



# 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

## POLARIZACE V OPTICKÉM VLÁKNĚ

POLARIZATION IN OPTICAL FIBER

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Maroš Bilek**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.**

**BRNO 2022**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

**Student:** Maroš Bilek

**ID:** 220883

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Polarizace v optickém vlákně**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem bakalářské práce je teoretický rozbor problematiky šíření paprsku v optickém vlákně. Detailně analyzována bude polarizace světla ve vlákně, vliv působení vnějších událostí (například ohyb, vibrace, teplota) na polarizaci, ale i vliv polarizace na přenášený datový signál. V rámci praktické části práce bude na vybrané trase provedeno měření stavu polarizace v optickém vlákně a rovněž měření polarizační vidové disperze. Na základě měření, bude proveden návrh dvou laboratorních úloh umožňujících pochopení dané problematiky.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] KUMAR, Arun a A. K. GHATAK. Polarization of light with applications in optical fibers. Bellingham: SPIE Press, 2011. Tutorial texts in optical engineering. ISBN 978-0-8194-8215-0.

[2] MENYUK, Curtis R. a Andrea GALTAROSSA. Polarization mode dispersion. New York, N.Y.: Springer, c2005. ISBN 9780387231938.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 31.5.2022

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

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

### **UPOZORNĚNÍ:**

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

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práca sa v teoretickej časti najprv venuje rozboru šírenia svetelného lúča vo vlákne, parametrom svetla a jednotlivým druhom vlákien. Následne je detailne popísaný jav polarizácie, jej stavy, spôsoby znázorňovania a zapisovania. Ďalej je vysvetlená problematika polarizačnej vidovej disperzie (PMD). Opísané sú väzby, diferenčné skupinové oneskorenie a metódy merania PMD. V praktickej časti sú popísané spôsoby a postupy meraní polarizácie a polarizačnej vidovej disperzie. Na meranie PMD bola využitá meracia platforma EXFO FTB-200 vybavená modulom pre meranie PMD/CD. Pre meranie polarizácie bol využitý polarimeter v kombinácii s polarizačným analyzér. V rámci dlhodobých meraní bol v prípade PMD znovu využitý merací prístroj EXFO FTB-200. V prípade meraní polarizácie bola využitá kombinácia polarimeteru a balančného detektoru. Na záver sú zobrazené výsledky krátkodobých aj dlhodobých meraní. Výsledky krátkodobých meraní polarizácie sú zobrazené vo forme Poincarého gule aj polarizačnej elipsy s vypočítaným azimutom a elipticitou. Dlhodobé merania sú vo forme grafov, ktoré zobrazujú zmeny rotácie polarizácie postupom času. Zo zobrazených výsledkov možno konštatovať vplyv rôznych okolitých podmienok na polarizáciu a tým aj na polarizačnú vidovú disperziu.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Vlákno, polarizačná vidová disperzia, PMD, polarizácia, polarizačný stav

## **ABSTRACT**

In the theoretical part of the the bachelor's thesis, the first part is devoted to the analysis of the spread of the light beam in the fiber, the parameters of light and various types of fibers. Subsequently, the phenomenon of polarization, its conditions, methods of depiction and writing are described in detail. Furthermore, the issue of polarization mode dispersion (PMD) is explained. Bindings, differential group delay and PMD measurement methods are described. The practical section of the thesis describes the methods and procedures for measuring polarization and polarization mode dispersion. The EXFO FTB-200 measuring platform was used to measure PMD and was equipped with a module for PMD/CD measurement. A polarimeter in combination with a polarization analyzer was used to measure polarization. As part of the long-term measurements, the EXFO FTB-200 measuring instrument was reused in the case of PMD. In the case of polarization measurements, a combination of polarimeter and balance detector was used. Finally, the results of both short- and long-term measurements are displayed. The results of short-term polarization measurements are shown in the form of both, a Poincaré sphere and a polarizing ellipse with a calculated azimuth and ellipticity. Long-term measurements are in the form of graphs that show changes in polarization rotation rate over time. From the displayed results, the dependency of polarization and therefore PMD on the environmental surroundings is concluded.

## **KEYWORDS**

Fibre, polarization mode dispersion, PMD, polarization, state of polarization



BILEK, Maroš. *Polarizace v optickém vlákne*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 109 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

## Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko autora:** Maroš Bilek  
**VUT ID autora:** 220883  
**Typ práce:** Bakalárska práca  
**Akademický rok:** 2021/22  
**Téma záverečnej práce:** Polarizace v optickém vlákne

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi doc. Ing. Petrovi Münsterovi Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	13
<b>1 Šírenie svetelného lúča v optickom vlákne</b>	<b>14</b>
1.1 Čo je to svetlo . . . . .	14
1.2 Rýchlosť šírenia svetla, index lomu, vlnová dĺžka, útlm . . . . .	14
1.3 Opticke vlákna . . . . .	16
1.3.1 Jednovidové vlákna . . . . .	18
1.3.2 Vlákna zachovávajúce polarizáciu . . . . .	18
<b>2 Polarizácia</b>	<b>20</b>
2.1 Polarizované svetlo . . . . .	20
2.2 Lineárne polarizované svetlo . . . . .	21
2.3 Kruhovo polarizované svetlo . . . . .	21
2.3.1 Lavotočivé kruhovo polarizované svetlo . . . . .	22
2.3.2 Pravotočivé kruhovo polarizované svetlo . . . . .	22
2.4 Elipticky polarizované svetlo . . . . .	23
2.4.1 Rôzne stavy eliptického polarizovaného svetla . . . . .	24
<b>3 Znázorňovanie polarizácie</b>	<b>27</b>
3.1 Poincarého guľa . . . . .	27
3.1.1 Polarizačné stavy na Poincarého guľi . . . . .	28
3.2 Stokesove parametre . . . . .	28
3.2.1 Stokesov vektor . . . . .	30
3.3 Jonesov vektor . . . . .	32
<b>4 Polarizačná vidová disperzia - PMD</b>	<b>34</b>
4.1 DGD . . . . .	35
4.2 Polarizačné väzby vidov . . . . .	37
4.3 PMD na krátke vzdialenosti - slabá väzba . . . . .	37
4.4 PMD na dlhé vzdialenosti - silná väzba . . . . .	37
4.5 Metódy merania PMD . . . . .	37
4.5.1 Metóda skenovania vlnovej dĺžky . . . . .	39
4.5.2 Polarimetrická metóda . . . . .	40
4.5.3 Metóda skramblovania polarizačných stavov - SSA . . . . .	41
4.5.4 Metóda POTDR . . . . .	42
4.5.5 TINTY - tradičná interferomagnetická metóda . . . . .	44
4.5.6 GINTY - všeobecná interferomagnetická metóda . . . . .	45
4.5.7 Závislosť PMD na vonkajších vplyvoch . . . . .	46



<b>5 Praktická časť</b>	<b>48</b>
5.1 Použité prístroje . . . . .	48
5.1.1 Meranie polarizačnej vidovej disperzie . . . . .	48
5.1.2 Meranie polarizácie . . . . .	49
5.2 Zapojenie meraní . . . . .	51
5.2.1 Zapojenie merania polarizačnej vidovej disperzie . . . . .	51
5.2.2 Zapojenie merania polarizácie . . . . .	51
5.3 Namerané hodnoty PMD . . . . .	53
5.3.1 Namerané hodnoty dlhodobých meraní - PMD . . . . .	55
5.4 Spracovanie nameraných hodnôt polarizácie . . . . .	59
5.4.1 Spracovanie nameraných hodnôt polarizácie – dlhodobé merania	65
5.5 Laboratórne úlohy . . . . .	69
5.5.1 Laboratórna úloha - Meranie polarizácie . . . . .	69
5.5.2 Laboratórna úloha - Meranie polarizačnej vidovej a chroma- tickej disperzie . . . . .	79
<b>Záver</b>	<b>86</b>
<b>Literatúra</b>	<b>88</b>
<b>Zoznam symbolov a skratiek</b>	<b>91</b>
<b>A Laboratórna úloha - Meranie polarizácie</b>	<b>93</b>
<b>B Laboratórna úloha - Meranie PMD</b>	<b>103</b>

# Zoznam obrázkov

1.1	Útlmová charakteristika optického vlákna . . . . .	15
1.2	Zobrazenie optického vlákna . . . . .	16
1.3	Bloková schéma jednoduchej optickej trasy . . . . .	17
1.4	Príklad úplného odrazu vo vlákne . . . . .	17
1.5	Prierez jednojádrovým vláknom . . . . .	18
1.6	Zobrazenie stresových prvkov vnútri optických vlákien . . . . .	19
2.1	Porovnanie vln . . . . .	20
2.2	Príklad ľavotočivej kruhovo polarizovanej vlny . . . . .	22
2.3	Príklad pravotočivej kruhovo polarizovanej vlny . . . . .	23
2.4	Zobrazenie pomocných uhlov a osí pre elipticky polarizovanú vlnu . . . . .	25
2.5	Stavy elipticky a lineárne polarizovanej vlny . . . . .	25
2.6	Elipsa . . . . .	26
3.1	Všeobecné zobrazenie Poincarého gule . . . . .	27
3.2	Zobrazenie deformovaných polarizačných stavov na Poincarého guli . . . . .	28
4.1	Zobrazenie vzniku DGD šírením sa v optickom vlákne . . . . .	34
4.2	DGD závislosť na vlnovej dĺžke . . . . .	36
4.3	Maxwellovo pravdepodobnostné rozdelenie hodnôt DGD . . . . .	36
4.4	Bloková schéma metódy skenovania vlnovej dĺžky . . . . .	40
4.5	Bloková schéma polarimetrickej metódy . . . . .	41
4.6	Koncept SSA . . . . .	42
4.7	Bloková schéma zapojenia POTDR metódou analýzy SOP . . . . .	43
4.8	Bloková schéma zapojenia POTDR metódou analýzy DOP . . . . .	44
4.9	Príklad námeru PMD pri použití metódy TINTY . . . . .	45
4.10	Bloková schéma zapojenia metódy TINTY . . . . .	46
4.11	Bloková schéma zapojenia metódy GINTY . . . . .	47
5.1	Použitý prístroj pre meranie polarizačnej vidovej disperzie . . . . .	49
5.2	Meraná trasa pre PMD aj polarizáciu . . . . .	50
5.3	Použitý prístroj pre meranie polarizácie . . . . .	51
5.4	Trasa Praha-Holešovice – Řež - dlhodobé merania polarizácie . . . . .	52
5.5	Zapojenie merania polarizačnej vidovej disperzie . . . . .	53
5.6	Namerané hodnoty PMD - statické merania . . . . .	54
5.7	Namerané hodnoty PMD - manipulačné merania . . . . .	55
5.8	Trojdnňové dlhodobé meranie PMD . . . . .	56
5.9	Zobrazenie jedného dňa pri trojdnňovom meraní . . . . .	57
5.10	Zobrazenie jedného dňa pri päťdnňovom meraní . . . . .	57
5.11	Päťdnňové dlhodobé meranie PMD . . . . .	58
5.17	Zmeny miery rotácie polarizácie v šachte - celá trasa . . . . .	66

5.18	Zmeny miery rotácie polarizácie v šachte - iba prvá šachta . . . . .	66
5.19	Zmeny miery rotácie polarizácie 29.04.2022 na trase Praha-Holešovice – Řež . . . . .	67
5.20	Teplotný graf pre vizualizáciu teplotnej závislosti polarizácie - 29.04.2022	67
5.21	Zmeny miery rotácie polarizácie 30.04.2022 na trase Praha-Holešovice – Řež . . . . .	68
5.22	Teplotný graf pre vizualizáciu teplotnej závislosti polarizácie - 30.04.2022	68

# Zoznam tabuliek

4.1	Tabuľka limitných hodnôt PMD [3] . . . . .	38
4.2	Tabuľka limitných hodnôt PMD podľa ITU-T [20] . . . . .	38
5.1	Tabuľka nameraných PMD hodnôt statickými meraniami . . . . .	54
5.2	Tabuľka nameraných PMD hodnôt manipulačnými meraniami . . . . .	55

# Úvod

Polarizácia je v dnešnej dobe veľmi dôležitý jav v rámci optických prenosov. Je to jav, ktorý nadobúda rôzne stavy podľa parametrov vlákna a tým dokáže ovplyvňovať samotný optický prenos. Je potrebné uvedomiť si, že polarizácia závisí aj od faktorov, ktoré v praxi nie je možné predvídať a kompenzovať. Práve kvôli polarizácii vzniklo mnoho nových, v optických prenosoch dôležitých zariadení ako polarizéry, retardéry, polarizačné kontroléry, senzory a podobne.

S polarizáciou súvisí aj polarizačná vidová disperzia. V minulosti sa tejto disperzii nevenovala veľmi veľká pozornosť. Je to z toho dôvodu, že táto disperzia sa prejavuje až pri vysokorýchlostných optických prenosoch, ktoré v minulosti nebolo možné dosiahnuť. V modernej dobe, pri dosahovaní prenosových rýchlostí  $>10$  Gb/s sa táto disperzia javí ako značný problém.

V prvej kapitole sú popísané základne všeobecné poznatky z optiky a optických prenosov, konkrétne základne pojmy, vzťahy a optické vlákna. Druhá kapitola sa už venuje javu polarizácie, jej stavom a výpočtom. V kapitole tretej sú popísané niektoré zo spôsobov zobrazenia polarizácie, konkrétne zobrazenia na Poincarého guľi, reprezentácia polarizácie Stokesovými a Jonesovými vektormi.

V štvrtej kapitole je detailne popísaná polarizačná vidová disperzia - PMD. Je to disperzia, ktorá vzniká kvôli náhodným zmenám dvojlomu vo vláknach. Na to aby sme mohli túto disperziu kontrolovať a kompenzovať, je potrebné vedieť ako dvojlom ovplyvňuje polarizáciu v optickom vlákne počas šírenia svetelného lúča. Hodnoty PMD majú stochastický charakter, to znamená že sú nahodné a premenné v čase, do veľkej miery ich ovplyvňujú vonkajšie vplyvy, ako napríklad teplota, tlak, pnutie, vibrácie a poloha. Z toho dôvodu predstavuje táto disperzia problém v praxi. Je potrebné ju merať dlhodobo, sledovať jej zmeny a podľa toho určovať kroky vedúce k jej kompenzácii. V dnešnej dobe potreba merania PMD rastie práve kvôli neustálemu zvyšovaniu nárokov na prenosové rýchlosti v optických prenosoch. Popísané sú meracie metódy TINTY, GINTY, polarimetrická metóda, SSA metóda, metóda skenovania vlnovej dĺžky a reflektometrická metóda POTDR.

V praktickej časti práce sú vykonané krátkodobé merania polarizácie a polarizačnej vidovej disperzie. Na meranie polarizácie je využitý polarimeter a polarizačný analyzér. Meranie hodnôt PMD je vykonané na prístroji značky EXFO, model FTB-200 s modulom na meranie CD/PMD disperzie FTB-5700. Výsledky týchto meraní a ich spracovanie sú uvedené vo forme zobrazenia na Poincarého guľi a polarizačnej elipsy. Dlhodobé merania PMD a polarizácie sú uvedené v rámci samostatných podkapitol s jednoduchým popisom postupu a prezentáciou výsledkov vo forme grafov.

V praktickej časti práce sú navrhnuté dve laboratórne úlohy venované problematike polarizácie a polarizačnej vidovej disperzie.

# 1 Šírenie svetelného lúča v optickom vlákne

## 1.1 Čo je to svetlo

Svetlo je elektromagnetické vlnenie vlnovej dĺžky od 380 nm – 760 nm, pričom väčšej vlnovej dĺžke prislúcha červená farba a menšej modrá farba. Väčšia vlnová dĺžka znamená väčšiu rýchlosť šírenia svetla a nižší index lomu svetla. K rozkladu svetla dochádza napríklad keď zväzok bieleho svetla dopadne na hranu optického prostredia (optický hranol) a rozloží sa na jednotlivé monochromatické zložky, podľa vlnových dĺžok. Kvôli nízkym útlmovým hodnotám sa v optických prenosoch a telekomunikáciách využíva infračervená časť spektra. Platí, že vo vákuu sa elektromagnetické vlny šíria rýchlosťou svetla  $c$ . To približne platí aj pre vzduch, ale v iných prostrediach sa šíria vždy pomalšie [1]. Optické vlákna sú špeciálnymi optickými svetlovodmi. Svetlovod je materiálová štruktúra ktorá, dokáže viesť svetlo v jednej alebo dvoch rovinách pričom zabraňuje jeho expanzii [2].

## 1.2 Rýchlosť šírenia svetla, index lomu, vlnová dĺžka, útlm

### Rýchlosť šírenia svetla

Rýchlosť šírenia svetla je možné určiť pomocou rýchlosti svetla a materiálových konštant prostredia v ktorom sa svetlo šíri - relatívnej permeability a permitivity [1].

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1.1)$$

kde  $\epsilon_r$  je relatívna permitivita a  $\mu_r$  je relatívna permeabilita prostredia v ktorom sa svetlo šíri. Tento vzťah platí pre nevodivé (bezstratové) prostredie.

### Index lomu

Index lomu je pomer rýchlosti prostredia v ktorom sa svetlo šíri a rýchlosti svetla. Závisí od polarizácie, frekvencie, smeru šírenia vlny a nie je konštantný [1].

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2)$$

Pre stratové prostredie je  $n$  komplexné a pre dielektrické prostredia sa dá zjednodušiť na [1]

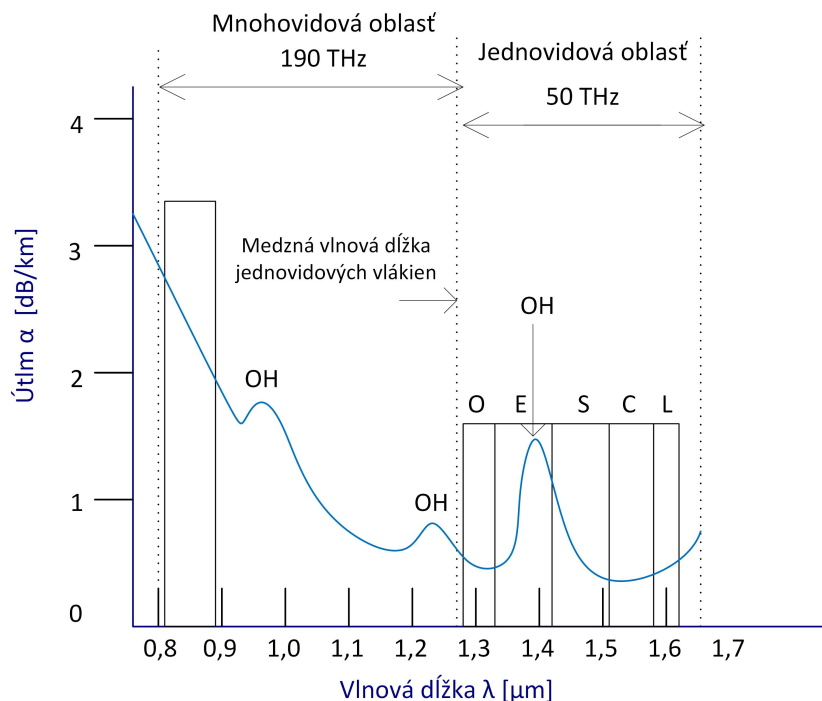
$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1.3)$$

## Vlnová dĺžka

Vlnová dĺžka je vzdialenosť medzi dvoma po sebe nasledujúcimi amplitúdami vlnenia. Oblasť optického žiarenia nízkych frekvencií sa nazýva mikrovlnné žiarenie, oblasť vysokých frekvencií sa nazýva röntgenové žiarenie. Optické žiarenie siaha od 100 nm do 1 mm, delí sa na 3 ultrafialové oblasti, 3 infračervené oblasti a na oblasť viditeľného svetla. Pre optické prenosy sa využíva infračervená oblasť, predovšetkým oblasť vlnových dĺžok 1,3–1,6  $\mu\text{m}$ . Pri týchto vlnových dĺžkach dochádza k najmenším stratám, taktiež vykazujú minimum materiálovej disperzie [3, 4]. Na obrázku 1.1 je znázornená útlmová charakteristika optického vlákna s označenými pásmami vlnových dĺžok.

