertikálně polarizované světlo (2.1)).



Obr. 2.1: Polarizace světla (a, lineární horizontální b, lineární vertikální). [9]

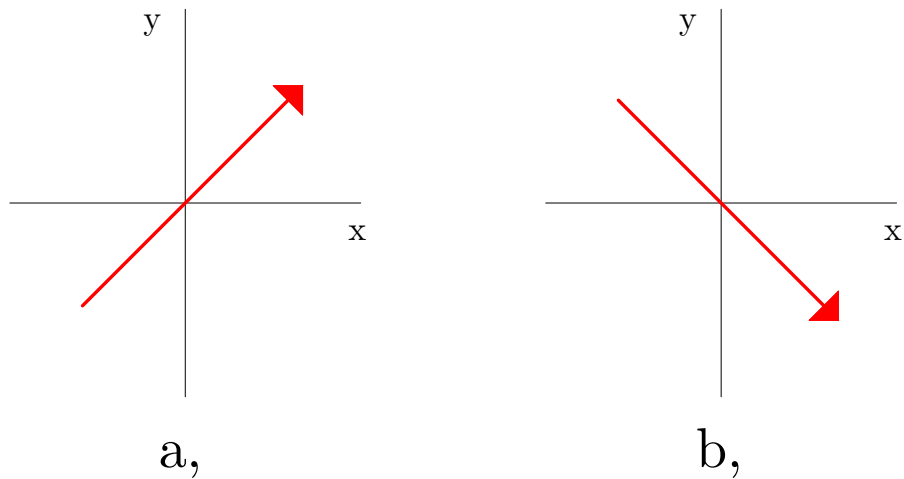
Další stav lineárního polarizovaného světla vznikne tak, pokud $\delta = 0$ nebo π . Rovnice polarizační elipsy se redukuje a vznikne vztah

$$E_y(z, t) = \pm \left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}} \right) E_x(z, t). \quad (2.17)$$

Této polarizaci se říká lineární polarizace se sklonem $\pm \left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}} \right)$. Pokud $\delta = 0$, tak je sklon záporný a pokud $\delta = \pi$, tak je sklon kladný. Ještě může nastat, že $E_{0x} = E_{0y}$ a vznikne vztah

$$E_y(z, t) = \pm E_x(z, t). \quad (2.18)$$

Takováto polarizace je nazývaná lineární polarizace se sklonem $\pm 45^\circ$ (2.2).



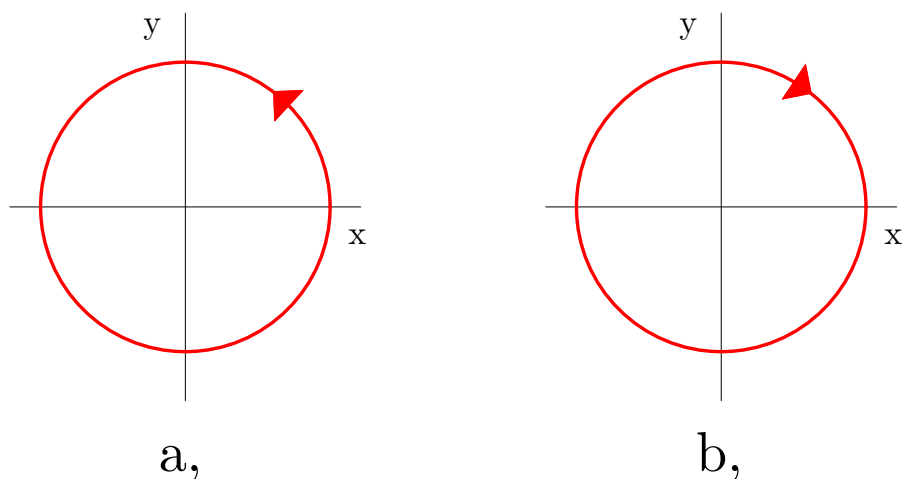
Obr. 2.2: Polarizace světla (a, lineární ve směru $+45^\circ$ b, lineární ve směru -45°). [9]

2.3 Kruhově polarizované světlo

Je to další druh polarizace [9, 11], který vzniká jako deformovaný stav polarizační elipsy. Také je definován z obecné rovnice elipsy. Jednotlivé složky mají stejnou amplitudu, ale rozdílnou fázi (o $\frac{\pi}{2}$ nebo $\frac{3\pi}{2}$). Kruhově polarizované světlo může být pravotočivé nebo levotočivé (podle kladné či záporné fáze) (2.3). Definice je

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \pm E_{0y} \sin(\omega t - kz + \delta_y), \quad (2.19)$$

kde podle kladného nebo záporného znaménka se určí její směr. Pokud je znaménko záporné, tak je to pravotočivě kruhově polarizované světlo. Pokud je kladné, tak je to levotočivě kruhově polarizované světlo. Točení u kruhově polarizovaného světla postupuje ve směru šíření.

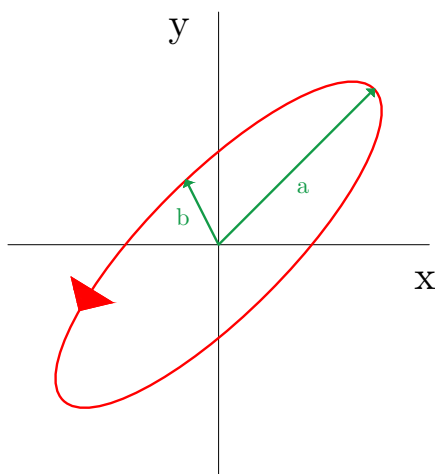


Obr. 2.3: Polarizace světla (a, kruhová levotočivá b, kruhová pravotočivá). [9]

2.4 Elipticky polarizované světlo

Všechny stavy polarizací [11] jsou popsány a vycházejí z elipticky polarizovaného světla. Elipticky polarizované světlo má tvar elipsy a jeho průměr kruhu je menší než kruhově polarizované světlo. Hlavním parametrem je zde elipticita, která určuje, jaký tvar bude mít elipsa. Čím menší je elipticita, tím je menší průměr (když je elipticita rovná 0, tak je světlo lineárně polarizované, ale pokud elipticita je rovná 1, tak je zase světlo kruhově polarizované. Pokud je elipticita v rozmezí 0 až 1, tak je světlo elipticky polarizované). Elipticita je formulována pomocí hlavní osy (a) a vedlejší osy (b)

$$\varepsilon = \frac{b}{a}. \quad (2.20)$$



Obr. 2.4: Elipticky polarizované světlo. [9]

Z rovnic, které popisují chování polarizovaného světla v optickém vlákne vzejde po jejich derivování a jejich sečtením rovnice pro polarizovanou elipsu

$$\frac{E_x^2(z, t)}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2(z, t)}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos(\varphi) = \sin^2(\varphi). \quad (2.21)$$

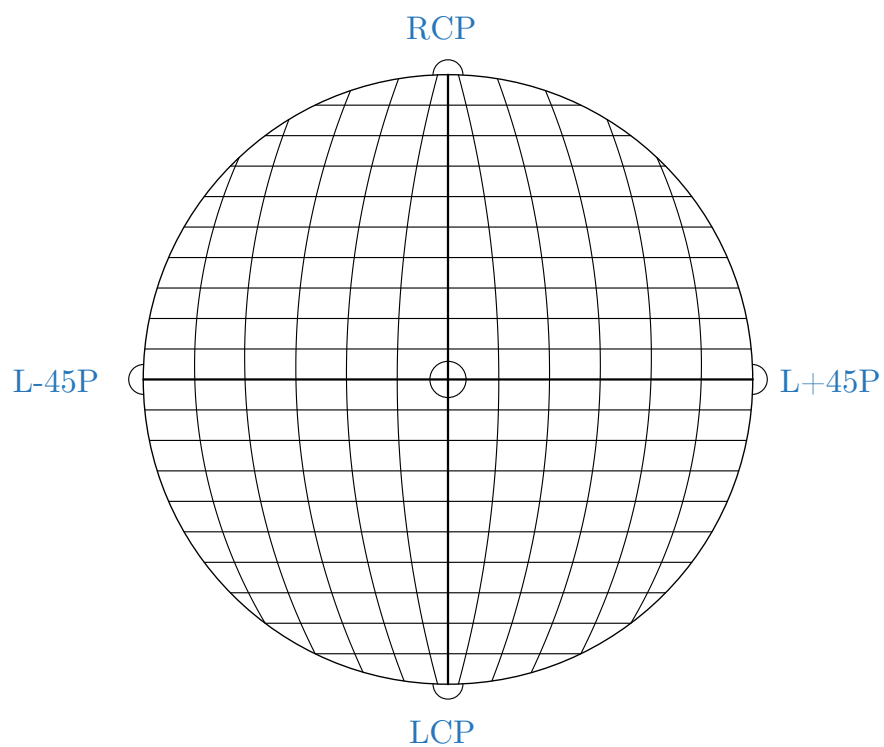
2.5 Poincarého koule

Polarizační elipsou [11, 12] lze zobrazit šíření a chování polarizace optického paprsku. Eliptická polarizace není při šíření pořád stejná a mění se její úhly a směr. Tyto nové úhly a orientaci lze spočítat, ale zabralo by to mnoho času. Proto se místo výpočtů používá Poincarého koule, která zobrazuje stav polarizační elipsy na kouli, a tím pádem lze určit její směr a úhly. Poincarého koule je tří dimenzionální reprezentace polarizačních stavů. Poincarého koule je reprezentovaná pomocí Kartézských souřadnic a , b , c . Jakýkoli bod na kouli může být reprezentován úhlem orientace Ψ (zeměpisná šířka) a úhlem elipticity χ (zeměpisná délka).

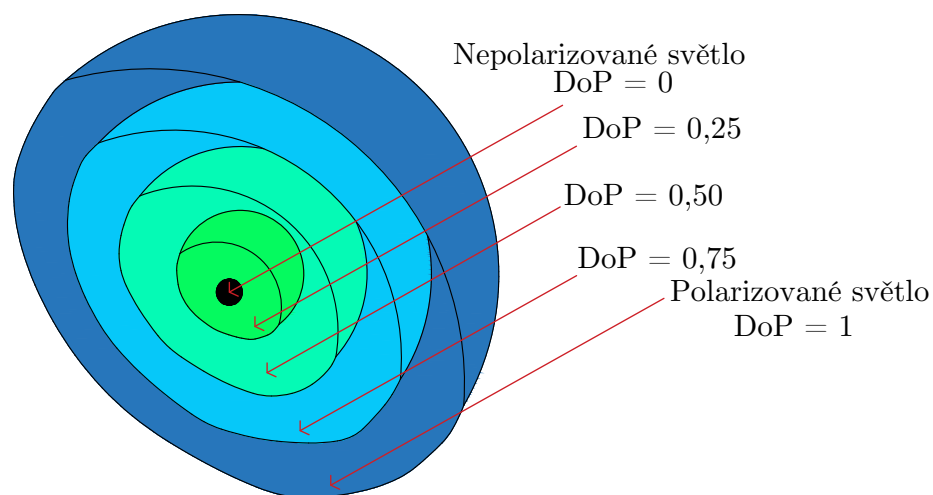
Zdeformované stavy jsou popsány pomocí úhlu orientace a úhlem elipticity (trojice bodů vznikne):

1. LHP: $\chi = 0, \Psi = 0, (1, 0, 0)$,
2. L+45P: $\chi = 0, \Psi = \frac{\pi}{4}, (0, 1, 0)$,
3. LVP: $\chi = 0, \Psi = \frac{\pi}{2}, (-1, 0, 0)$,
4. L-45P: $\chi = 0, \Psi = \frac{3\pi}{4}, (0, -1, 0)$,
5. RCP: $\chi = \frac{\pi}{4}, \Psi = 0, (0, 0, 1)$,
6. LCP: $\chi = \frac{-\pi}{4}, \Psi = 0, (0, 0, -1)$.

Na přesně definovaných místech (2.5) se nacházejí deformované polarizační stavy. Pokud koule se bere jako zeměkoule, tak na rovníku jsou všechny stavy lineárně polarizovaného světla. Na severním a jižním pólu jsou stavy pro kruhově polarizované světlo (na severním pólu pravotočivě kruhově polarizované světlo, na jižním pólu levotočivě kruhově polarizované světlo). Povrchy na kouli reprezentují stavy elipticky polarizovaného světla. Na obrázku (2.5) není vidět lineárně vertikálně polarizované světlo, neboť se nachází na druhé straně koule (naproti LHP). Osy na Poincarého koule jsou základní stavy Stokesových parametrů $\pm S_1$, $\pm S_2$ a $\pm S_3$. Na povrchu koule leží totálně polarizované stavy (stupeň polarizace se rovná 1). Oproti tomu uprostřed koule (0,0,0) je nepolarizované světlo. Vně Poincarého koule se nachází místa, kde světlo je částečně polarizované (2.6).



Obr. 2.5: Stavy polarizovaného světla na Poincarého kouli. [11]



Obr. 2.6: Stupeň polarizace v jednotlivých částech Poincarého koule. [9]

2.6 Stokesovy vektory

Polarizační elipsa [11, 12] pomáhá k popsání jakéhokoliv polarizačního stavu, pokud je možné použít vzoreček pro elipticky polarizované světlo. Bohužel tento vzoreček není ideální k popsání jakéhokoliv polarizačního stavu. První důvod je ten, že světlo šířící se ve volném prostoru, tak jeho elektrický vektor sleduje tvar elipsy (popřípadě rovné čáry či kruhu). Cyklus sledování je tak rychlý (zhruba 10^{-15}), že není možné sledovat polarizační elipsu v oblasti opticko časové. Druhý důvod je ten, že polarizační elipsu lze použít pouze pro totálně polarizované světlo (stupeň polarizace je rovné 1). Také je důležité zmínit, že nemůžeme změřit její amplitudu, ale pouze intenzitu. Proto je potřeba polarizační elipsu přeměnit, aby byla k dispozici pouze intenzita. Po přeměně polarizované elipsy na intezitu vzniknou čtyři parametry nazývané Stokesovy polarizační parametry

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \quad (2.22)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2, \quad (2.23)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \varphi, \quad (2.24)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \varphi, \quad (2.25)$$

kde z těchto čtyř rovnic vznikne Stokesův vztah

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2. \quad (2.26)$$

S_0 je totální intenzita optického pole, S_1 je intenzita lineárně horizontálního a vertikálního polarizovaného světla, S_2 vyjadřuje intenzitu lineárně $\pm 45^\circ$ polarizovaného světla a poslední parametr S_3 vyjadřuje intenzitu pravotočivě či levotočivě kruhově polarizovaného světla.

Ze čtyř Stokesových parametrů vycházejí Stokesovy vektory, které jsou uspořádány v matici 4×1 . Je potřeba zmínit, že i když to matematicky není vektor, tak ve společnosti se takto nazývá.

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}. \quad (2.27)$$

Deformované stavy Stokesových vektorů jsou následující.

1. **Lineárně horizontálně polarizované světlo**

Podmínkou pro lineárně horizontálně polarizované světlo je $E_{0y} = 0$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.28)$$

kde $I_0 = E_{0x}^2$ je totální intenzita.

2. **Lineárně vertikálně polarizované světlo**

Podmínkou pro lineárně vertikálně polarizované světlo je $E_{0x} = 0$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.29)$$

kde $I_0 = E_{0y}^2$ je totální intenzita.

3. **Lineárně $+45^\circ$ polarizované světlo**

Podmínkou pro lineárně $+45^\circ$ polarizované světlo je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = 0$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.30)$$

kde $I_0 = 2E_0^2$ je totální intenzita.

4. **Lineárně -45° polarizované světlo**

Podmínkou pro lineárně -45° polarizované světlo je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = \pi$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.31)$$

kde $I_0 = 2E_0^2$ je totální intenzita.

5. **Kruhově levotočivé polarizované světlo**

Podmínkou pro kruhově levotočivé polarizované světlo je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = \frac{3\pi}{2}$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad (2.32)$$

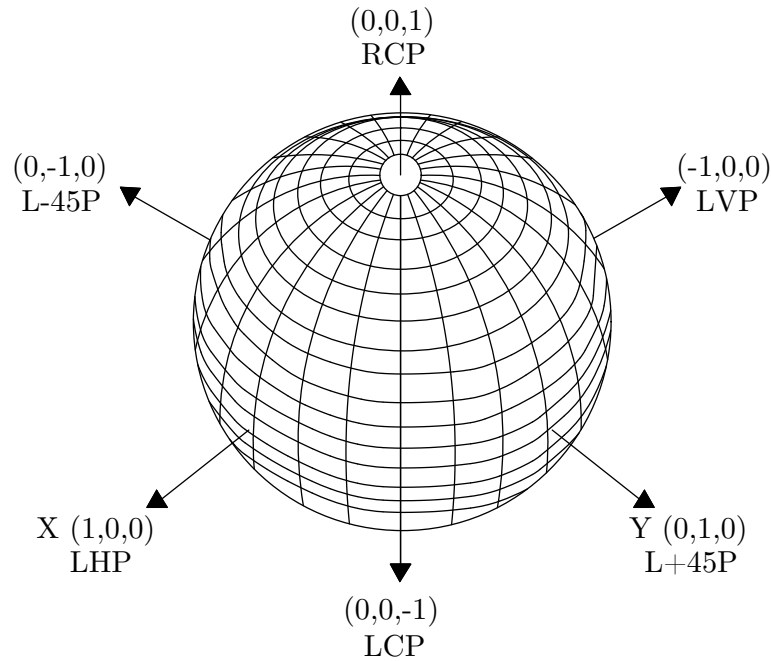
kde $I_0 = 2E_0^2$ je totální intenzita.

6. Kruhově pravotočivé polarizované světlo

Podmínkou pro kruhově pravotočivé polarizované světlo je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2.33)$$

kde $I_0 = 2E_0^2$ je totální intenzita.



Obr. 2.7: Stokesovy vektory v jednotlivých částech Poincarého koule. [11]

2.7 Jonesovy vektory

Jonesovy vektory [11] popisují vlastnosti polarizovaného světla. Oproti Stokesovým vektorům popisují amplitudu a fázi elektrického pole. Vektory v této problematice se rozumí jako matice. Tímto způsobem lze vyřešit souhrnné problémy polarizovaného světla. Nevýhoda Jonesových vektorů je ta, že se používá pouze pro plně polarizované světlo, proto je tento typ velice omezující.

Jonesův vektor se zapisuje jako 2×1 matice

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{j\varphi_x} \\ E_{0y} e^{j\varphi_y} \end{pmatrix}, \quad (2.34)$$

u které E_{0x} a E_{0y} symbolizují amplitudy jednotlivých složek, φ_x a φ_y zase jejich fázi.

Deformované stavy pro polarizované světlo u Jonesových vektorů jsou

1. **Lineárně horizontálně polarizované světlo**

Podmínka je $E_y = 0$,

$$\mathbf{E}_{\text{LHP}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.35)$$

2. **Lineárně vertikálně polarizované světlo**

Podmínka je $E_x = 0$,

$$\mathbf{E}_{\text{LVP}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.36)$$

3. **Lineárně $+45^\circ$ polarizované světlo**

Podmínka je $E_x = E_y$,

$$\mathbf{E}_{\text{L}+45\text{P}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.37)$$

4. **Lineárně -45° polarizované světlo**

Podmínka je $E_x = -E_y$,

$$\mathbf{E}_{\text{L}-45\text{P}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (2.38)$$

5. **Levotočivě kruhově polarizované světlo**

Podmínka je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = \frac{-\pi}{2}$,

$$\mathbf{E}_{\text{LCP}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix}. \quad (2.39)$$

6. **Pravotočivě kruhově polarizované světlo**

Podmínka je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = \frac{\pi}{2}$,

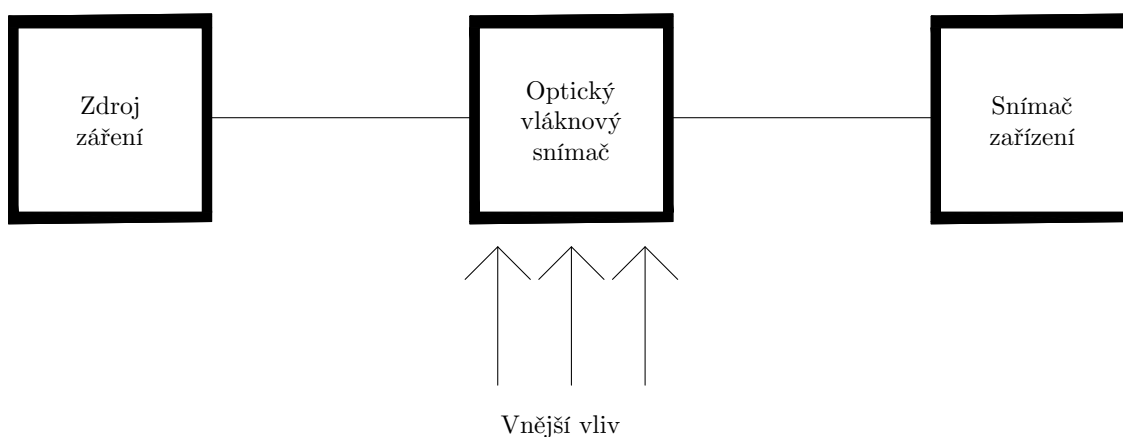
$$\mathbf{E}_{\text{RCP}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}. \quad (2.40)$$

Sečtením lineárně horizontálního a vertikálního polarizovaného světla vzejde elipticky polarizované světlo v Jonesově matici

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{LHP}} + \mathbf{E}_{\text{LVP}} = \begin{pmatrix} E_{0x}e^{j\varphi_x} \\ E_{0y}e^{j\varphi_y} \end{pmatrix} = \mathbf{E}_{\text{ELP}}.$$

3 Optické sensorické systémy

Senzory se v dnešní době [13] používají v mnoha odvětvích (např. zdravotnictví, doprava nebo ochrana). Sensorická optická vlákna mohou poskytnout více příležitostí na použití, kde jiné senzory nejde použít. Je to bohatá a výkonná technologie. Používají se například k monitorování v ropných vrtech nebo v křídlech letadel. Náklady na tento typ senzorů se oproti minulosti snížil, a proto jsou hojně využívány. Je třeba podotknout, že senzory na bázi optických vláken se pořád vyvíjejí a zlepšují. Protože ceny komponentů [6] klesaly v čase a technologie optických komponent se zlepšovala, tak bylo možné vyvíjet optické senzory ve větší míře. Výhodou optických senzorů je jejich lehkost, jsou citlivé, velice malé, nejsou rušeny elektromagnetickým rušením a dají se multiplexovat.



Obr. 3.1: Základní blokové schéma senzoru. [4]

Je potřeba kvalifikovat [13] a třídit jeden nebo více parametrů. Parametry se musí zpracovávat a změřit, aby systém mohl vykonávat svoji funkci. Senzor dodává požadované fyzikální, chemické či biologické měřené veličiny (teplota, tlak) a přemění je do požadované energie (elektrického nebo optického signálu), kterou lze následně zpracovat a přenášet se sledovanou měřenou veličinou.

Práce optického senzoru [4] je převod signálu na elektrický signál, který ostatní elektrické obvody mohou zpracovat. Největší využití optických senzorů je pro měření mechanického namáhání a teploty.

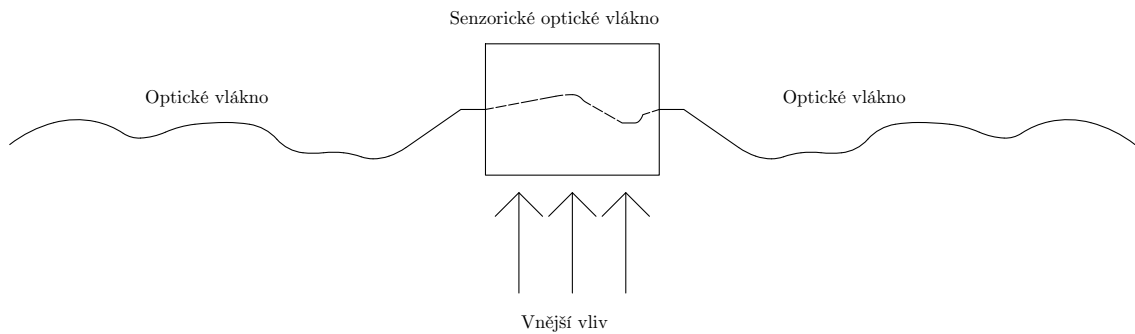
Velkou výhodou optického senzoru [13] je to, že dokáže měřit mnoho veličin na základě požadavku uživatele (tlak, elektrické a magnetické pole, teplota, vibrace).

Senzory [4] lze umístit v místech s výbušným prostředím (jsou dielektrické). Optické senzory dokáží snímat teplotu od mínus desítek stupňů Celsia až po stovky stupňů Celsia.

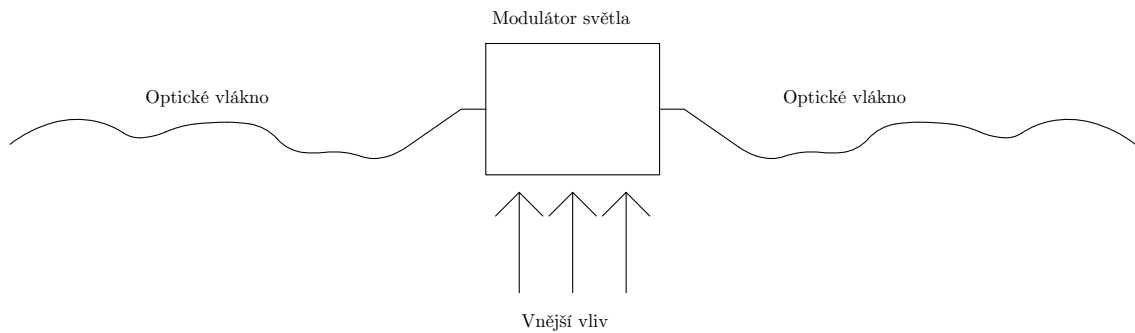
Optické sensorické systémy [14, 15] se řadí do několika základních kategorií podle jejich využití.

Dle funkce [4, 13, 15] se sensorická optická vlákna dělí na:

- vlastní – optické vlákno je použito jako sensorický prvek (pro měření dané veličiny), vnější vliv působí rovnou na vlákno (3.2),
- nevlastní – optické vlákno slouží pro přenos sledovaného optického signálu k prvku, který slouží jako senzor (3.3).



Obr. 3.2: Optický sensorický systém vlastní. [4]



Obr. 3.3: Optický sensorický systém nevlastní. [4]

Dále se dělí [15] podle použití optických vláken:

- jednořivá vlákna,
- mnohořivá vlákna,
- speciální vlákna (vlákna zachovávající polarizaci).

Poté lze rozdělit [13, 14, 15] senzory dle jejich modulace:

- fázově modulovaný senzor,
- polarizačně modulovaný senzor,
- amplitudově modulovaný senzor,
- senzor modulovaný vlnovou délkou,

- senzor modulovaný intenzitou.

Poslední dělení [14] senzorických optických systémů je dle měřené veličiny:

- mechanické senzory (vibrace),
- teplotní senzory,
- elektromagnetické,
- radiační.

Z důvodu použití polarizačně modulovaného senzoru v diplomové práci bude teoreticky rozebrán pouze tento typ.

3.1 Polarizačně modulovaný senzor

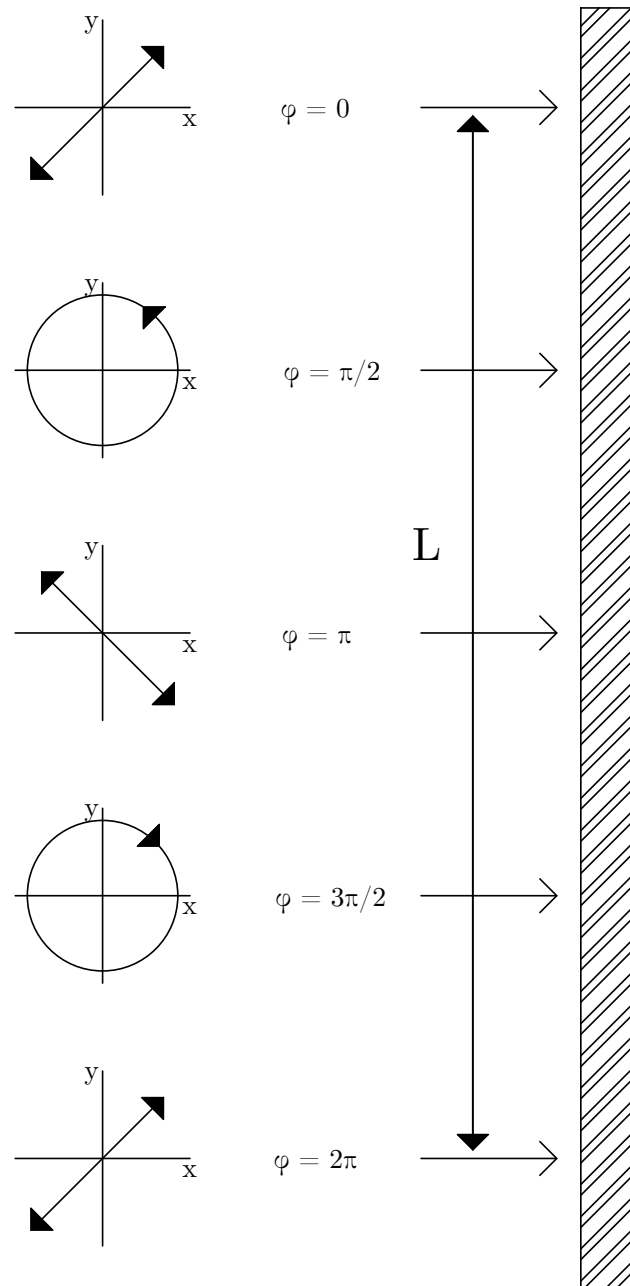
U tohoto typu senzorů [6] je hlavním prvkem vlákno zachovávající polarizaci (PANDA, bow-tie). Vlákno zachovávající polarizaci udrží stav polarizace po celou dobu přenosu. Jsou to anizotropní vlákna, která zobrazují odlišné indexy lomu v závislosti na orientaci elektrického pole světla.