## Útlm

Útlm je stráta energie prenášaného signálu v optickom vlákne. Je udávaný v jednotke dB/km. V optických prenosoch je to dôležitý parameter, ktorý sa v dnešnej dobe kompenzuje vo veľkej miere pri výrobe vlákna. Moderné optické vlákna majú koeficient tlmenia približne 0,2 dB/km pri vlnovej dĺžke 1550 nm. V praxi sa útlm kompenzuje nasadením opakovačov, zosilňovačov a regenerátorov signálu do optickej trasy. Útlm je najčastejšie spôsobovaný nehomogenitami vo vlákne, ohybom vlákna a absorpciou vlákna [3, 4, 5].



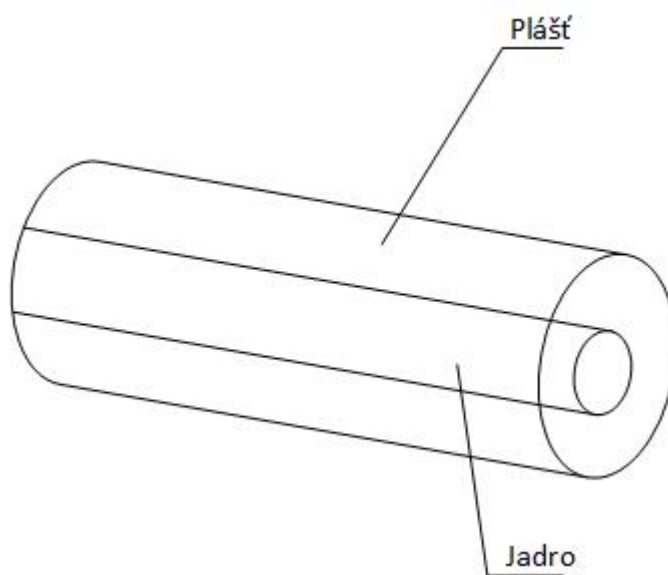
Obr. 1.1: Útlmová charakteristika optického vlákna [4, 3]

## 1.3 Optické vlákna

Optické vlákno sa skladá z valcovitého jadra a plášťa. Jadro je vyrobené z kremičitého skla s prísadami germánia, ktoré má malý útlm a vysokú čistotu. Germánium sa pridáva práve kvôli zvýšeniu indexu lomu. Jadro aj plášť sú dielektriká, pričom plášť býva najčastejšie z kremičitého skla. Niekedy sa používa aj plastové optické vlákno, potom sú ale straty pri prenose na väčšie vzdialenosti podstatne vyššie. Princíp fungovania spočíva na úplnom odraze svetla vnútri vlákna. Plášť aj jadro majú určité indexy lomu, pričom musí platiť, že index lomu jadra je väčší ako index lomu plášťa, inak by úplný odraz nenastal. Veľkou výhodou optických káblov oproti metalickým je to, že optické káble sú elektrickými izolátormi. Taktiež majú nižšiu hmotnosť, veľkú šírku pásma a menší útlm. Nevýhodou optických káblov je ich náročná výroba, inštalácia, oprava a údržba.

Prenášané svetelné lúče v jadre sa nazývajú *vidy*, podľa toho koľko vidov sa vo vlákne prenáša sa vlákna delia na [7, 8, 13]:

- Jednovidové (SM, single-mode),
- Mnohovidové (MM, multi-mode),
  - So skokovým indexom lomu,
  - S gradientným indexom lomu.



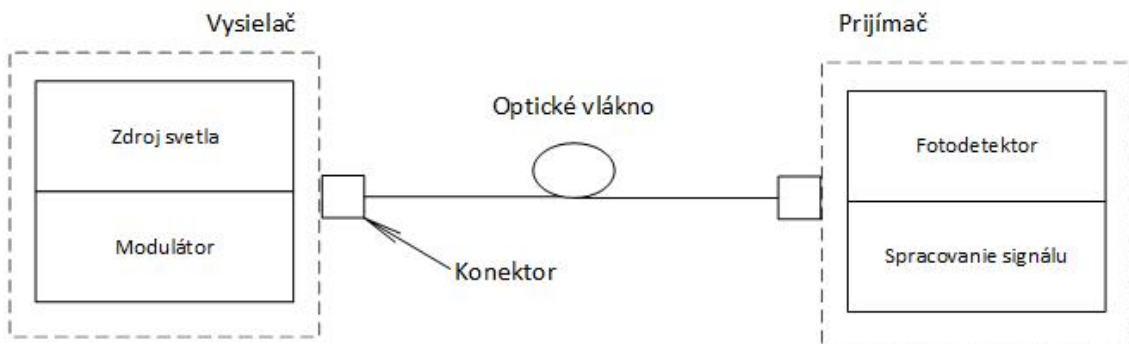
Obr. 1.2: Zobrazenie optického vlákna [13]

Prenosové vlastnosti vlákien sú závislé na ich konštrukcii. Ideálne vlákno by prenášalo len jeden vid. To by ale znamenalo, že prierez vlákna by bol rovný len niekoľkým vlnovým dĺžkam. Také tenké vlákno je veľmi ťažko zhotoviteľné. Jednovidové vlákna



sú vhodné na prenos na väčšie vzdialenosti, mnohovidové vlákna sa používajú na kratšie vzdialenosti.

Na prenos dát pomocou optických vlákien je potrebné použiť aj množstvo iných komponentov. Na jednom konci sa inštaluje vysielač optického signálu, na druhom zase prijímač. Vysielač pozostáva zo zdroja svetla a modulátora, prijímač zase z fotodetektora a jednotky na spracovanie signálu. Ak je potrebné, medzi nimi sa inštalujú opakovače, rozbočovače a zosilňovače [5, 13, 15]. Na obrázku 1.3 je znázornený jednoduchý príklad zapojenia optickej trasy. Na obrázku 1.4 je znázornený princíp úplného odrazu vo vlákne.

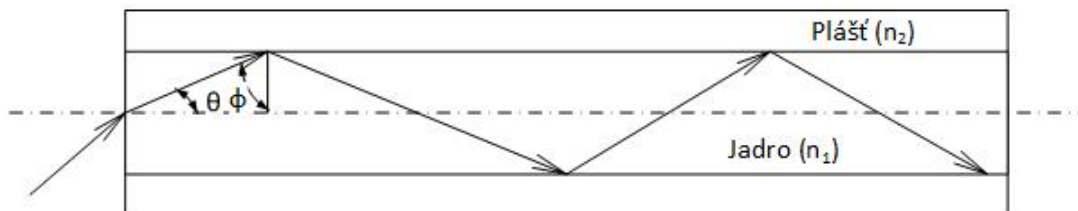


Obr. 1.3: Bloková schéma jednoduchej optickej trasy [5]

$$\begin{aligned} n &= n_1 & 0 < r < a \\ &= n_2 & r < a \end{aligned} \quad (1.4)$$

kde  $n_1$  a  $n_2 (< n_1)$  sú indexy lomu jadra a plášťa,  $a$  je priemer jadra. Všetky svetelné lúče, ktoré dopadnú na rozhranie jadro-plášť pod uhlom väčším ako  $\phi_c$  budú úplne odrazené späť do jadra vlákna. Uhol  $\phi_c$  sa nazýva medzný uhol [10, 14]

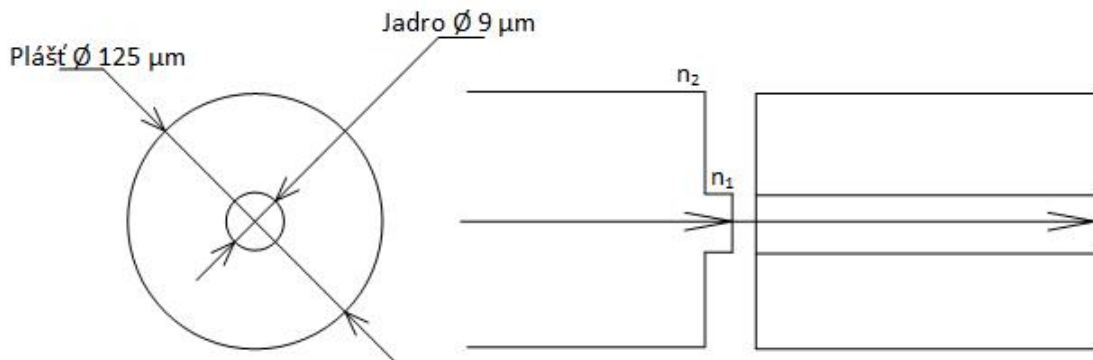
$$\phi_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.5)$$



Obr. 1.4: Príklad úplného odrazu vo vlákne [10]

### 1.3.1 Jednovidové vlákna

Jednovidové vlákna majú malý priemer jadra, ktoré je vyrobené z kremičitého skla. Je potrebné, aby mal zdroj svetla pre jednovidové vlákna nízku spektrálnu čiaru, tým je zaistený prenos iba na jednej vlnovej dĺžke. Z toho vyplýva, že sa prenáša len jeden vid, tzv. základný vid elektromagnetickej vlny ( $V < 2,405$ ,  $HE_{11}$ ). Tieto vlákna majú malý útlm, väčšie výrobné tolerancie a taktiež si lepšie udržujú polarizáciu a spojitosť. Nedochádza v nich k vlnovej disperzii. Prenos prebieha na vlnovej dĺžke 1280 nm – 1565 nm [7, 8, 13, 14, 15]. Na obrázku 1.5 je znázornený prierez jednovidovým optickým vláknom.



Obr. 1.5: Prierez jednovidovým vláknom [13]

### 1.3.2 Vlákna zachovávajúce polarizáciu

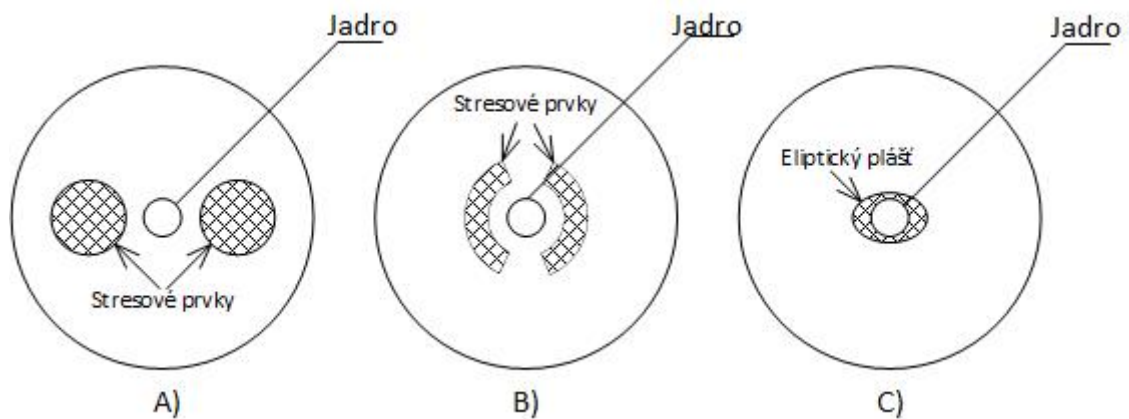
Vlákna zachovávajúce polarizáciu (PMF) sú vlákna, ktoré si udržia stav polarizácie svetla počas celého prenosu. Keď polarizované svetlo vnikne do jednovidového optického vlákna, jeho polarizovaný stav sa zmení alebo stratí už po niekoľkých metroch. Polarizovaný stav je ale ovplyvňovaný stresom v optickom vlákne. Stres v optickom vlákne je vyvolávaný tvarom jadra, ohybom, skrutom, asymetriami vnútri vlákna alebo pomocou fotonických kryštálov [13, 16, 17]. Na obrázku 1.6 sú znázornené prierezy vlákien so stresovými prvkami. Tieto vlákna sa ďalej delia na vlákna

- s vysokým dvojlomom,
- a s nízkym dvojlomom.

Miera zachovania polarizácie sa značí [10]

$$L_b = \frac{\lambda_0}{\beta_x - \beta_y} \quad (1.6)$$

kde  $\beta_x$  a  $\beta_y$  sú propagačné konštanty dvoch ortogonálnych polarizovaných módov,  $\lambda_0$  je šírka pásma. Čím menšie  $L_b$ , tým lepšie si dané vlákno udrží polarizáciu.



Obr. 1.6: Zobrazenie stresových prvkov vnútri optických vlákien [13]

### **Vlákna zachovávajúce polarizáciu - s vysokým dvojlomom**

Vo vláknach s vysokým dvojlomom (hovoríme, že vlákno má dvojlom ak každý polarizačný mód má rôznu rýchlosť) je stres vyvolaný okolo jadra ktoré udáva mierne odlišné indexy lomu pre dve ortogonálne osi (rýchlu a pomalú). Tieto osi zachovávajú polarizovaný stav svetelného lúča vo vlákne aj na veľké vzdialenosti, je ale veľmi dôležité, aby boli tieto osi dokonalo zarovnané s polarizovaným svetlom. Miera zachovania polarizácie pre tieto vlákna je zvyčajne medzi 1 a 2 mm [13, 16].

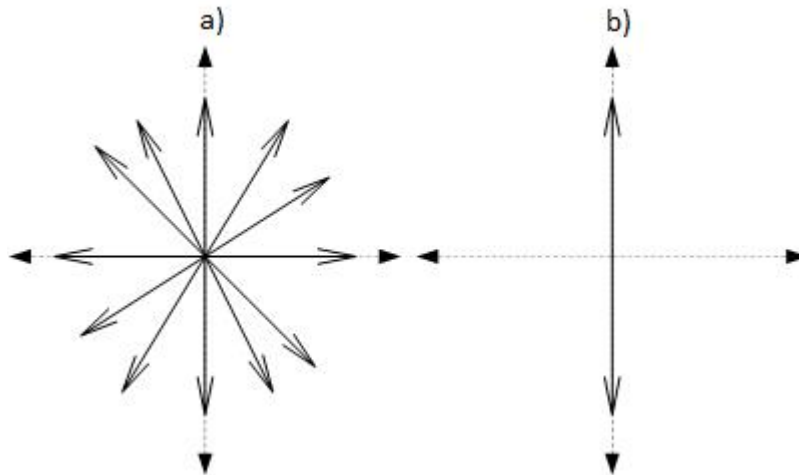
### **Vlákna zachovávajúce polarizáciu - s nízkym dvojlomom**

Vlákna s nízkym dvojlomom sa použijú vtedy, keď rýchlu a pomalú os nie je možné dokonalo zarovnať so svetelným lúčom. Tieto vlákna sú symetrickejšie ako bežné jednovidové vlákna. Musia mať dokonalú geometriu a byť úplne symetrické pozdĺž optickej osi [13, 16].

## 2 Polarizácia

Polarizácia je smer, v ktorom vlna osciluje. Svetelné vlny su elektromagnetické vlny [10, 13], ktoré sa skladajú z elektrickej ( $\mathbf{E}$ ) a magnetickej ( $\mathbf{B}$ ) intenzity. Tieto elektromagnetické vlny ležia v rovine priecnej ku smeru šírenia svetla. Hovoríme, že svetlo je nepolarizované (slnko, žiarovka) ak sa vektor elektrického poľa mení náhodne v čase (veľkosť aj smer). Ak sa mení predvídateľným spôsobom hovoríme, že sa jedná o polarizované svetlo. Podľa toho akým spôsobom sa elektrické pole v čase mení, sa určuje druh polarizácie svetla. Svetlo môže byť: lineárne, kruhovo alebo elipticky polarizované podľa toho, či sa vektor elektrického poľa pohybuje na priamke, kruhu alebo všeobecne, elipse.

### 2.1 Polarizované svetlo



Obr. 2.1: Porovnanie a) nepolarizovanej a b) polarizovanej vlny [13]

Ako je vidieť z obrázku 2.1, nepolarizované svetlo sa šíri v každom smere, pričom svetlo lineárne polarizované sa šíri už len v jednom smere. Svetlo môžeme polarizovať použitím anizotropných kryštálov s dvojlomom, polarizačných filtrov alebo odrazom svetla pod Brewsterovým uhlom. V teórii polarizovaného svetla sa pracuje s upravenými Maxwellovými rovnicami [10, 13]

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.2)$$

kde  $\mathbf{D}$  je elektrický posun,  $\mathbf{E}$  je intenzita elektrického poľa,  $\mathbf{B}$  je magnetická indukcia,  $\mathbf{H}$  je intenzita magnetického poľa,  $\varepsilon$  je permitivita a  $\mu$  je permeabilita v danom médiu.

## 2.2 Lineárne polarizované svetlo

Ak je priamka, po ktorej sa vektor elektrického poľa pohybuje rovnobežná s osou  $x$ , potom je táto svetelná vlna lineárne polarizovaná a matematicky je najjednoduchšie popísaná takto [10]

$$\mathbf{E} = \hat{\mathbf{x}}a \cos(\omega t - kz + \delta_0) \quad (2.3)$$

kde  $k = (2\pi / \lambda_0)n$ , kde  $n$  je index lomu média,  $\lambda_0$  je vlnová dĺžka,  $z$  je smer šírenia,  $a$  je amplitúda,  $\delta_0$  je počiatková fáza a  $\hat{\mathbf{x}}$  je jednotkový vektor  $x$ -ovej osi. Ak priamka, po ktorej sa vektor elektrického poľa pohybuje zvierá s osou  $x$  uhol  $\theta$ , potom sa takáto svetelná vlna dá popísať superpozíciou dvoch ortogonálnych lineárne polarizovaných zložiek pozdĺž osí  $x$  a  $y$  [1, 2, 10, 13].

$$E_x = a \cos(\theta) \cos(\omega t - kz + \delta_0) \quad (2.4)$$

$$E_y = a \sin(\theta) \cos(\omega t - kz + \delta_0) \quad (2.5)$$

Tieto dve zložky budú mať rovnakú počiatkovú fázu ak  $0 < \theta < \pi/2$  alebo sa budú líšiť v počiatkovej fáze o  $\pi$ , ak  $\pi/2 < \theta < \pi$ .