Optická vlna [13] se šíří skrz optické vlákno a stav polarizace se mění z důvodu odlišné fázové rychlosti dvou ortogonálních polarizačních módů v dvojlomném vlákně. Polarizační vlastnosti jsou závislé například na teplotě, tlaku nebo ohnutí na vlákně. Tyto polarizační vlastnosti se měří a rozebírají (například pomocí polarimetru). Nesymetrie ve vlákně nebo teplota na optickém vlákně ovlivňuje konstantu B (dvojlom), která určuje rychlost šíření mezi jednotlivými polarizačními módy. Dvojlom je definován také záznejovou délkou (L_b), která definuje, jak dlouhé vlákno je potřeba, aby fázový rozdíl mezi oběma ortogonálními módy byl 2π . U tohoto typu senzoru je důležité, aby lineárně polarizované světlo bylo nasměřováno pod úhlem 45° , aby oba polarizační módy byly vybudeny.

Světlo je vyzařováno [5] do vlákna zachovávajícího polarizaci jako lineárně polarizované světlo při 45° (vybudení obou polarizačních módů). Stav polarizace se podél vlákna mění díky tomu, že přitom jak světlo postupuje, vertikální mód postupně mění fázi, až je nakonec ve fázi s horizontálním módem. Lineární polarizace se mění na eliptickou, poté na kruhovou při fázovém posunu $\frac{\pi}{2}$. Kruhově polarizované světlo se zpětně mění na eliptickou polarizaci a poté na lineární polarizaci při fázovém posunu π . Polarizační vektor je nyní o 180° mimo fázi s počátečním stavem polarizace. Vzdálenost L pro úplné otočení polarizačního stavu se nazývá záznejová délka (3.4).

Stav polarizace [6] na výstupu je převeden na intenzitu. Polarizace se poté dá měřit například pomocí polarimetru, který může zobrazovat polarizovaný stav na

Poincarého kouli. Citlivost senzoru je velice závislá na stupni polarizační rotace a na minimální rozlišitelné rotaci, kterou lze detekovat.



Obr. 3.4: Záznejová délka u optického vlákna. [6]

3.1.1 Senzory využívající změny polarizace světla

Některé výzkumy či práce se už zabývaly polarizačně modulovaným senzorem, který měřil změnu polarizace na vláknech. Budou rozebrány dva výzkumy, které se zabývaly podobnou problematikou jako v této diplomové práci.

Vliv dvojlomu na změnu polarizace a frekvence u sensorických optických vláken

V tomto výzkumu [16] byl vytvořen senzor, ve kterém na sensorické optické vlákno působila kádinka s vodou s odlišnou teplotou (0 °C, 24 °C a 48 °C). V celém senzoru bylo použito vlákno zachovávající polarizaci (PANDA vlákno). Na konci senzoru pro měření veličiny byl použit polarimetr a spektrální analyzátor. Výsledkem tohoto výzkumu bylo to, že při přiložení nebo odebrání kádinky s vodou s teplotou 0 °C nebo 48 °C se začal stav polarizace neprodleně měnit, a tím pádem zaznamenal změnu teploty. Při přiložení nebo odebrání kádinky s vodou s teplotou 24 °C (referenční teplota) senzor nezaznamenal žádné radikální změny stavu polarizace. Výsledky ze spektrálního analyzátoru vyšly podobně jako z polarimetru. Když na vlákno působily odlišné teploty než referenční teplota, tak se měnila intenzita světla na různých vlnových délkách. Senzor tedy reagoval na změnu teploty v okolí. Pro napájení optovláknového senzoru byla zde použita pouze trasa z vlákna zachovávající polarizaci.

Měření vlastností polarizovaného světla na výstupu optovláknového senzoru

Práce [17] se zabývala analýzou polarizovaného světla šířícím se v optickém vláknech. Oproti dřívějšímu výzkumu rozdíl v této práci je, že trasa k sensorickému optickému vláknu není pouze z vláken zachovávajících polarizaci, ale na začátku trasy je použité velice krátké jednovidové vlákno. Také místo spektrálního analyzátoru je optický měřič výkonu. Na sensorické optické vlákno působila kádinka s vodou 0 °C, 24 °C nebo 48 °C. Při použití referenční teploty (24 °C) se stav polarizace výrazně neměnil (pouze lehce po přiložení a odebrání kádinky s vodou). Po přiložení kádinky s vodou 0 °C nebo 48 °C se stav polarizace intenzivně měnil. Při odebrání kádinky s vodou se také stav polarizace intenzivně měnil. Po přiložení a odebrání kádinky s vodou 0 °C nebo 48 °C se naskytly největší výkyvy optického výkonu, které se poté začaly ustalovat po odebrání kádinky s vodou. Tím pádem lze říci, že senzor reagoval velice citlivě na změnu teploty, i když bylo použito na začátku senzoru klasické jednovidové vlákno. Pro napájení optovláknového senzoru byla použita 1 m trasa jednovidového vlákna.

4 Laserová dioda

Pro optické spoje [4] je potřeba zdroj optického záření. Není možné použít jakýkoliv zdroj optického záření, protože některé zdroje mají nevýhodnou vyzařovací charakteristiku nebo malou energii. Také například u polarizačně modulovaných senzorů je potřeba světlo s vysokým stupněm polarizace. Důležité u zdrojů je jejich teplota. Pro optické spoje se používají buď luminiscenční diody nebo laserové diody. Pro použití v diplomové práci bude rozebrána pouze laserová dioda.

U laserové diody je potřeba, aby měla vysokou spolehlivost a životnost, generovala záření při pokojové teplotě, vysokou koherenci generovaného záření a také co nejvyšší směrovou charakteristiku vystupujícího záření. Laserové diody mají vysokou vyzařovací charakteristiku, mají menší spektrální šířku nebo vysokou účinnost vazby na vlákno. Oproti tomu jejich nevýhodou je jejich cena, teplotní stabilizace a vyžadují vyšší napájení. Nejvíce se laserové diody používají pro přenosy na větší vzdálenosti a tam, kde je potřeba vyzařovat v úzkém svazku (také například ve vlnovém multiplexu).

Princip laserové diody je takový, že stimulace emise záření zesiluje světlo. Skládá se ze zesilovače vlny a zpětnovazebního rezonátoru. Pokud se naladí velice ostře zpětnovazební rezonátor, tak intenzita záření nepřísluší jedné vlnové délce, ale více vlnovým délkám (tím pádem by světlo nebylo monochromatické). Výkon laserové diody se zvětšuje se vzrůstajícím proudem. Pokud se zvětšuje zase teplota, tak se spektrální charakteristika posouvá k vyšším vlnovým délkám.



Obr. 4.1: Laserová dioda.

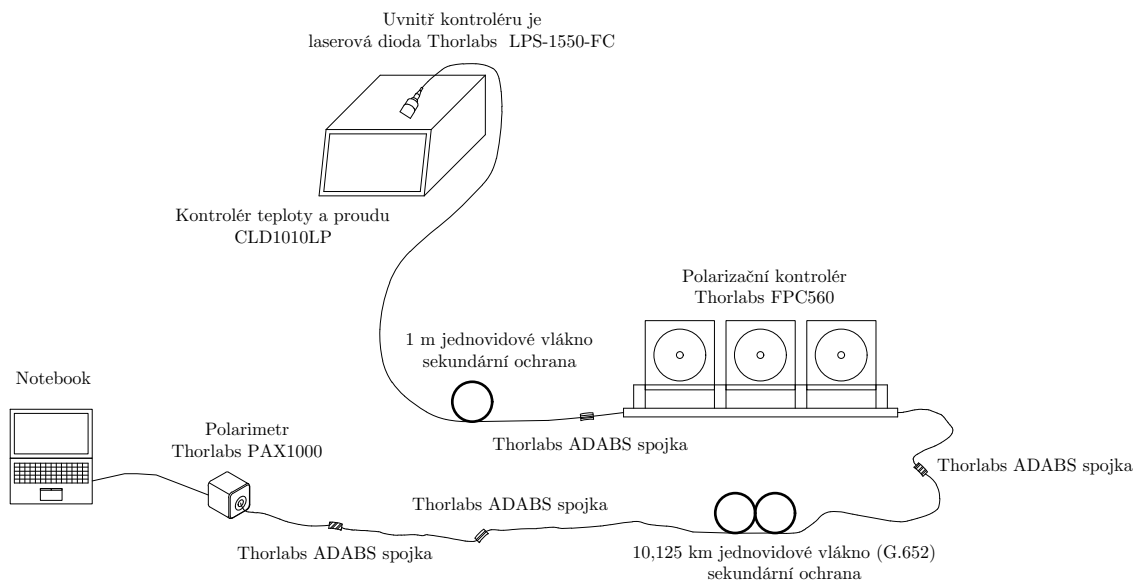
5 Měření dlouhé trasy v laboratorním uspořádání

5.1 Měření s jednovidovým vláknem 10,125 km

V této části se měřením testovala polarizace jednovidového vlákna s délkou 10,125 km. Byly provedeny dva typy měření (poprvé měření trvalo 24 hodin a podruhé 60 hodin). Měření probíhalo v laboratoři na Univerzitě obrany v Brně. Výsledky byly zaznamenány softwarem z polarimetru. Měření probíhalo na přelomu ledna a února 2020. Při rozboru výsledků byly použity informace o počasí ze stránky www.in-pocasi.cz (počasí v Brně bylo měřeno na letišti v Tuřanech).

5.1.1 Návrh zapojení pracoviště

Zapojení bylo sestaveno na externím pracovišti na Univerzitě obrany v Brně. Hlavní myšlenkou tohoto zapojení je přenos polarizovaného světla pomocí jednovidového vlákna. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku (5.1). Použité komponenty jsou převážně použity od firmy Thorlabs kvůli synchronizaci měření.



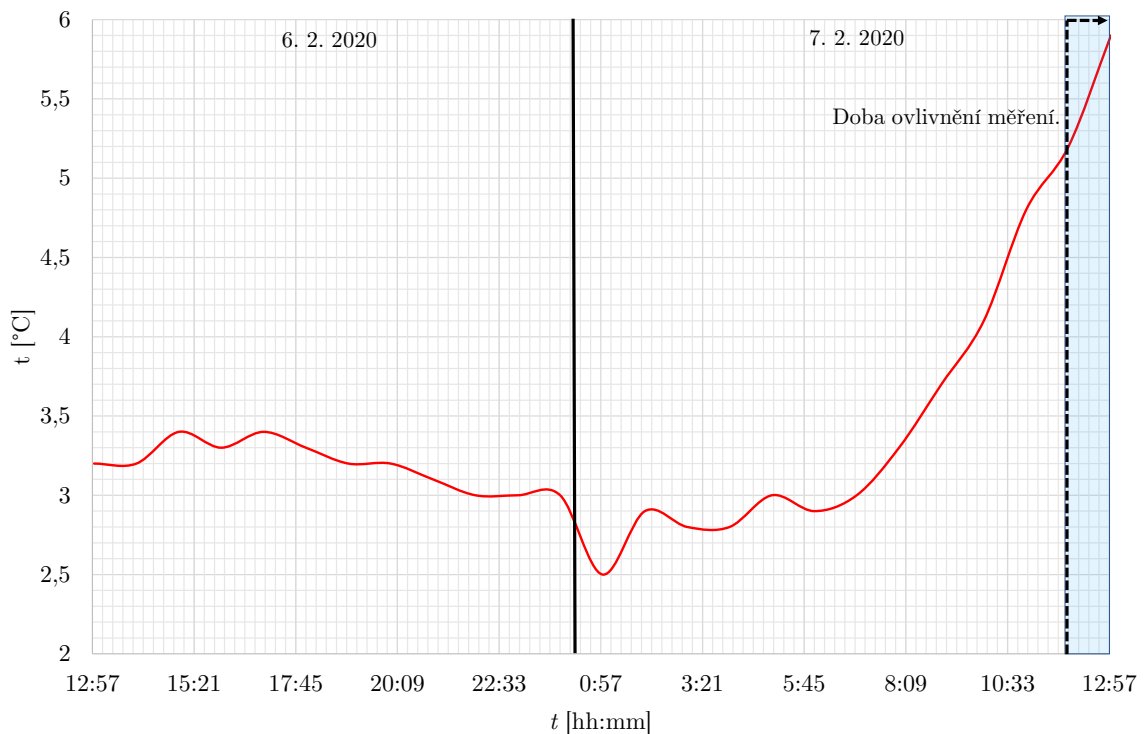
Obr. 5.1: Schéma zapojení měření s jednovidovým vláknem s délkou 10,125 km.

Na začátku zapojení je umístěn kontrolér teploty a proudu CLD1010LP od firmy Thorlabs. Výhodou je kontrola proudu a teploty laserové diody, tím pádem nenaštane překročení teploty či proudu než je nastavený limit. Tento kontrolér je odolný proti vysokým teplotám. V kontroléru teploty a proudu je umístěná laserová dioda

LPS-1550-FC od firmy Thorlabs, která pracuje na vlnové délce 1550 nm (byla vybrána vlnová délka 1550 nm kvůli navázání a šíření světla v jednovidovém vlákně). Světlo vyzařující z laserové diody je koherentně polarizované (lineárně vertikálně polarizované světlo se stupněm polarizace až 99,9 %). Světlo z laserové diody je vyzařováno do jednometrového jednovidového vlákna se sekundární ochranou. Na druhé straně jednovidového vlákna je umístěn polarizační kontrolér FPC560 od firmy Thorlabs. Polarizačním kontrolérem lze kontrolovat a nastavovat typ polarizace v jednovidovém vlákně. Pro toto měření je nastaven polarizační kontrolér tak, aby bod na Poincarého kouli byl umístěn na pozici lineárně horizontální polarizace. Poté je vlákno zapojeno do Thorlabs ADABS spojky. Na druhé straně spojky je připojeno jednovidové vlákno se sekundární ochranou s délkou 10,125 km (standard G.652, který popisuje geometrické, mechanické a přenosové vlastnosti vlákna). Toto jednovidové vlákno je namotáno na kabelový buben. Dále v zapojení jsou použity další dvě Thorlabs ADABS spojky. Pro zobrazení polarizovaného světla na Poincarého kouli a jeho Stokesovy parametry je použit polarimetr PAX1000 od společnosti Thorlabs. Je to jeden z nejnovějších typů polarimetru této společnosti. Jeho výhodou je přehlednější správa programu, výběr více typů měření a také velikost polarimetru. Dokáže pracovat na vlnové délce od 400 nm–1700 nm. Na konci zapojení je umístěn notebook, na kterém je instalovaný software polarimetru a zároveň jsou na notebooku ukládány výsledky měření.

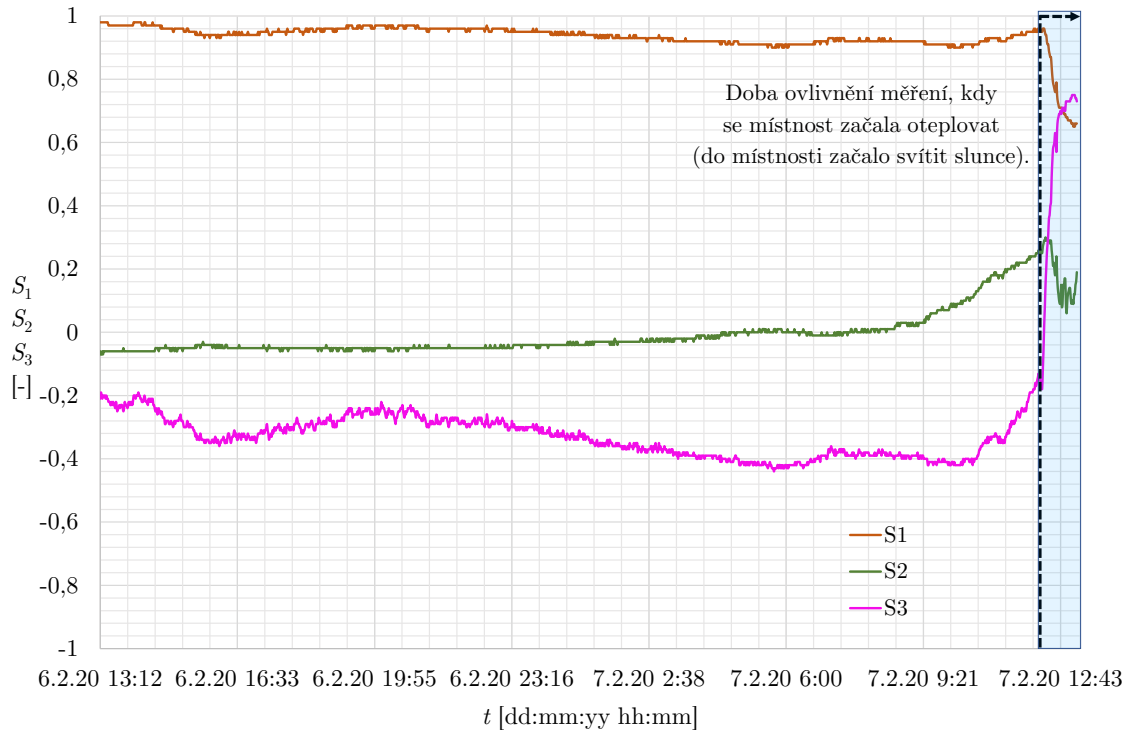
5.1.2 Měření dlouhé 24 hodin (jednovidové vlákno 10,125 km)

První typ měření probíhal 24 hodin (od 6. 2. 2020 13:12 do 7. 2. 2020 13:12). Před tím, než se začne s rozborem výsledků z polarimetru, je potřeba si nastínit počasí tohoto dne, které má vliv na výsledky měření. Venkovní teplota při měření byla celou dobu skoro stálá. Začala se zvyšovat až druhý den (7. 2. 2020) od 8:00. Při konci měření teplota dosahovala až 6 °C. Oba dny sněžilo a slunce svítilo pouze 7. 2. 2020 (když se zvyšovala teplota). Protože místnost, kde bylo uskutečněno měření, má okna směřované na západ, tak slunce do této místnosti svítilo v rozmezí od 12:00 do 17:00. Graf teploty při době měření lze vidět na obrázku (5.2).



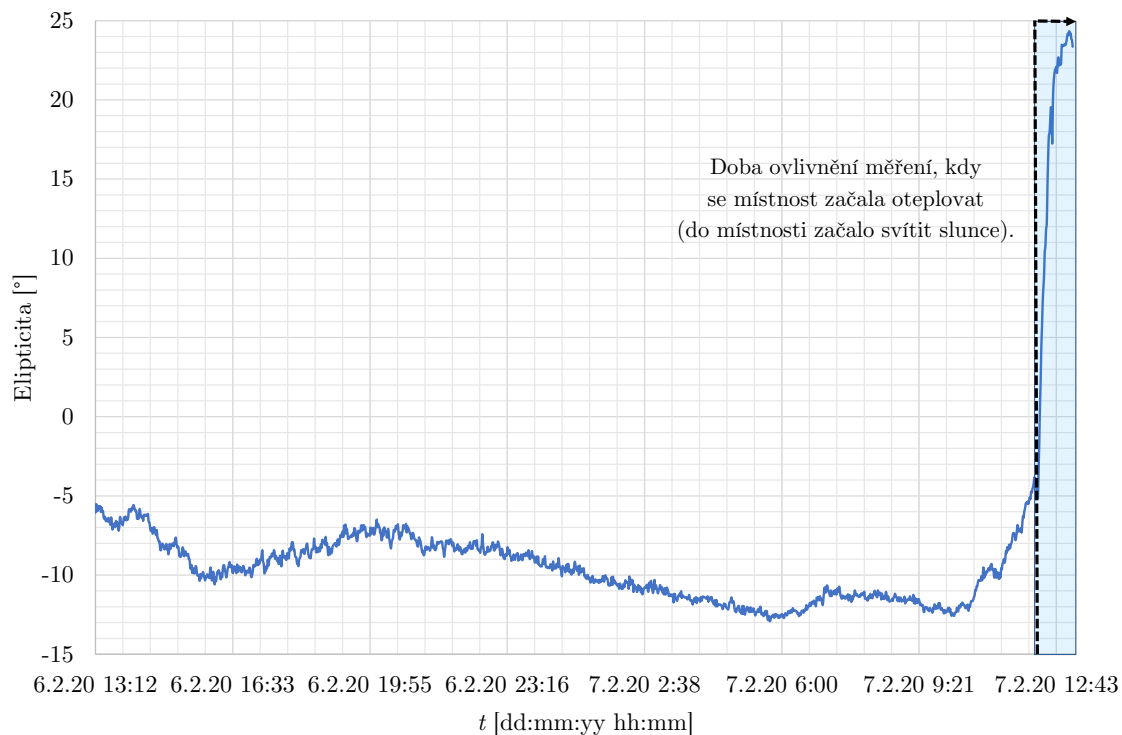
Obr. 5.2: Průběh teploty při 24 hodinovém měření (6. 2.–7. 2. 2020).

Prvním výsledkem měření je graf Stokesových parametrů S_1 , S_2 a S_3 (5.3). Převažně po celou dobu měření byla v místnosti stála teplota. Až druhý den (7. 2. 2020) kolem 8:00 se začala zvyšovat venkovní teplota (začalo svítit slunce) a poté od zhruba 12:00 začalo svítit slunce i do místnosti, tudíž se teplota v místnosti zvyšovala a začala mít vliv na polarizaci ve vlákne. Proto se snižoval parametr S_1 a zvětšovaly se parametry S_2 a S_3 .

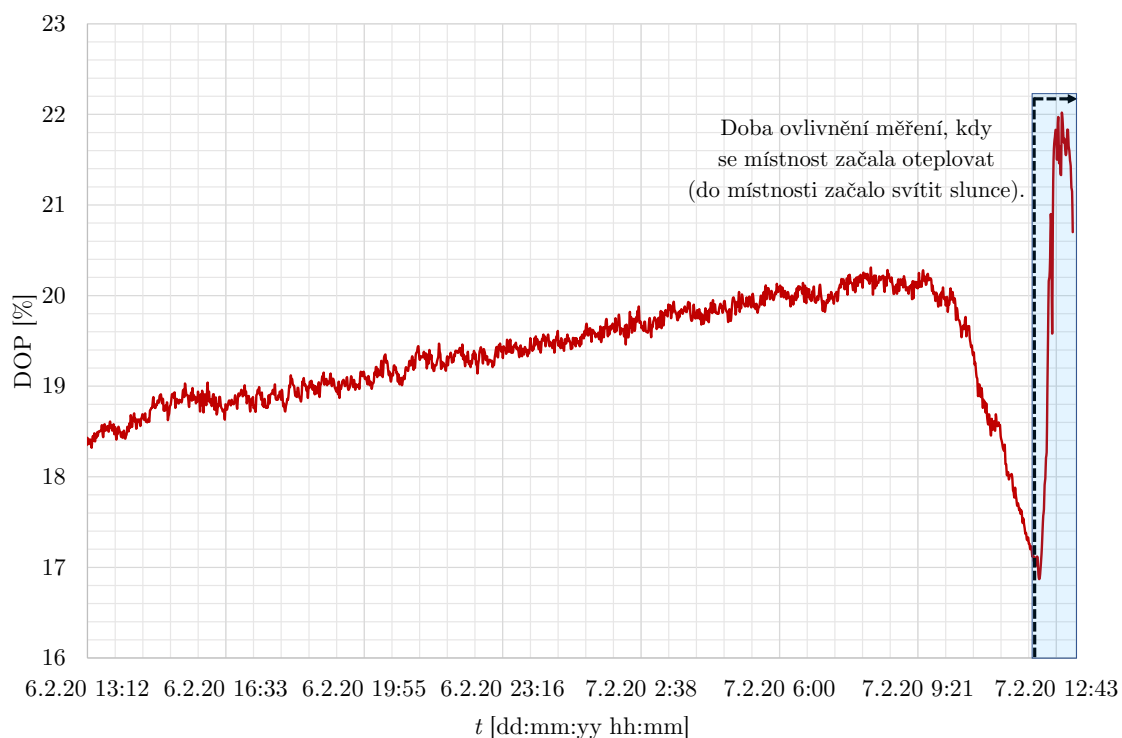


Obr. 5.3: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 24 h.

Elipticita (5.4), která charakterizuje míru změny rovinně polarizovaného světla na elipticky polarizované světlo, je při měření stálá a skoro nulová. Až po změně teploty místnosti se začal měnit úhel elipticity z rovinně polarizovaného světla (lineárně horizontální) na elipticky polarizované. Při měření byl stupeň polarizace nízký a stálý. Až při změně teploty v místnosti se začal stupeň polarizace měnit.



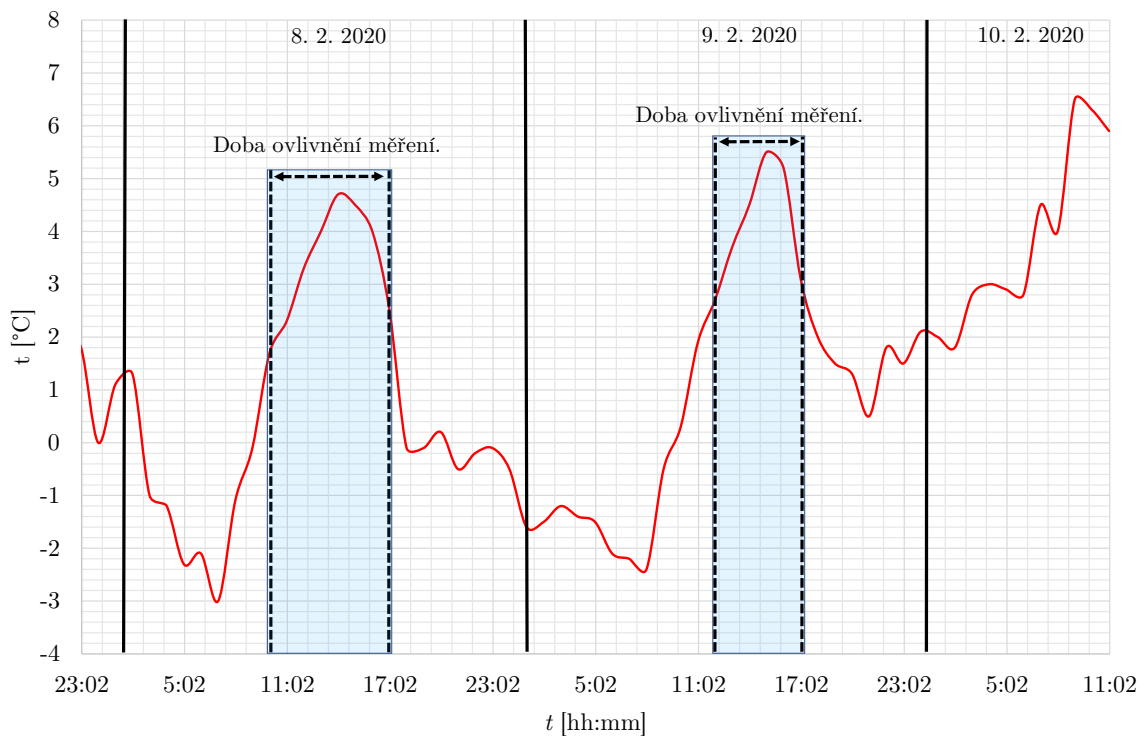
Obr. 5.4: Závislost elipcticity na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 24 h.



Obr. 5.5: Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 24 h.