## 2.3 Kruhovo polarizované svetlo

Hovoríme, že svetlo je kruhovo polarizované, ak vektor elektrického poľa opisuje kruh v postupne narastajúcom čase. Takáto vlna sa dá opísať ako dve ortogonálne a lineárne polarizované zložky s rovnakými amplitúdami ale rozdielnymi fázami, konkrétne  $\pi/2$ . Rovnice pre opis takejto vlny sú nasledujúce [1, 2, 10, 13]

$$E_x = a \cos(\omega t - kz + \delta_0) \quad (2.6)$$

$$E_y = a \cos(\omega t - kz + \delta_0 \pm \pi/2) = \pm a \sin(\omega t - kz + \delta_0) \quad (2.7)$$

Dokázat, že amplitúda sa meniť nebude, sa dá pomocou rovnice

$$\mathbf{E} = \hat{\mathbf{x}}a \cos(\omega t - kz + \delta_0) \pm \hat{\mathbf{y}}a \sin(\omega t - kz + \delta_0) \quad (2.8)$$

pretože  $a = (\sqrt{E_x^2 + E_y^2})$  sa nemení v čase. Meniť sa ale bude smer elektrického poľa, kde špička vektora elektrického poľa opisuje kruh s polomerom amplitúdy  $a$ , vyjadriť sa dá pomocou [10]

$$E_x^2 + E_y^2 = a^2 \quad (2.9)$$

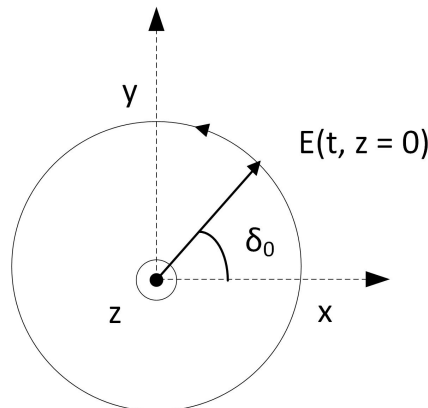
Orientácia kruhovej polarizácie závisí na + alebo - znamienku vyskytujúcim sa v rovnici 2.7.

### 2.3.1 Ľavotočivé kruhovo polarizované svetlo

Vlna je ľavotočivá kruhovo polarizovaná, ak  $y$  zložka fázovo zaostáva za  $x$  zložkou. V takom prípade vektor elektrického poľa rotuje v protismere hodinových ručičiek v narastajúcom čase. Hovoríme, že stav polarizácie je ľavotočivá kruhová polarizácia a dá sa opísať rovnicami [1, 2, 10, 13]

$$E_x = a \cos(\omega t - kz + \delta_0) \quad (2.10)$$

$$E_y = a \cos(\omega t - kz + \delta_0 - \pi/2) = a \sin(\omega t - kz + \delta_0) \quad (2.11)$$



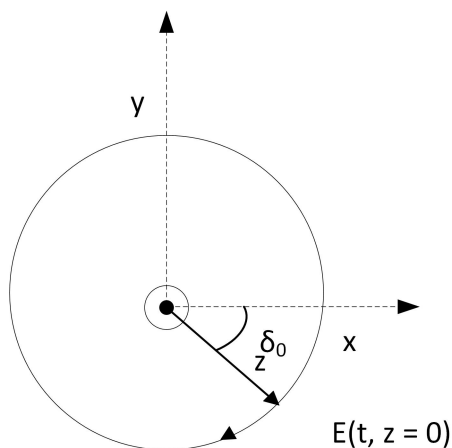
Obr. 2.2: Príklad ľavotočivej kruhovo polarizovanej vlny

### 2.3.2 Pravotočivé kruhovo polarizované svetlo

Vlna je pravotočivá kruhovo polarizovaná, ak  $y$  zložka fázovo predbieha  $x$  zložku. V takom prípade vektor elektrického poľa rotuje v smere hodinových ručičiek v narastajúcom čase. Hovoríme, že stav polarizácie je pravotočivá kruhová polarizácia a dá sa opísať rovnicami [1, 2, 10]

$$E_x = E_0 \cos(\omega t - kz + \delta_0) \quad (2.12)$$

$$E_y = a \cos(\omega t - kz + \delta_0 + \pi/2) = -a \sin(\omega t - kz + \delta_0) \quad (2.13)$$



Obr. 2.3: Príklad pravotočivej kruhovo polarizovanej vlny

## 2.4 Elipticky polarizované svetlo

Hovoríme, že vlna je elipticky polarizovaná, ak sa vektor elektrického poľa v akomkoľvek zvolenom mieste pohybuje po elipse, tzv. polarizačnej elipse. Takáto polarizácia sa dá opísať podobne ako kruhová polarizácia, ak je opísaná dvoma lineárnymi zložkami polarizovanými podľa osí elipsy (napr.  $\xi$  a  $\eta$ ). Jedna os je hlavná a druhá je vedľajšia. Pre zjednodušenie opisujúcich rovníc môžeme určiť, že dĺžka hlavnej osi ( $\xi$ ) bude  $2a$  a dĺžka vedľajšej osi ( $\eta$ ) bude  $2b$ , potom sa dajú lineárne zložky vyjadriť ako [1, 2, 10]

$$E_\xi = a \cos(\omega t + \delta_0) \quad (2.14)$$

$$E_\eta = \pm b \sin(\omega t + \delta_0) \quad (2.15)$$

kde znamienka  $+$  a  $-$  znova určujú smer rotácie elipsy. Po vypočítaní  $E_\xi$  a  $E_\eta$  dokážeme vypočítať akékoľvek dve ortogonálne lineárne polarizované zložky opisujúce elipticky polarizovanú vlnu. Ak hlavná os elipsy zvierá s osou  $x$  uhol  $\theta$ , tak  $x$  a  $y$  zložky požadovanej polarizácie získame rotáciou  $E_\xi$ - $E_\eta$  súradníc v smere hodinových ručičiek o uhol  $\theta$  [10]

$$E_x = E_\xi \cos(\theta) - E_\eta \sin(\theta) \quad (2.16)$$

$$E_y = E_\xi \sin(\theta) + E_\eta \cos(\theta) \quad (2.17)$$

Takýmto spôsobom dokážeme získať akýkoľvek pár ortogonálnych lineárnych zložiek eliptickej polarizácie.

### 2.4.1 Rôzne stavy eliptického polarizovaného svetla

Eliptická polarizácia nadobúda rôzne stavy podľa hodnoty počiatočnej fázy. Pre určovanie týchto stavov sa používa superpozícia dvoch ortogonálnych lineárnych polarizácií [10, 11]

$$E_x = a_x \cos(\omega t + \delta_x) \quad (2.18)$$

$$E_y = a_y \cos(\omega t + \delta_y) \quad (2.19)$$

Ak hlavná os elipsy zvierá s osou  $x$  uhol  $\theta$  tak orientáciu elipsy môžeme vypočítať ako

$$\tan(2\theta) = \frac{2a_x a_y}{(a_x^2 - a_y^2)} \cos(\delta) \quad (2.20)$$

kde  $\delta = \delta_y - \delta_x$ . Definujeme pomocný uhol  $\alpha$  ako [10, 1]

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{a_y}{a_x}\right) \quad (2.21)$$

Teraz upravíme 2.20 do tvaru

$$\tan(2\theta) = \tan(2\alpha) \cos(\delta) \quad (2.22)$$

kde  $\alpha (0 \leq \alpha \leq \pi/2)$  je uhol medzi osou  $x$  a diagonálou obdĺžníka, ktorý má osi paralelné s osami  $x$  a  $y$  a ktorý opisuje danú elipsu.

Iný pomocný uhol  $\chi$  daný ako

$$\tan(\chi) = \pm \frac{b}{a} \quad (2.23)$$

sa dá podobne ako 2.22 upraviť do

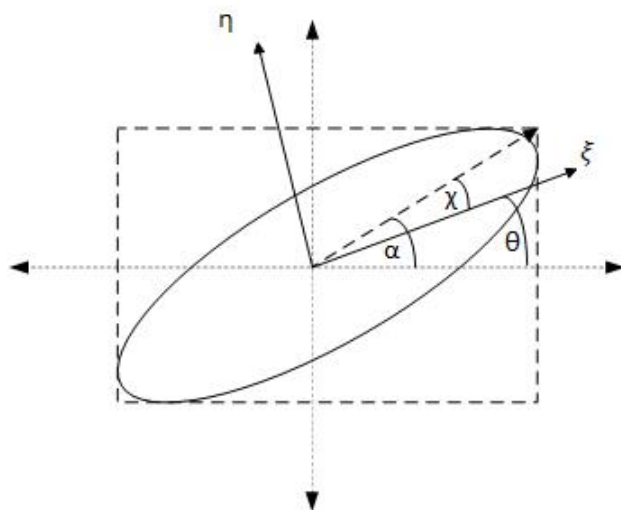
$$\sin(2\chi) = \sin(2\alpha) \sin(\delta) \quad (2.24)$$

Tento uhol sa taktiež nazýva uhol elipticity,  $\chi (-\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4)$ , zobrazený je na 2.4. Podľa tohto uhlu sa dá určiť ako rotácia elipsy tak aj elipticita danej eliptickej polarizácie. Ak je  $\chi$  záporné, tak elipsa rotuje doľava, naopak ak je hodnota  $\chi$  kladná, elipsa rotuje doprava. Ak  $\chi = 0$ , potom  $b/a = 0$ , z toho vyplýva, že daná vlna je lineárne polarizovaná. Z geometrického hľadiska je  $\chi$  uhol, ktorý zvierá hlavná os elipsy s diagonálou obdĺžníka ktorý opisuje elipsu [2, 10, 11].

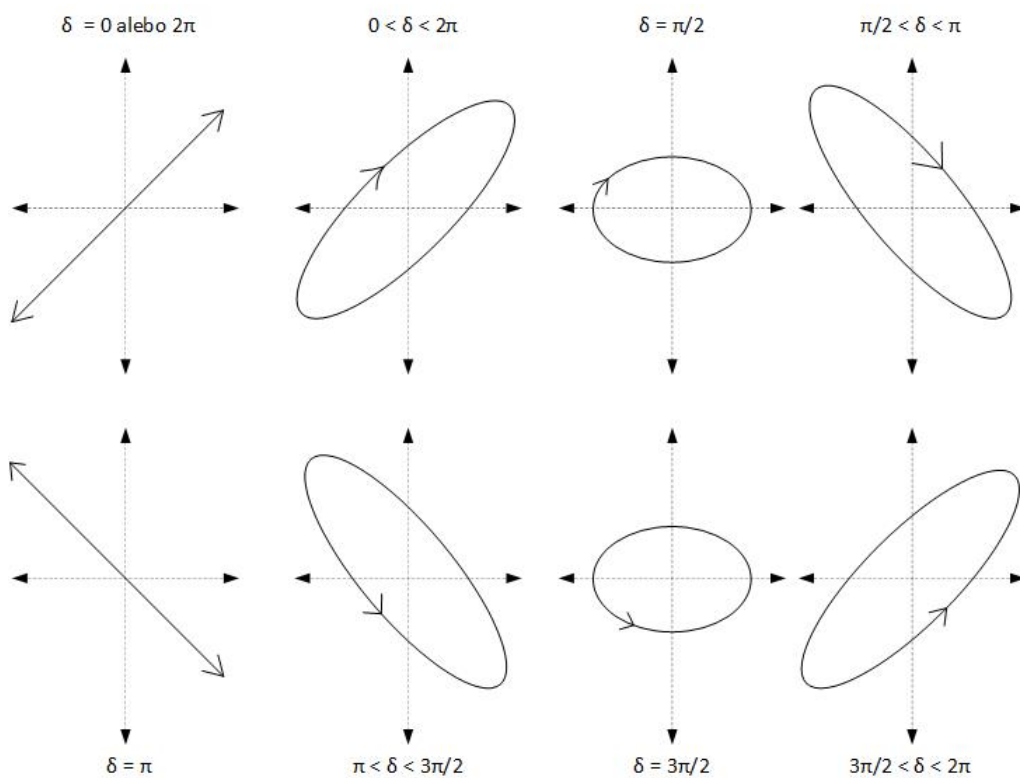
Na obrázku 2.5 sú zobrazené stavy elipticky a lineárne polarizovanej vlny pre všeobecné hodnoty  $a_x$ ,  $a_y$  a  $\delta$ .

Pre dané  $\delta$  a  $\alpha$  vždy existujú dve možnosti ako zvoliť hodnotu  $2\theta$  tak aby vyhovovala rovnici 2.22, na obrázku 2.6 sú zobrazené jednotlivé kvadranty z ktorých sa zvolí vhodné  $2\theta$ .

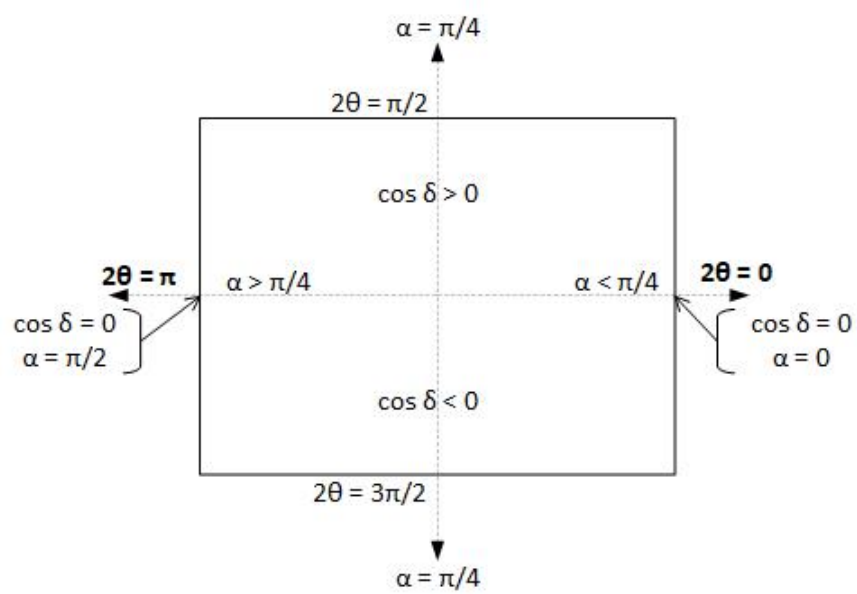




Obr. 2.4: Zobrazenie pomocných uhlov a osí pre elipticky polarizovanú vlnu [1, 10, 11]



Obr. 2.5: Stavy elipticky a lineárne polarizovanej vlny pre rôzne hodnoty  $\delta$  [1, 2, 10]



Obr. 2.6: Zobrazenie kvadrantov pre jednoduché volenie hodnoty  $2\theta$  [10]

## 3 Znázorňovanie polarizácie

### 3.1 Poincarého guľa

Zobrazovanie polarizovaného svetla použitím Poincarého guľi je veľmi jednoduchý a rýchly proces ako popísať a zobraziť polarizované svetlo a aj to ako sa mení v čase [2, 6, 10, 11, 13]. Elipticky polarizovaná vlna sa dá popísať tromi parametrami: elipticitou elipsy ( $\epsilon = \tan^{-1}(b/a)$ ), orientáciou  $\theta$  hlavnej osi polarizačnej elipsy a rotáciou vektora elektrického poľa (podľa znamienka  $\pm$  pri  $\epsilon$ ). Podľa toho všeobecný polarizačný stav môžeme definovať dvomi uhlami - azimutom  $\theta$  a uhlom elipticity  $\chi$  ( $\chi = \pm\epsilon$ ), všetky polarizačné stavy sa nachádzajú v intervaloch

$$0 < \theta < \pi \quad (3.1)$$

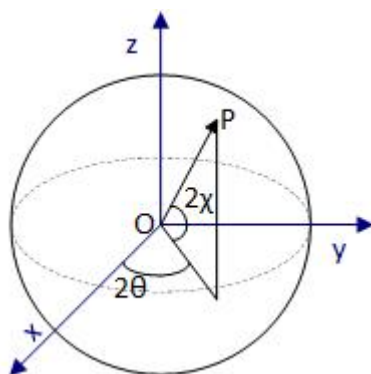
$$-\pi/4 < \chi < +\pi/4 \quad (3.2)$$

Každá zmena polarizácie polarizovanej vlny v čase sa na Poincarého guľi zobrazí ako bod na povrchu gule. Pre výpočet potrebných súradníc bodu sa používa

$$x = \cos(2\chi) \cos(2\theta) \quad (3.3)$$

$$y = \cos(2\chi) \sin(2\theta) \quad (3.4)$$

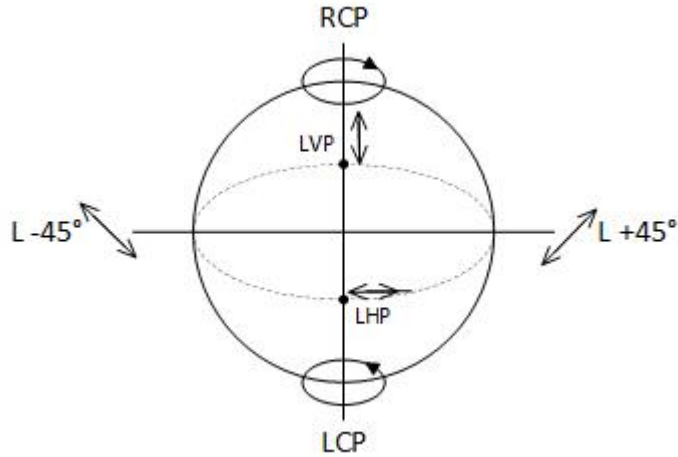
$$z = \sin(2\chi) \quad (3.5)$$



Obr. 3.1: Všeobecné zobrazenie Poincarého guľe [2]

### 3.1.1 Polarizačné stavy na Poincarého guli

Všetky lineárne stavy ležia na rovníku gule. Pre kruhovo polarizované vlny platí, že ich stavy ležia na póloch gule, pravotočivý na severnom a ľavotočivý na južnom. Lineárny horizontálny polarizačný stav a lineárny vertikálny polarizačný stav ležia v strede rovníka oproti sebe. Ak je bod zobrazený inde ako na týchto miestach, jedná sa o elipticky polarizovanú vlnu, pričom všetky pravotočivé stavy ležia na hornej pologuli, obdobne všetky ľavotočivé stavy ležia na dolnej pologuli [2, 10, 11, 13].



Obr. 3.2: Zobrazenie deformovaných polarizačných stavov na Poincarého guli [2]

## 3.2 Stokesove parametre

Prezentácia polarizovanej vlny pozorovateľnými parametrami, známymi ako Stokesove parametre, je veľmi univerzálna a odstraňuje dve najväčšie nevýhody metódy Poincarého gule. Na Poincarého guli [2] je totiž zobrazená polarizačná elipsa ako bod v danom čase a taktiež uhol elipticity  $\chi$  a azimut  $\theta$  sa nedajú priamo zmerať. Použitím Stokesových parametrov ktoré vychádzajú z časového priemeru polarizačnej elipsy sa dá popísať svetlo polarizované, nepolarizované a aj čiastočne polarizované. Parametre sú definované ako [10]

$$S_0 = I_0 = a_x^2 + a_y^2 = a^2 \quad (3.6)$$

$$S_1 = I_H - I_V = a_x^2 - a_y^2 = a^2 \cos(2\theta) \quad (3.7)$$

$$S_2 = I_{+45} - I_{-45} = 2a_x a_y \cos(\delta) = a^2 \sin(2\theta) \quad (3.8)$$

$$S_3 = I_{RCP} - I_{LCP} = 2a_x a_y \sin(\delta) = 0 \quad (3.9)$$

kde  $I_0$  je celková intenzita svetelného lúču,  $I_H$ ,  $I_V$ ,  $I_{+45}$ ,  $I_{-45}$ ,  $I_{RCP}$  a  $I_{LCP}$  sú intezity potom, čo daný lúč prejde polarizérmí príslušných polarizačných stavov. Parameter  $S_1$  definuje, či je daný polarizačný stav bližšie k lineárnemu vertikálnemu ( $S_1 < 0$ ) alebo lineárnemu horizontálnemu ( $S_1 > 0$ ) polarizovanému svetlu alebo ani k jednému ( $S_1 = 0$ ). Parameter  $S_2$  definuje či je daný polarizačný stav bližšie k lineárnemu  $+45^\circ$  ( $S_2 > 0$ ) alebo lineárnemu  $-45^\circ$  ( $S_2 < 0$ ) polarizovanému svetlu alebo ani k jednému  $S_2 = 0$ . Podobne  $S_3$  určuje či je svetlo pravotočivé ( $S_3 > 0$ ) alebo ľavotočivé ( $S_3 < 0$ ) alebo ani jedno ( $S_3 = 0$ ). Ďalším vyjadrením Stokesových parametrov je pomocou uhla elipticity  $\chi$  a azimutu  $\theta$  [2, 6, 10]

$$S_1 = S_0 \cos(2\chi) \cos(2\theta) \quad (3.10)$$

$$S_2 = S_0 \cos(2\chi) \sin(2\theta) \quad (3.11)$$

$$S_3 = S_0 \sin(2\chi) \quad (3.12)$$

Elipticky polarizované svetlo je popísané rovnicami 3.10 až 3.12. Stokesove parametre pre jednotlivé deformované polarizačné stavy [6, 13]:

### 1. Lineárne horizontálne polarizované svetlo

Pre LHP platí, že vertikálna zložka je nulová a teda  $a_y = 0$

$$\begin{aligned} S_0 &= a_x^2 \\ S_1 &= a_x^2 \\ S_2 &= 0 \\ S_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

### 2. Lineárne vertikálne polarizované svetlo

Pre LVP platí, že horizontálna zložka je nulová a teda  $a_x = 0$

$$\begin{aligned} S_0 &= a_y^2 \\ S_1 &= -a_y^2 \\ S_2 &= 0 \\ S_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

### 3. Lineárne +45° polarizované svetlo

Pre L+45° platí, že amplitúdy sa rovnajú a fázový posuv  $\delta = 0^\circ$ .

$$\begin{aligned}S_0 &= 2a^2 \\S_1 &= 0 \\S_2 &= 2a^2 \\S_3 &= 0\end{aligned}\tag{3.15}$$

### 4. Lineárne -45° polarizované svetlo

Pre L-45° platí, že amplitúdy sa nemenia, ale fázový posuv je  $\delta = 180^\circ$ .

$$\begin{aligned}S_0 &= 2a^2 \\S_1 &= 0 \\S_2 &= -2a^2 \\S_3 &= 0\end{aligned}\tag{3.16}$$

### 5. Pravotočivo kruhovo polarizované svetlo

Pre pravotočivo kruhovo polarizované svetlo platí, že amplitúdy sa rovnajú, ale fázový posuv je  $\delta = 90^\circ$

$$\begin{aligned}S_0 &= 2a^2 \\S_1 &= 0 \\S_2 &= 0 \\S_3 &= 2a^2\end{aligned}\tag{3.17}$$

### 6. Ľavotočivo kruhovo polarizované svetlo

Pre ľavotočivo kruhovo polarizované svetlo platí, že amplitúdy sa rovnajú, ale fázový posuv je  $\delta = -90^\circ$

$$\begin{aligned}S_0 &= 2a^2 \\S_1 &= 0 \\S_2 &= 0 \\S_3 &= -2a^2\end{aligned}\tag{3.18}$$

## 3.2.1 Stokesov vektor

Stokesové parametre sú často usporiadané ako matica 4x1, v tomto prípade sa jedná o Stokesov vektor svetelného lúča [2, 6, 10]

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x^2 + a_y^2 \\ a_x^2 - a_y^2 \\ 2a_x a_y \cos(\delta) \\ 2a_x a_y \sin(\delta) \end{bmatrix}\tag{3.19}$$

Vektory pre jednotlivé polarizačné stavy sú:

1. Lineárne horizontálne polarizované svetlo:

$$\mathbf{S} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

2. Lineárne vertikálne polarizované svetlo:

$$\mathbf{S} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

3. Lineárne  $+45^\circ$  polarizované svetlo:

$$\mathbf{S} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

4. Lineárne  $-45^\circ$  polarizované svetlo:

$$\mathbf{S} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

5. Pravotočivo kruhovo polarizované svetlo:

$$\mathbf{S} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

6. Ľavotočivo kruhovo polarizované svetlo:

$$\mathbf{S} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

### 3.3 Jonesov vektor

Polarizované svetlo sa taktiež dá popísať Jonesovým vektorom (2x1) alebo Jonesovou maticou (2x2). Vektor sa využíva na popis zložiek polí (magnetického a elektrického) a matica na popis polarizačných zložiek. Nevýhodou Jonesovej formulácie je ale to, že dokáže opísať len úplne polarizované svetlo, pri čiastočne polarizovanom svetle ani nepolarizovanom svetle sa táto metóda nedá využiť. V praxi sa využíva pri riešení presluchov a rušení alebo tam kde je potrebné aby boli amplitúdy polí superponované. Jonesov vektor 2x1 je [2, 6, 10, 11]

$$\mathbf{E}(z, t) = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ a_y \cos(\omega t - kz + \delta_y) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Taktiež sa často vyskytuje v komplexnom tvare

$$\mathbf{E}(z, t) = \begin{bmatrix} a_x e^{i\delta_x} \\ a_y e^{i\delta_y} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Intenzita vlny je potom

$$I = a_x^2 + a_y^2 = E_x^* E_x + E_y^* E_y = \mathbf{E}^\top \mathbf{E} \quad (3.28)$$

pričom hodnoty intenzít sa často normujú tak, aby sa hodnota celkovej intenzity rovnala jednej. Jonesove vektory pre deformované polarizačné stavy [2, 13]:

#### 1. Lineárne horizontálne polarizované svetlo

Pre LHP platí, že vertikálna zložka je nulová a teda  $E_y = 0$

$$\mathbf{E}_{LHP} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

#### 2. Lineárne vertikálne polarizované svetlo

Pre LVP platí, že horizontálna zložka je nulová a teda  $E_x = 0$

$$\mathbf{E}_{LVP} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

#### 3. Lineárne +45° polarizované svetlo

Pre lineárne +45° polarizované svetlo platí, že  $E_x = E_y$  a teda  $2a_x = 1$

$$\mathbf{E}_{+45^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

#### 4. Lineárne -45° polarizované svetlo

Pre lineárne -45° polarizované svetlo platí, že  $E_x = -E_y$  a teda  $2a_x = 1$

$$\mathbf{E}_{-45^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$



## 5. Pravotočivé kruhovo polarizované svetlo

Pre pravotočivé kruhovo polarizované svetlo platí  $E_x = E_y$ ,  $2a_x = 1$  a  $\delta = \pi/2$

$$\mathbf{E}_{RCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

## 6. Ľavotočivé kruhovo polarizované svetlo

Pre ľavotočivé kruhovo polarizované svetlo platí  $E_x = E_y$ ,  $2a_x = 1$  a  $\delta = -\pi/2$

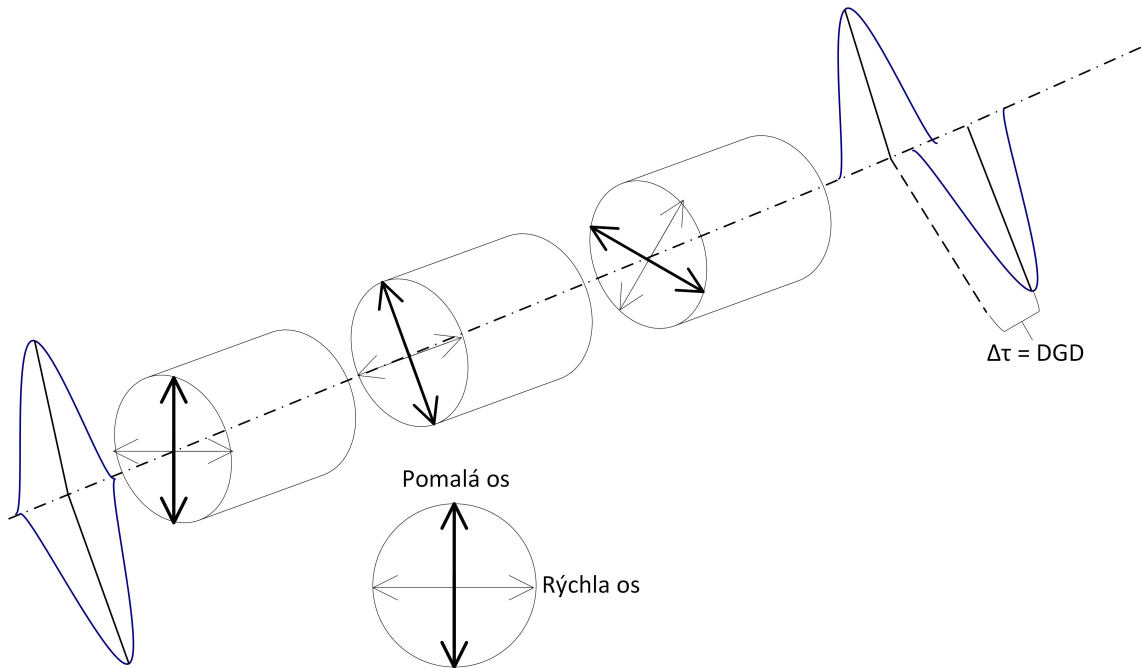
$$\mathbf{E}_{LCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

## 4 Polarizačná vidová disperzia - PMD

Základom tejto disperzie je práve polarizačný stav svetla. Kvôli zvyšovaniu rýchlosti prenosu ( $2,5\text{--}10 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ) vznikla potreba merania PMD. Táto disperzia je zdrojom pulzového rozširovania, ktoré vychádza z dvojlomu vlákna a dokáže byť obmedzujúcim faktorom pri vysokorýchlostom prenose. Je to náhodný jav kvôli intrinzičným (vplyvy vnútri vlákna, napr. stresové prvky, nehomogenity, geometrickosť jadra) aj extrinzičným vplyvom (vplyvy spôsobené zaobchádzaním s vláknom, ohýbanie, stočenie), ktoré vo vyrobených vláknach vedú k rôznej skupinovej rýchlosti polarizačných stavov [7, 10, 12, 14, 16, 17, 19]. PMD sa dá vnímať aj vo frekvenčnej doméne a to ako rozdiel fázových rýchlostí [18]

$$\Delta v_p = v_{px} - v_{py} \quad (4.1)$$

kde dochádza k rotácii polarizácie podĺž dĺžky vlákna.  $\Delta v_p$  je aj frekvenčne závislé,



Obr. 4.1: Zobrazenie vzniku DGD šírením sa v optickom vlákne [20]

takže vstupná polarizácia sa na výstupe zmení podľa frekvencie  $\omega$ . V ideálnom prípade (dokonale homogénne vlákno) sa vidy vo vlákne šíria rovnakou rýchlosťou, ide o tzv. degenerované vidy. V skutočnosti sa táto degenerácia vidov odstráni dvojlomom, vidy sa potom šíria rôznymi rýchlosťami a dôjde k polarizačnej vidovej disperzii. PMD sa do určitej miery dá ovplyvniť už pri výrobe vlákna [19]:

- Symetria vlákna,

- Vnútorý stres.

ale z veľkej časti je spôsobená práve vonkajšími vplyvmi:

- Poveternostné podmienky (teplota, vietor v prípade vzdušného vedenia),
- Umiestnenie a polohovanie vlákna (ohýbanie vlákna, skrut).

PMD sa vyjadruje koeficientom  $D_{PMD}$ , ktorý sa rozlišuje:

- Na krátke vzdialenosti - PMD lineárna,
- Na dlhé vzdialenosti - PMD nelineárna.

## Polarizačný multiplex - PDM

Je to metóda na zdvojnásobenie systémovej kapacity alebo spektrálnej účinnosti. Princíp spočíva v tom, že dva na sebe nezávislé modulované dátové kanály s rovnakou vlnovou dĺžkou, ale ortognálnymi polarizačnými stavmi sa vysielajú zároveň v tom istom vlákne. Na výstupe sú tieto polarizačné kanály potom oddelené a detekované samostatne. Výhodou polarizačného multiplexu je, že do celkového zapojenia optickej trasy nie je potrebné podstatne zasahovať. Pridať stačí ďalší vysielateľ (rovnaký, aký už je v systéme použitý) a k nemu pridružený polarizačný multiplexer/demultiplexer na koncoch optického systému [24, 25]. V praxi sa implementuje len minimálne kvôli finančným nákladom. Tento multiplex má ale dobré vyhliadky do budúcnosti, kde by sa dal využiť hlavne pre zvýšenie prenosových rýchlostí a modernizácii už nainštalovaných optický trás. Polarizácia sa ale v optickom vlákne rapídne mení v čase a to predstavuje problém pre úplné nasadenie tejto technológie, pretože polarizáciu vo veľkej miere ovplyvňujú aj vonkajšie vplyvy (pnutie vlákna, skrut vlákna, stočenie vlákna, okolitá teplota) [4, 24, 25].

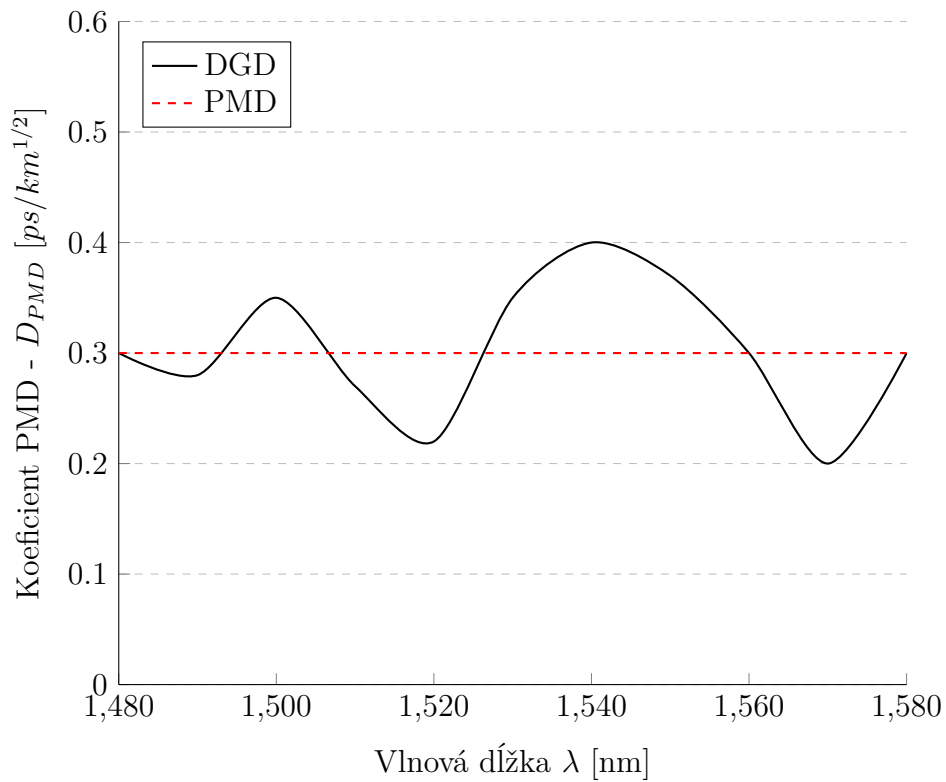
## 4.1 DGD

S polarizačnou vidovou disperziou úzko súvisí aj diferenciálne skupinové oneskorenie vidov - DGD. Je to časový rozostup medzi polarizačnými vidmi, taktiež je to miera PMD daného vlákna. DGD parameter je závislý na vlnovej dĺžke a teplote, a taktiež sa mení už len pri manuálnom zaobchádzaní s vláknom, pretože to ovplyvňuje dvojlom. Mení sa v čase [10, 19]. Primerná hodnota DGD je samotná veličina PMD, ako je znázornené na obrázku 4.2.

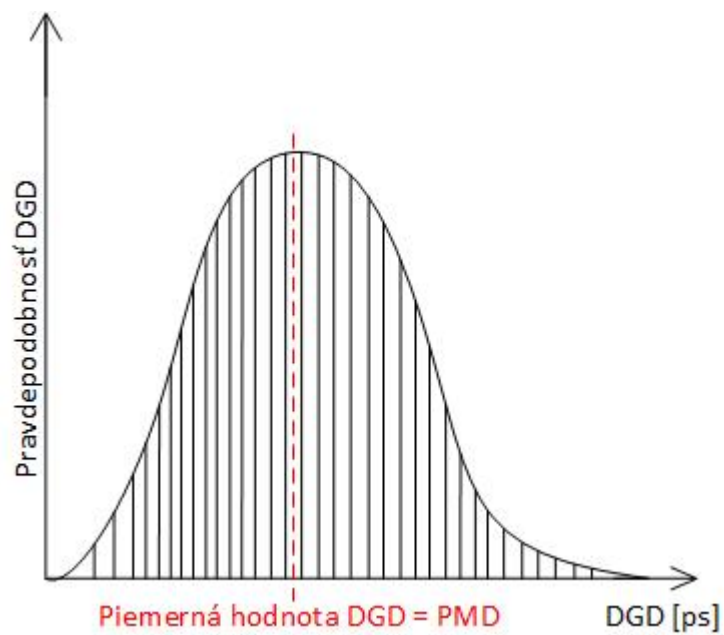
Ak je optické vlákno dlhé, zmeny hodnôt DGD v závislosti na teplote a vlnovej dĺžke nadobúdajú obzvlášť náhodný charakter, vtedy sa preferuje graficky zobrazit závislosť v Maxwellovom pravdepodobnostnom zobrazení [19].

Funkcia hustoty pravdepodobnosti daného zobrazenia je [20]

$$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta\tau^2}{\alpha^3} \exp\left(-\frac{\Delta\tau^2}{2\alpha^2}\right) \quad (4.2)$$



Obr. 4.2: DGD závislosť na vlnovej dĺžke



Obr. 4.3: Maxwellovo pravdepodobnostné rozdelenie hodnôt DGD [20]

kde  $\alpha = \sqrt{\frac{\pi}{8}}$  je úmerné priemernej hodnote DGD.

## 4.2 Polarizačné väzby vidov

Aj napriek snahe vyrábať optické vlákna s čo najmenším dvojlomom, vo vyrobenom vlákne sa dvojlom vyskytuje v takej miere, ktorá sa nedá zanedbať. Vo vláknoch zachovávajúcej polarizáciu je dvojlom jednotný. To ale nie je prípad konvenčných vlákien, kde dvojlom, a teda aj DGD, je spôsobený mikroohybmi, makroohybmi, skrutkami a manuálnym zaobchádzaním s vláknom. Tieto vlákna sa teda modelujú ako množina segmentov s dvojlomom s náhodne orientovanými polarizačnými osami (rýchla a pomalá os). PMD nastáva vtedy, keď dva alebo viacero DGD segmentov nasleduje po sebe v kaskáde [20, 21, 22].

## 4.3 PMD na krátke vzdialenosti - slabá väzba

V krátkych optických vláknoch sa dá predpokladať, že dvojlom je konštantný veľkosťou aj smerom, takže nedochádza k spojovaniu polarizačných vidov. DGD je potom buď veľmi málo závislé alebo je úplne nezávislé na  $\lambda$  [10, 19]. Koeficient PMD pre krátke vzdialenosti sa udáva v  $ps \cdot km^{-1}$  a je vyjadrený ako

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{L} \quad (4.3)$$

kde  $L$  je dĺžka trasy a  $\Delta\tau$  je oneskorenie signálu vo vlákne. Polarizácia v krátkych vláknoch nadobúda všetky polarizačné stavy postupne za sebou a pravidelne - nevyskytuje sa polarizačná nepravidelnosť.