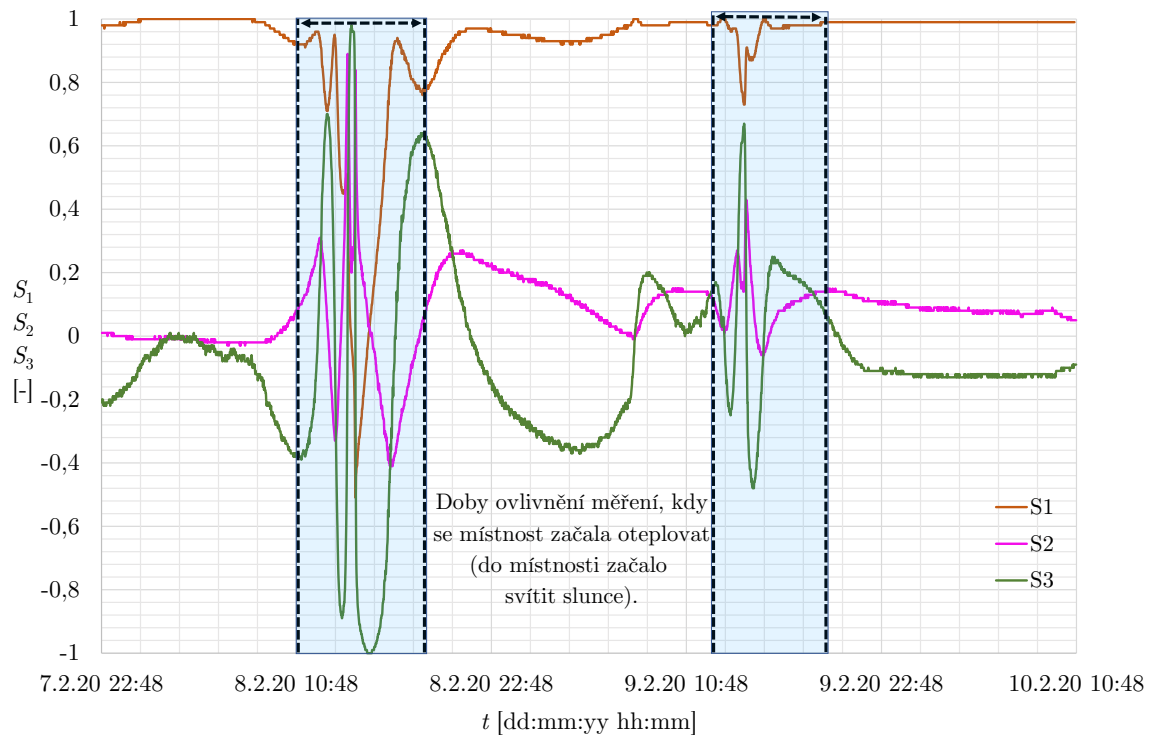
5.1.3 Měření dlouhé 60 hodin (jednovidové vlákno 10,125 km)

Oproti minulému měření toto měření trvalo celých 60 hodin. Začátek měření začalo 7. 2. 2020 ve 22:58 (pátek) a skončilo 10. 2. 2020 v 10:48 (pondělí). Výsledky měření nemohly být ovlivněny pohybem osob v laboratoři, protože měření probíhalo o víkendu, kdy do místnosti nikdo nemohl vstoupit. 9. 2. 2020 i 10. 2. 2020 bylo slunečno s oblohou. Při měření nastaly pouze dvě doby ovlivnění měření. První ovlivnění měření nastalo 8. 2. 2020 od 10:50 do 17:02. Slunce začalo svítit do místnosti, a proto se teplota v místnosti začala zvyšovat. Stejné ovlivnění měření teplotou nastalo přibližně ve stejný čas i 9. 2. 2020 (od 11:02 do 17:02). Slunce znovu svítilo do místnosti a místnost se začala oteplovat (zvýšení teploty ovlivňovalo měření – změnu polarizace).



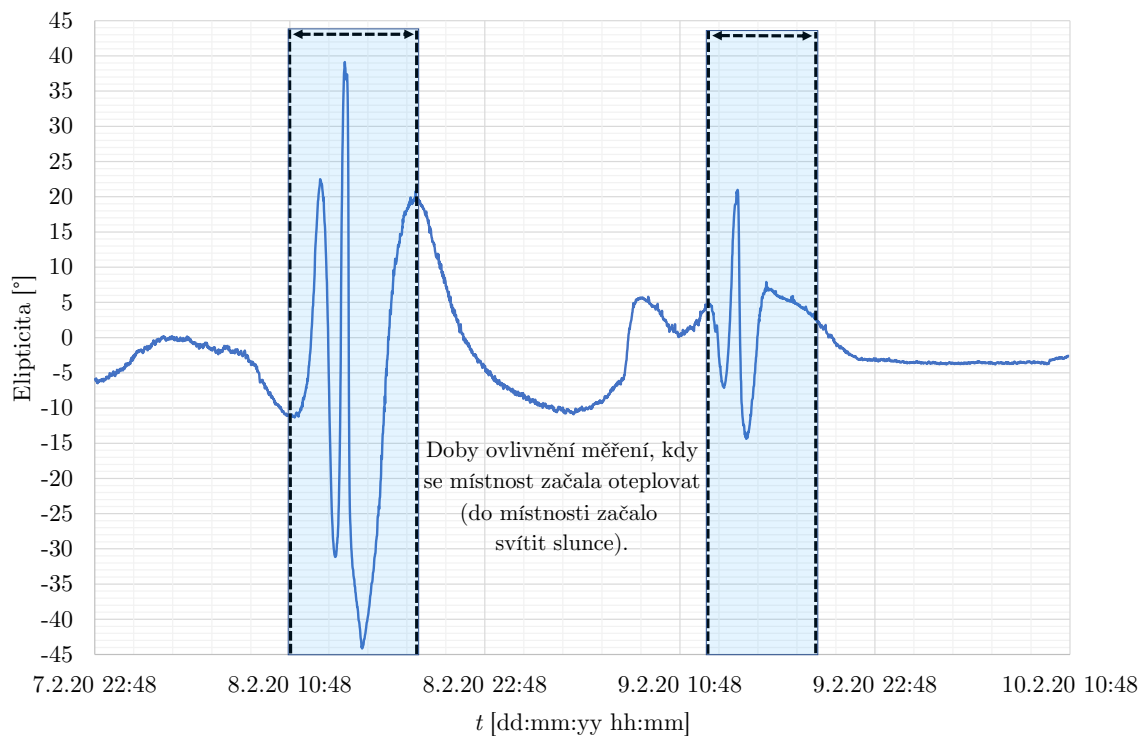
Obr. 5.6: Průběh teploty při 60 hodinovém měření (8. 2.–10. 2. 2020).

Nejzajímavějším grafem jsou Stokesovy parametry S_1 , S_2 a S_3 (5.7), u kterého se držela hodnota Stokesova parametru S_1 na hodnotě +1 (lineární horizontální polarizace). Pouze při velkých změnách vnitřní teploty se začal snižovat Stokesův parametr S_1 a Stokesův parametr S_2 a S_3 se z hodnoty 0 začal měnit na ± 1 . Všechny tři Stokesovy parametry se měnily velice rychle. Důvod je podobný předešlému měření, kdy při zvýšení teploty (do místnosti svítilo slunce) se místnost oteplovala, a tím se ovlivňovala polarizace ve vlákne.

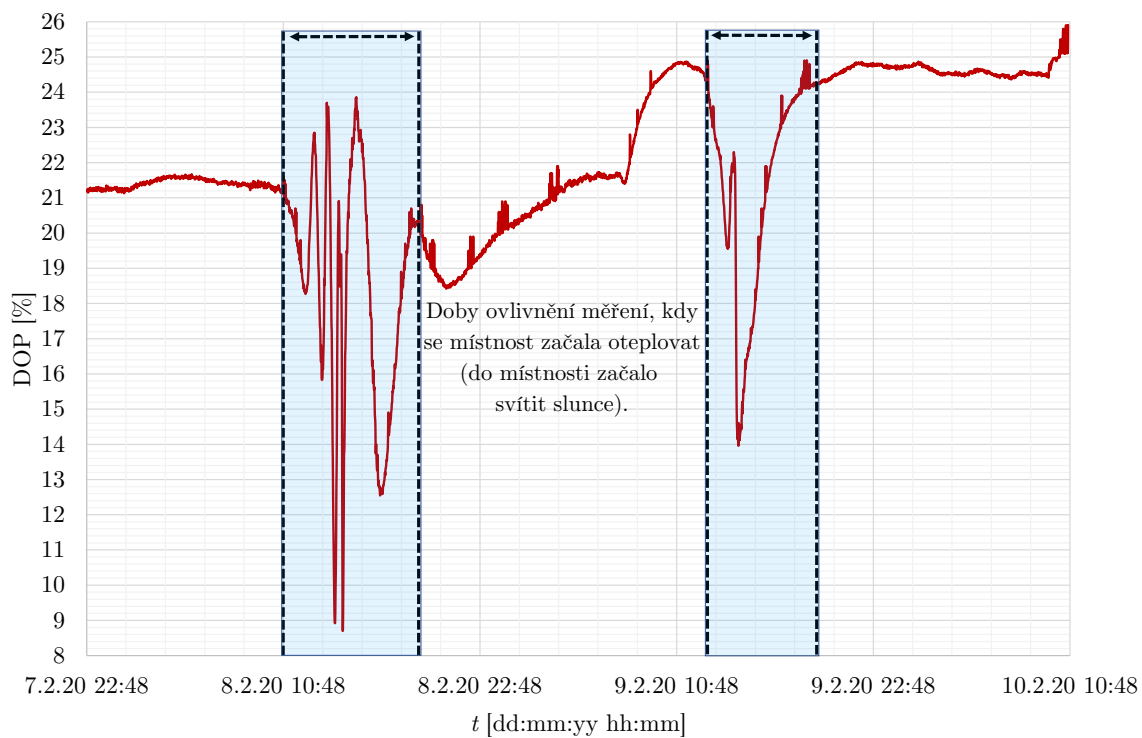


Obr. 5.7: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 60 h.

Elipticita (5.8) se v těchto stanovených časech také měnila (z rovinné polarizace do eliptické). Při prvním ovlivnění se měnila lineární polarizace na kruhovou. Při druhém ovlivnění se zase měnila lineární polarizace na eliptickou. Stupeň polarizace (5.9) většinou nabýval hodnoty 20% při celé době měření. Při změně teploty místnosti se začal stupeň polarizace neprodleně měnit, než když byla v místnosti stálá teplota.



Obr. 5.8: Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 60 h.



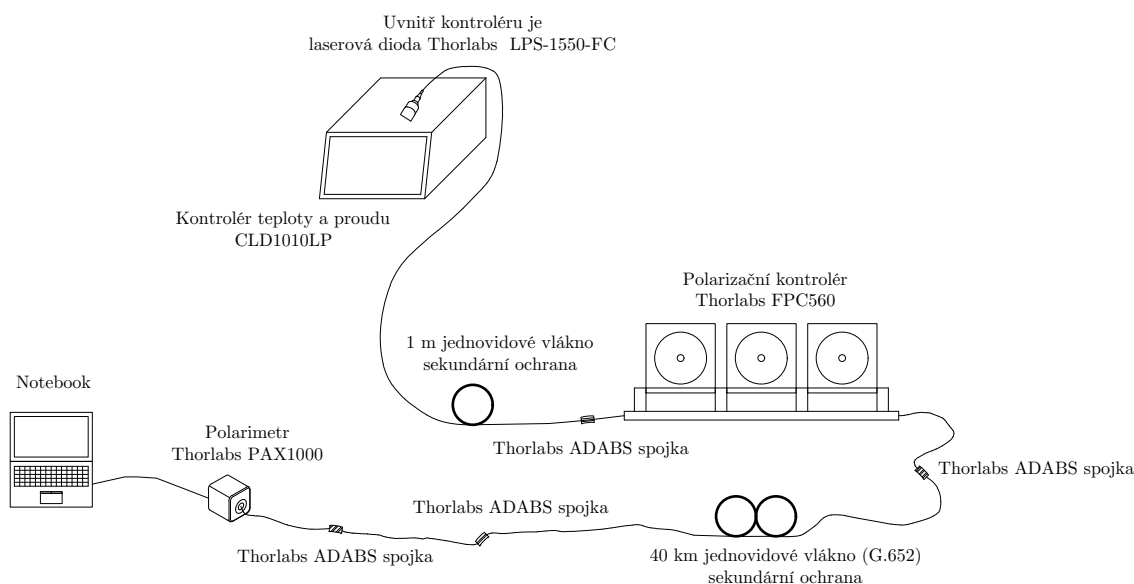
Obr. 5.9: Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 10,125 km a měření trvajícím 60 h.

5.2 Měření s jednovidovým vláknem 40 km

Měření probíhalo obdobně jako předešlé měření s jednovidovým vláknem s délkou 10,125 km. Rozdíl je v tom, že je použita větší délka optického kabelu (40 km). Místo měření zůstalo stejné. I zde se prováděly dva typy měření (24 hodin a 60 hodin). Tato měření byla provedena koncem ledna 2020.

5.2.1 Návrh zapojení pracoviště

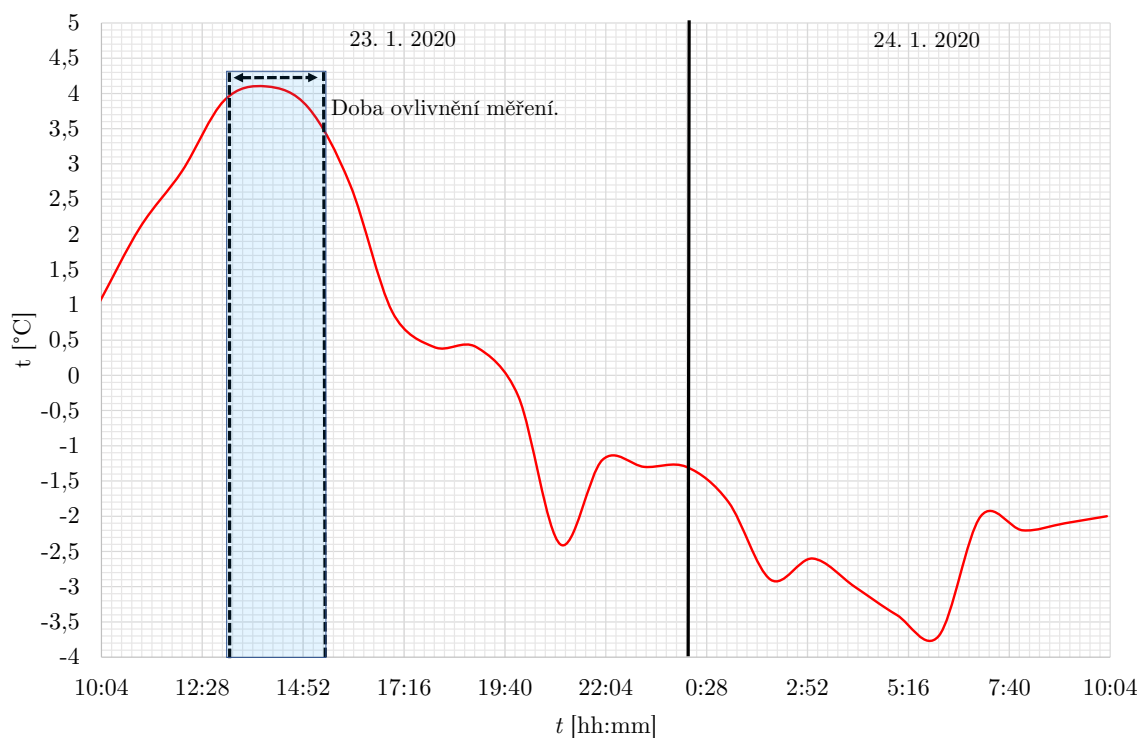
Zapojení pracoviště (5.10) zůstalo skoro stejné jako v předešlém měření. Nahradil se jen kabelový buben s optickým kabelem s délkou 10,125 km za kabelový buben s optickým kabelem s délkou 40 km (pořád jednovidové vlákno se sekundární ochranou). Polarizační kontrolér byl nastaven tak, aby bod na Poincarého kouli byl umístěn uprostřed (na pozici lineárně horizontální polarizace).



Obr. 5.10: Schéma zapojení měření s jednovidovým vláknem s délkou 40 km.

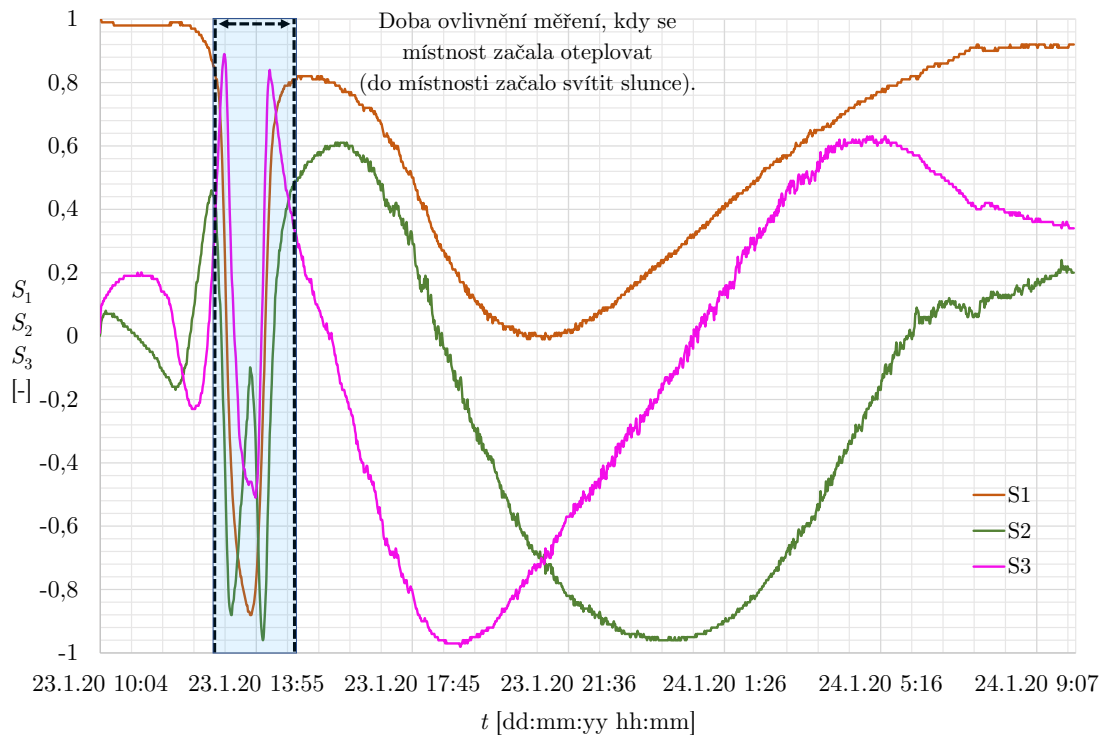
5.2.2 Měření dlouhé 24 hodin (jednovidové vlákno 40 km)

U tohoto typu měření bylo použito jednovidové optické vlákno s délkou 40 km. Měření probíhalo (5.11) od 23.1.2020 (10:04) do 24.1.2020 (10:04). 23.1.2020 bylo slunečno s trochou oblačnosti. Největší nárůst venkovní teploty nastal od 10:00 do zhruba 15:00. Největší vliv na měření bylo v čase, kdy se teplota zvýšila na 4 °C a svítilo slunce do místnosti, a proto se místnost oteplovala.

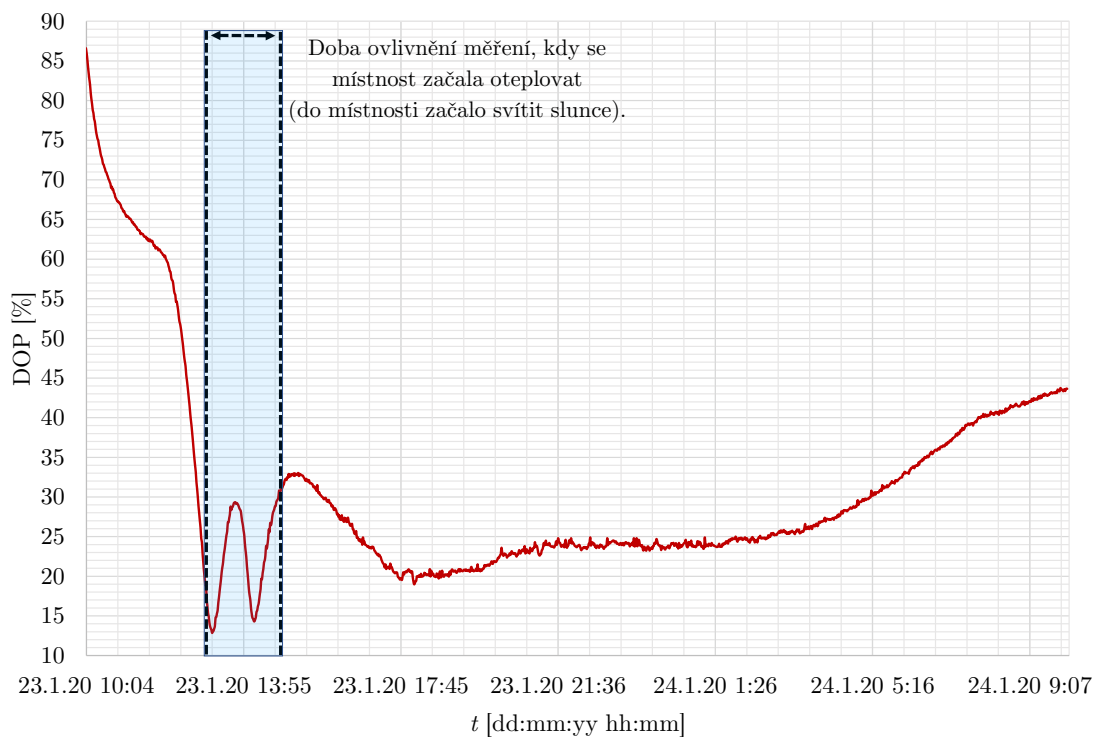


Obr. 5.11: Průběh teploty při 24 hodinovém měření (23. 1.–24. 1. 2020).

Všechny Stokesovy parametry (5.12) vykazují, že před tím, než narostla teplota v místnosti, bylo světlo skoro lineárně horizontálně polarizované. Při zvýšení teploty v místnosti se jednotlivé Stokesovy parametry začaly měnit. Hodnoty Stokesových parametrů se měnily od $+0,8$ do $-0,8$ často za krátkou časovou dobu. Parametry se začaly ustalovat, až přestalo svítit slunce do místnosti (začínalo zapadat slunce v 16:30). Stupeň polarizace (5.13) byl na začátku měření vysoký, ale po změně teploty v místnosti se stupeň polarizace snížil až na hodnotu 15%. Po ustálení teploty v místnosti se stupeň polarizace skoro neměnil a na konci měření se začal i zvětšovat.



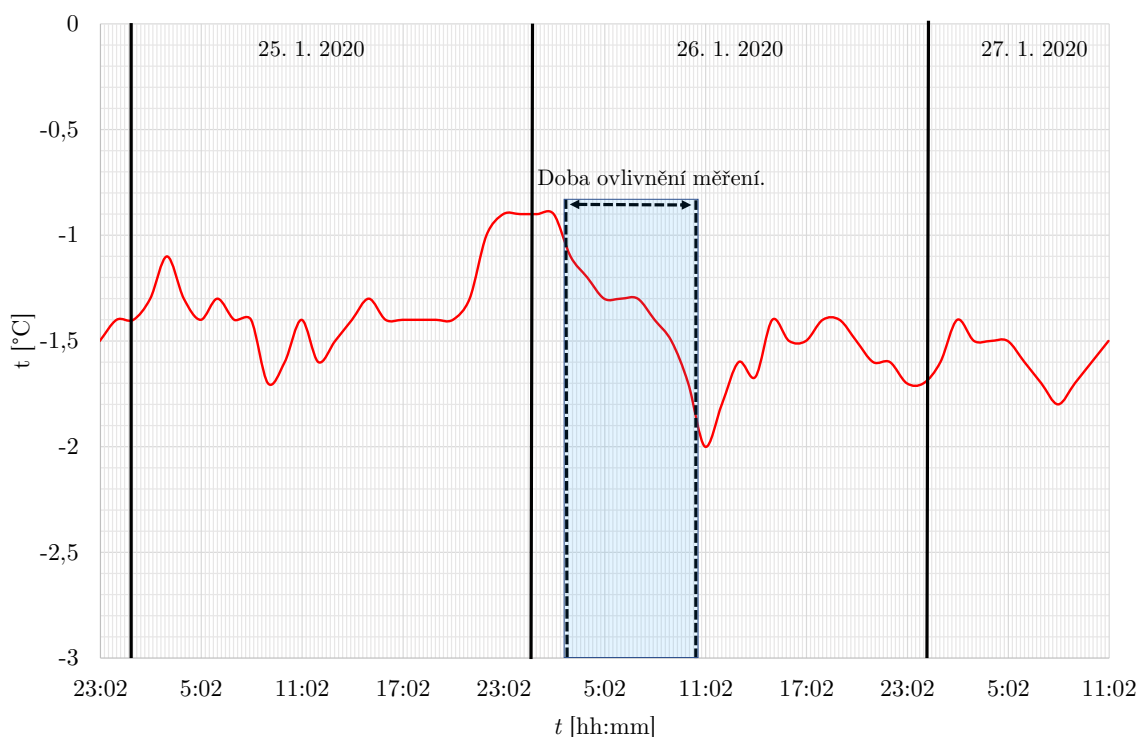
Obr. 5.12: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 24 h.



Obr. 5.13: Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 24 h.

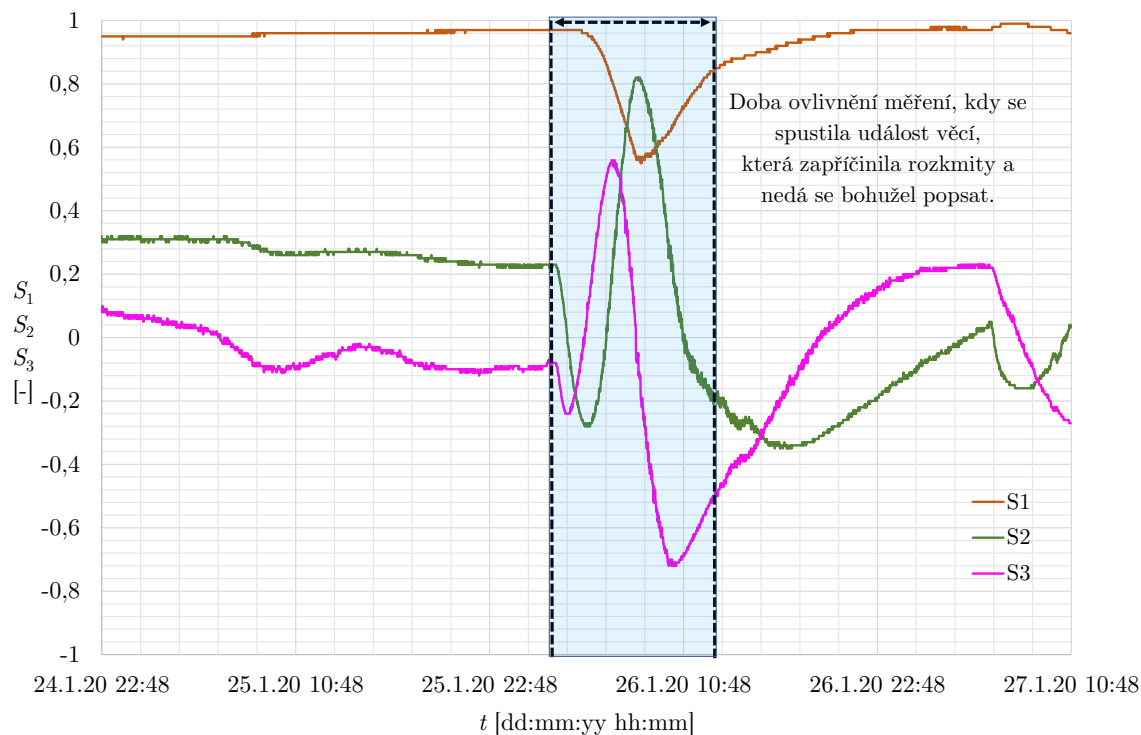
5.2.3 Měření dlouhé 60 hodin (jednovidové vlákno 40 km)

Toto měření začalo pár hodin po doměření 24 hodinového měření. Měření probíhalo o víkendu (od pátku večer do pondělí ráno (5.14)), čímž se eliminovaly vnější vlivy při měření (vstup osob do místnosti). Při celé době měření byla pouze jedna doba, která ovlivnila výsledky měření. Bylo to začátkem sobotního dne (26. 1. 2020) a skončilo těsně před 11:00. Byl to jediný okamžik měření, kdy se venkovní teplota změnila o více stupňů za menší časový úsek. Jedním z důvodů může být snížení teploty v místnosti (špatně utěsněná okna), ale spíše to vykazuje buď na chybu měření nebo jiný vnější vliv, který bohužel nejde přesně určit.