## 4.4 PMD na dlhé vzdialenosti - silná väzba

Pri prenose na dlhé vzdialenosti je optické vlákno vystavené stresu, ohybom, skrutkom, teplotným zmenám a podobne náhodným spôsobom pozdĺž dĺžky vlákna. Tým dochádza k zmene veľkosti aj smeru dvojlomu pozdĺž vlákna, čo má za dôsledok, že dvojlom už nie je aditívny. PMD sa potom už nemení lineárne s dĺžkou vlákna, ale mení sa druhou odmocninou dĺžky vlákna. V každom segmente je rozloženie polarizačných stavov náhodné [10, 19]. Koeficient pre dlhé vzdialenosti sa udáva v  $ps \cdot (\sqrt{km^{-1}})$  a je vyjadrený ako

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad (4.4)$$

## 4.5 Metódy merania PMD

Zvyšovaním limitov prenosových rýchlostí v dnešnej dobe a blízkej budúcnosti ( $\geq 10$  Gbit/s) rastie aj potreba merania hodnôt PMD [3]. Tým, že PMD je štatistický jav,

je vhodné a potrebné merať ho opakovane, kvôli pozorovaniu trendu pohybu PMD hodnôt, čo môže pomôcť pri analýze PMD z dlhodobého hľadiska. PMD merania sú typické pri [20]:

- modernizácii už existujúcej optickej trasy na vyššiu prenosovú rýchlosť
- inštalácii novej optickej trasy s vysokou prenosovou rýchlosťou
- pri výrobe optického vlákna
- pri/po inštalácii optického vlákna do optickej trasy

Zvýšené hodnoty PMD môžeme často namerať napríklad pri inštalácii nových vysokorýchlostných systémov do nevhodne namontovanej optickej trasy [3]. Limitné hodnoty PMD pre prenosové rýchlosti sú uvedené v tabuľke 4.1. PMD sa meria nasledujúcimi metódami [3]:

- Skenovaním vlnovej dĺžky,
- Polarimetrickou metódou,
- Metóda skramblovania polarizačných stavov - SSA,
- Metóda POTDR,
- Interferomagnetickými metódami,
  - TINTY - tradičná interferomagnetická metóda,
  - GINTY - všeobecná interferomagnetická metóda.

Tab. 4.1: Tabuľka limitných hodnôt PMD [3]

Prenosová rýchlosť [Gbit/s]	Limit PMD (10%) [ps]
2,5 (STM16)	40
10 (STM64)	10
10 (GE)	10
40 (STM256)	2,5

Tab. 4.2: Tabuľka limitných hodnôt PMD podľa ITU-T [20]

Druh vlákna podľa ITU-T	Hodnota $D_{PMD}(\lambda)$
G.652.A, C	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.652.B, D	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.653.A, B	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.654.A, B, C	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.655.A, B	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.655.C	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.656	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$

### 4.5.1 Metóda skenovania vlnovej dĺžky

Táto metóda je známa aj pod názvom *metóda s fixným analýzátorom*. Pri tejto metóde sa vykoná spektrálne meranie pomocou laditeľného laseru alebo širokopásmového zdroja žiarenia [3]. Princíp spočíva v monitorovaní závislosti výkonu signálu, ktorý prechádza optickou trasou pri určitej vlnovej dĺžke a v konečnom vyhodnotení spektrálnej zmeny polarizácie. Tým, že PMD je závislé na vlnovej dĺžke, rôzne vlnové dĺžky vyslaného polarizovaného svetla zo zdroja sa transformujú do rôznych polarizačných stavov na výstupe vlákna. Tým dosiahneme náhodnú zmenu optického výkonu podľa vlnovej dĺžky za polarizačným filtrom.[3, 19, 20, 23] Hodnota PMD, respektíve DGD, je potom určená pomocou počtu extrémov alebo pomocou rýchlej Fourierovej transformácie - FFT [20, 23]. Pri počítaní extrémov sa využíva vzťah [20]

$$\Delta\tau = \frac{k_2 \cdot \pi \cdot N_e}{\Delta\omega} \quad (4.5)$$

kde  $k_2 = 0,82$  pre dlhé vlákna a  $k_2 = 1$  pre krátke vlákna,  $N_e$  je počet extrémov a  $\Delta\omega$  je frekvenčný rozsah. Pri použití FFT sa zmerané spektrum vlnových dĺžok transformuje do časovej oblasti a výsledok sa preloží Gaussovou funkciou [3, 20, 23]. Výhodou využitia FFT postupu je práve grafický výstup reprezentujúci medzividové väzby meranej časti vlákna[3]. Ďalšou výhodou využitia FFT postupu je možnosť odfiltrovania vysokofrekvenčných zložiek, ktoré by inak boli v postupe počtu extrémov považované za maximá a minimá [20]. Výhody tejto metódy sú [3]:

- dobrá absolútna neistota merania,
- vhodné aj pri začlenení EDFA<sup>1</sup> zosilňovačov,
- rýchlosť a jednoduchosť,
- možnosť merať aj diskkrétne komponenty.

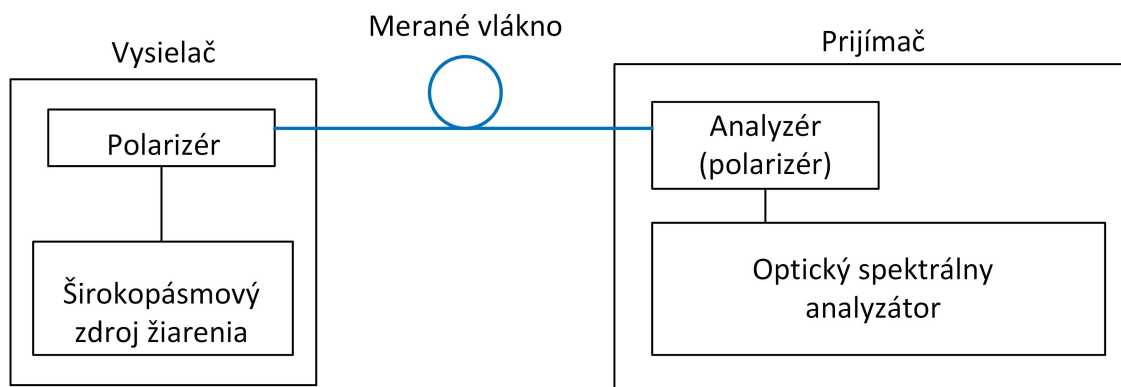
Nevýhody tejto meracej metódy sú:

- náchylnosť vlákna na vibrácie,
- potreba vykonať dva meracie kroky,
- limit pri meraní vyšších hodnôt PMD,
- citlivosť na vstupnú polarizáciu,
- PMD druhého rádu sa nemeria priamo, ale určuje sa výpočtom.

Metóda je vhodná pre meranie PMD hodnôt na optických vláknach ktoré využívajú vlnové dĺžky pre jednovidové prenosy[3, 23]. Na obrázku 4.4 je znázornená bloková schéma zapojenia metódy skenovania vlnovej dĺžky.

---

<sup>1</sup>Erbium Doped Fibre Amplifier



Obr. 4.4: Bloková schéma metódy skenovania vlnovej dĺžky [3, 20]

### 4.5.2 Polarimetrická metóda

Polarimetrická metóda je inak označovaná aj ako metóda analýzy Jonesovej matice [3, 20]. Princípiálne patrí medzi najpresnejšie meriace metódy a taktiež je najčastejšie používaná. Je to frekvenčná polarimetrická metóda vďaka ktorej sme schopní obsahovať kompletnú charakteristiku PMD pri stanovení optimálnej frekvenčnej závislosti polarizácie disperzného vektora. DGD určuje veľkosť disperzného vektora a polarizácia meraného vlákna určuje orientáciu disperzného vektora [3]. Meranie prebieha tak, že laditeľný laser vysiela postupne žiarenia rôznej vlnovej dĺžky a polarizačný kontrolér, ktorý ovláda polarizačné filtre. Ten nastaví filtre tak, aby prepustili tri rôzne lineárne (pod uhlom  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  alebo  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ) polarizačné stavy pre každú vysielanú vlnovú dĺžku [20]. Tieto stavy následne analyzuje polarimeter. Výhody tejto metódy sú [3]:

- veľký dynamický rozsah merania (až 50 dB),
- vysoká reprodukovateľnosť merania,
- minimálna absolútna nepresnosť,
- možnosť merania aj s EDFA zosilňovačmi v trase,
- necitlivosť na vstupnú polarizáciu.

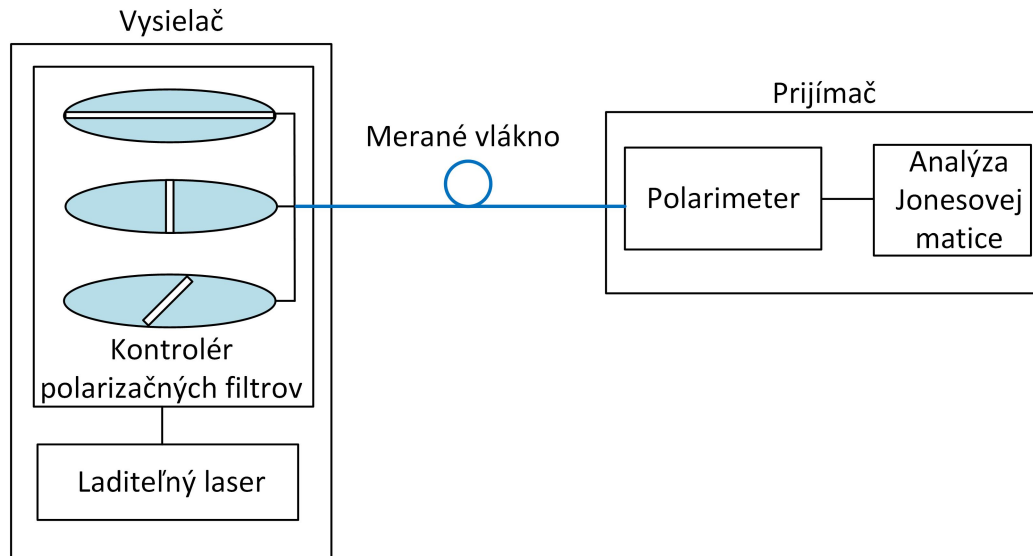
Nevýhody tejto metódy sú:

- nákladné zariadenia
- časovo aj technologicky náročné systémy
- nutnosť vyhodnocovania každej vlnovej dĺžky samostatne
- nemožnosť merania v teréne
- náchylné na teplotné zmeny
- náchylné na vibrácie vlákna
- možnosť merania PMD **maximálne** do 50 ps

V praxi sa táto metóda používa pre presné laboratórne merania optických kompo-



mentov, hlavne pri výrobe [3], [20]. Na obrázku 4.5 je znázornená bloková schéma zapojenia polarimetrickej metódy.



Obr. 4.5: Bloková schéma polarimetrickej metódy [20]

### 4.5.3 Metóda skramblovania polarizačných stavov - SSA

Princíp fungovania spočíva v meraní výkonu optického vlákna na frekvenčnom páre [3]. Frekvenčný pár sa označuje  $k$ , volí sa od  $k = 1$  až  $k = N$ , kde  $N$  je celkový počet párov pre vybraný frekvenčný rozsah. Cieľom týchto párov je získať hodnotu DGD alebo jednu náhodne kódovanú I/O-SOP<sup>2</sup> PMD hodnotu. Kvôli tomu je každý pár pridružený, nastavený náhodne a rovnomerne kódovaný I/O-SOP. Čím väčší počet I/O-SOP tým menšia neistota merania. Výhody tejto metódy sú[3]:

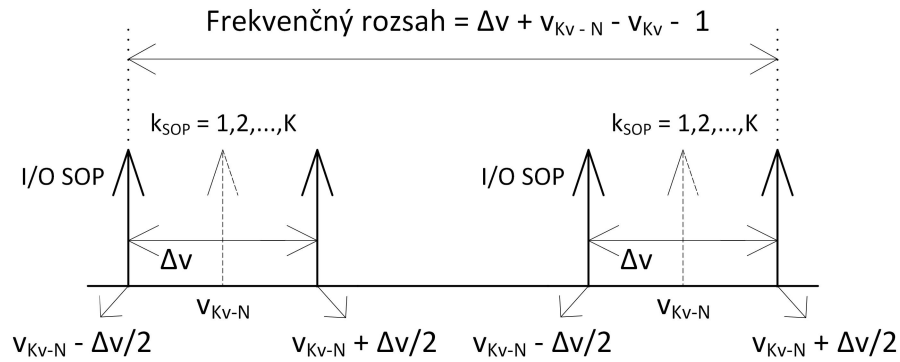
- rýchle a jednoduché meranie,
- možnosť realizácie ako jednostranného meracieho prístroja.

Nevýhody tejto metódy sú:

- časovo náročné
- presnosť menšia ako u GINTY (pre väčšinu aplikácií stále postačujúca)

Na obrázku 4.6 je znázornený koncept frekvenčných párov, frekvenčných spektier, odstupov a rozsahov tejto metódy.

<sup>2</sup>Input/Output State Of Polarization



Obr. 4.6: Koncept frekvenčných párov, frekvenčných spektier, odstupov a rozsahov metódy SSA [3]

#### 4.5.4 Metóda POTDR

Je to metóda, ktorá kombinuje meranie PMD s metódou optickej reflektometrie. Táto metóda umožňuje meranie celej optickej trasy, zistiť v ktorých úsekoch su PMD hodnoty nepriaznivé a následne dané úseky vymeniť alebo obísť[3, 23]. Funguje rovnako ako metóda OTDR na princípe spätného rozptylu. Od metódy OTDR sa ale líši tým, že reflektogram je vyhodnocovaný polarizovane. Merací signál sa do vlákna vysiela v slede impulzov a hodnoty PMD vyčítame zo spätného rozptýleného žiarenia. PMD sa pri využití tejto metódy nemeria priamo, pre určenie hodnôt PMD sa využíva vzťah [3, 20, 23]

$$PMD \approx \beta \cdot \sqrt{L \cdot h} \quad (4.6)$$

kde  $\beta$  [ps/km] je veľkosť dvojlomu vo vlákne,  $L$  je dĺžka vlákna a  $h$  je väzobná dĺžka (charakterizuje väzby medzi polarizačnými vidmi). Vázobná dĺžka predstavuje dĺžku vlákna, pri ktorej dôjde k výraznej zmene osy dvojlomu vo vlákne, dôsledkom toho je výrazná výmena energie medzi polarizačnými vidmi [3, 20, 23]. Na to, aby sme získali parametre zo vzťahu 4.6, je potrebné do vlákna ešte posielat krátke impulzy polarizovaného optického žiarenia. Na to sa využíva metóda SOP<sup>3</sup> alebo metóda DOP<sup>4</sup>[3, 20, 23].

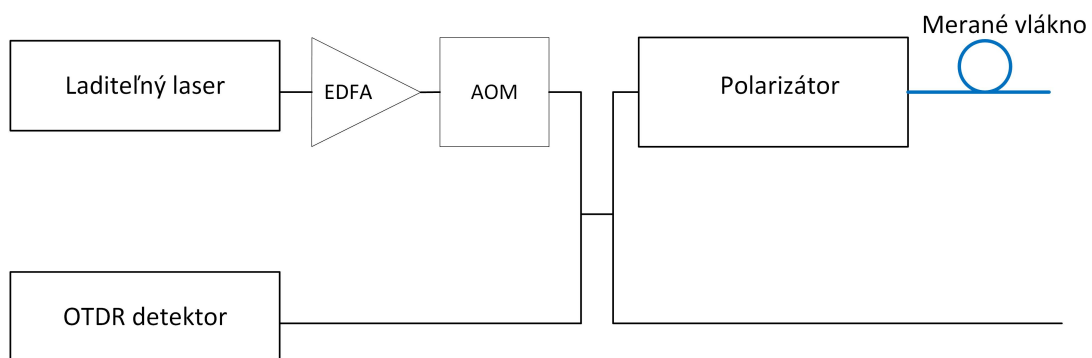
#### Metóda SOP

Vplyvom dvojlomu a medzividovej väzby dochádza k zmene SOP. Pomocou spätne rozptýleného žiarenia môžeme potom tieto zmeny sledovať. Parameter  $\beta$  ovplyvňuje rýchlosť zmeny SOP a parameter  $h$  zase *charakter* tejto zmeny [20, 23]. Napríklad

<sup>3</sup>State of Polarization

<sup>4</sup>Degree of Polarization

pri zobrazení na Poincarého guľi, parameter  $\beta$  určuje rýchlosť rotácie SOP a parameter  $h$  určuje zmenu osi rotácie [23]. Meraním na rôznych vlnových dĺžkach získame spektrálnu závislosť zmien SOP pre jednotlivé úseky na trase a tým umožňuje vyhodnotiť veľkosť PMD. Zapojenie tejto metódy pozostáva z laditeľného lasera malej spektrálnej šírky, jeho výstup je ďalej zosilnený EDFA zosilňovačom a modulovaný akusticko-optickým modulátorom AOM. Táto vysielacia časť nám generuje meracie impulzy, ktoré prechádzajú polarizátorom do meraného vlákna. Následne spätne rozptýlené žiarenie prejde taktiež polarizátorom k detektoru OTDR [20, 23]. Táto metóda je vhodná na meranie kratších trás s typickými hodnotami  $\text{PMD} \leq 0,7$  ps/km. Na obrázku 4.7 je bloková schéma zapojenia POTDR metódou analýzy SOP.



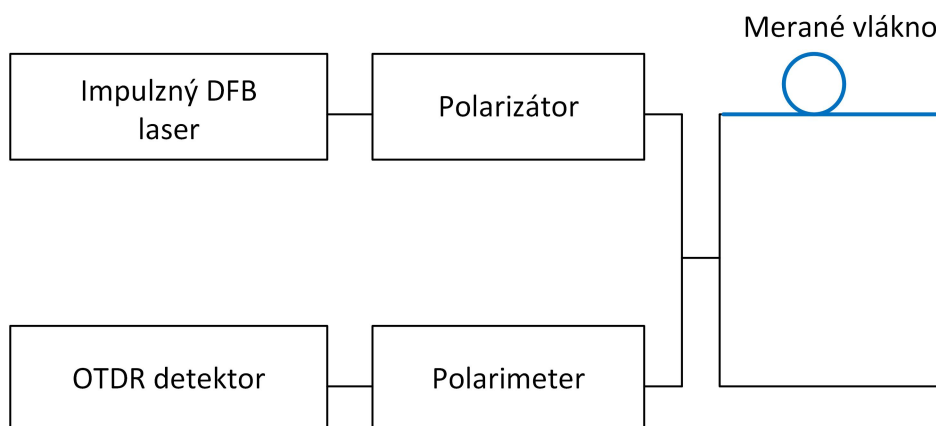
Obr. 4.7: Bloková schéma zapojenia POTDR metódou analýzy SOP [20, 23]

## Metóda DOP

Zdrojom žiarenia je veľmi úzkospektrálny DFB laser. Ten sa používa kvôli tomu, aby nedošlo k depolarizácii signálu vo vlákne. Výstupné žiarenie z tohto lasera je naviazané do meraného vlákna. Následne pomocou polarimetra a detektora OTDR sa analyzuje DOP zo spätne rozptýleného žiarenia. DOP závisí ako na dvojlome tak aj na medzividovej väzbe podľa troch situácií [3, 20, 23]:

1. Vlákna so slabým dvojlomom (malé  $\beta$ ) – DOP bude vysoký (až 1), nezáleží na medzividovej väzbe. V praxi vlákna s malou hodnotou PMD.
2. Vlákna so silným dvojlomom a silnou medzividovou väzbou (veľké  $\beta$ ; krátka väzobná dĺžka  $h$ ) – DOP bude malý ( $\approx 1/3$ ) a bude sa rýchlo meniť práve kvôli krátkej väzobnej dĺžke. V praxi sa jedná o vlákna so strednou hodnotou PMD.
3. Vlákna so silným dvojlomom a slabou medzividovou väzbou (veľké  $\beta$ ; dlhá väzobná dĺžka  $h$ ) – v tomto prípade záleží aj na vzájomnej polohe SOP žiarenia

a tvaru dvojlomu vo vlákne. DOP môže nadobúdať vysokých aj nízkych hodnôt ale mení sa pomaly. V praxi sa jedná o vlákna s vysokou hodnotou PMD. Na obrázku 4.8 je bloková schéma zapojenia POTDR metódou analýzy DOP.