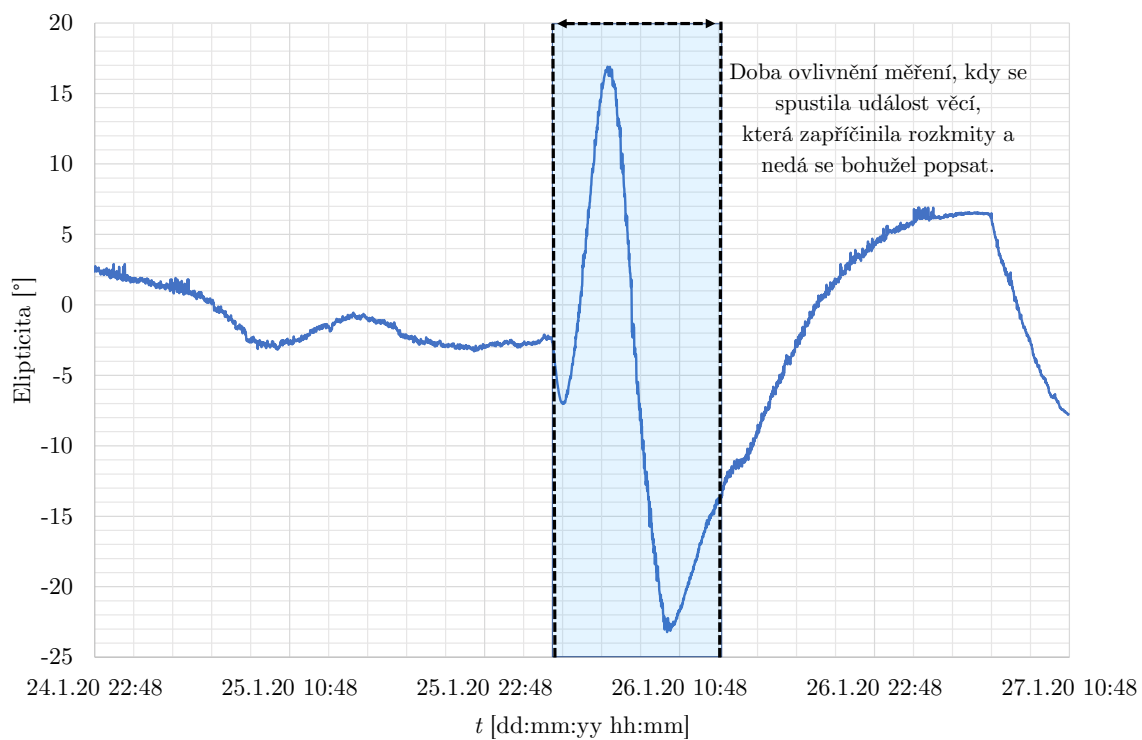


Obr. 5.14: Průběh teploty při 60 hodinovém měření (24. 1.–27. 1. 2020).

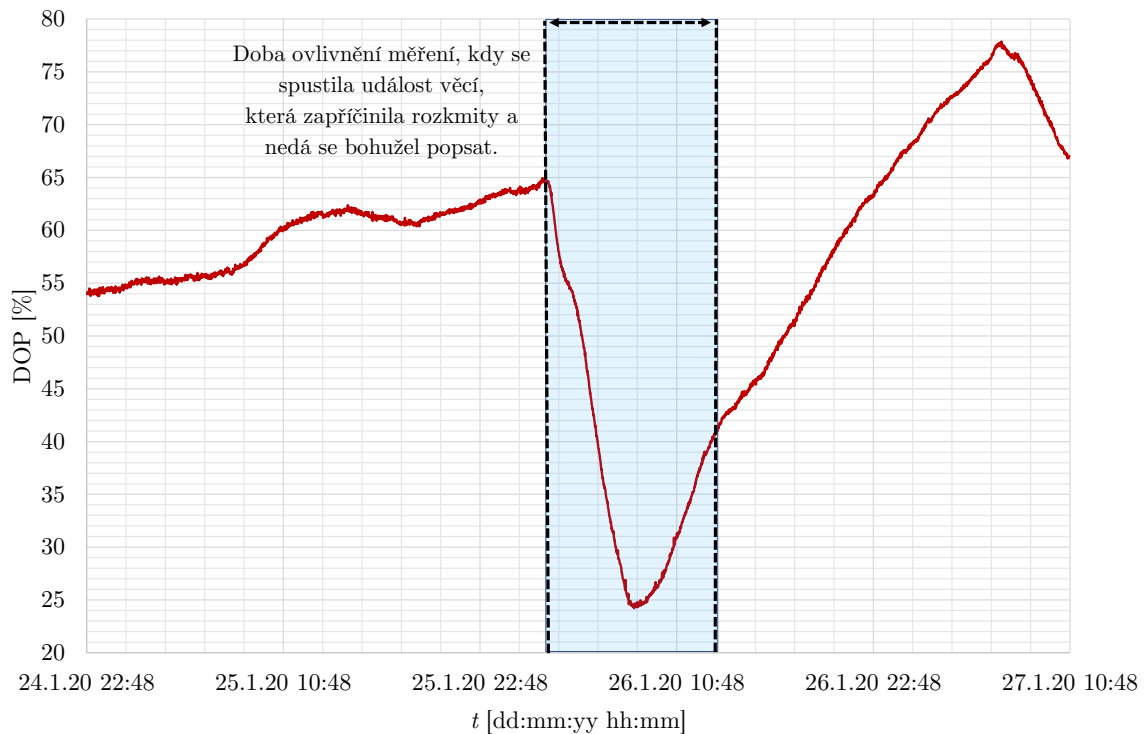
V grafu (5.15), kde jsou zobrazeny jednotlivé Stokesovy parametry, lze vidět, že do doby, dokud se teplota pohybovala okolo stejné hodnoty, se vektory výrazně neměnily. Až se začala měnit venkovní teplota o více stupňů, tak se Stokesovy parametry začaly měnit ve stejný čas. Nejvíc se změnily Stokesovy parametry S_2 a S_3 . To stejné lze říci o úhlu elipticity (5.16), který nabýval skoro nulové hodnoty do doby stálé venkovní teploty. Poté se začal měnit úhel elipticity (z rovinné polarizace na eliptickou). Stupeň polarizace (5.17) se držel na 55 %, ale při ovlivnění měření vnějším vlivem se snížil. Jak na optické vlákno nepůsobil vnější vliv, tak se polarizace zase zvětšovala k původní hodnotě.



Obr. 5.15: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 60 h.



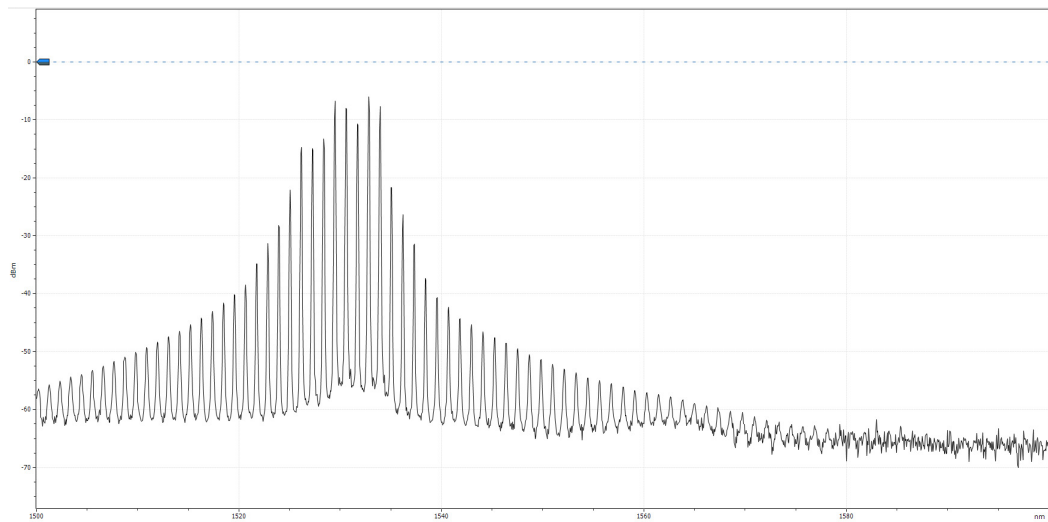
Obr. 5.16: Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 60 h.



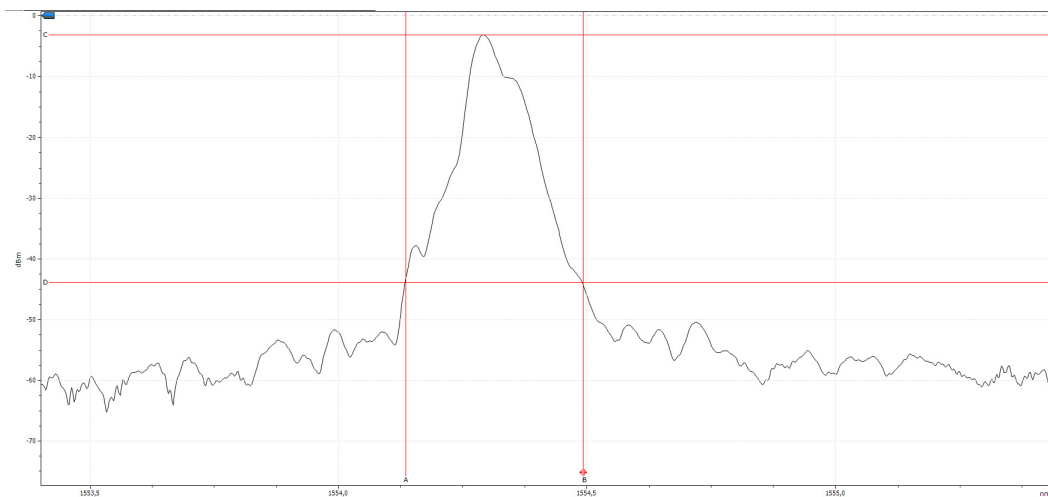
Obr. 5.17: Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 60 h.

5.2.4 Změna zdroje světla pro měření dlouhých tras

V předešlých měřeních byla použita jako zdroj světla laserová dioda LPS-1550-FC od firmy Thorlabs. Z naměřených výsledků bylo patrné, že při výrazné změně teploty v místnosti se měnila polarizace ve vlákně. Možná tento jev způsobil i to, že laserová dioda má vyšší spektrální charakteristiku (naměřenou spektrální charakteristiku jde vidět na obrázku 5.18). U krátkých tras tato spektrální charakteristika nemá tak velký vliv na senzor. Ale u dlouhých tras je potřeba použít užší spektrální charakteristiku. U vyšší spektrální charakteristice dochází k tak velkému rozptylu, který výrazně snižuje schopnost senzoru reagovat na vnější vlivy. Proto na další měření bude změněn zdroj světla a použije se média konvertor TPLINK MC220L, do kterého bude vložen SFP modul SPS-7140WCIS, pracující na vlnové délce 1550 nm. Spektrální charakteristika (5.19) byla také změřena u tohoto zdroje světla a je daleko užší než u laserové diody LPS-1550-FC. Pomocí optického spektrálního analyzátoru EXFO FTB-5240-EA byla naměřena spektrální charakteristika obou zdrojů světla.



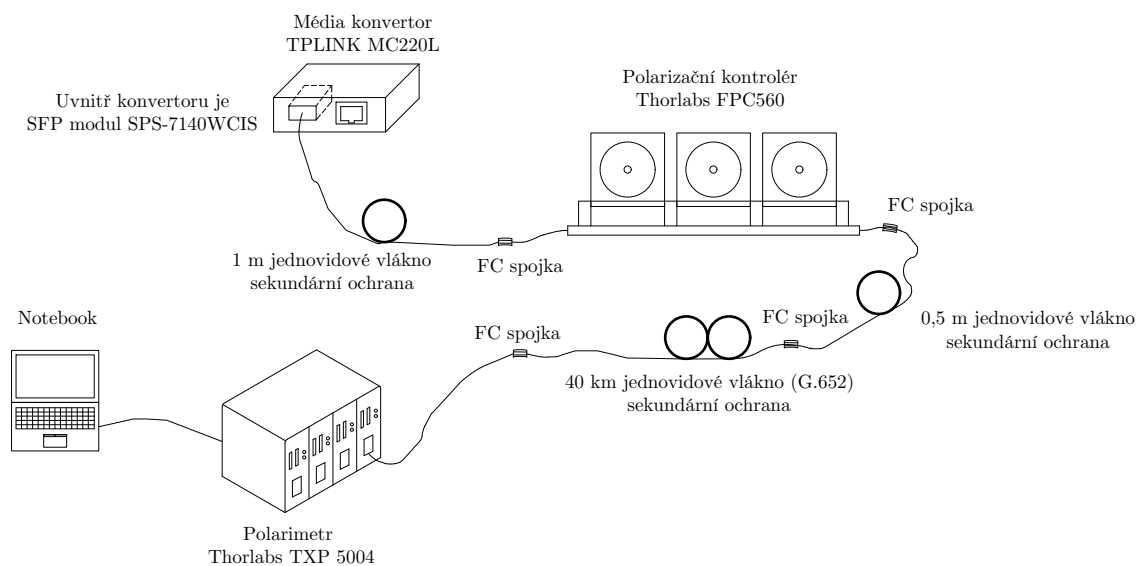
Obr. 5.18: Spektrální charakteristika laserové diody LPS-1550-FC.



Obr. 5.19: Spektrální charakteristika SFP modulu SPS-7140WCIS.

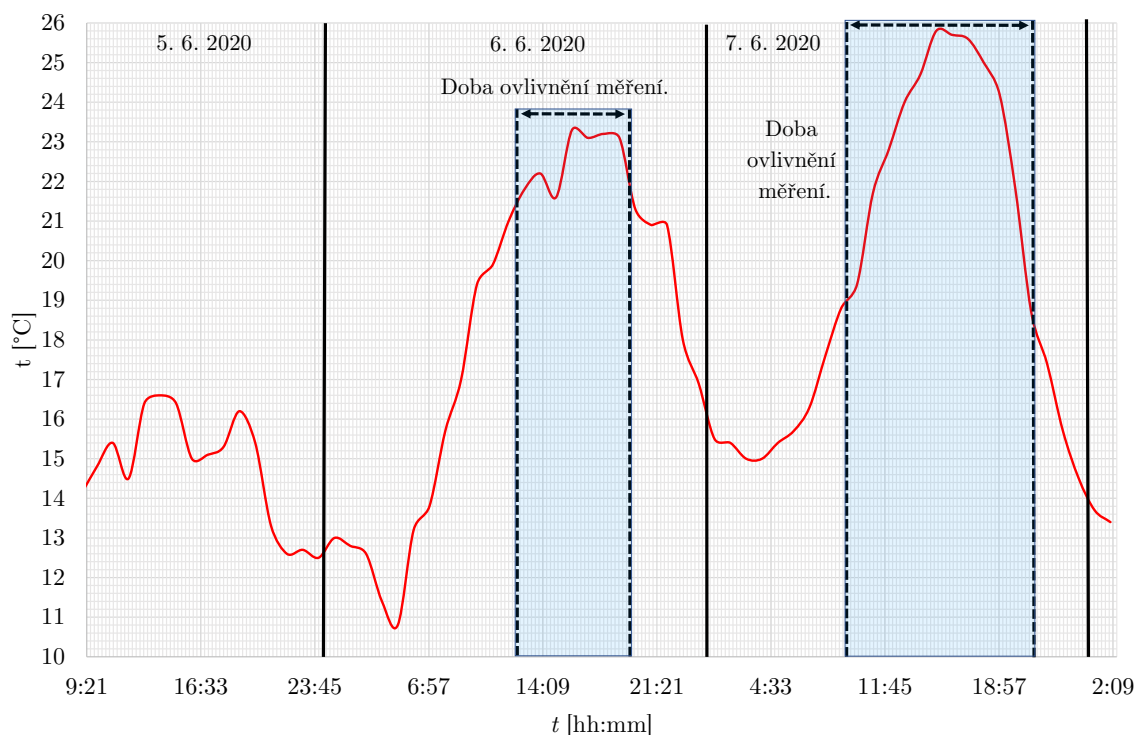
5.2.5 Měření dlouhé 65 hodin (jednovidové vlákno 40 km)

Tento typ měření probíhal na stejném pracovišti jako v předešlém měření, ale s tím rozdílem, že se mírně změnilo zapojení pracoviště. Hlavním rozdílem je, že byl použit jiný typ polarimetru (starší typ, protože oproti novějšímu PAX1000 má lepší obsluhu, při zpracování větší množství dat je práce s daty snazší a s tímto polarimetrem lze měřit delší interval) a hlavně byl použit jako zdroj světla média konvertor TPLINK MC220L. Do média konvertoru byl vložen SFP modul SPS-7140WCIS, který vyzařuje světlo s vlnovou délkou 1550 nm. Jak bylo řečeno v předešlé kapitole, jeho spektrální charakteristika je velice úzká. Účelem tohoto měření bylo zjistit, jaký z dvou typů laserových diod je lepší jako zdroj pro napájení polarizačních senzorů. Měření probíhalo po dobu 65 hodin.



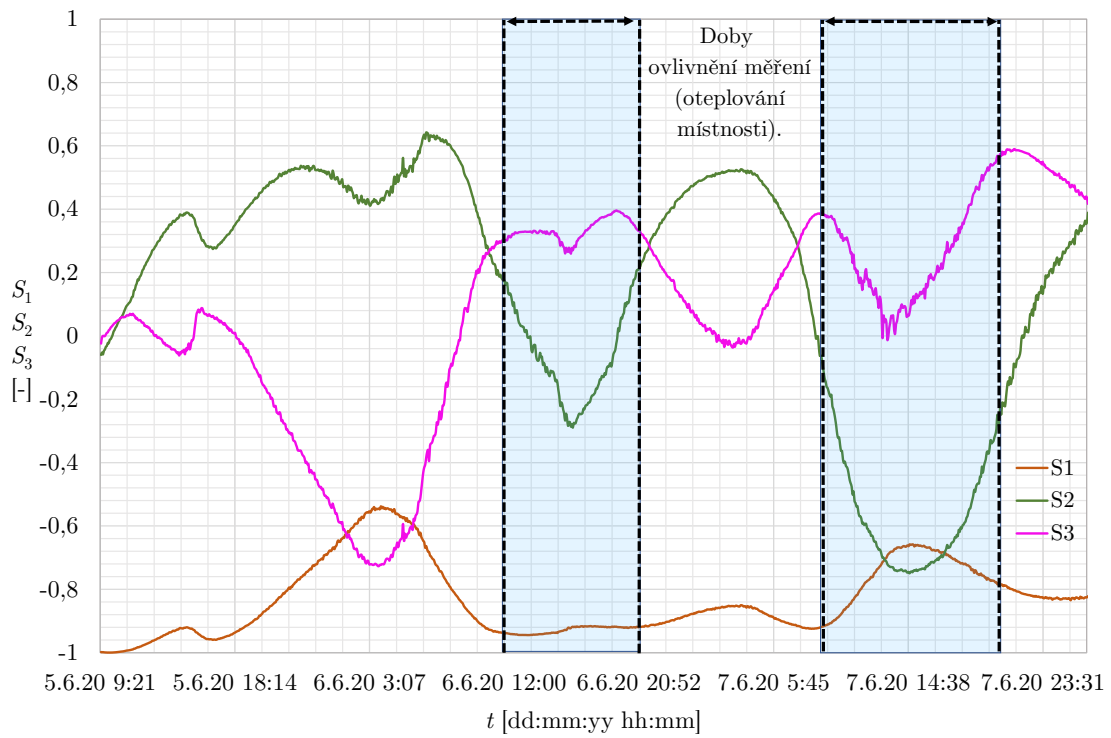
Obr. 5.20: Schéma zapojení měření s jednovidovým vláknem s délkou optického kabelu 40 km a délkou měření 65 h.

Venkovní teplota (5.21) oproti minulým měření byla odlišná v tom, že měření probíhalo v létě (slunečno bývá častěji než v zimě a také počasí bývá teplejší). Doba ovlivnění měření proběhla pouze ve dvou okamžicích, a to 6. 6. 2020 a 7. 6. 2020. Tyto doby ovlivnění nastaly kvůli tomu, že sluneční paprsky dopadaly přes okno do místnosti, a tím zahřívaly místnost. 5. 6. 2020 počasí vůbec nemohlo ovlivnit měření, protože celý den přšelo a bylo zataženo.

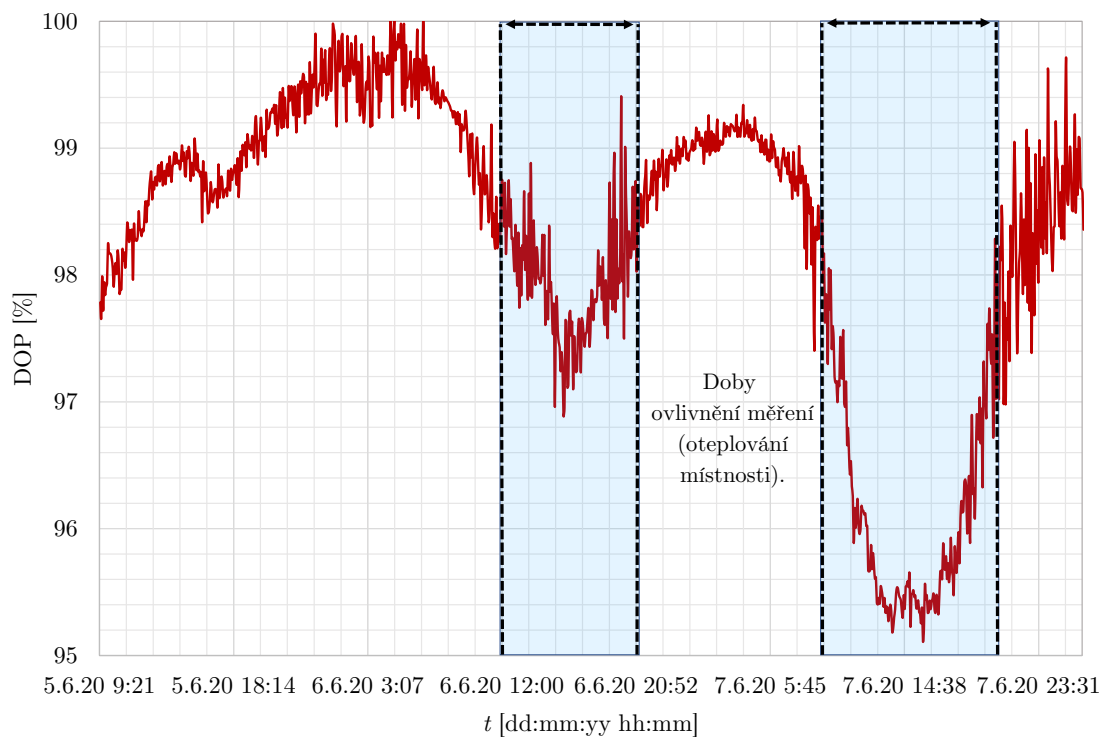


Obr. 5.21: Průběh teploty při 65 hodinovém měření (5. 6.–7. 6. 2020).

Ze Stokesových parametrů (5.22) si lze všimnout, že polarizace se měnila velice pomalu v čase. Druhý den (6. 6. 2020) nastaly drobné odchylky polarizace okolo 16:00. Přes den bylo oblačno, ale poté na konci dne začalo svítit slunce, a tím pádem i do místnosti a začalo to ovlivňovat měření (v menší míře než v předešlých měření). To stejné nastalo třetí den (7. 6. 2020) ve zhruba stejné době (hlavní odchylky měl v tu dobu Stokesův parametr S_3). Nejzajímavějším prvkem je to, že v tomto měření stupeň polarizace (5.23) dosahoval skoro 100 %. Proto bylo skoro světlo plně polarizované. Jediné mírné zmenšení stupně polarizace (v řádek jednotek) nastalo při změnách teploty v místnosti, což bylo popsáno dříve.



Obr. 5.22: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 65 h.

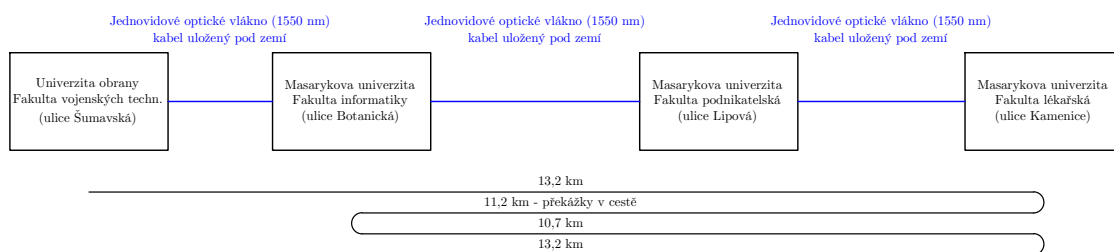


Obr. 5.23: Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 40 km a měření trvajícím 65 h.

6 Měření dlouhé trasy pokládkou v zemi

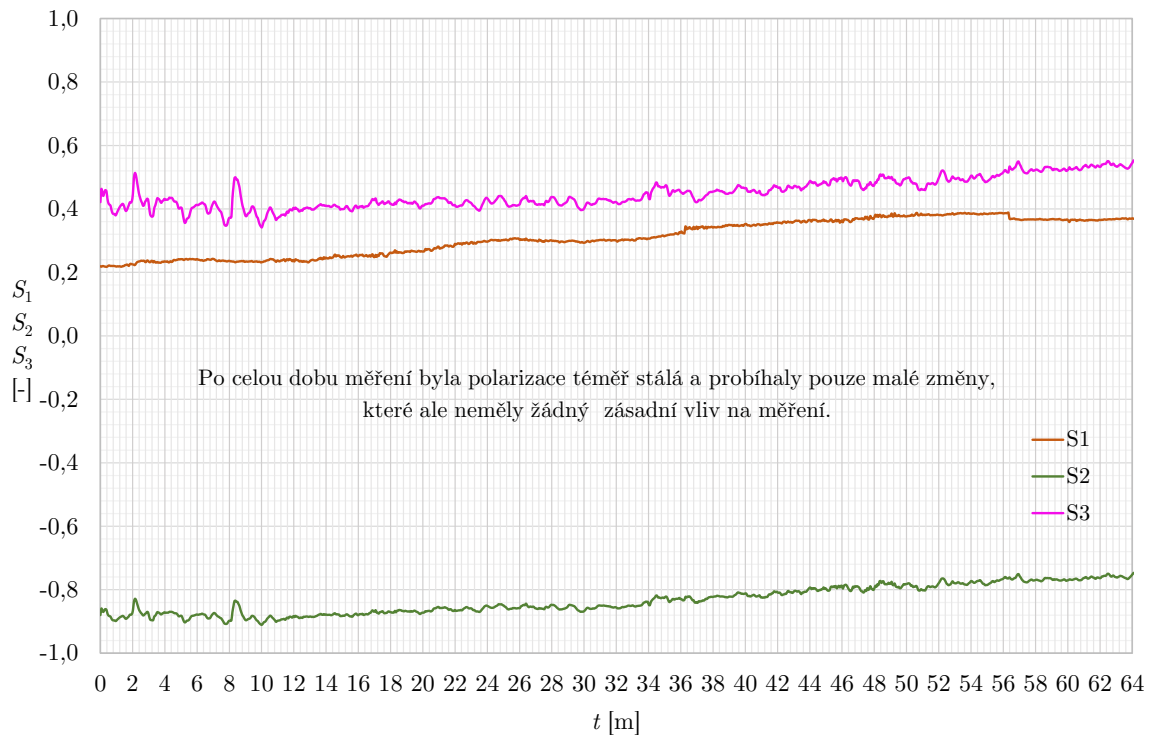
6.1 Měření trasy Šumavská–Bohunice (48,3 km)

Na další měření se využila stávající trasa jednovláknového vlákna. Trasa začíná na Univerzitě obrany na Šumavské ulici přes fakultu informatiky na Botanické ulici (Masarykova univerzita), dále přes fakultu podnikatelskou na Lipové ulici až na fakultu lékařskou na ulici Kamenice v Bohunicích (Masarykova univerzita). Stávající spoj je dlouhý 48,3 km. Optický kabel je uložen pokládkou pod zemí. Schéma zapojení trasy je zobrazeno na obrázku (6.1). Pro změření výsledků byl použit média konvertor TPLINK MC220L. Do média konvertoru byl vložen SFP modul SPS-7140WCIS. Na konci trasy byl použit polarimetr PAX5710 od firmy Thorlabs.

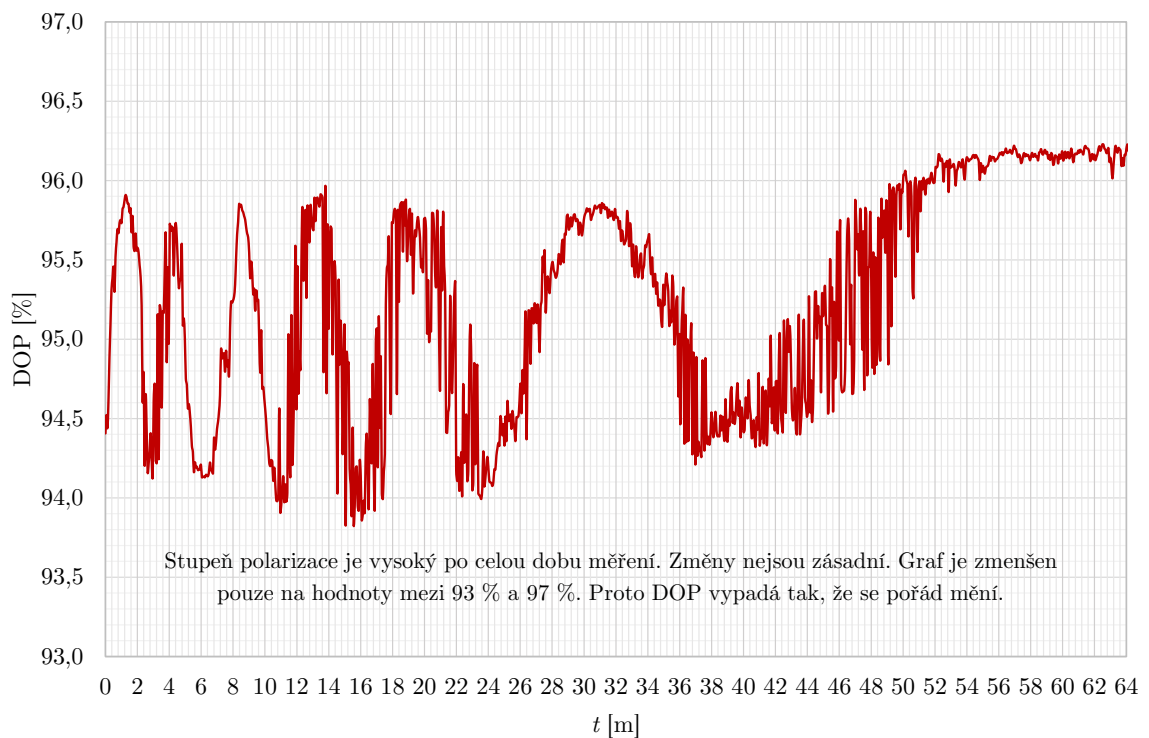


Obr. 6.1: Schéma zapojení stávající trasy UNOB Šumavská – MU fakulta lékařská.

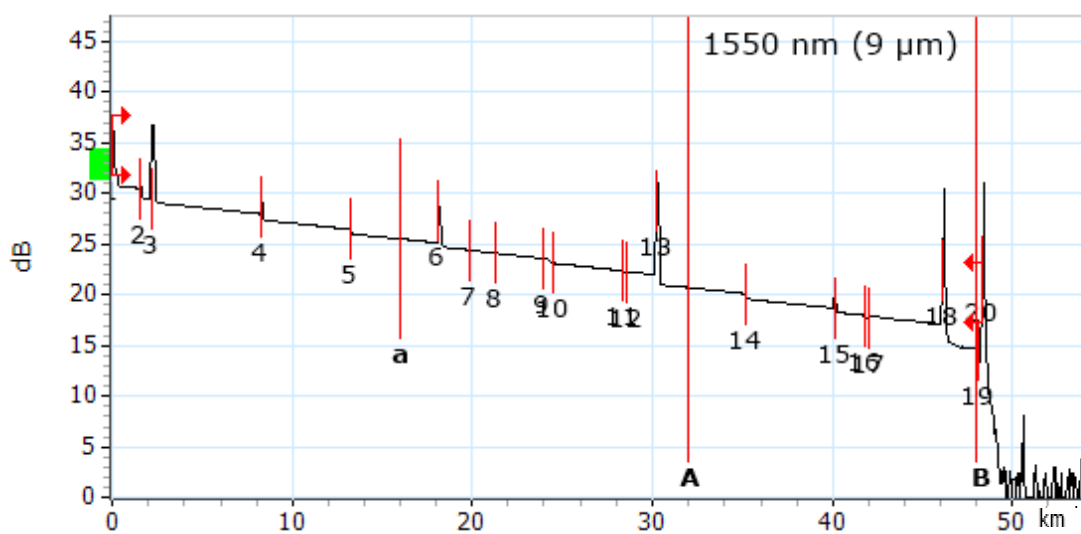
Všechny výsledky vyšly podle předpokladu. Protože optický kabel je uložen pod zemí, tak na něj nepůsobily žádné vnější vlivy (teplota pod zemí je stálá, na kabel nepůsobily žádné povětrnostní podmínky nebo vliv lidí). Z výsledků Stokesových parametrů (6.2) je patrné, že světlo bylo po celou dobu elipticky polarizované. Na začátku měření byly menší změny Stokesových parametrů S_2 a S_3 , které ale celkově neměly vliv na měření. Stupeň polarizace (6.3) byl vysoký po celou dobu měření. I když se stupeň polarizace měnil s rozpětím dvou procent, tak se výsledky dají považovat za úspěšné. Je potřeba také brát v potaz přiblížení grafu.



Obr. 6.2: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase u trasy Šumavská–Bohunice (měření trvající 1 h).



Obr. 6.3: Závislost stupně polarizace na čase u trasy Šumavská–Bohunice (měření trvající 1 h).

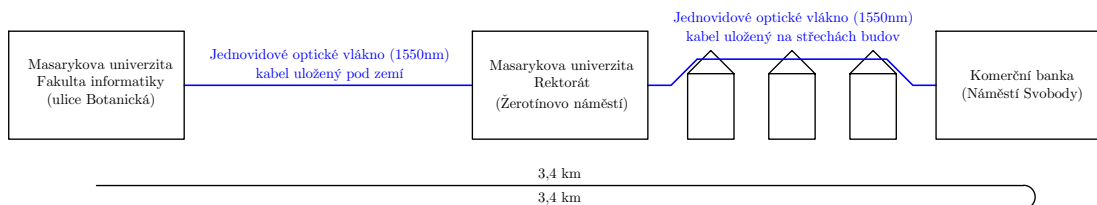


Obr. 6.4: Naměřená trasa Univerzita obrany – Masarykova univerzita v Bohunicích pomocí OTDR metody.

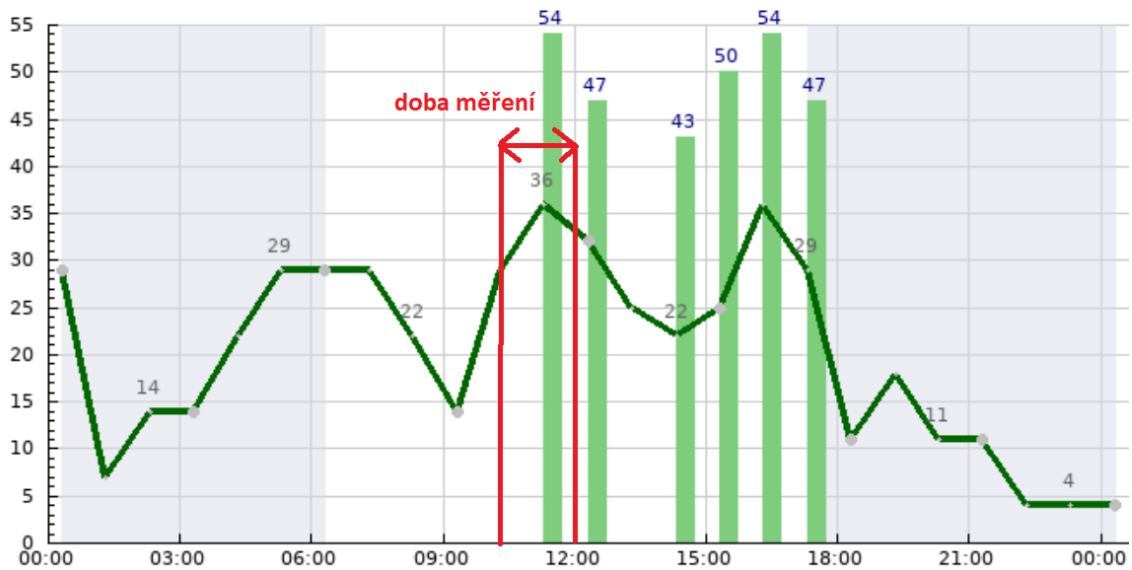
7 Měření dlouhé trasy na závěse

7.1 Měření na závěsném kabelu (6,8 km)

Na poslední měření stávající trasy byl využit optický kabel, který byl v části trasy uložen na střechách budov. Trasa vede od fakulty informatiky na ulici Botanické (Masarykova univerzita) přes rektorát Masarykovy univerzity na Žerotínově náměstí až po Komerční banku na Náměstí Svobody. Trasa má celkově 6,8 km. Měření proběhlo 28. 2. 2020 od 10:15 do 12:15. Schéma zapojení je na obrázku (7.1). Pro měření výsledků byl použit kontrolér teploty a proudu CLD1010LP a v něm byla umístěna laserová dioda LPS-1550-FC (oba komponenty od firmy Thorlabs). Na konci trasy byl použit polarimetr PAX1000 od firmy Thorlabs. Před tím, než se zobrazí výsledky měření, je potřeba si popsat den kvůli vnějším vlivům (teplota a převážně rychlost větru, který měl největší vliv na toto měření). V den měření bylo zataženo a chvílemi i sněžilo. Teplota se celý den pohybovala okolo 4 °C. Rychlost větru (7.2) v tento den byl vyšší, než normálně bývá. Průměrná rychlost větru byla na začátku měření 30 km/h. Kolem 11:15 se průměrná rychlost větru zvýšila až na 36 km/h. Poté se do konce měření snížila na 34 km/h. Nárazy větru byly v 11:15 až 11:45 o rychlosti 54 km/h (nejvyšší hodnota tohoto dne). Hodnota tohoto nárazu větru podle dostupných informací na internetu je nadprůměrná.

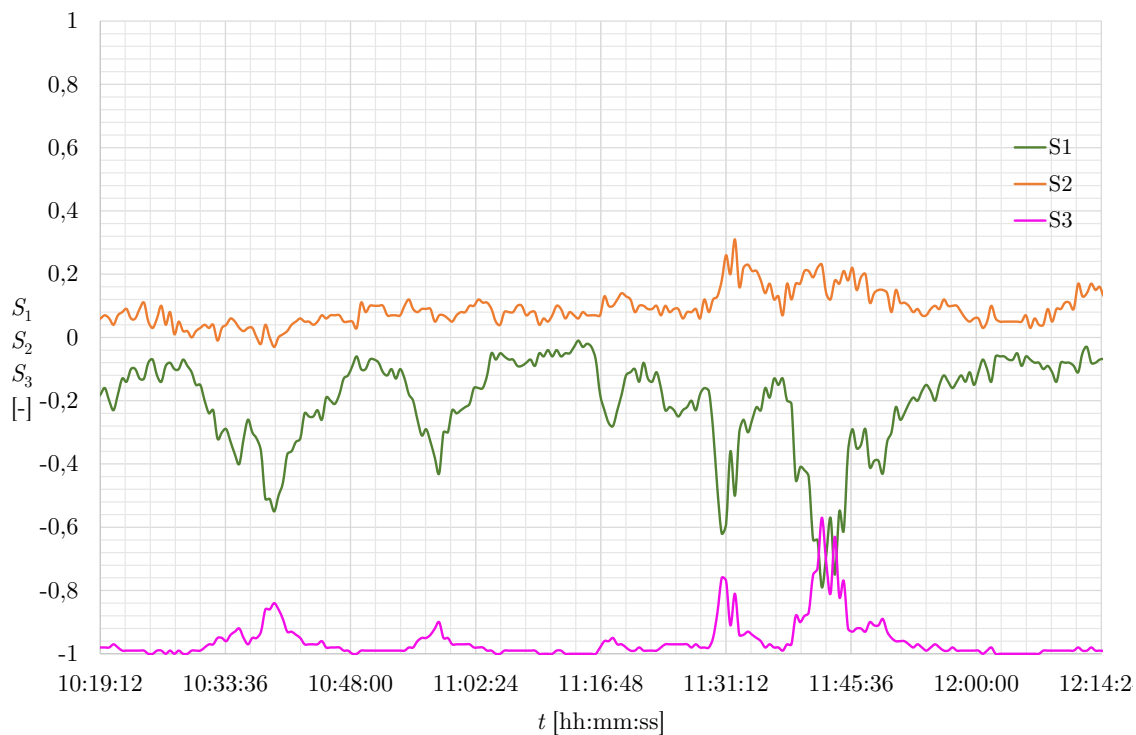


Obr. 7.1: Schéma zapojení stávající trasy od Botanické ulice až na Náměstí Svobody.

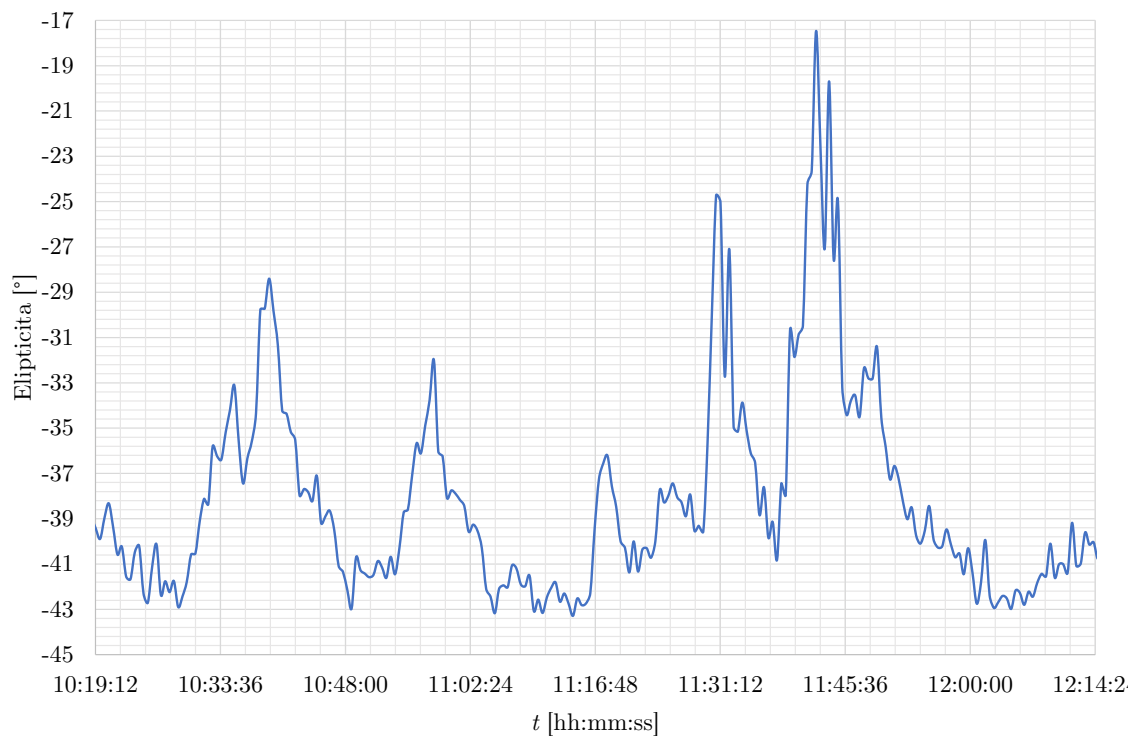


Obr. 7.2: Rychlost a náraz větru 28. 2. 2020.

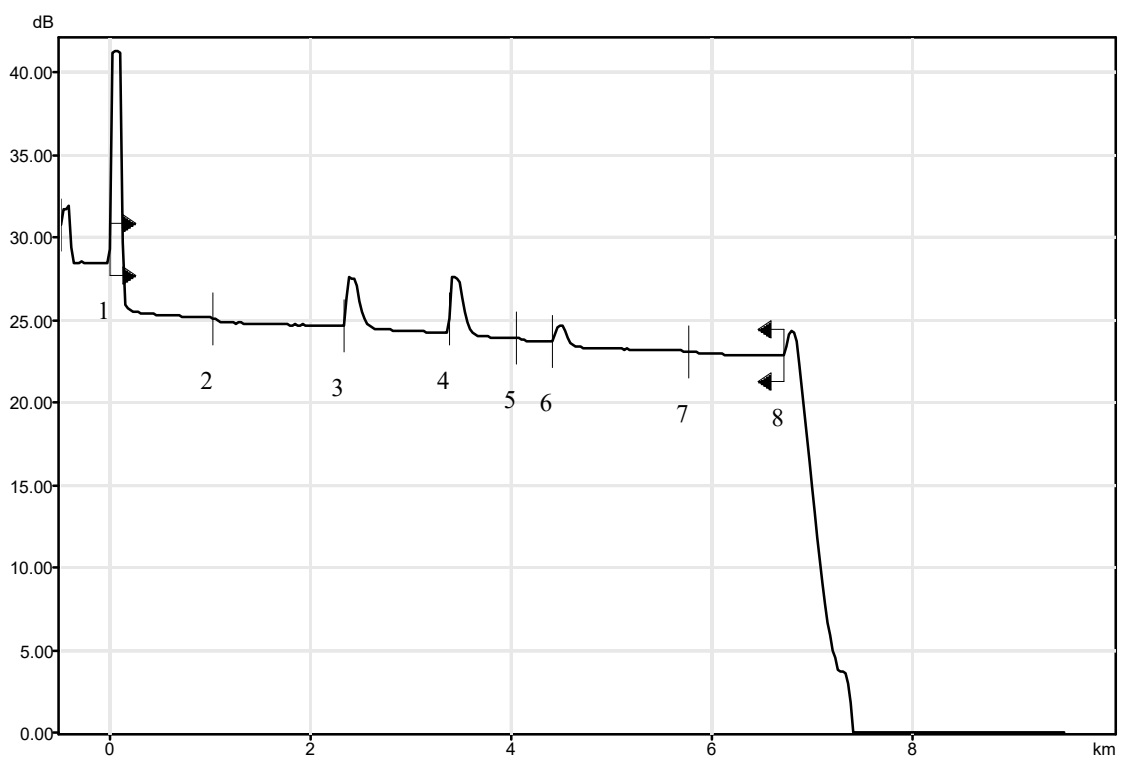
Na výsledcích měření si lze všimnout, že se Stokesovy parametry nejvíce (7.3) měnily při době, kdy byl náraz větru toho dne nejvyšší. Tím pádem měl vítr velký vliv na měření. Poté, až se náraz větru snížil pod hodnotu 40 km/h , se začaly ustalovat Stokesovy parametry. Na grafu jsou vidět i ostatní menší výkyvy hodnot Stokesových parametrů (může za to vítr tohoto dne – vítr lehce rozhýbal zavěšený optický kabel). Internetová stránka, kde je pořízena fotografie rychlosti větru a nárazu větru u sloupcových grafů neukazuje náraz větru do hodnoty 34 km/h . U grafu elipticity si lze všimnout (7.4), že nastalo více kmitů při měření. Ale největší kmit vždy nastal se zvětšeným nárazem větru.



Obr. 7.3: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase u závěsného kabelu (měření trvající 2 h).



Obr. 7.4: Závislost elipticity na čase u závěsného kabelu (měření trvající 2 h).



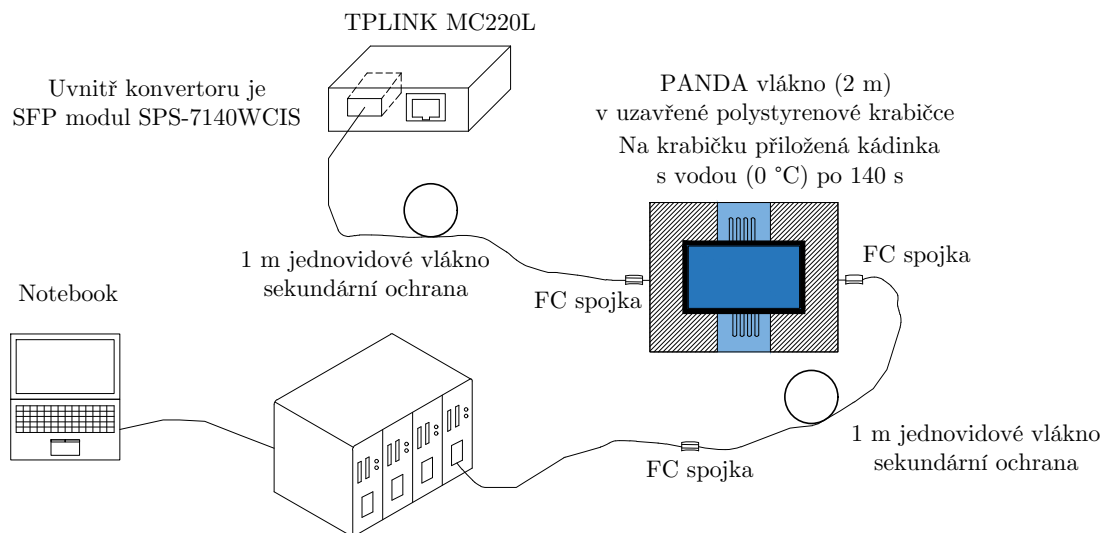
Obr. 7.5: Měřená trasa MU fakulta informatiky – Komerční banka na Náměstí Svobody pomocí metody OTDR.

8 Reakce senzoru bez dlouhé trasy při působení vnějšího vlivu

V minulých kapitolách byly testovány různé typy tras, které by mohly být použity k napájení polarizačních senzorů. V této kapitole byl testován senzor teploty, na který byla přiložena kádinka s vodou (0 °C nebo 48 °C). Senzor teploty se skládá ze sensorického optického vlákna (z vlákna zachovávající polarizaci). V této kapitole měření před senzorem není žádná trasa (senzor je připojen přímo ke zdroji světla). Bylo potřeba otestovat senzor, zda reaguje na změnu teploty, a také jak se mění polarizace při změně teploty, když je použito pro napájecí trasu jednovidové optické vlákno s vlnovou délkou 1550 nm.

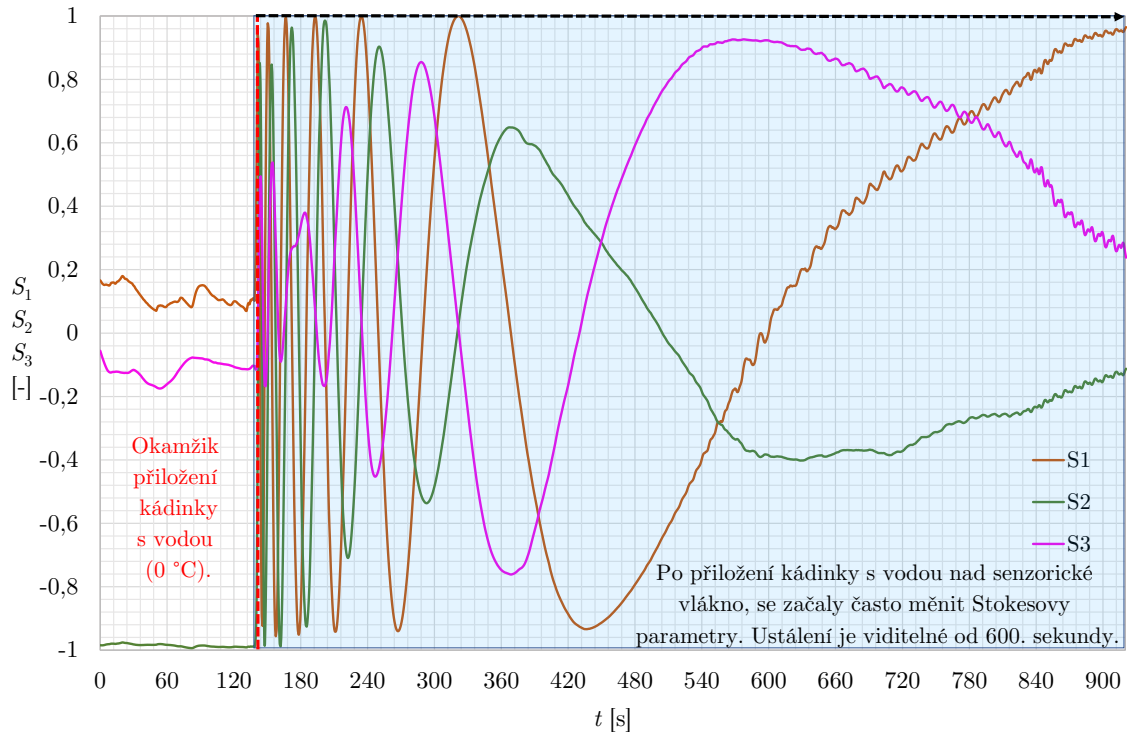
8.1 Reakce senzoru po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C

Byl složen senzor, u kterého sensorické optické vlákno snímalo změnu teploty v okolí. Pro měření byl použit jako zdroj světla média konvertor TPLINK MC220L. Do tohoto média konvertoru byl vložen SFP modul SPS-7140WCIS, který vyzařuje světlo s vlnovou délkou 1550 nm. Za zdrojem bylo použité optické vlákno dlouhé 1 m a připojené do FC spojky. Před sensorickým optickým vláknem bylo použité optické vlákno dlouhé 0,5 m se sekundární ochranou. Před a po sensorické části byly umístěny FC spojky. Sensorická část se skládá z vlákna zachovávajícího polarizaci, který je uložen v polystyrenové krabičce. Polystyrenové krabička má otvor, ve kterém je vidět 8 smyček sensorického vlákna. Nad tímto vláknem na polystyrenové krabičce je uložena plastová fólie. Poté při měření byla kádinka s vodou umístěna na polystyrenové krabičce, aby prostředek kádinky mířil na smyčky sensorického vlákna. Po sensorickém vlákně je použito znovu optické vlákno s délkou 1 m a s FC spojkou. Pro snímání změny polarizace na vlákně je použit polarimetr TXP 5004 od firmy Thorlabs. Na konci zapojení je umístěn notebook, na kterém je nainstalovaný software polarimetru (bez něj by polarimetr nefungoval) a zároveň jsou na počítači ukládány výsledky měření v excelu. Měření trvalo 920 s a v čase 140 s byla nad sensorické optické vlákno přiložena kádinka s vodou s teplotou 0 °C (kádinka s vodou zůstala do konce měření). Teplota v místnosti byla po celou dobu měření 24 °C. Operační proud při měření byl nastaven na 30 mA. Schéma zapojení lze vidět na obrázku (8.1).



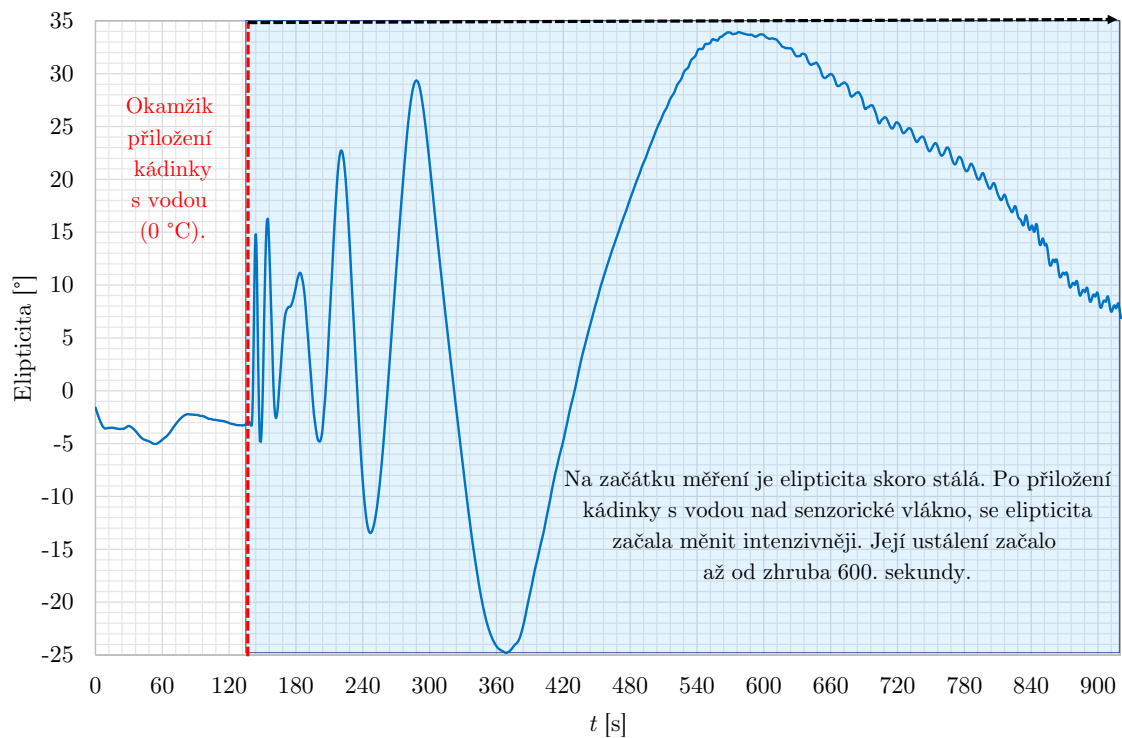
Obr. 8.1: Schéma zapojení měření reakce senzoru bez dlouhé trasy po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C.