Obr. 4.8: Bloková schéma zapojenia POTDR metódou analýzy DOP [3, 20, 23]

#### 4.5.5 TINTY - tradičná interferomagnetická metóda

Princíp spočíva v interferencii<sup>5</sup> nízko koherentného<sup>6</sup> optického žiarenia. Využíva sa širokospektrálny zdroj žiarenia, napríklad LED dióda [3, 20, 23]. Výstupné polarizované žiarenie zo zdroja prejde polarizátorom P do meraného vlákna, kde na druhom konci vlákna je pripojený PMD analyzátor. Základným prvkom tohto analyzátoru je Michelsonov interferometer. V ňom je polarizované žiarenie rozdelené do dvoch ramien, jedno zakončené pohyblivým, druhé nepohyblivým zrkadlom. Tým, že sa optické žiarenie odráža od oboch zrkadiel späť, dochádza k interferencii signálov na detektore. Pohybom zrkadla dochádza k časovému posunu signálov. Interferogram získame z tohto posunu a z neho sme schopný vyčítať oneskorenie spôsobené PMD. PMD hodnota je práve stredná hodnota vyčítaného oneskorenia. Pri meraní štandardných telekomunikačných vlákien je interferogram preložený Gaussovou krivkou, potom je hodnota PMD úmerná smerodajnej odchýlke krivky [3, 20, 23]. Platí vzťah [20]

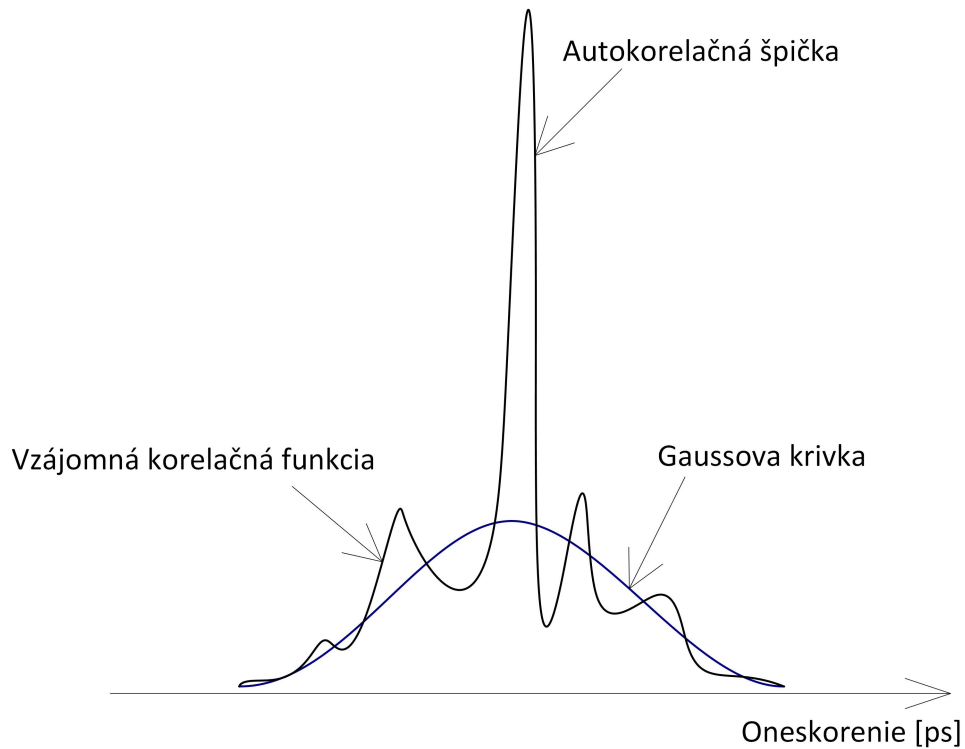
$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot \sigma \quad (4.7)$$

Na obrázku 4.9 je zobrazený príklad námeru pri použití tejto metódy.

Na interferograme je zobrazená korelačná funkcia dvoch ortogonálnych polarizačných rovín [3], kde malé špičky sú spôsobené silnou medzividovou väzbou a

<sup>5</sup>Interferencia – skladanie vlnení

<sup>6</sup>Koherencia – optická čistota



Obr. 4.9: Príklad námeru PMD pri použití metódy TINTY [3, 20, 23]

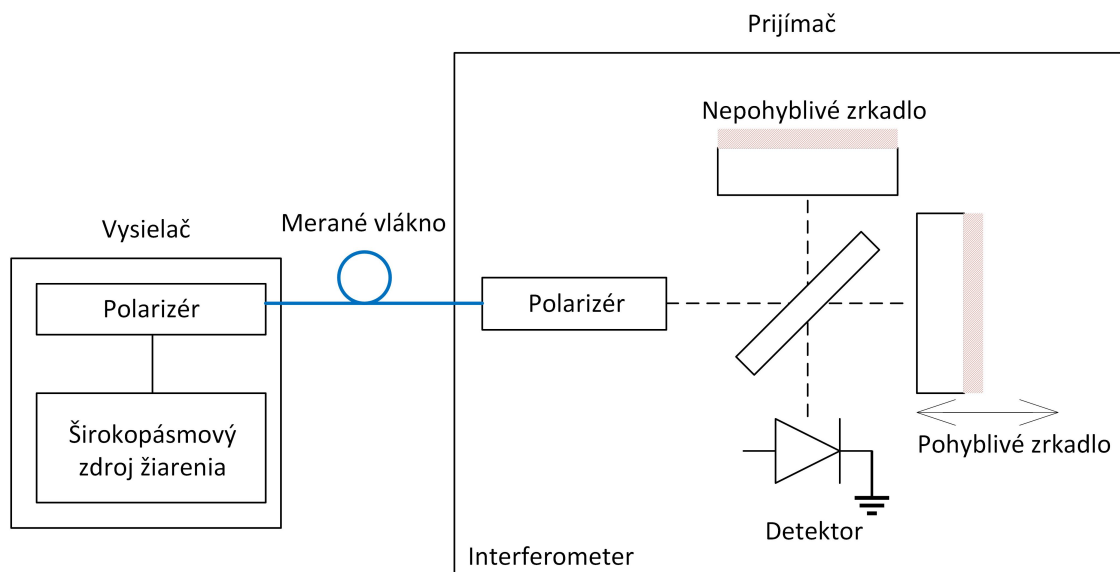
hlavná špička je spôsobená autokorelačnou funkciou vlastného meracieho signálu [20]. Hlavná špička závisí na tvare spektra. Je dôsledkom situácie kedy sú zrkadlá v takej polohe, že ramená majú rovnaku dĺžku [3, 20, 23]. Na obrázku 4.10 je zobrazená bloková schéma zapojenia tejto metódy.

Metóda nie je vhodná na meranie trás, ktoré obsahujú EDFA zosilňovače. Meranie na nich je možné, ale znamenalo by to merať každý zosilňovaný úsek samostatne a celkovú hodnotu potom vypočítať. Ďalšou nevýhodou je presnosť merania, ktorá je ovplyvňovaná autokorelačnou špičkou. Pri meraní nízkych hodnôt PMD môže chybovosť dosahovať aj desiatky percent meranej hodnoty. Presnosť tejto metódy je 100 fs a horšia [3, 20, 23].

#### 4.5.6 GINTY - všeobecná interferomagnetická metóda

Od metódy TINTY sa líši tým, že výsledný signál obsahujúci optické žiarenie z oboch ramien interferometru je rozdelený pomocou polarizačného deliča PBS<sup>7</sup> na dve navzájom ortogonálne polarizované zložky [3, 20, 23]. Každá zo zložiek dopadá na samostatný detektor kde dôjde k interferencii. Z každého detektoru vznikne interferogram obsahujúci korelačnú zložku. Tieto korelačné zložky je možné od seba

<sup>7</sup>Polarization Beam Splitter



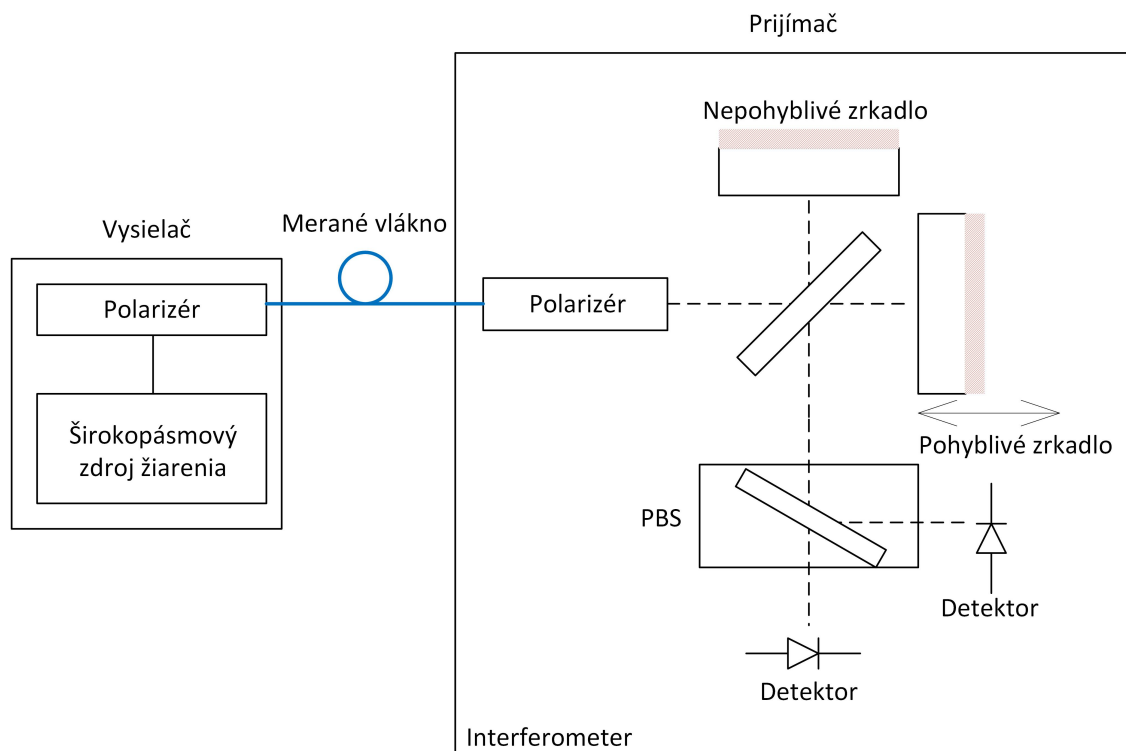
Obr. 4.10: Bloková schéma zapojenia metódy TINTY [3, 20, 23]

oddeliť matematickými operáciami medzi obidvoma interferometrami [3, 20, 23]. Po odčítaní interferogramov získame vzájomnú koreláciu a ich sčítaním zase čistú autokoreláciu. Pri použití tejto metódy sa odstráni autokorelačná špička prítomná v interferograme metódy TINTY. Z výsledného interferogramu sme potom schopní vyhodnocovať PMD. Interfogram sa nemusí prekladať Gaussovou krivkou a hodnota PMD sa určí priamo z bodov interferogramu ako RMS<sup>8</sup> [3, 20, 23]. Výhodou tejto metódy je necitlivosť na spektrálny útlm trasy a presnosť 20 fs [3]. Je to rýchla, univerzálna metóda s využitím v teréne, schopná merať aj nízke hodnoty PMD a taktiež ponúka možnosť merať PMD hodnoty spektrálne závislých prvkov trasy [20]. Na obrázku 4.11 je zobrazená bloková schéma zapojenia tejto metódy.

#### 4.5.7 Závislosť PMD na vonkajších vplyvoch

PMD, ako aj stav polarizácie vlákna, je závislé na zmeny dvojlomu vo vlákne. K týmto zmenám často dochádza už priamo pri výrobe vlákna (asymetria jadra). Tieto zmeny sa ale do určitej miery dajú ovplyvniť. Zmeny dvojlomu ale spôsobujú aj vonkajšie vplyvy ako okolitá teplota, poloha vlákna (stočenie), skrut vlákna, mechanické pnutie, vibrácie spôsobené kolísaním vo vetre alebo dokonca aj akustické vibrácie či blesky. Niektoré z týchto vplyvov sú v prírode úplne nahodné a niektoré pôsobia na vlákno len veľmi pomaly v čase. Preto je dôležité aby merania PMD boli dlhodobé a pravidelné. [26] sa venuje experimentom a teoretickej analýze závislosti PMD

<sup>8</sup>Root Mean Square – stredná kvadratická hodnota



Obr. 4.11: Bloková schéma zapojenia metódy GINTY [3, 20, 23]

na teplote v jednojádrových vláknach. Podobne v [27] sa autori venujú dlhodobému monitorovaniu PMD prvého ako aj druhého rádu na vzdušnej optickej trase dlhej 14,8 km v Južnej Afrike. Problematike sa venuje aj [28], ktorý ale skôr skúma limity koherentných detektorov a ich schopnosť kompenzovať vplyv PMD v optických trasách.

## 5 Praktická část

V tejto časti boli podľa zadania prevedené merania polarizácie, zmeny stavov polarizácie a meranie polarizačnej vidovej disperzie PMD za rôznych okolitých podmienok. V nasledujúcich kapitolách sú popísané použité prístroje, ako boli prístroje zapojené počas merania a aké na nich boli nastavené parametre. Merania boli prevedené v laboratóriu prenosových médií na FEKT VUT Brno, trase na kampuse VUT FEKT a trase Praha-Holešovice – Řež.

### 5.1 Použité prístroje

#### 5.1.1 Meranie polarizačnej vidovej disperzie

Na meranie polarizačnej vidovej disperzie bola použitá modulárna meracia platforma značky EXFO, konkrétne model FTB-200 v kombinácii s modulom FTB-5700. Táto kombinácia umožňuje jednoduché, rýchle a presné meranie. Veľkou výhodou tohto meracieho prístroja je, že meranie je jednostranné, to v praxi šetrí veľa času. Dokáže merať až do dĺžky 150 km. Prístroj používa princíp Fresnelovho odrazu, kvôli tomu je potrebné na ukončenie meranej trasy použiť odrazové zrkadlo. Merací rozsah prístroja pre PMD je 0–20 ps s presnosťou  $\pm 0,2$  ps. Na obrázku 5.1 je odfotený konkrétny použitý prístroj. Pre dlhodobé meranie PMD bol využitý program automatického plánovania merania „Plánovač měření pro EXFO FTB-5700“, ktorý je výsledkom bakalárskej práce „Návrh a realizace programu pro měřící přístroj EXFO FTB-5700“ [9]. Celkovo boli uskutočnené dve dlhodobé merania, jedno trojdňové a jedno päťdňové. Dlhodobé merania boli prevedené na optickej trase okolo kampusu VUT FEKT vid.5.2.

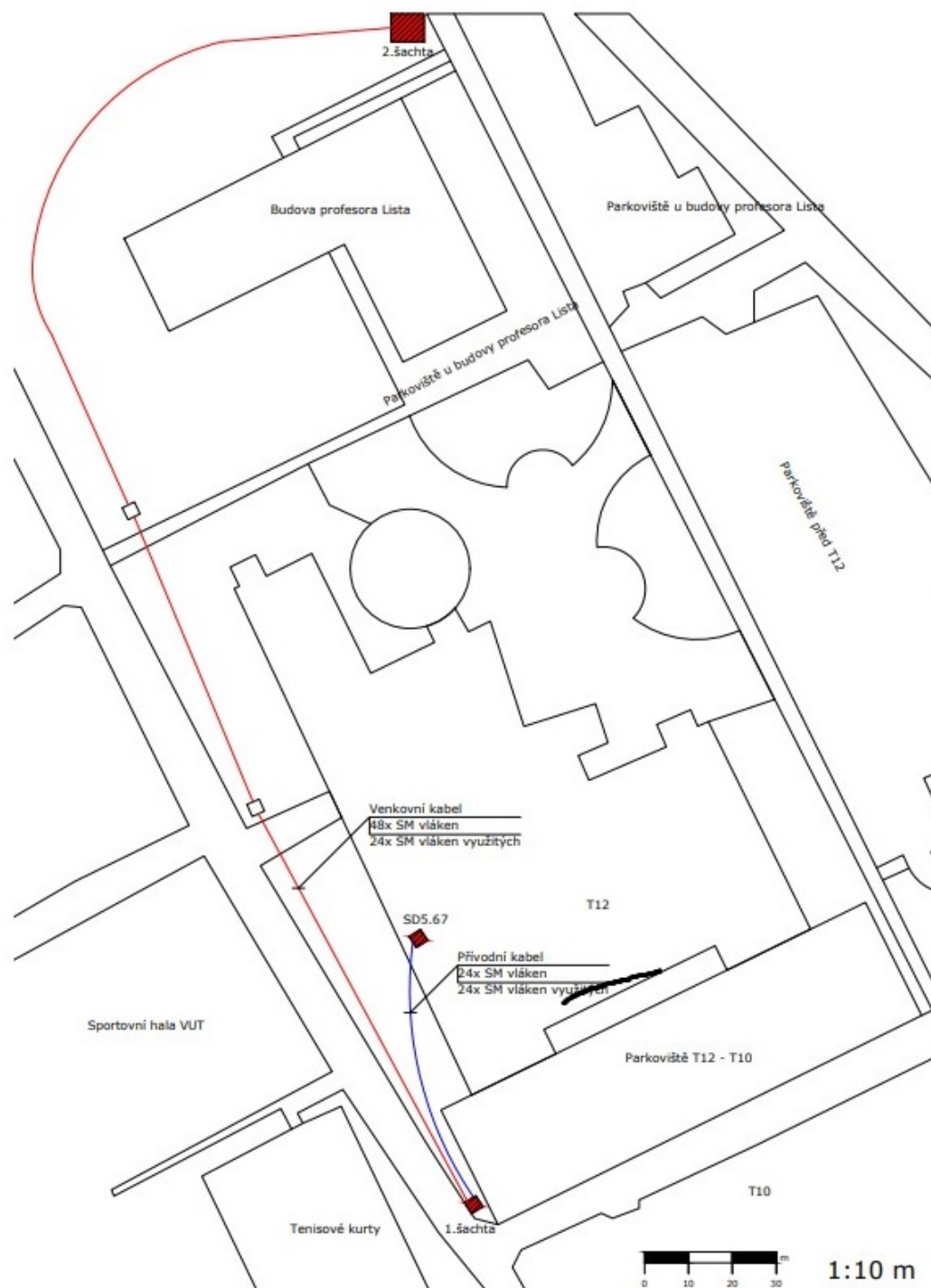




Obr. 5.1: Použitý prístroj pre meranie polarizačnej vidovej disperzie

### 5.1.2 Meranie polarizácie

Na meranie polarizácie a jej stavov bol využitý polarimeter v kombinácii s polarizačným analyzér. Táto kombinácia bola vytvorená a naprogramovaná pracovníkmi Ústavu telekomunikácií na FEKT VUT v Brne. Na obrázku 5.3 je napravo odfotený použitý polarimeter a naľavo polarizačný analyzér.



Obr. 5.2: Meraná trasa pre PMD aj polarizáciu



Obr. 5.3: Použité prístroje pre meranie polarizácie

## 5.2 Zapojenie meraní

### 5.2.1 Zapojenie merania polarizačnej vidovej disperzie

Zapojenie je jednoduché, merané vlákno sa priviedlo na vstup na zadnej strane meračieho prístroja, následne už len stačilo nepripojený koniec vlákna ukončiť odrazovým prvkom (v tomto prípade bol použitý modrý konektor - UPC). Celé zapojenie na odfotené je obrázku 5.5.