Prvními výsledky měření jsou Stokesovy parametry (8.2), které zobrazují typ polarizace na měřené trase. Na začátku měření převažoval Stokesův parametr S_2 (lineární polarizace s odchylkou 45 °C). Stokesovy parametry S_1 a S_3 byly skoro nulové. Po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C začal senzor reagovat na změnu teploty v prostředí, a proto se začaly velmi intenzivně měnit Stokesovy parametry za krátkou dobu času. Velmi zajímavým jevem je to, že Stokesův parametr S_2 před změnou teploty převládá a polarizace byla lineární s odchylkou 45 °C. Poté se začal Stokesův parametr S_2 po změně teploty zmenšovat do konce měření, ale naopak Stokesovy parametry S_1 a S_3 se začaly zvětšovat do konce měření, tudíž převládá na trase. Z lineární polarizace s odchylkou 45 °C vznikla polarizace eliptická. Do konce měření se poté už polarizace neměnila tak často jako po přiložení kádinky (zhruba 200 s). Lze tedy říci, že senzorické vlákno reaguje velice citlivě na změnu teploty v okolí.

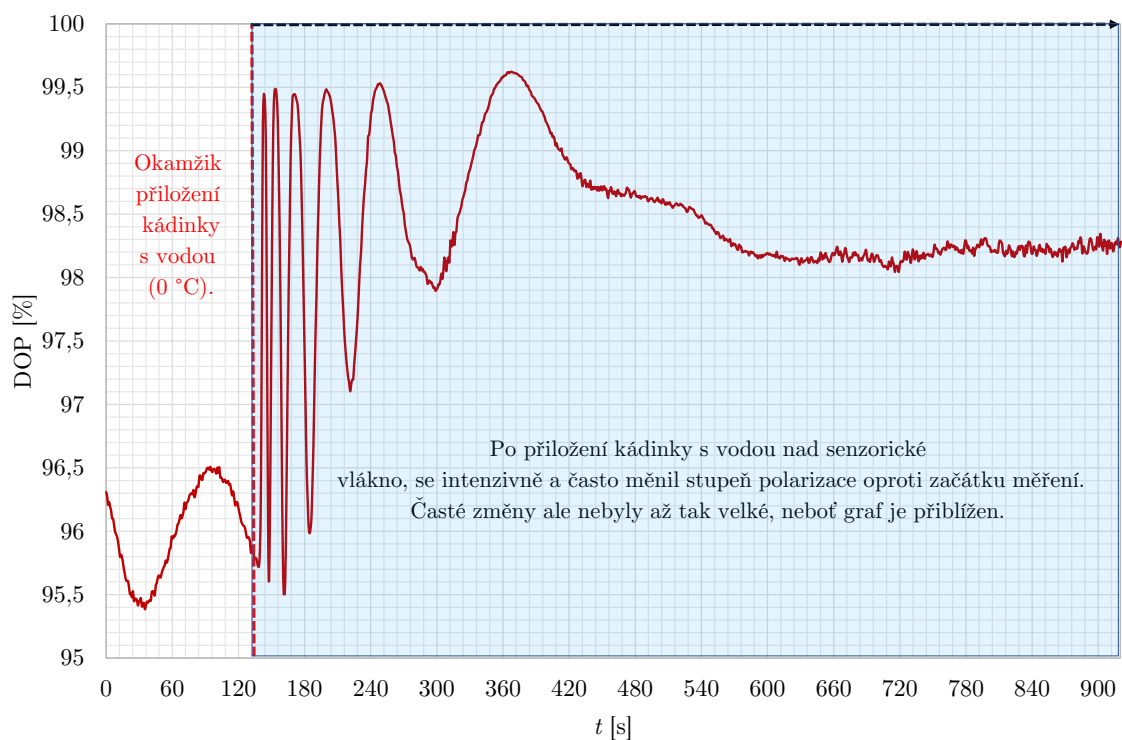


Obr. 8.2: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$).

Graf elipticity (8.3) zase vykazuje, že před přiložením kádinky s vodou byla rovinná polarizace klidná na vlákně. Po přiložení se elipticita měnila z rovinné polarizace na eliptickou. Do konce měření dosáhla elipticita až úhlu 35° . Lze hypoteticky říct, že kdyby měření trvalo delší dobu, tak by se dalo očekávat, že by se změnila polarizace z eliptické na kruhovou. Stupeň polarizace (8.4) byl skoro na 100% po celou dobu měření. Jediná výchylka nastala po přiložení kádinky s vodou, kdy se stupeň polarizace začal opakovaně měnit za krátkou dobu času.



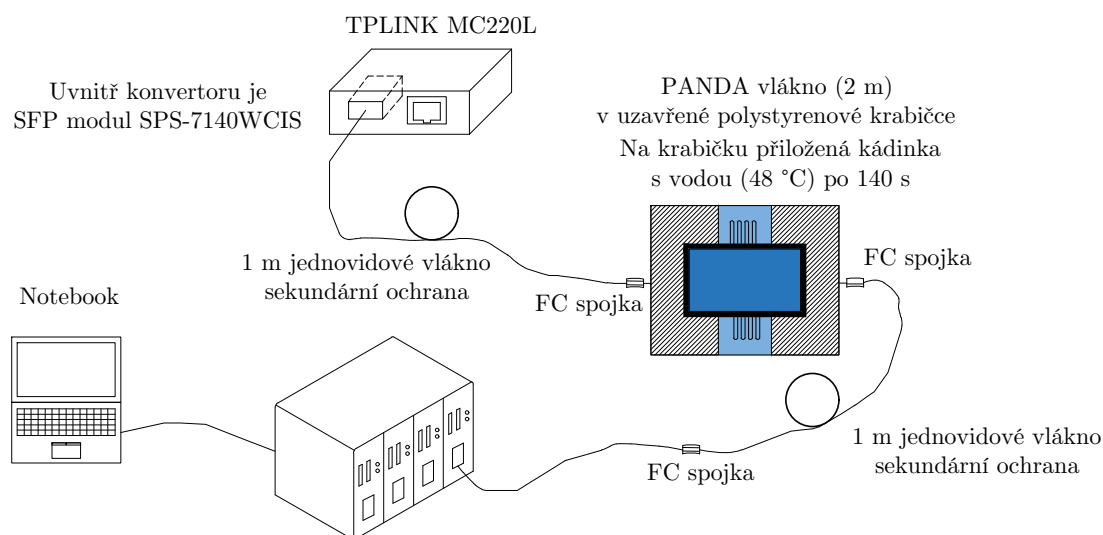
Obr. 8.3: Závislost elipticity na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 0 °C).



Obr. 8.4: Závislost stupně polarizace na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 0 °C).

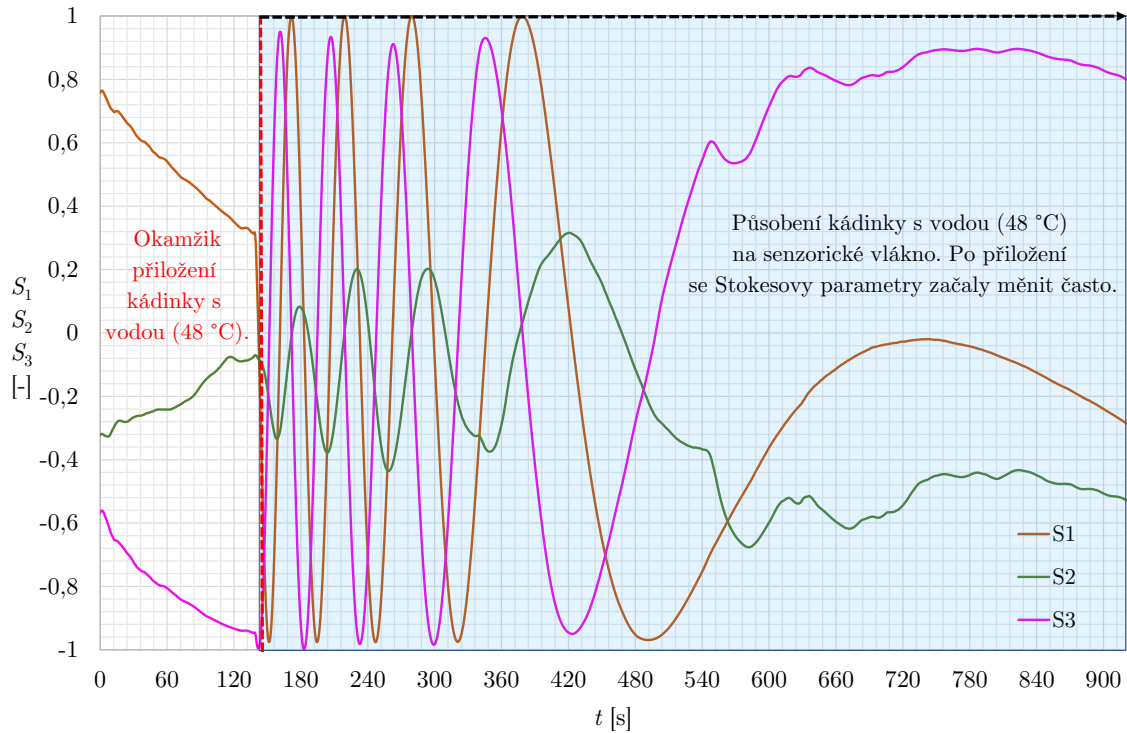
8.2 Reakce senzoru po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C

Schéma zapojení (8.5) je stejné jako v minulé kapitole při reakci senzoru po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C. Zapojení se liší v tom, že byla použita kádinka s vodou s teplotou 48 °C. Měření probíhalo 920 s a ve 140. s byla přiložena kádinka s vodou nad sensorickým optickým vláknem.



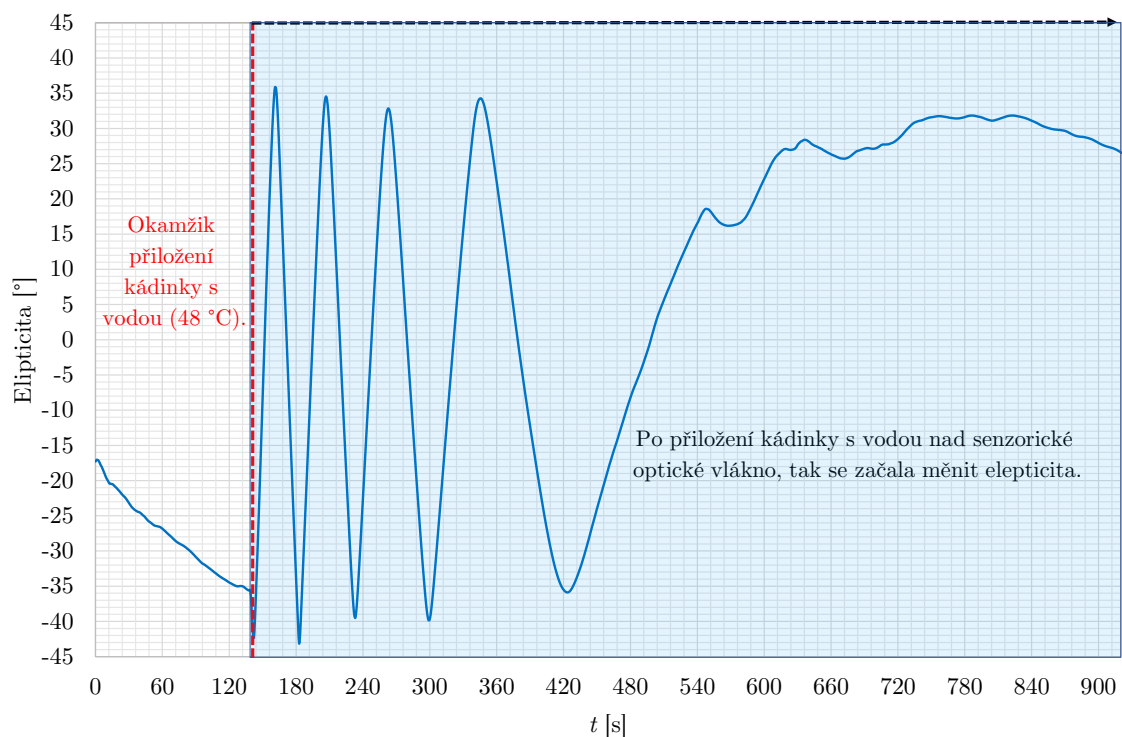
Obr. 8.5: Schéma zapojení měření reakce senzoru bez dlouhé trasy po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C.

U grafu (8.6), kde jsou zobrazeny jednotlivé Stokesovy parametry, lze říci, že ze začátku měření bylo světlo v trase elipticky polarizované. Od začátku měření do 140. s se Stokesovy parametry S_1 a S_2 začaly přibližovat k nule, proto se polarizace začala měnit na kruhovou levotočivou polarizaci. Po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C ve 140. s se začaly Stokesovy parametry intenzivně měnit. Stokesovy parametry S_1 a S_3 kmitaly mezi hodnotami +1 a -1. Stokesův parametr S_2 pouze od hodnoty +0,2 až k -0,4. Ve 480. s se intenzivní změny Stokesových parametrů začaly ustalovat. Z těchto výsledků lze říci, že senzor je velice citlivý na rychlou změnu teploty.

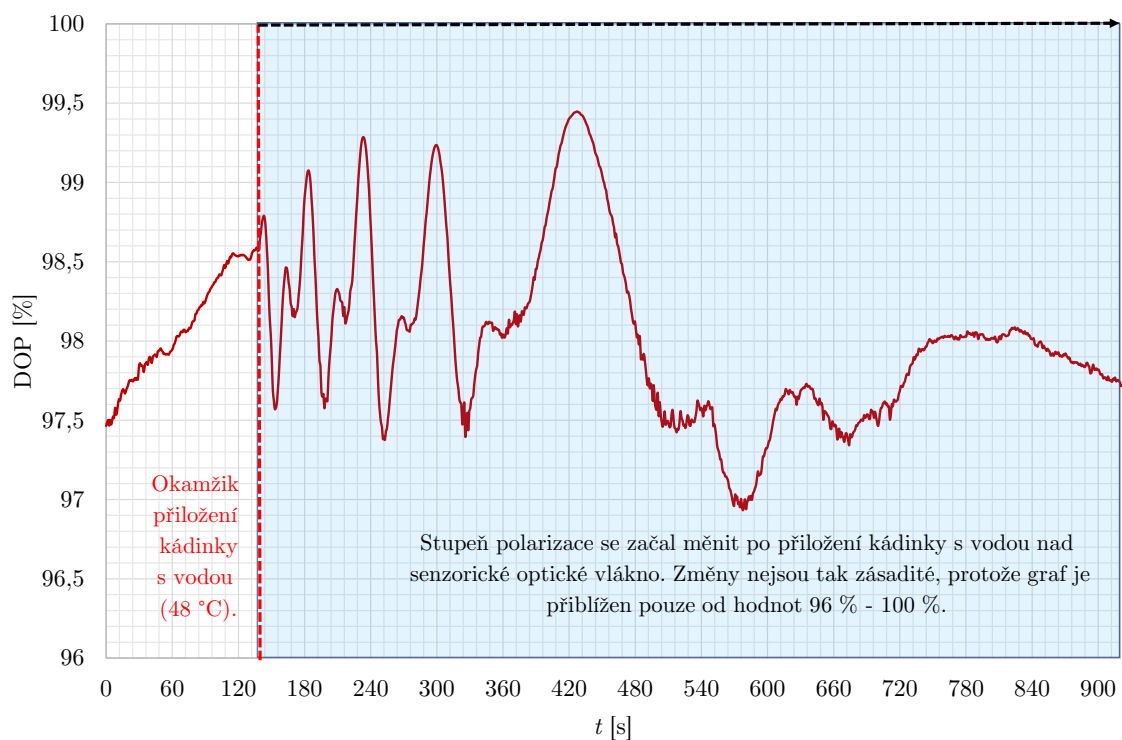


Obr. 8.6: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 48 °C).

Graf elipticity potvrzuje (8.7), že světlo na trase bylo elipticky polarizované. Před přiložením kádinky s vodou na senzorní vlákno se polarizace měnila na kruhově levotočivou. Po přiložení kádinky se měnila velice rychle elipticita od hodnoty +35 až k hodnotě -40. Po určitém čase se elipticita začala měnit méně. Po přiložení kádinky se elipticita ve 220.s měnila velice rychle za krátkou časovou dobu. Poté dalších 560s se elipticita měnila velice pomalu. Graf stupně polarizace (8.8) prozrazuje, že světlo ve vlákne bylo skoro plně polarizované. Po přiložení kádinky stupeň polarizace kolísal (odchylka 4%). Po čase začal být stupeň polarizace stálý. Změna teploty na stupeň polarizace velký vliv nemá.



Obr. 8.7: Závislost elipticity na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 48 °C).



Obr. 8.8: Závislost stupně polarizace na čase u senzoru bez dlouhé trasy (při teplotě 48 °C).

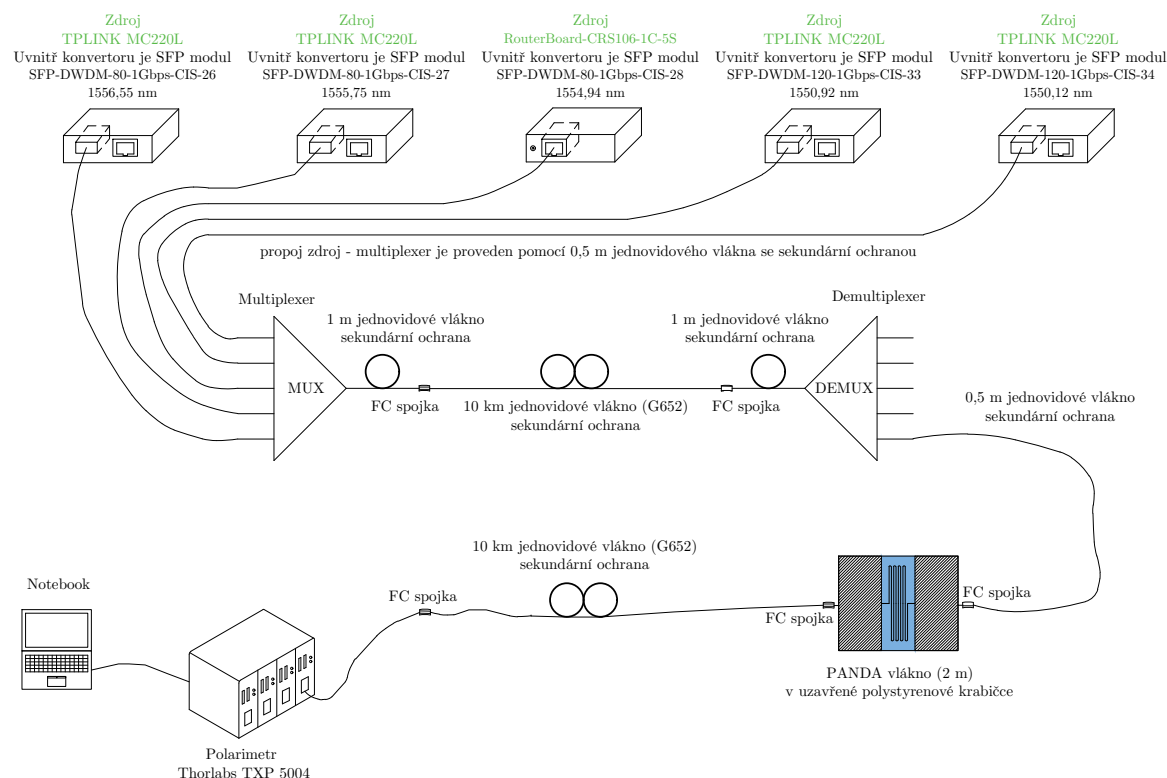
9 Reakce senzoru s dlouhou trasou při využití vlnového multiplexu a při působení vnějšího vlivu

Po pozitivních výsledcích z minulé kapitoly byl vytvořen senzor na podobné bázi s tím rozdílem, že bylo použito pět zdrojů světla. Tyto zdroje světla byly multiplexovány do 10 km vlákna (multiplexer je zde zakomponován z toho důvodu, aby mohl být senzor napájen pomocí dlouhé trasy s použitím stávající vybudované optické trasy). Poté na konci 10 km vlákna byl použit demultiplexer a jeden výstup demultiplexeru se použil pro napájení senzoru. Na sensorickou část působil vnější vliv (teplota okolí, kádinka s vodou 0 °C, 24 °C a 48 °C). Za sensorickou částí byla vložena další trasa 10 km vlákna, která vedla do polarimetru ke zjištění výsledku měření. Měření má nasimulovat napájení senzoru pro dlouhé trasy s použitím stávajících vybudovaných optických tras.

9.1 Reakce senzoru s dlouhou trasou při využití vlnového multiplexu a bez přiložení kádinky s vodou

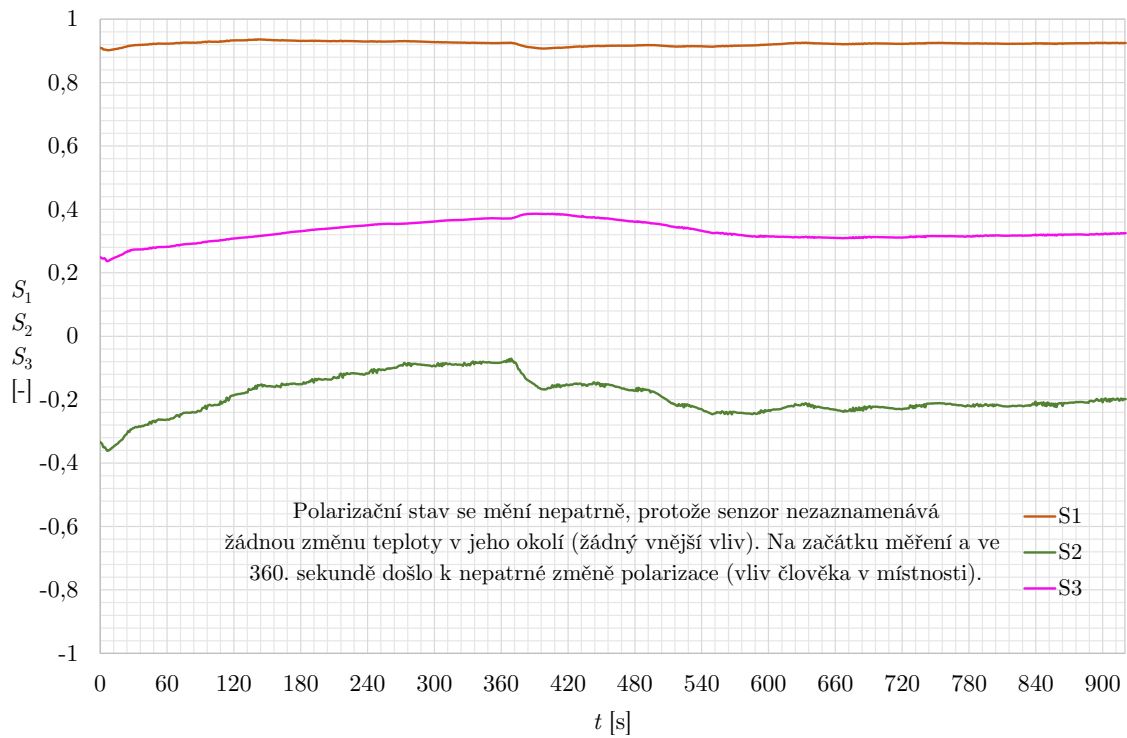
Na začátku schématu zapojení (9.1) bylo použito pět zdrojů světla. Použily se čtyři zdroje od TPLINK MC220L, do kterých byl vložen SFP modul. Všechny čtyři SFP moduly mají přenosovou rychlost 1 Gbps. Jako poslední zdroj byl použit RouterBoard-CRS106-1C-5S, do kterého byl též vložen SFP modul s přenosovou rychlostí 1 Gbps. Všechny tyto moduly jsou pro typ přenosu DWDM. Každý zdroj vyzařoval světlo s odlišnou vlnovou délkou. Z těchto zdrojů vedlo jednovidové vlákno se sekundární ochranou s délkou 0,5 m do vstupu multiplexeru. Zdroje světla byla multiplexována do trasy, která byla tvořena na začátku a na konci 1 m jednovidovým optickým vláknem se sekundární ochranou a mezi těmito krátkými vlákny bylo vloženo 10 km jednovidové vlákno se sekundární ochranou (dlouhá trasa). Poté byly jednotlivé vlnové délky demultiplexovány. Jeden výstup demultiplexeru posloužil pro napájení sensorické části. Pro napájení senzoru bylo použito světlo ze zdroje TPLINK MC220L s SFP modulem SFP-DWDM-80-1Gbps-CIS-26 a vlnovou délkou 1556,55 nm. Sensorická část se skládá z vlákna zachovávajícího polarizaci (2 m PANDA vlákno), které je uloženo v polystyrenové krabici. Za touto sensorickou částí byla vložena další dlouhá trasa (10 km jednovidové vlákno se sekundární ochranou). Na konci trasy byl vložen polarimetr od firmy Thorlabs (TXP 5004), který posloužil k naměření polarizace ve vlákně. Pro zobrazení výsledků byl polarimetr

připojen do notebooku. Měření trvalo 920 s a teplota v místnosti byla po celou dobu měření 24 °C.

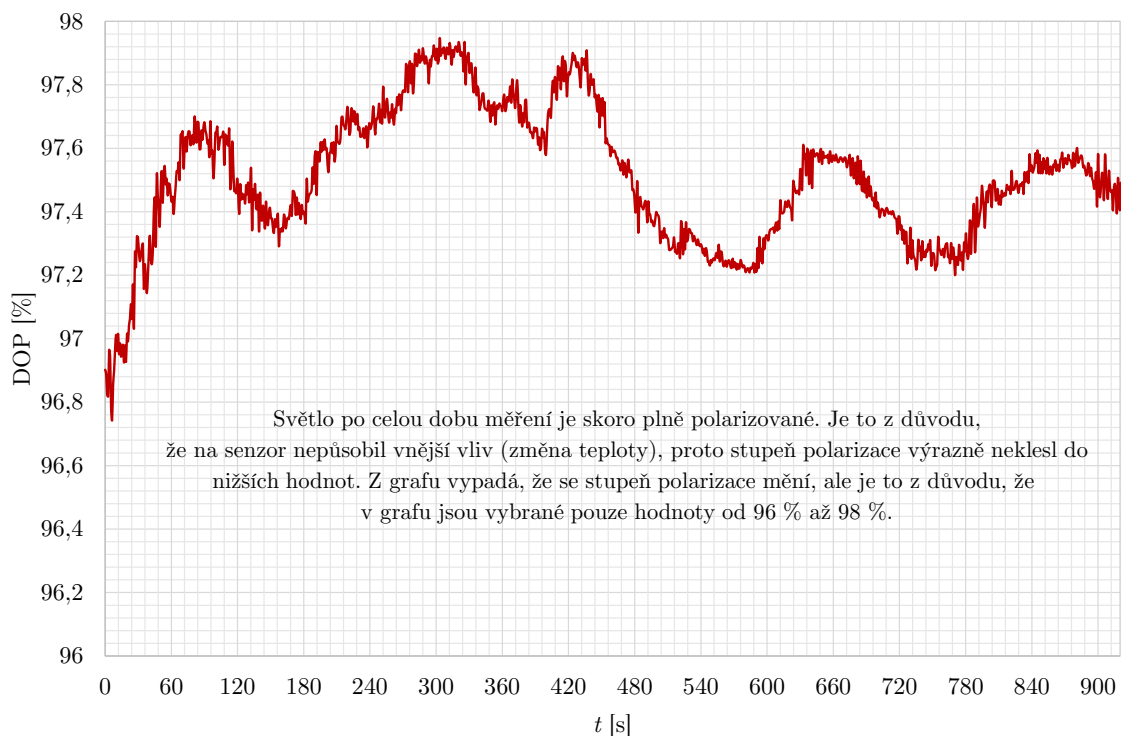


Obr. 9.1: Schéma zapojení měření reakce senzoru s dlouhou trasou bez přiložení kádinky s vodou.

Výsledky Stokesových parametrů (9.2) vykazují, že světlo bylo elipticky polarizované po celou dobu měření. K zásadním změnám polarizačního stavu nedošlo, proto jsou Stokesovy parametry po celou dobu měření téměř konstantní. Na začátku měření a v 360. sekundě došlo k mírným odchylkám (vliv osoby v místnosti – pohyb osoby u senzoru). Stupeň polarizace (9.3) byl vysoký po celou dobu měření (stupeň polarizace se pohyboval mezi hodnotami 96,8 % až 98 %). Lze říci, že i stupeň polarizace se měnil při měření velice pomalu (v řádech 2 %). Graf tuto skutečnost zkresluje, protože je oříznut na hodnoty od 96 % až 98 %. Výsledky vykazují skutečnost, že když na vlákno nepůsobí vnější vliv, jsou polarizace a stupeň polarizace stálé. Toto měření ověřuje, že lze použít DWDM technologii pro napájení senzoru, aniž by došlo k chybě měření.



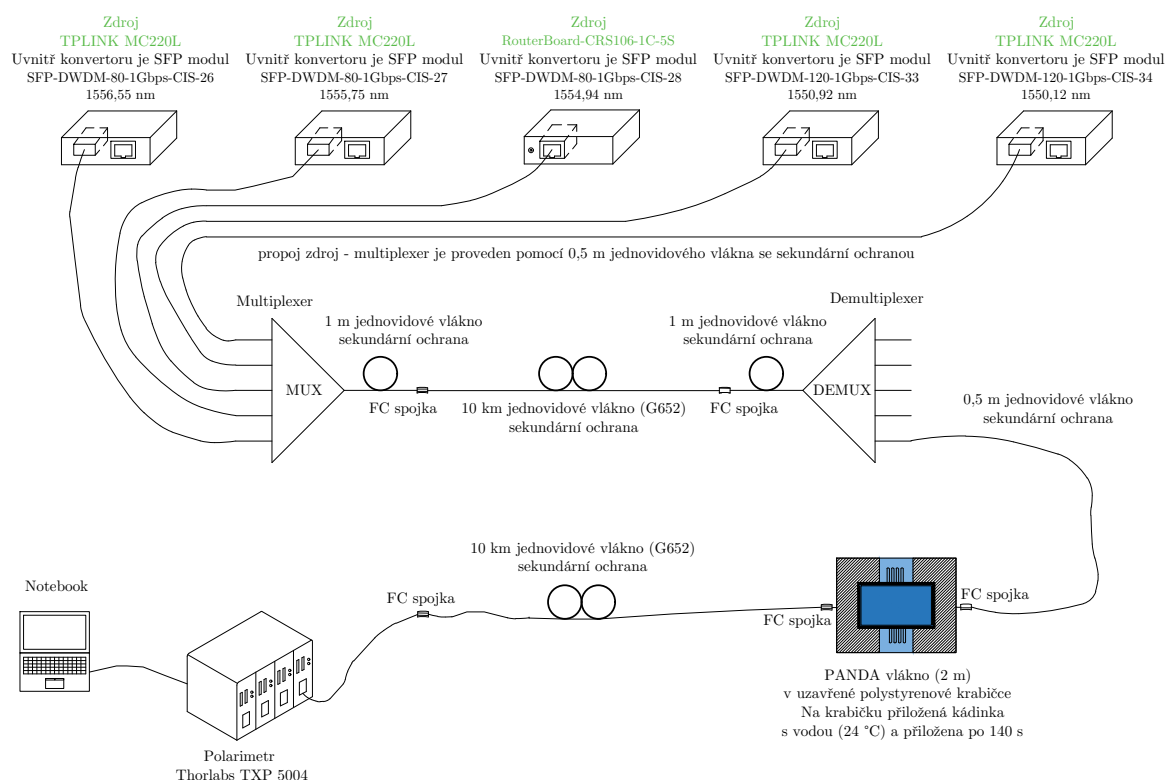
Obr. 9.2: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie a měření trvajícím 15 minut.



Obr. 9.3: Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie a měření trvajícím 15 minut.

9.2 Reakce senzoru s dlouhou trasou při využití vlnového multiplexu a po přiložení kádinky s vodou s teplotou 24 °C

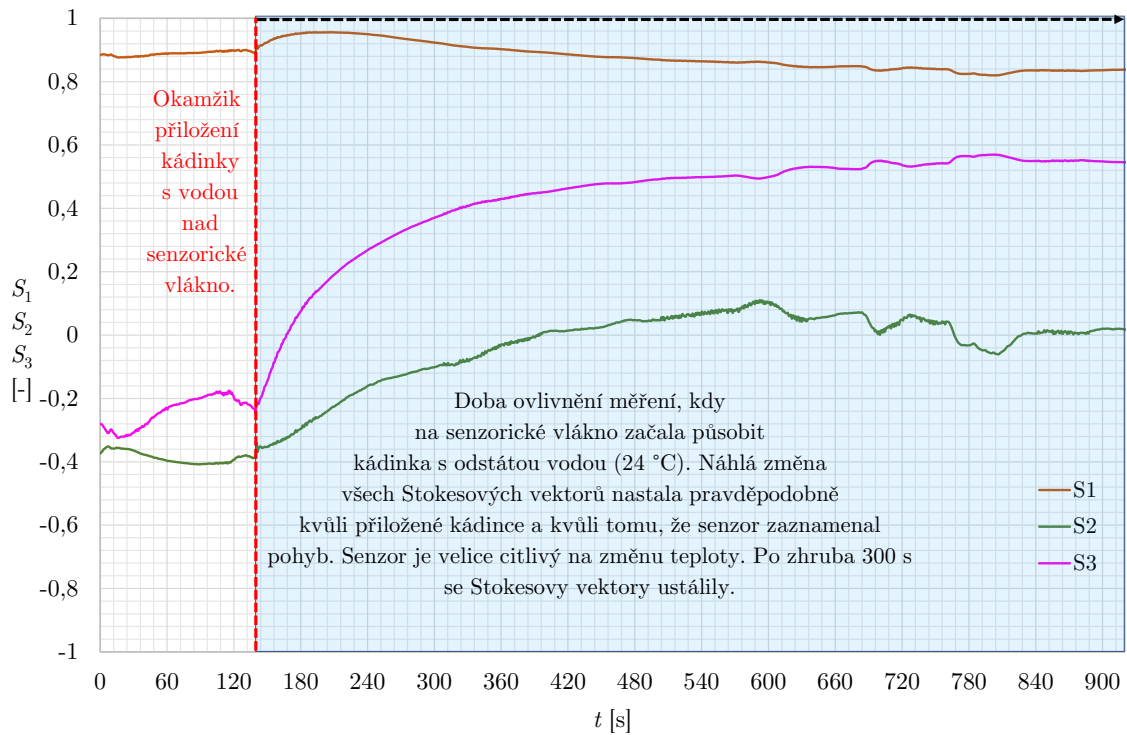
V tomto měření byla oproti minulému měření přiložena kádinka s vodou (teplota 24 °C) nad sensorické optické vlákno ve 140. sekundě. Měření stále trvalo 920 sekund. Schéma zapojení se kromě sensorické části nezměnilo. Teplota v místnosti je stálá (24 °C).



Obr. 9.4: Schéma zapojení měření reakce senzoru s dlouhou trasou po přiložení kádinky s vodou s teplotou 24 °C.

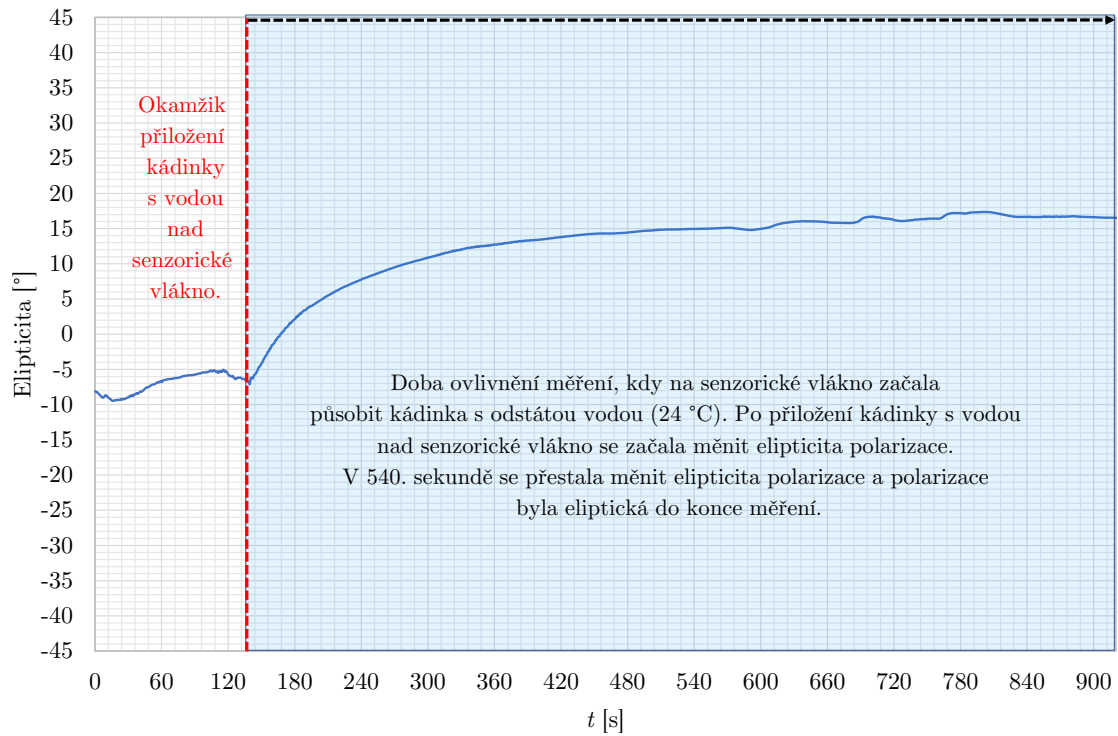
Stokesovy parametry (9.5) na začátku měření byly téměř stálé. V prvních sekundách měření je mírná změna Stokesových parametrů S_1 a S_2 kvůli tomu, že bylo spuštěno měření na notebooku a osoba v místnosti si šla sednout (sensorické vlákno je velice citlivé a tuto změnu zaznamenalo). Poté další změna Stokesových parametrů nastala ve 120. sekundě, protože osoba musela vzít kádinku s vodou a položit ji nad sensorické vlákno (ve 140. sekundě). Tyhle pohyby v místnosti sensorické vlákno zaznamenalo, proto se měnila polarizace. Po přiložení kádinky s vodou se začal pomalu měnit stav polarizace (Stokesovy parametry se měnily). Do konce měření byla

polarizace stálá (krom 700. sekundy, kdy se začala měnit polarizace – pravděpodobně nečekaný pohyb osoby v místnosti).



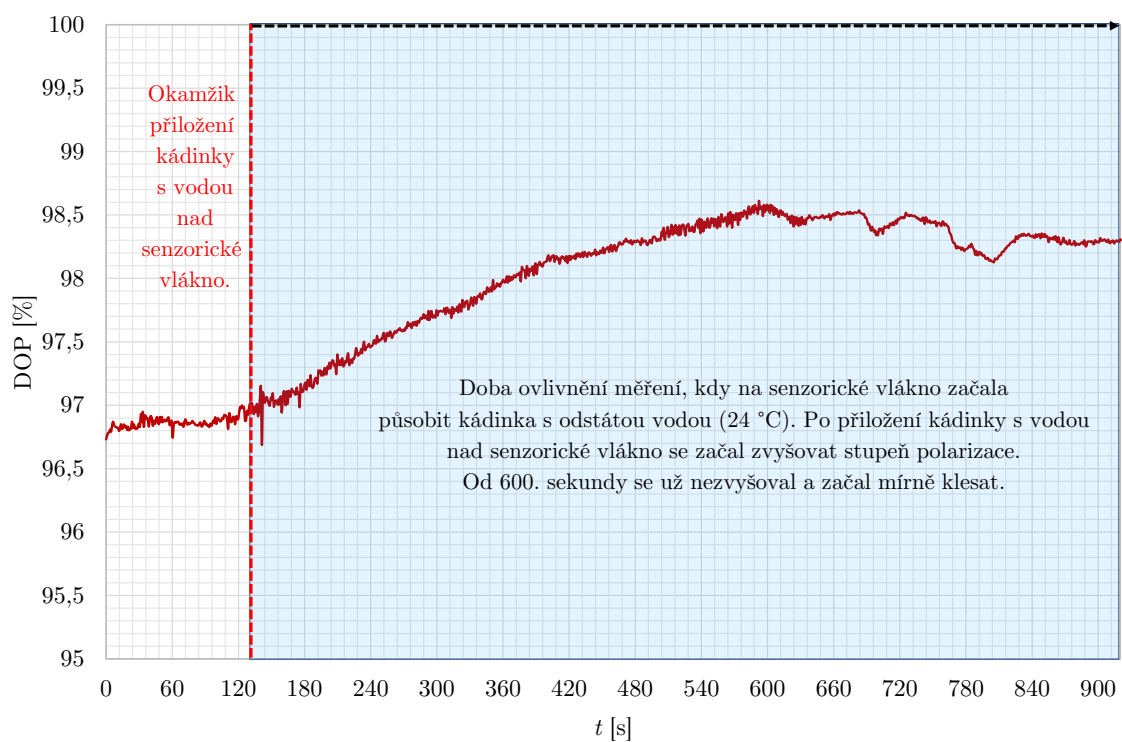
Obr. 9.5: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 24 °C a měření trvajícím 15 minut.

Z grafu elipticity (9.6) lze vyvodit, že průběh elipticity je identický jak pro Stokesovy parametry (stejně změny ve stejných časech, které byly popsány v horním odstavci). Po celou dobu měření byla polarizace eliptická.



Obr. 9.6: Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 24 °C a měření trvajícím 15 minut.

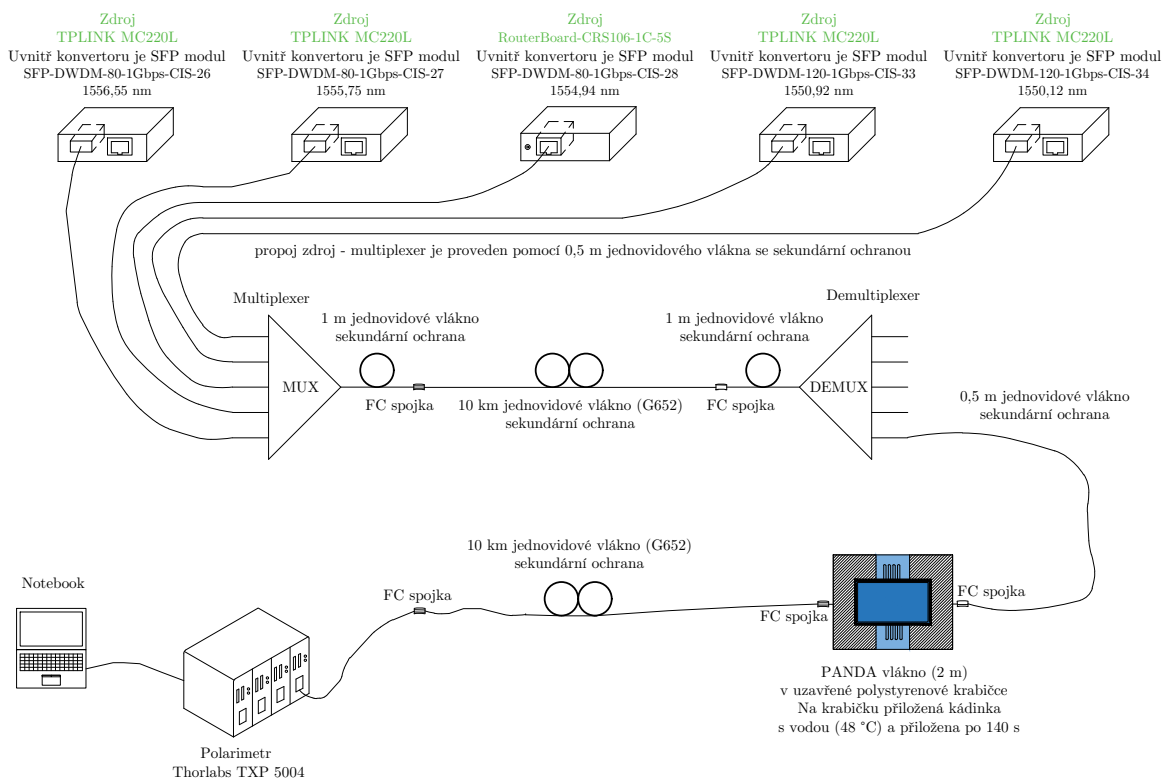
Hodnoty stupně polarizace (9.7) byly v rozmezí 96,5%–98,5%. Po přiložení kádinky s vodou nad senzorigké optické vlákno, se začal stupeň polarizace zvyšovat až do maximální hodnoty 98,5%. V 700. sekundě se také měnil stupeň polarizace (v desetinné odchylce) kvůli nečekanému pohybu osoby v místnosti. Stupeň polarizace se ale měnil velice pomalu a dá se říct, že byl skoro stálý. Kdyby graf nebyl pouze vybraném rozmezí, tak by průběh vypadal pořád konstantní).



Obr. 9.7: Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 24 °C a měření trvajícím 15 minut.

9.3 Reakce senzoru s dlouhou trasou při využití vlnového multiplexu a po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C

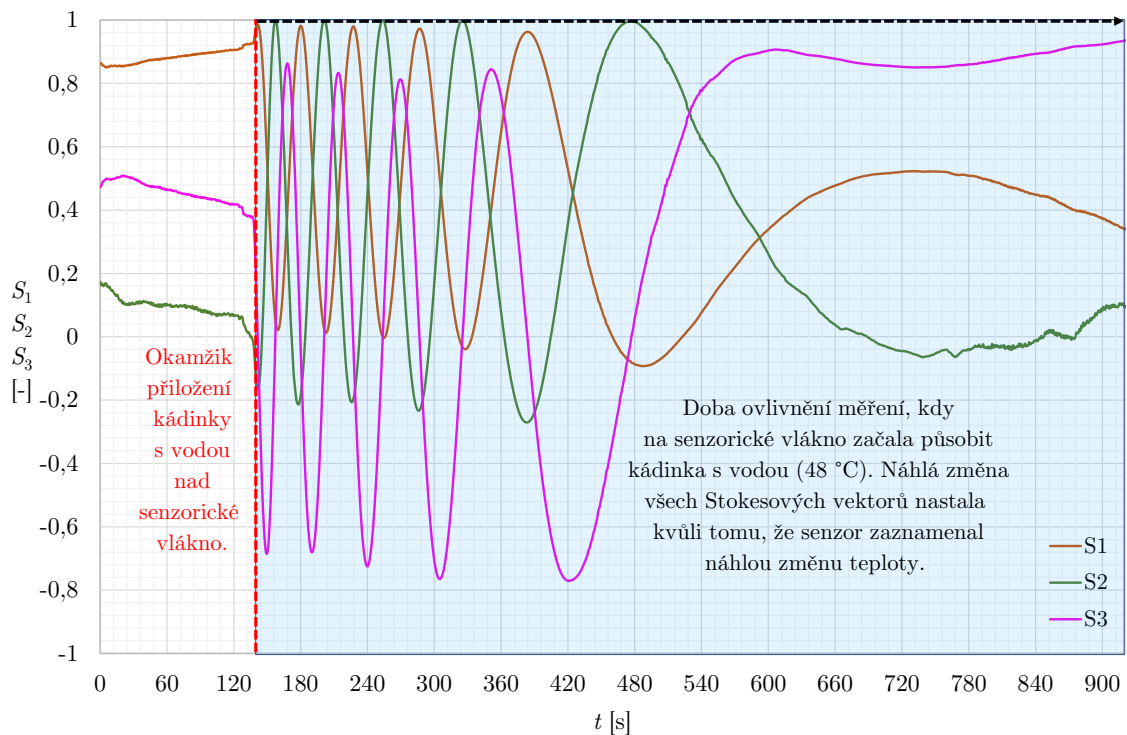
Zapojení pracoviště zůstává stejné, pouze se měření liší v tom, že na senzoričké optické vlákno je přiložena kádinka s teplou vodou (48 °C). Interval měření zůstává stejný (920 sekund) a teplota v místnosti je 24 °C.



Obr. 9.8: Schéma zapojení měření reakce senzoru s dlouhou trasou po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C.

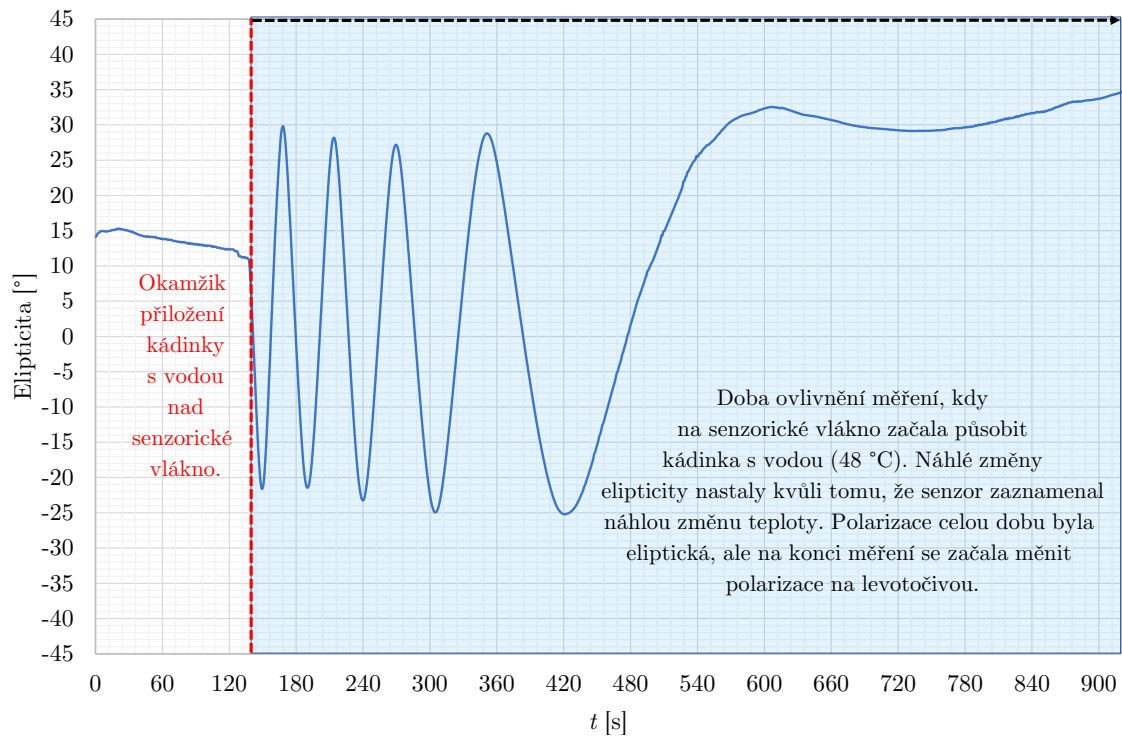
Stokesovy parametry (9.9) se na začátku měření měnily velice pomalu, neboť na senzor nepůsobil žádný vnější vliv. Po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C se ihned začaly měnit Stokesovy parametry často. Velikost změny Stokesových parametrů byl pro S_1 v rozmezí od hodnoty +1 až 0, S_2 +1 až -0,2 a S_3 +0,84 až -0,68). Stokesovy parametry se začaly stabilizovat kolem 600. sekundy. Důvodem stabilizace parametrů je to, že po přiložení kádinky s vodou se začaly minimálně měnit geometrické parametry vlákna. Tyto minimální změny zaznamenalo i světlo při šíření (polarizace). Po určitém časovém intervalu se polarizace přizpůsobila geometrické změně vlákna, tím pádem už se Stokesovy parametry měnily pomalu do

konce měření.

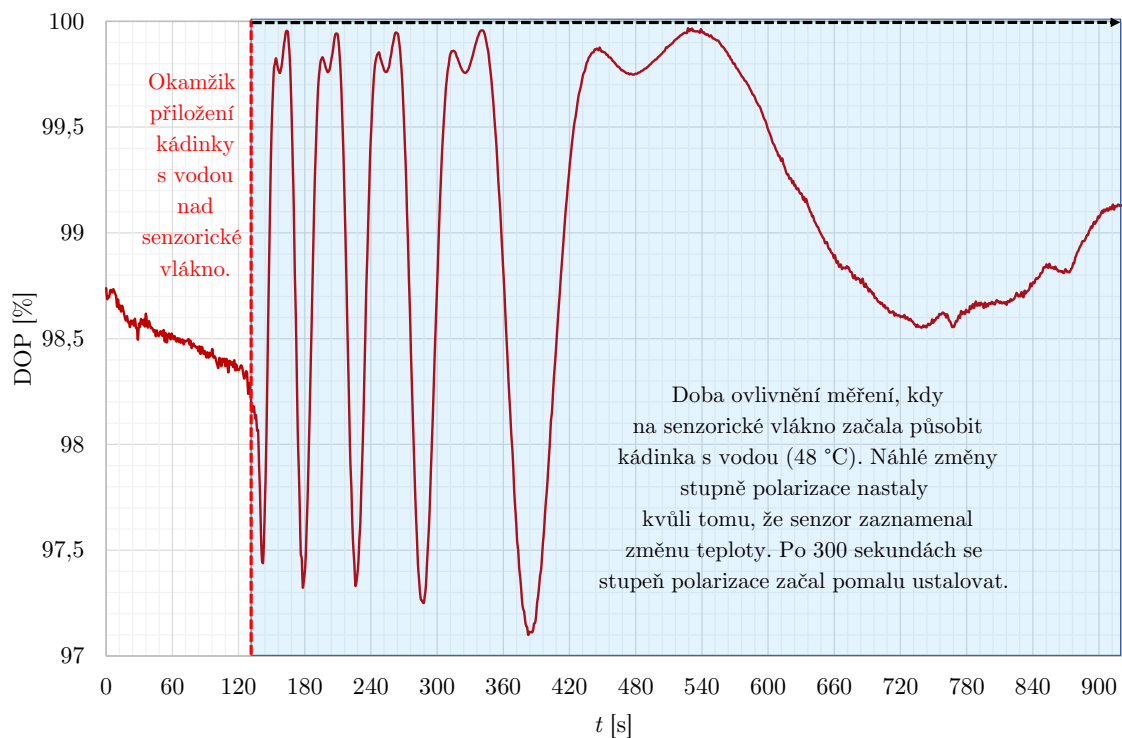


Obr. 9.9: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 48 °C a měření trvajícím 15 minut.

Graf elipticity (9.10) má stejný průběh jako Stokesovy parametry. Na začátku měření je elipticita klidná a mění se velice pomalu. Po přiložení kádinky s vodou se elipticita začne často měnit od hodnoty +30 až -25. Po určité době se elipticita ustálí a mění se velice pomalu. Světlo bylo po celou dobu měření elipticky polarizované. Stupeň polarizace (9.11) měl také stejný průběh. Po přiložení kádinky s vodou nad sensorické vlákno se stupeň polarizace měnil v rozsahu 2,5%. Maximální vrcholy změn dosahovaly i 100% (světlo plně polarizované). Je potřeba dodat, že v nezmenšeném grafu by stupeň polarizace vypadal jako stálý.



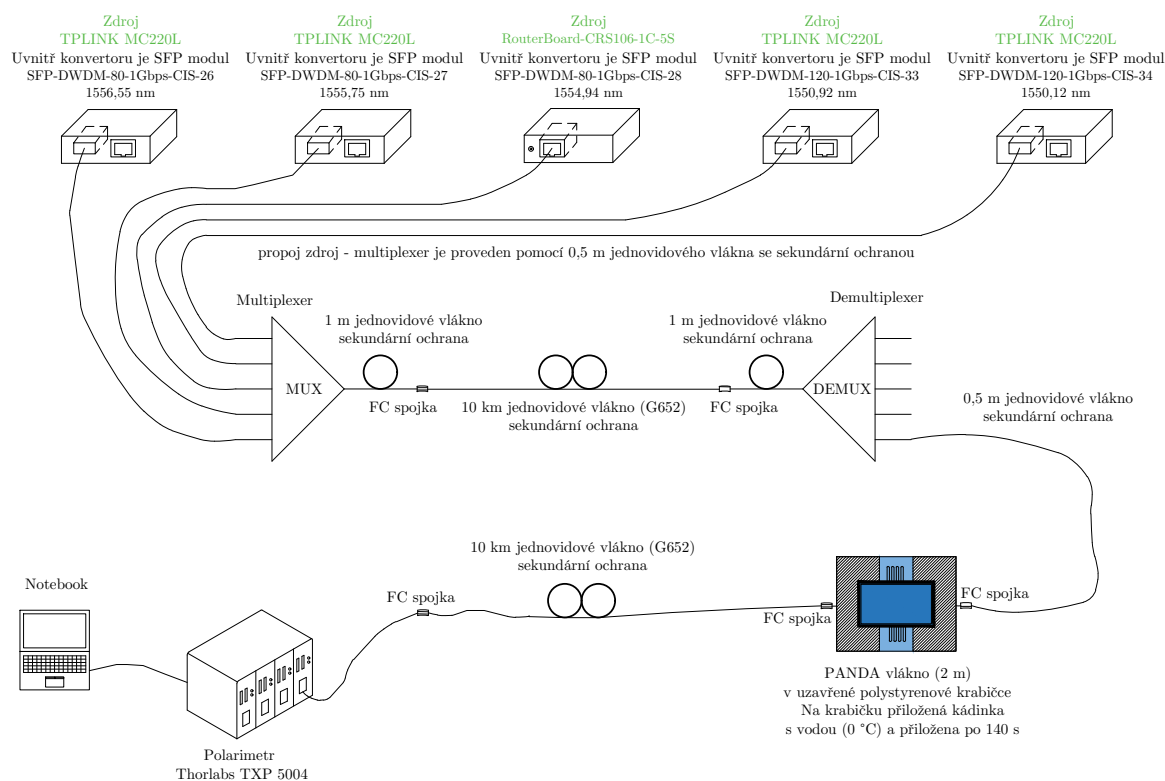
Obr. 9.10: Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 48 °C a měření trvajícím 15 minut.