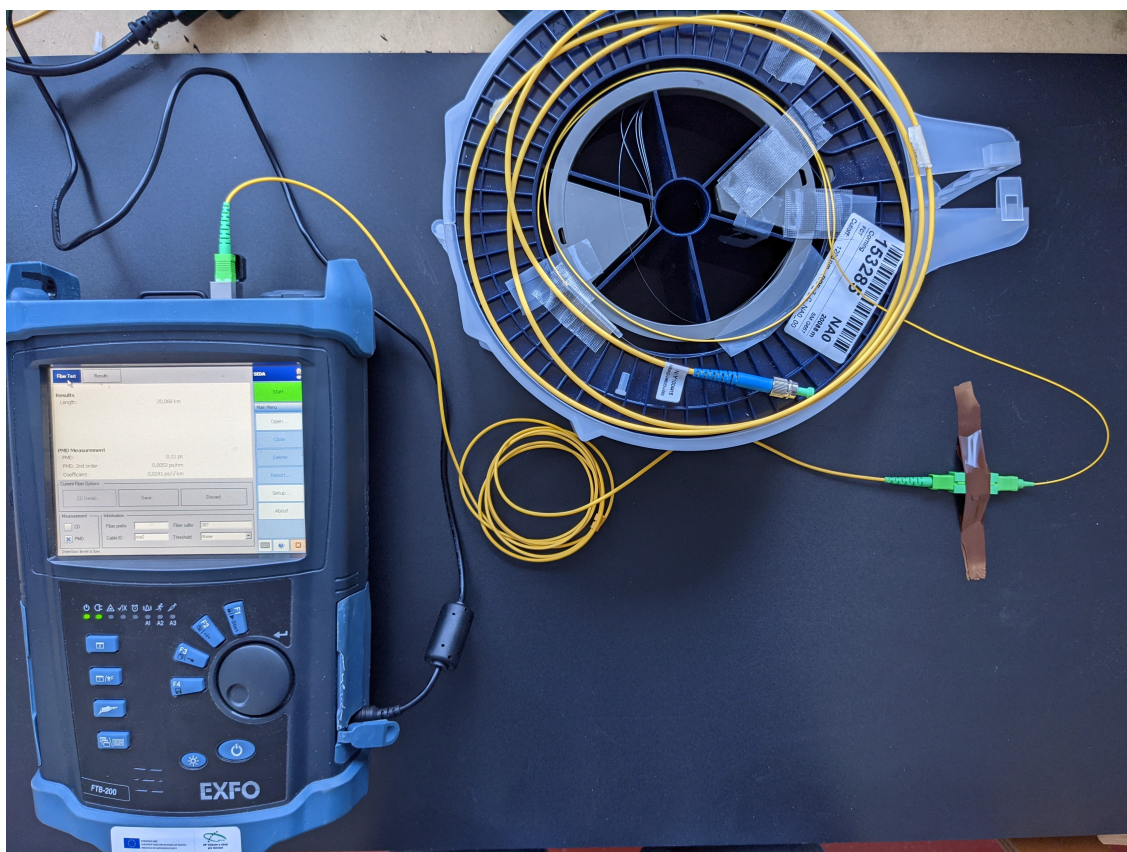
### 5.2.2 Zapojenie merania polarizácie

Hlavnými prvkami tohto zapojenia bol polarimeter a polarizačný analyzátor. Polarimeter slúži na odmeranie hodnôt výstupnej polarizácie a polarizačný analyzátor slúži ako zdroj žiarenia a k tomu ešte merá zmeny polarizačných stavov. Zo zadnej strany boli obidva prístroje napájané nízkym napätím z programovateľného Raspberry Pi. Koniec vlákna bol pri tomto meraní rozdelený pomocou optického deliča. Na prednej strane je podľa obrázku 5.1 vidieť, že polarimeter ma jeden vstup. Na tento vstup bol privedený jeden z koncov vlákna, namerané dáta sa posielali a ukladali na externý disk z ktorého boli po ukončení merania exportované. Polarizačný analyzátor má na



Obr. 5.4: Trasa Praha-Holešovice – Řež – dlhodobé merania polarizácie

prednej strane dva vstupy, ľavý vstup slúži ako meracia jednotka, ktorá zachytáva zmeny polarizačných stavov, a druhý vstup je dióda, ktorá do vlákna vysiela žiarenie a slúži ako zdroj. Do ľavého vstupu bol pripojený druhý koniec vlákna a do pravého vstupu bol pripojený začiatok vlákna. Žiarenie z diódy teda putovalo vláknom do vstupu polarimetru a taktiež do vstupu polarizačného analyzériu. Meranie je ovlá-



Obr. 5.5: Zapojenie merania polarizačnej vidovej disperzie

dané terminálom spustiteľnom na spomínanom Raspberry Pi, v tomto terminále sa nastavuje taktiež vzorkovacia frekvencia, v tomto prípade je nastavená frekvencia 8192 Hz. V prípade dlhodobého mernia bol použitý polarimeter a balančný detektor.

### 5.3 Namerané hodnoty PMD

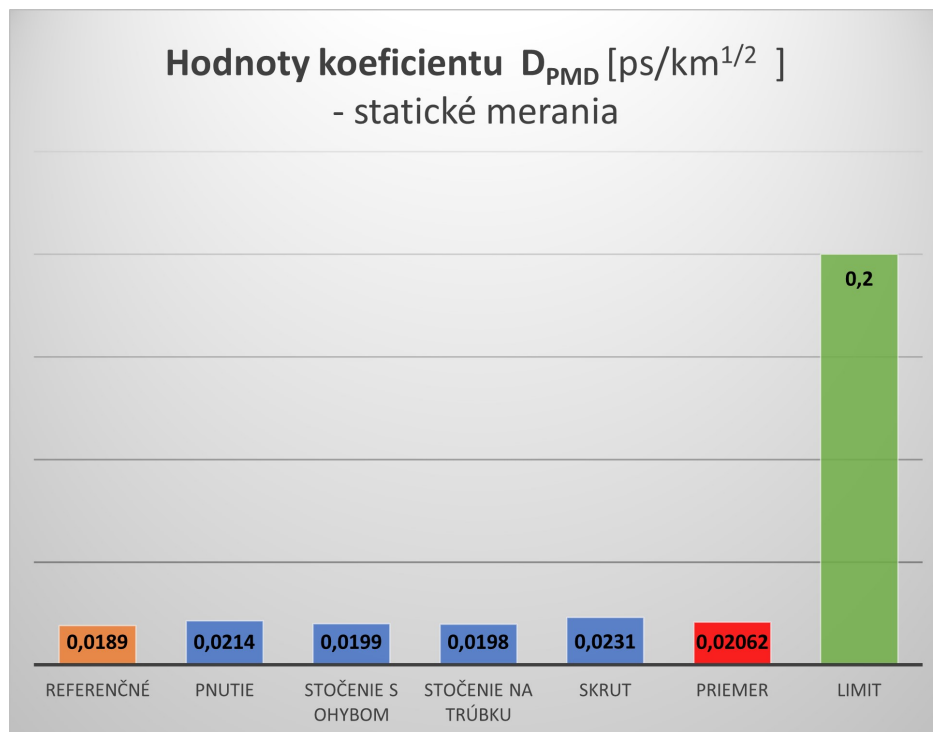
Toto meranie prebehlo celkovo deväťkrát, pričom pri každom meraní, okrem prvého, sa s vláknom zaobchádzalo. Prvé meranie bolo referenčné, pri tomto meraní bolo vlákno celý čas presne v takej istej polohe ako je na obrázku 5.5. Pri ďalšom meraní bolo vlákno narovnané, až napnuté. Následne bolo vlákno stočené, s ostrým ohybom približne v strede, na prípravku, ktorý na to slúži. Potom bolo vlákno niekoľkokrát natočené na prípravku s priemerom 0,7 cm. Ďalej bolo vlákno skrútené pozdĺž vlastnej osi. Merací cyklus týchto meraní bol približne 2 minúty. V ďalších meraniach sa s vláknom manipulovalo počas merania. Princíp manipulácie bol ako pri statických meraniach, teraz sa ale napr. vlákno napína a stáča do pôvodnej polohy alebo sa ohýba a stláča, počas toho ako prebieha meranie. Merací cyklus týchto meraní bol podstatne dlhší oproti statickým meraniam. Každé meranie trvalo približne 8–10

minút. Je to z toho dôvodu, že ak sa s vláknom manipulovalo merací prístroj mal dojem, že sa meria vzdušné spojenie a tak musel prejsť do režimu merania vzdušných spojení. Takto boli umelo vytvorené vonkajšie vplyvy ktoré pôsobia na vlákna a tým menia dvojlom vlákna, od ktorého sa potom odvíja výsledna hodnota PMD. Limitná hodnota koeficientu meraného vlákna bola  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .

1. Podľa hodnôt z tabuľky 5.1 a grafu 5.6 je vidieť že ani jedno statické meranie sa k limitnej hodnote ani nepriblížilo.

<i>Statické merania</i>	PMD	$D_{PMD}$	PMD 2. rádu
	[ps]	$[\text{ps}/\sqrt{\text{km}}]$	[ps/km]
<b>Referenčné</b>	0,08	0,0189	0,0033
<b>Pnutie</b>	0,10	0,0214	0,0042
<b>Stočenie s ohybom</b>	0,09	0,0199	0,0036
<b>Stočenie na trúbke</b>	0,09	0,0198	0,0036
<b>Skrut</b>	0,10	0,0231	0,0049
<b><i>Priemer</i></b>	<b>0,09</b>	<b>0,0206</b>	<b>0,0039</b>
<b><i>LIMIT</i></b>		<b>0,2</b>	

Tab. 5.1: Tabuľka nameraných PMD hodnôt statickými meraniami

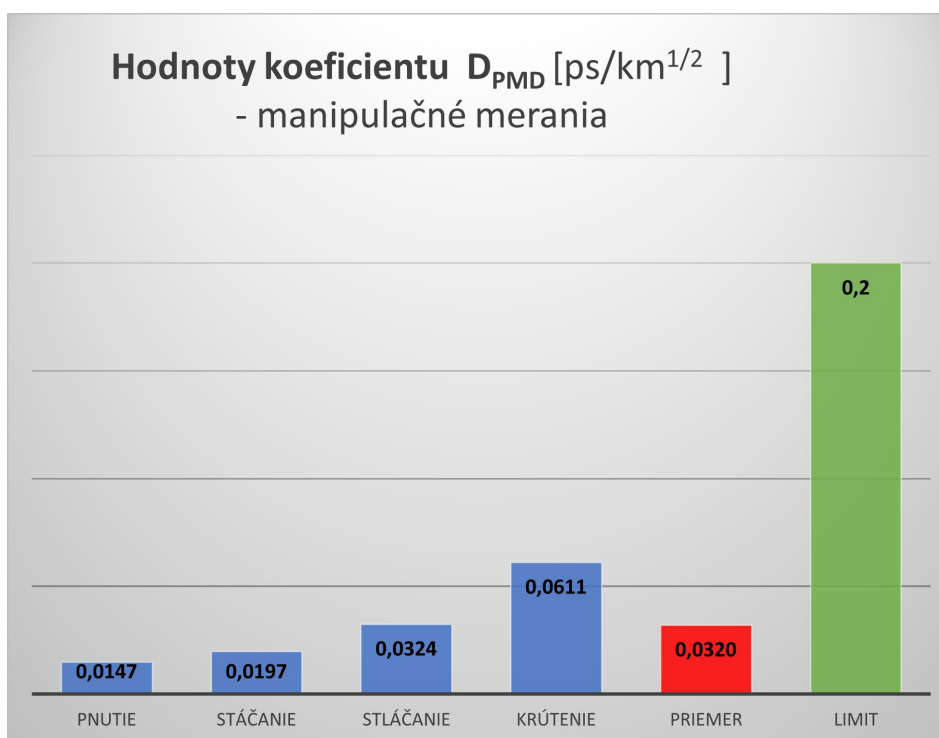


Obr. 5.6: Namerané hodnoty PMD - statické merania

2. Podľa hodnôt z tabuľky 5.2 a grafu 5.7 je zrejmé, že manipulácia s vláknom počas merania určite ovplyvňuje hodnoty PMD vo väčšej miere ako keď sa s vláknom nemanipuluje. Aj napriek tomu, ani jedna hodnota sa k limitnej hodnote PMD nepriblížila.

<i>Manipulačné merania</i>	PMD	$D_{PMD}$	PMD 2. rádu
	[ps]	$[ps/\sqrt{km}]$	[ps/km]
<b>Pnutie</b>	0,07	0,0147	0,002
<b>Stáčanie</b>	0,09	0,0197	0,0035
<b>Stláčanie</b>	0,15	0,0324	0,0096
<b>Krútenie</b>	0,27	0,0611	0,0342
<b><i>Priemer</i></b>	<b>0,15</b>	<b>0,0320</b>	<b>0,0123</b>
<b><i>LIMIT</i></b>		<b>0,2</b>	

Tab. 5.2: Tabuľka nameraných PMD hodnôt manipulačnými meraniami

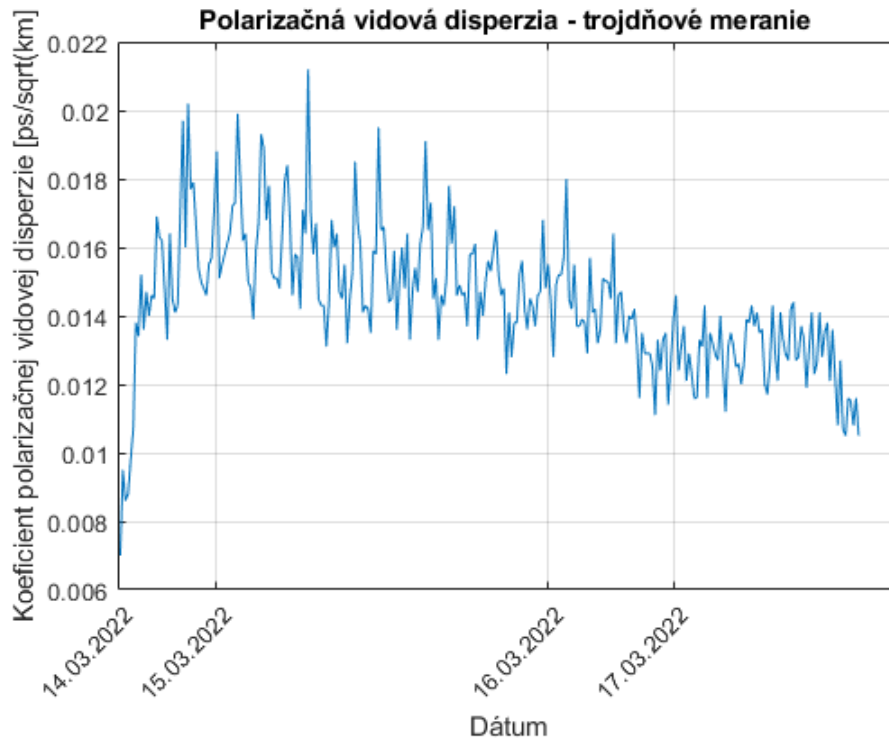


Obr. 5.7: Namerané hodnoty PMD - manipulačné merania

### 5.3.1 Namerané hodnoty dlhodobých meraní - PMD

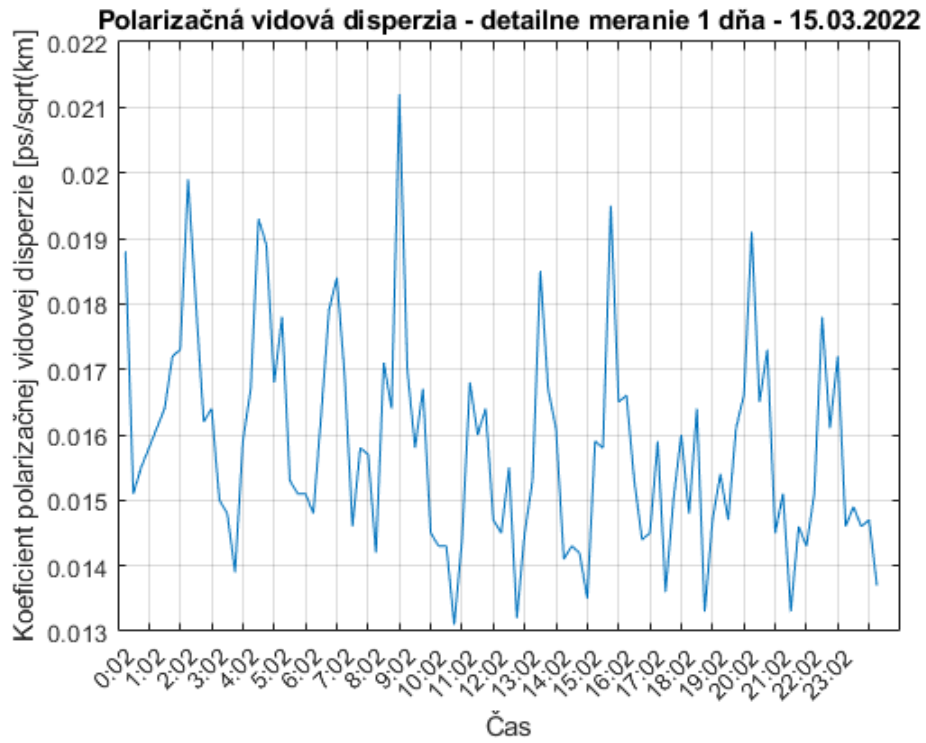
Na grafoch 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 sú zobrazené námery dvoch dlhodobých meraní polarizačnej vidovej disperzie aj zobrazenie námerov jedného dňa z obidvoch meraní.

Počas merania došlo v obidvoch meraniach k zmene meracieho cyklu, kvôli tomu bolo v niektorých dňoch nameraných viac hodnôt ako v ostatných. Na hodnoty polarizačnej vidovej disperzie v tomto meraní vplývali najmä faktory ako teplota, vibrácie, vyvíjaný tlak a dĺžka vlákna. Pri tomto meraní nebola zistená priama závislosť na žiadnom z týchto faktorov. Prvotné hodnoty zobrazené ako prudký nárast na začiatku merania mohli byť spôsobené zapojením meracieho prístroja. Z grafov je ale zrejmé, že k limitnej hodnote sa ani jeden námer nepriblížil.