Obr. 9.11: Závislost elipticity na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 48 °C a měření trvajícím 15 minut.

9.4 Reakce senzoru s dlouhou trasou při využití vlnového multiplexu a po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C

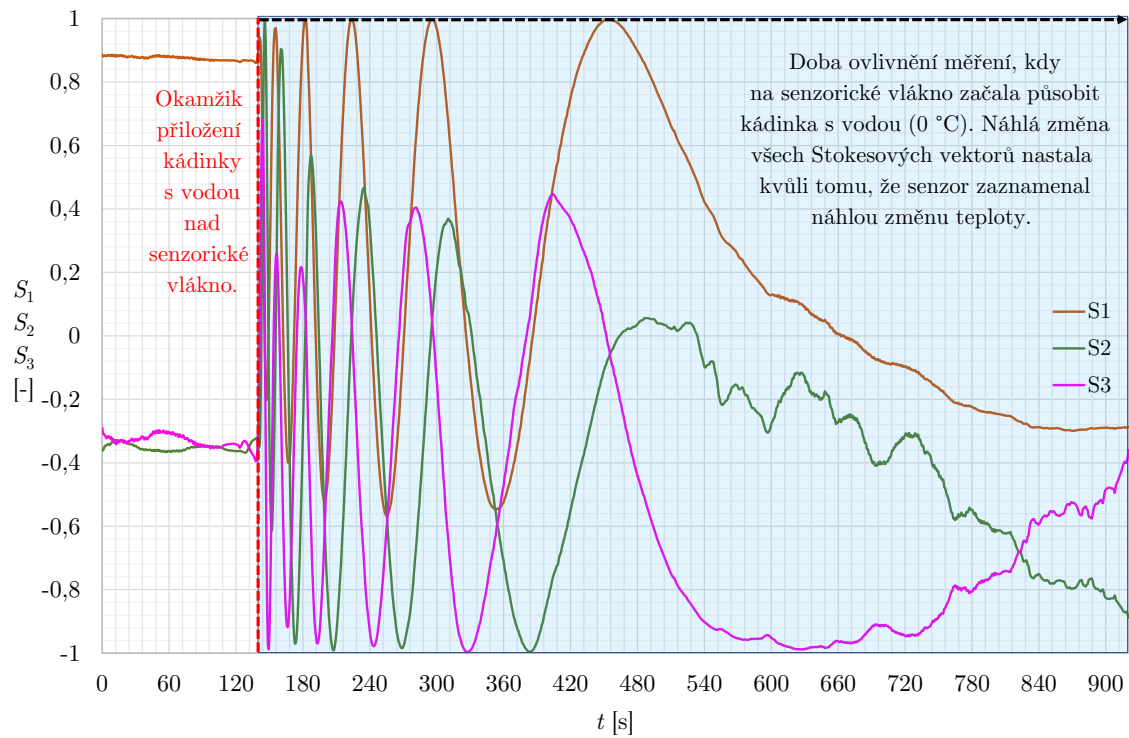
V posledním měření této kapitoly zůstalo zapojení stejné, pouze se nad senzoričké optické vlákno položila kádinka se studenou vodou (0 °C). Měření trvalo 920 s, teplota v místnosti byla 24 °C.



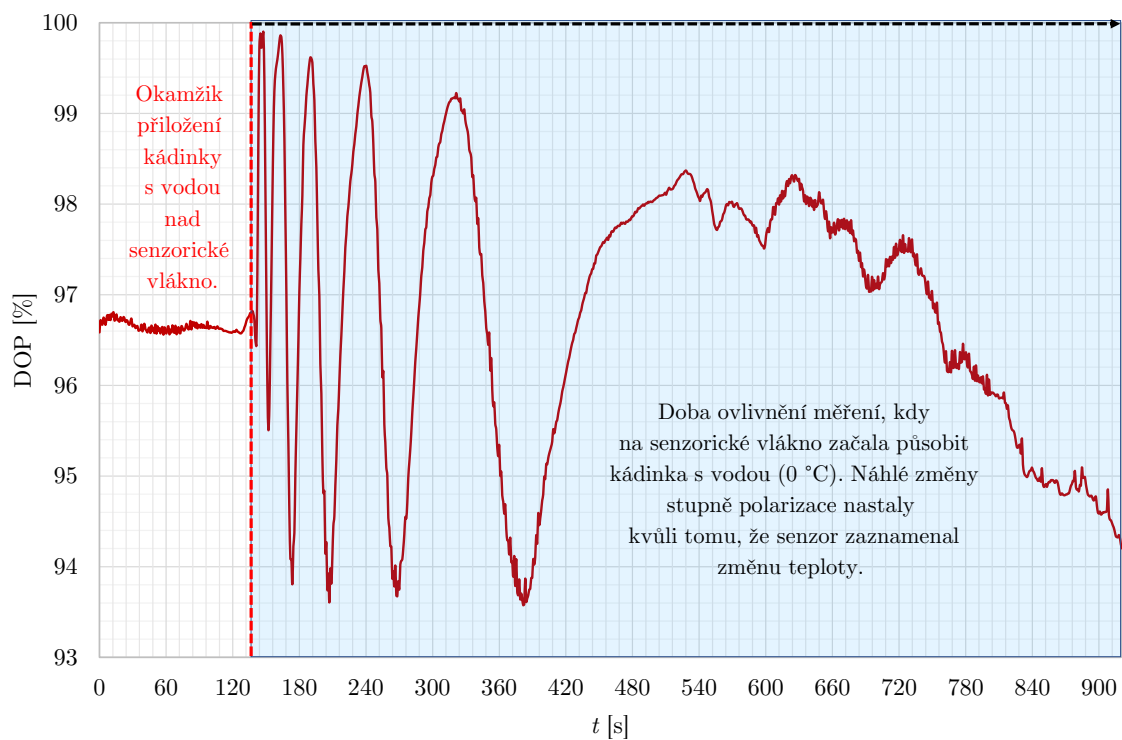
Obr. 9.12: Schéma zapojení měření reakce senzoru s dlouhou trasou po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C.

Stokesovy parametry (9.13) byly na začátku měření stálé (popřípadě se měnily pomalu v čase). Po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C, se začaly opakovaně měnit všechny Stokesovy parametry. Velikost změn byla pro všechny tři parametry podobná (rozdíl mezi dvěma body změny byla vždy hodnota kolem 1,4). Po určité době se parametry začaly ustalovat (i když S_2 se pořád v čase měnil). Důvod je podobný jako v minulé kapitole, kdy se začaly měnit geometrické vlastnosti vlákna, proto se měnila i polarizace. V grafu v minulé kapitole (9.9) byly v polovině měření ustáleny Stokesovy parametry lépe než v tomto měření. Důvodem může být to, že se geometrické vlastnosti mění se zimou více i déle, než s teplem. Elipticita měla

podobný průběh jako Stokesovy parametry (a také jako v minulém měření), proto není zde popsána. Stupeň polarizace (9.11) byl na začátku měření stálý a po vložení kádinky s vodou nad sensorické vlákno se začal měnit stupeň polarizace v rozmezí od 100 % až k 94 %. Na konci měření stupeň polarizace nebyl stálý a začal klesat k hodnotě menší, než která byla na začátku. Kádinka se studenou vodou měla horší vliv na stupeň polarizace než kádinka s teplou vodou. Maximální vrcholy změn dosahovaly znovu 100 % (světlo plně polarizované).



Obr. 9.13: Závislost Stokesova parametru S_1 , S_2 a S_3 na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 0 °C a měření trvajícím 15 minut.



Obr. 9.14: Závislost stupně polarizace na čase při trase dlouhé 20 km s použitím DWDM technologie, přiložené kádinky s vodou s teplotou 0 °C a měření trvajícím 15 minut.

10 Diskuze

Praktická část byla rozdělena do pěti dílčích měření. Každé dílčí měření mělo zjistit, zda polarizační vlastnosti světla na konci dlouhé trasy by byly dále použitelné pro senzorické účely.

V první části byla použita dlouhá trasa s jednovidovým optickým vláknem dlouhým 10,125 km a 40 km (bez senzorické části). Laserová dioda LPS-1550-FC od firmy Thorlabs se použila jako zdroj světla. Měření probíhala v místnosti v laboratoři. Pro tato dlouhá jednovidová vlákna se provedla měření dlouhá 24 hodin nebo 60 hodin. Z výsledků bylo patrné, že stupeň polarizace při přenosu byl pro oba typy měření nízký (pro vlákno dlouhé 10,125 km nebyl stupeň polarizace vyšší než 26 %). Oproti tomu stupeň polarizace byl pro vlákno dlouhé 40 km vyšší. Nejvyšší hodnota byla buď na začátku měření nebo na konci měření. Tyto nejvyšší hodnoty ale trvaly krátce. Pokud se bude počítat jen s dlouhotrvajícími výsledky, tak stupeň polarizace byl do 65 % u vlákna dlouhého 40 km. U obou délek vláken při měření nastávaly doby ovlivnění měření, kdy se začaly často měnit Stokesovy parametry a též stupeň polarizace. Bylo vydedukováno, že když svítilo přes okno slunce do místnosti, tak se zvyšovala teplota v místnosti a začaly se měnit Stokesovy parametry a stupeň polarizace. Hypotéza těchto změn je taková, že při změně teploty v místnosti se mění geometrické parametry ve vlákne (minimálně). Tyto minimální změny mají vliv na šíření polarizace vláknem (začnou se náhle měnit Stokesovy parametry, stupeň polarizace, elipticita a další parametry). Změny polarizace se ustálí až po určité době, kdy se vlákno přizpůsobí teplotě (vyrovnají se teploty). Pro zamezení těchto změn polarizace byla na zkoušku použita laserová dioda s užší spektrální charakteristikou (laserová dioda od firmy Thorlabs má vyšší spektrální charakteristiku). Spektrální charakteristika nemá pro krátké trasy vliv na měření, ale pro dlouhé trasy ano. Proto se na další měření použil média konvertor TPLINK MC220L, do kterého byl vložen SFP modul SPS-7140WCIS. Pro zkušební měření s tímto zdrojem světla bylo použité jednovidové vlákno dlouhé 40 km a měření trvalo 65 hodin. Výsledky stupně polarizace byly oproti dřívějším výsledkům velmi pozitivní. Stupeň polarizace dosahoval hodnot v rozmezí 95 % až 100 %. Při dobách ovlivnění měření nastaly změny Stokesových parametrů a stupně polarizace, ale změna byla v menší míře než s laserovou diodou od firmy Thorlabs. Proto lze potvrdit, že pro napájení senzorických systémů je vhodné použít laserovou diodu s nejnižší možnou spektrální charakteristikou.

Z výsledků první části bylo zjištěno, že jako zdroj světla pro napájení senzorických systémů je potřeba použít laserovou diodu s užší spektrální charakteristikou. Dále bylo potřeba zjistit, jakým způsobem by mělo být uloženo jednovidové optické

vlákno, aby polarizační vlastnosti byly dále použitelné pro sensorické účely. Z první části vyplynulo, že teplota má vliv na změnu geometrie ve vlákne, tím pádem i na polarizační vlastnosti. Byla proto testována stávající dlouhá trasa uložena pokládkou v zemi. Tato trasa začíná na fakultě vojenských technologií na Šumavské ulici (Univerzita obrany), dále přes fakultu informatiky na Botanické ulici (Masarykova univerzita), přes fakultu podnikatelskou na Lipové ulici (Masarykova univerzita) až na fakultu lékařskou na ulici Kamenice v Bohunicích (Masarykova univerzita). Použil se SFP modul, který byl umístěný v média konvertoru TPLINK MC220L. Stávající trasa je dlouhá 48,3 km a měření trvalo jednu hodinu. Výsledky nevykazují žádné náhlé změny polarizace při přenosu. Po celou dobu přenosu byly Stokesovy parametry stálé. Světlo bylo po celou dobu přenosu téměř plně polarizované. Stupeň polarizace dosahoval hodnot 93,8 % až 94,3 %. Lze říci, že je vhodné použít pro napájení sensorických systémů dlouhou trasu uloženou v zemi, protože v zemi je stálá teplota a geometrické vlastnosti vlákna se nemění.

V dalším měření byla použita další stávající trasa, která je v první části uložena pokládkou v zemi a v druhé části je trasa uložena na střechách budov. Trasa vede od fakulty informatiky na ulici Botanické (Masarykova univerzita) přes rektorát Masarykovy univerzity na Žerotínově náměstí až po Komerční banku na Náměstí Svobody. Délka trasy je 6,8 km a měření trvalo dvě hodiny. Byla použita laserová dioda od firmy Thorlabs (LPS-1550-FC). Problémem v tomto měření je stálá změna polarizace ve vlákne. Stokesovy parametry a také elipticita se neustále mění v čase. Je to z toho důvodu, že na vlákno uložené na střechách budov naráží vítr. Tím pádem vlákno vibruje. Uložení vlákna na závěsu není dobré pro napájení sensorických systémů kvůli falešným poplachům. Na vlákno nesmí působit žádná vibrace (vnější vlivy, které vibrují s vláknem).

Bylo potřeba zkonstruovat sensorickou část, která bude zaznamenávat vnější vliv. Na sensorickou část působil vnější vliv (kádinka s vodou 0 °C a 48 °C). Nebyla zde použita žádná trasa, bylo potřeba otestovat pouze senzitivitu sensorického systému. Měření trvalo 920 sekund. Prvních 140 sekund nepůsobil na sensorické optické vlákno žádný vnější vliv, a proto se polarizace výrazně neměnila. Po přiložení kádinky s vodou 0 °C nebo 48 °C, se začala často měnit polarizace v čase (Stokesovy parametry začaly kmitat od +1 do -1). Po zhruba 400 sekundách se Stokesovy parametry začaly ustalovat. Toto ustálení pravděpodobně nastalo dle předchozí hypotézy, kdy při změně teploty okolo sensorického optického vlákna se začala měnit geometrie optického vlákna. Proto se polarizace začala měnit se změnou geometrie vlákna. Po určitém čase se geometrie vlákna přestala měnit, a tím pádem i polarizace. Stupeň polarizace byl od hodnot 95,5 % až 99,5 %. Tento vysoký stupeň polarizace je zapříčiněn tím, že byla použita laserová dioda s užší spektrální charakteristikou. Ale jak

bylo řečeno, pro krátké trasy by spektrální charakteristika neměla mít vliv, proto by pravděpodobně byl stupeň polarizace vysoký i s Thorlabs laserovou diodou. Po přiložení kádinky s vodou na sensorické optické vlákno, se začal měnit i stupeň polarizace, který se též po určité době ustálil. Sensor zaznamenával změnu teploty, proto lze tvrdit, že zkonstruovaný sensor funguje dle předpokladu.

Poslední dílčí částí je zkonstruování senzoru, který bude napájen dlouho trasou. Z dřívějších měření byly vybrány důležité informace, které se použily pro zkonstruování tohoto senzoru. Jako zdroje světla se použilo pět SFP modulů s úzkou spektrální charakteristikou. Jak bylo řečeno, nejlepší možné uložení vlákna pro správný chod senzoru je pokládkou v zemi. Idea tohoto měření je taková, aby se nemusela dělat nová pokládka v zemi, která je velice drahá, použije se tedy stávající optické vlákno, do kterého bude multiplexován zdroj světla a na konci této trasy světlo bude demultiplexováno a použito pro napájení sensorického systému. Pro toto měření bylo použito jednovidové vlákno s délkou 10 km, do kterého bylo multiplexováno pět zdrojů světla a za sensorickou částí další jednovidové vlákno s 10 km délkou. Toto měření mohlo proběhnout pouze v laboratorním uspořádání, ale oproti dřívějším měřením bylo měření provedeno v místnosti se stálou teplotou bez oken (zamezení oteplení místnosti vlivem slunce). Proběhly čtyři typy měření. Na sensorické vlákno nepůsobil vnější vliv nebo na sensorické optické vlákno působila kádinka s vodou 0 °C, 24 °C nebo 48 °C. Když na sensorické optické vlákno nepůsobil žádný vnější vliv, tak se polarizace neměnila. Stokesovy parametry byly skoro stálé. Nepatrná odchylka mohla nastat mírným pohybem osoby v místnosti. Proto lze tvrdit, že sensorické optické vlákno je velmi citlivé. Stupeň polarizace byl také celou dobu vysoký a dosahoval hodnot od 96,8 % až 98 %. Pokud na sensorické optické vlákno působila kádinka s vodou 24 °C (teplota vody jako teplota v místnosti), tak se pouze změnila polarizace při přiložení kádinky s vodou nad sensorické optické vlákno. To nastalo kvůli tomu, že pohyby osoby v místnosti zaznamenal sensor už před tím, než na něj byla položena kádinka s vodou. Po položení se polarizace pomalu měnila, ale ne výrazným způsobem. To stejné jde říci i o stupni polarizace. Po přiložení kádinky s vodou 0 °C nebo 48 °C, se začaly často měnit Stokesovy parametry, ale také i stupeň polarizace. Po přiložení kádinky s vodou se polarizace ustalovala v čase. Reagování senzoru bylo úplně stejné jak při pokusu měření bez žádné trasy. Lze tvrdit, že polarizace se mění častěji s teplotou 0 °C než 48 °C.

Finální měření tedy potvrdilo, že lze napájet polarizační sensor dlouho trasou (jednovidovým optickým vláknem), aby polarizační vlastnosti světla na konci trasy byly dále použitelné pro sensorické účely. Pro správné fungování senzoru (bez falešných poplachů) je doporučeno, aby zdroj světla měl co nejužší spektrální charakteristiku. Také je potřeba, aby dlouhá trasa byla uložena pokládkou v zemi, kde je

stálá teplota a nejsou vyvolány žádné vibrace na vlákno. Lze tedy použít i stávající trasu, do které bude světlo multiplexováno. Je to výhodnější z finančních důvodů, ale také proto, že lze multiplexovat a demultiplexovat více zdrojů světla. Tím pádem lze napájet více sensorických systémů pomocí jednoho optického vlákna.

V měření této problematiky by se dalo pokračovat. Byly dosaženy zajímavé výsledky, které by bylo dobré v budoucnu dále rozvinout. Mohl by se k senzoru přidat spektrální analyzátor, který by zjišťoval spektrum světla ve vlákně. Pomocí tohoto spektra by se zjistilo, jakou intenzitu světla mají multiplexované zdroje světla. Mohl by se poté vytvořit program, který by vyhodnocoval jak změnu Stokesových parametrů, tak i například intenzitu světla vlnové délky. Pomocí toho by program poté porovnal, zda jde o vyhlášení poplachu a nebo jde o falešný poplach, který by se nemusel nahlásit. Je potřeba i říci, že na výsledcích měření se vůbec nic nemění a diplomová práce splnila dosažených cílů.

Takový zkonstruovaný senzor lze použít pro zabezpečovací účely nebo pro elektrickou požární signalizaci (v místnostech, kde nelze použít elektrická zařízení). Dále může být tento senzor použit v postýlkách novorozeňat a snímalo by to jejich dýchání (vibrace) nebo teplotu. Popřípadě se dá použít takový senzor v místnostech, kde musí být stálá teplota (sklad potravin nebo léků). I ve vojenských aplikacích by se mohl použít takový senzor (do muničních skladů, které jsou označovány jako místnosti nebezpečí výbuchu). V těchto místnostech jsou pouze skladovány munice a ojedinele někdo vstupuje do této místnosti.

Závěr

Pro dlouhé trasy bylo použito jednovidové vlákno s délkou 10,125 km a s délkou 40 km. Pro obě délky vláken bylo navrženo laboratorní zapojení bez sensorické části. Z naměřených výsledků z polarimetru a po jejich analýze bylo zjištěno, že při měření, kdy svítilo slunce do místnosti a teplota v místnosti se zvyšovala, se začal měnit polarizační stav v jednovidovém vlákně. Tudíž by mohlo docházet k falešným poplachům, ještě před tím, než by sensorická část zaznamenala změnu v okolí místnosti. Z výsledků bylo patrné, že při těchto změnách nehrála roli délka vlákna. Pro obě délky vláken byl stupeň polarizace nízký. Proto se změnilo zapojení pracoviště a místo laserové diody se použil SFP modul s užší spektrální charakteristikou. Výsledky s SFP modulem zaznamenaly menší změny polarizace ve vlákně při zvyšování teploty v místnosti. Také stupeň polarizace se udržoval na vysoké hodnotě. Proto bylo zjištěno, že pro napájení sensorů na dlouhé vzdálenosti je lepší použít SFP modul, který je spolehlivější. Problémy, které nastávaly s laserovou diodou s širší spektrální charakteristikou, by bylo možné odstranit pomocí lineárního polarizátoru. To by znamenalo, že na konci dlouhé trasy by byl umístěn lineární polarizátor, který by odstranil změny polarizačního stavu v jednovidovém vlákně. Tímto řešením by se zvýšila cena celého sensorického systému. Také je dán důraz na co nejmenší počet komponentů v celém sensorickém systému.

Dále v praktické části se využila stávající jednovidová vlákna, která jsou vybudována pokládkou v zemi, popřípadě jsou zavěšeny na střechách budovy. Pro jednovidové optické vlákno uložené pouze pokládkou v zemi nebyly naměřeny žádné změny polarizačního stavu. U tohoto měření byl použit SFP modul s užší spektrální charakteristikou. Z těchto analyzovaných dat lze tento modul použít pro jednovidové optické vlákno uložené v zemi. U jednovidového optického vlákna, které bylo zavěšeno na střechách budov, bylo patrné, že při nárazu větru na vlákno se měnil polarizační stav ve vlákně a polarizační vlastnosti světla na konci trasy by nebyly použitelné pro sensorické účely. Protože větrné podmínky jsou docela časté, tak by tento způsob trasy pro sensorické účely nebylo možné použít skrz teplotní změny a mechanické vibrace. Bylo by nutné odfiltrovat falešné poplachy způsobené komínáním vlákna ve větru vyhodnocovací elektronikou, což je obtížné a neúměrně by to zatěžovalo vyhodnocovací elektroniku.

Protože vybudování nových optických tras je finančně nákladné, je vhodné použít stávající optické trasy. Takový způsob použití stávajících tras je možné například pomocí multiplexeru. Proto byl navrhnut senzor, u kterého bylo použito pět zdrojů světla s úzkou spektrální charakteristikou. Světelný signál ze zdrojů byl multiplexován do dlouhé trasy a poté jeden výstup demultiplexeru se použil pro napájení

senzorické části. Za senzorickou částí se použila další dlouhá trasa. Senzor bez použití vnějšího vlivu nereagoval a polarizace byla stálá. Po přiložení tepelného zdroje s referenční teplotou, tak se změnila pouze polarizace při položení kádinky s vodou nad senzorickou část, protože senzor je velice citlivý a zaznamenává každý pohyb v místnosti (změna teploty). Po přiložení tepelného zdroje reagoval senzor dle předpokladu a zaznamenával náhlou změnu teploty v okolí. Výhodou tohoto systému je kromě finanční stránky i to, že lze napájet pomocí multiplexování více senzorických systémů (například budova, kde je potřeba hlídat pět místností, tak se multiplexuje světlo z pěti zdrojů světla a použije se pro každou místnost jeden zdroj světla).

Aby polarizační vlastnosti světla na konci trasy byly dále použitelné pro senzorické účely, je potřeba využít zdroj světla, který má nízkou spektrální charakteristiku. Takový zdroj zaručuje vysoký stupeň polarizace po celou dobu trasy a také změny polarizačních vlastností světla ve vláknech jsou minimální. Pro zvýšení spolehlivosti je doporučováno použít optické vlákno, které je pokládkou uložené pod zemí, kde je stálá teplota, tím pádem se minimálně mění polarizační vlastnosti. Aby se nemusela vybudovat nová optická trasa, která je velice nákladná, lze multiplexovat světlo do stávající optické trasy. Senzorická část, která by byla umístěna v požadované místnosti, by se měla skládat z vlákna zachovávajícího polarizaci, který citlivě reaguje na změnu teploty v okolí. Takový senzor může být použit například v zabezpečovacích technologiích, vojenských aplikacích, pro elektrickou požární signalizaci, sklad potravin a léků nebo hlídání dechu a teploty novorozeňat.

Literatura

- [1] GHATAK Ajoy, THYAGARAJAN Krishna. *An Intoduction to Fiber Optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. ISBN 0-521-57785-3.
- [2] CRISP John, ELLIOTT Barry. *Introduction to Fiber Optics*. 3rd. ed. Oxford: Newnes, c2005. ISBN 9780750667562.
- [3] OLIVIERO Andrew, WOODWARD Bill. *Cabling: The Complete Guide to Copper and Fiber-Optic Networking*. 5th edition. Canada: John Wiley, c2014. ISBN 978-1-118-80732-3.
- [4] FILKA Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. 2. roz. vyd. Brno: Centa, c2017. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [5] KROHN David, MACDOUGALL Trevor, MENDEZ Alexis. *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications*. 4rd ed. Bellingham: SPIE PRESS, c2014. ISBN 978-1-6284-1180-5.
- [6] YI Shizhuo, RUFFIN Paul, YU T. S. Francis. *Fiber Optic Sensors*. 2rd edition. Florida: Taylor & Francis Group, c2008. ISBN 978-1-4200-5365-4.
- [7] MENDEZ Alexis, MORSE F. Theodore. *Specialty Optical Fibers Handbook*. Cambridge: Academic Press, c2007. ISBN 9780123694065.
- [8] KAMINOW Ivan, LI Tingye, WILLNER Alan. *Optical Fiber Telecommunications VA: Components and Subsystems*. 5th ed. Amsterdam: Academic Press, c2008. ISBN 978-0-12-374171-4.
- [9] CHIPMAN Russel, LAM Wai-Sze Tiffany, YOUNG Garam. *Polarized Light and Optical Systems*. 1rd ed. Boca Raton: CRC Press, c2019. ISBN 9781498700566.
- [10] GOLDSTEIN H. Dennis *Polarized Light*. 3th ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1439830406.
- [11] COLLETT Edward. *Polarized Light in Fiber Optics*. 1th ed. New Jersey: Polawave Group, c2003. ISBN 0-9677167-1-3.
- [12] COLLETT Edward. *Field Guide to Polarization*. 1th ed. Bellingham: SPIE Press, c2005. ISBN 0-8194-5868-6.
- [13] RAJAN Ginu. *OPTICAL FIBER SENSORS: Advanced Techniques and Applications*. Florida: Taylor & Francis Group, c2015. ISBN 978-1-4822-2829-8.

- [14] HIGUERA Jose Miguel Lopez, ed. *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*. Chichester: JOHN WILEY, c2002. ISBN 0-471-82053-9.
- [15] KYSELAK Martin. *Využití polarizačních vlastností světla v sensorových a telekomunikačních systémech*. Brno, 2018. Habilitační práce, Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, Katedra elektrotechniky.
- [16] KYSELAK Martin, MASCHKE Jan, PANASCI Marco, SLAVICEK Karel, DOSTAL Otto, GREAR David, CUCKA Milan, FILKA Miloslav. *Birefringence influence on polarization changes and frequency on optical fiber*, Proc. SPIE 11538, Electro-Optical Remote Sensing XIV, 115380F (20 September 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2573696>
- [17] VELIC Ladislav. *Měření vlastností polarizovaného světla na výstupu optovláknového senzoru*. Brno, 2020, 60 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

B	dvojlom
B_f	propagační konstanta
c	rychlost světla
cm	centimetr
DoP	Degree of Polarization – stupeň polarizace
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing – hustý vlnový multiplex
ELP	eliptická polarizace
E_x	kolmá složka vektoru \mathbf{E} ve směru osy x
E_y	kolmá složka vektoru \mathbf{E} ve směru osy y
FC	optická spojka
Gbps	Gigabit per second – Gigabit za sekundu
h	hodina
km	kilometr
L	vzdálenost
L_b	záznějová délka
LCP	kruhově levotočivá polarizace
LHP	lineární horizontální polarizace
LVP	lineární vertikální polarizace
L+45P	lineární polarizace pod úhlem $+45^\circ$
L-45P	lineární polarizace pod úhlem -45°
mA	miliampér
n_{eff}	rozdíl indexů lomů
n_f	index lomu v rychlé ose (fast)
nm	nanometr

n_s	index lomu v pomalé ose (slow)
n_x	index lomu na ose x
n_y	index lomu na ose y
POF	polymerová optická vlákna
RCP	kruhově pravotočivá polarizace
PANDA	Polarization Maintaining and Absorption Reducing
m	metr
s	sekunda
SFP	Small form-factor pluggable transceiver – modul síťového rozhraní
v_x	rychlost šíření světla na ose x
v_y	rychlost šíření světla na ose y
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry – metoda měření
S	Stokesovy vektory – S_0 , S_1 , S_2 , S_3 a S_4
Ψ	úhel orientace
χ	úhel elipticity
λ	vlnová délka
π	Pi
ω	úhlová frekvence
ε	elipticita