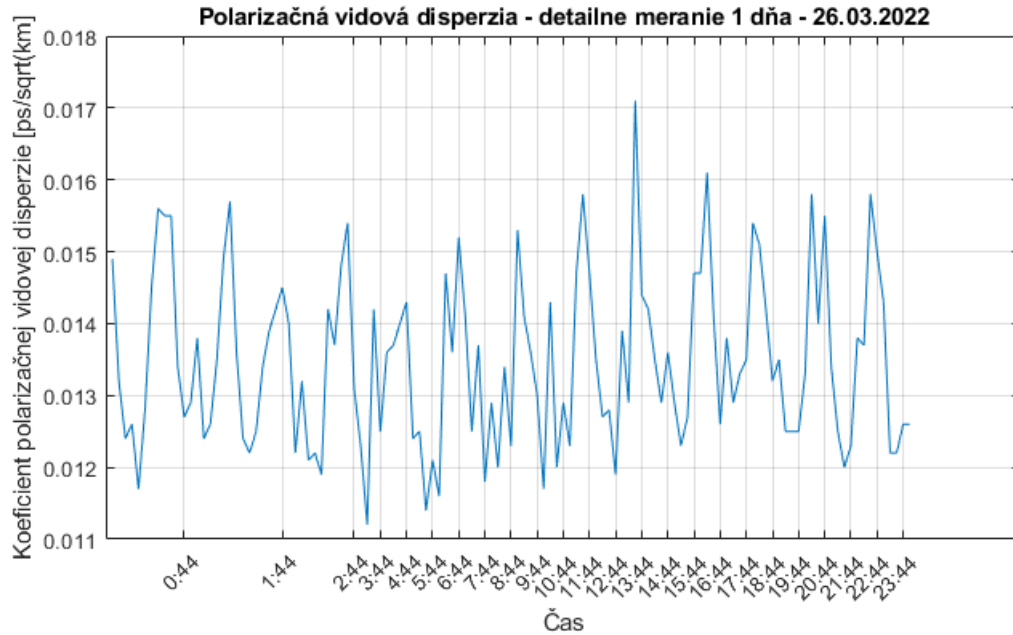


Obr. 5.8: Trojdňové dlhodobé meranie PMD

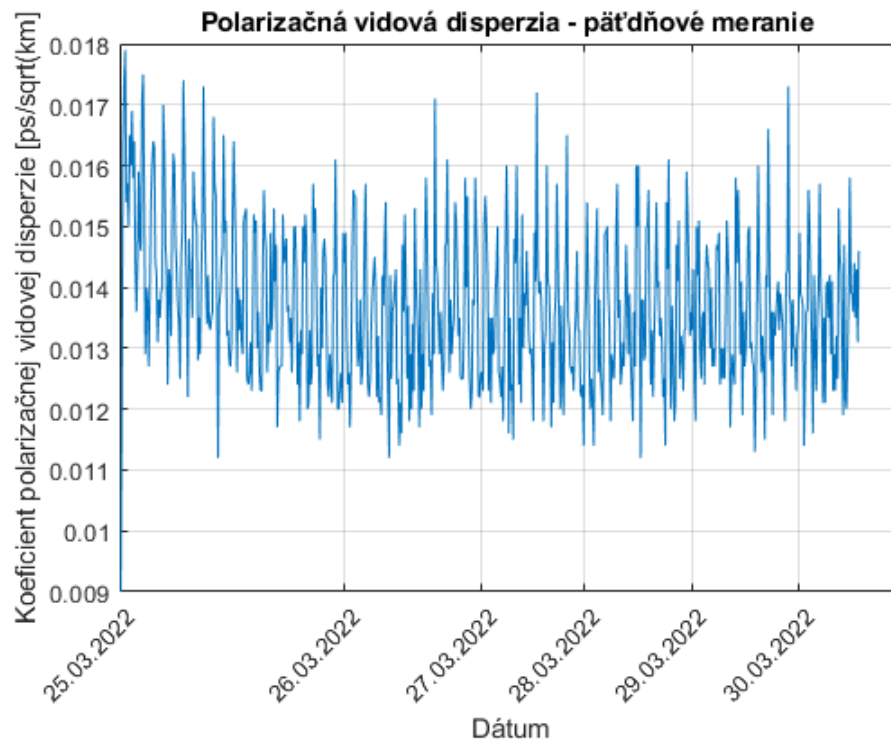




Obr. 5.9: Zobrazenie jedného dňa pri trojdňovom meraní



Obr. 5.10: Zobrazenie jedného dňa pri pätdňovom meraní



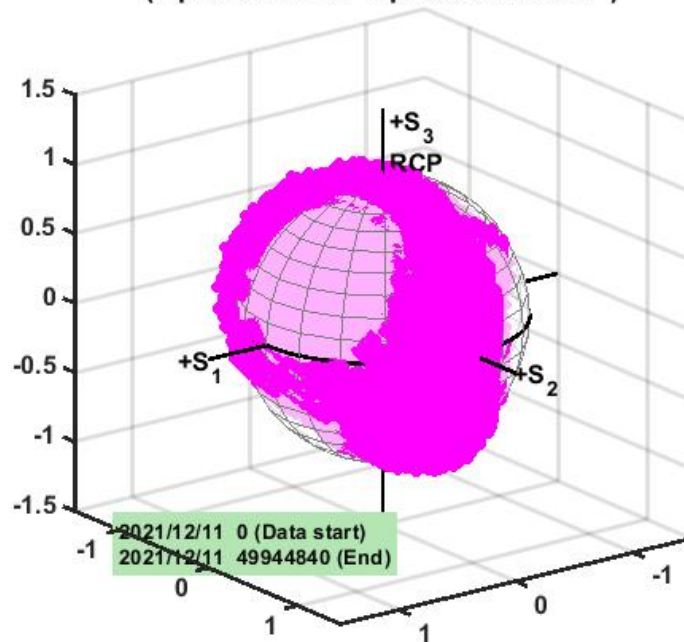
Obr. 5.11: Päťdňové dlhodobé meranie PMD

## 5.4 Spracovanie nameraných hodnôt polarizácie

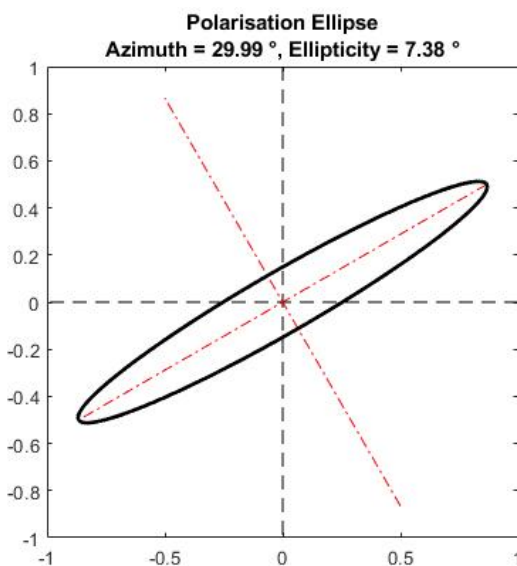
Každé meranie bolo uložené do dvoch súborov, jeden obsahoval namerané hodnoty polarizačným analyzárom a druhý namerané hodnoty polarimetrom. Namerané hodnoty tvorili datasety, ktoré bolo potrebné spracovať do požadovaného formátu pre výsledné spracovanie. V prípade hodnôt z polarimetru boli v každom súbore vytvorené štyri datasety, jeden z každej diódy polarimetru. Tieto datasety boli spracované pomocou skriptu v programe MATLAB do stokesových vektorov pomocou ktorých bola vygenerovaná výstupná polarizačná elipsa. Tieto vektory boli ešte ale upravené do formy matice, kde bola každej hodnote priradená časová značka, následne bola matica exportovaná ako súbor .csv. To bolo potrebné urobiť, pretože pomocou ďalšieho skriptu bolo generované zobrazenie na Poincarého guli, kde bol požadovaný minimálny formát v tvare <čas. značka><stokesove vektory 0–3>. Celkovo bolo prevedených 13 meraní, za účelom dostať čo najviac najrôznejších zobrazení. Počas každého merania sa s meraným vláknom rôzne manipulovalo (napr. stláčalo, natahovalo, ohýbalo, krútilo a pod.). Z trinástich bolo vybratých 5 najrôznejších zobrazení na Poincarého guli. Ku každej Poincarého guli je uvedená aj príslušná polarizačná elipsa. Každý bod na guli predstavuje polarizáciu v čase, body ktoré sa zobrazujú na opačnej strane ako sa na guľu pozeráme sú zobrazené bledšou farbou.

- Na obrázku 5.12a je vidieť, že polarizácia nadobúdla všetky polarizačné stavy, dominantnými ale boli lineárne horizontálne a vertikálne polarizované stavy s prechodom cez  $L-45^\circ$  a kruhovo točivé stavy.
- Na obrázku 5.13a je vidieť, že dominantnými polarizačnými stavmi boli opäť lineárne horizontálne a vertikálne polarizované stavy.
- Na obrázku 5.14a je vidieť, že dominantným polarizačným stavom bol v tomto prípade  $L-45^\circ$  a lineárne vertikálne polarizovaný stav.
- Na obrázku 5.15a je vidieť, že dominantným polarizačným stavom bol v tomto prípade opäť  $L-45^\circ$  a lineárne vertikálne polarizovaný stav. Za zmienku stojí, že v tomto prípade iné polarizačné stavy neboli nadobudnuté.
- Na obrázku 5.16a je vidieť, že polarizácia prechádzla medzi kruhovými polarizačnými stavmi.

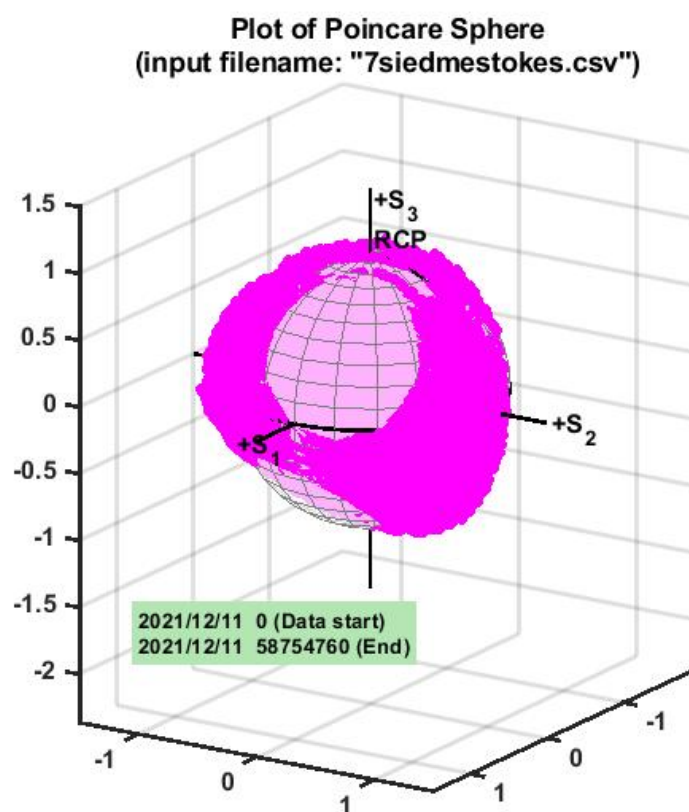
Plot of Poincare Sphere  
(input filename: "5piatestokes.csv")



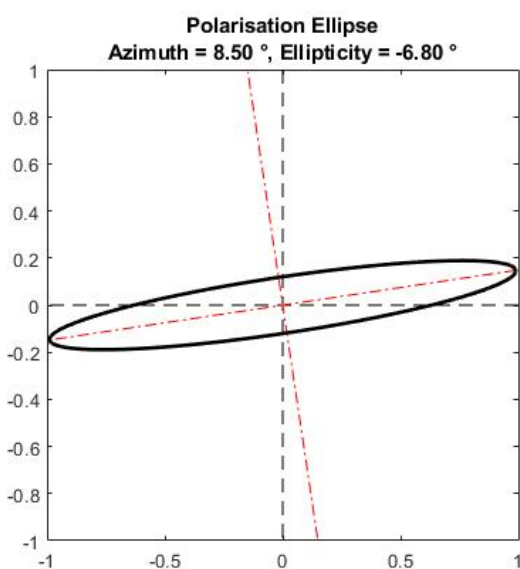
(a) Zobrazenie polarizácie na Poincarého guľi - piate meranie



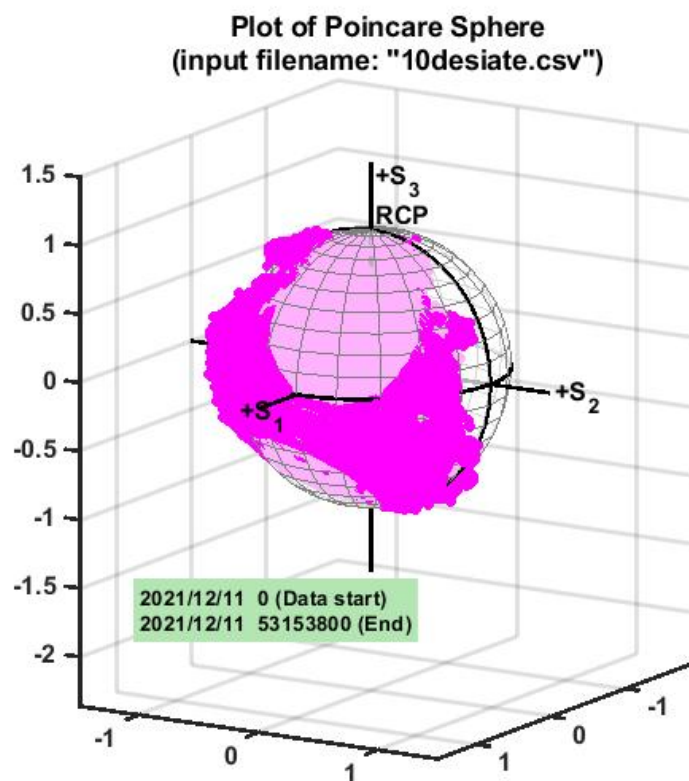
(b) Zobrazenie polarizačnej elipsy - piate meranie



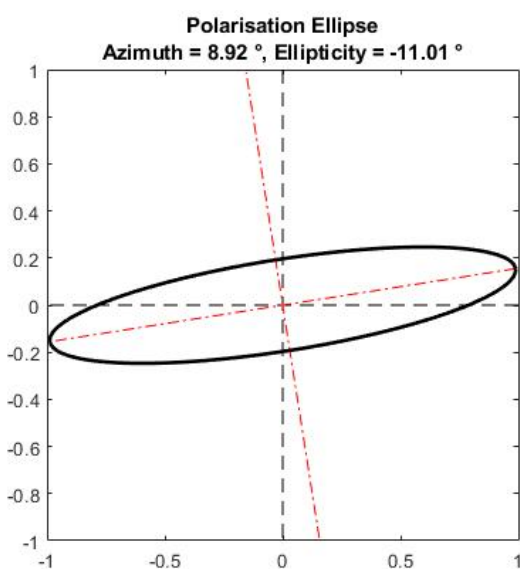
(a) Zobrazenie polarizácie na Poincarého guli - siedme meranie



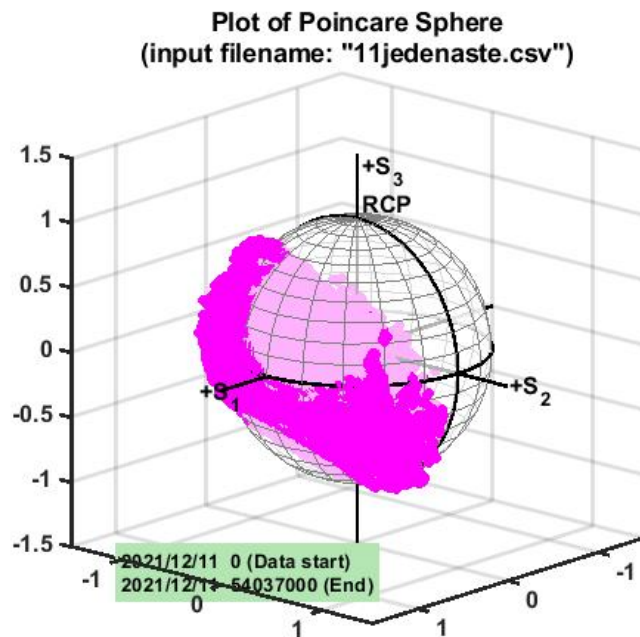
(b) Zobrazenie polarizačnej elipsy - siedme meranie



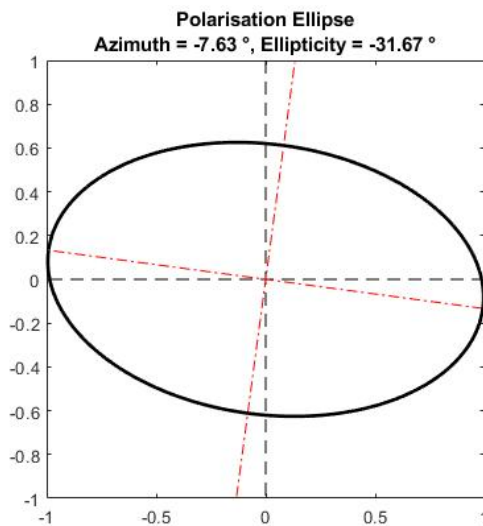
(a) Zobrazenie polarizácie na Poincarého guli - desiate meranie



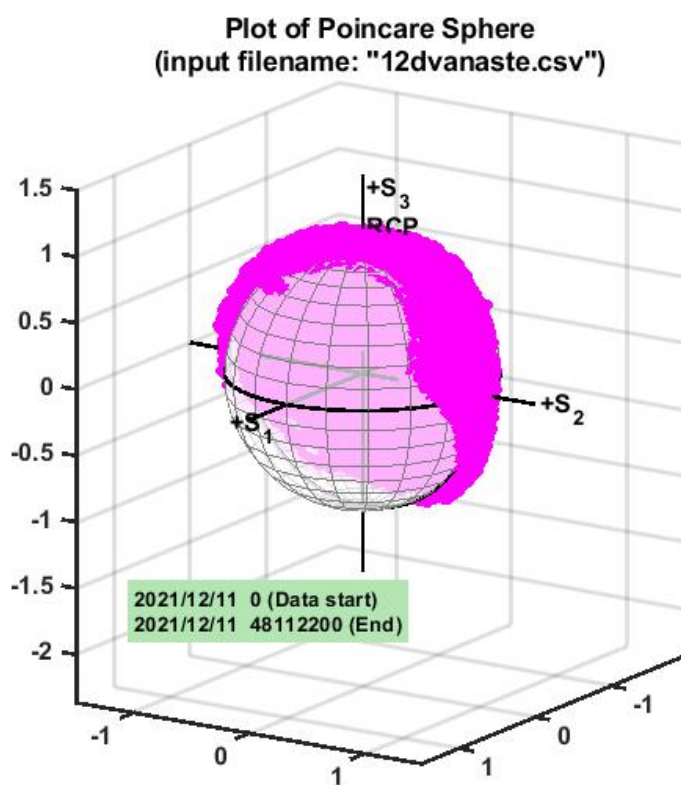
(b) Zobrazenie polarizačnej elipsy - desiate meranie



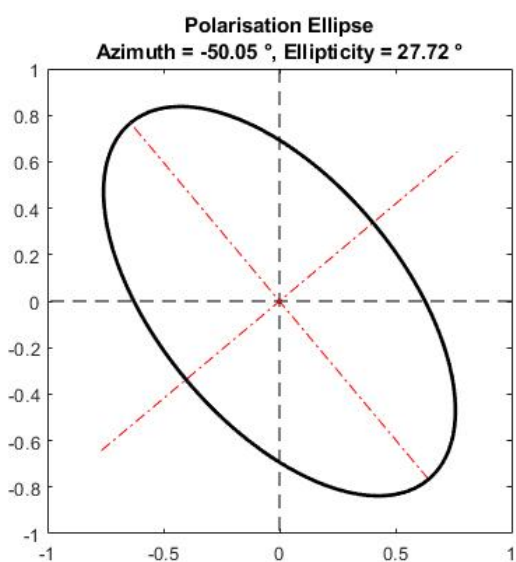
(a) Zobrazenie polarizácie na Poincarého guli - jedenáste meranie



(b) Zobrazenie polarizačnej elipsy - jedenáste meranie



(a) Zobrazenie polarizácie na Poincarého guli - dvanáste meranie



(b) Zobrazenie polarizačnej elipsy - dvanáste meranie



### 5.4.1 Spracovanie nameraných hodnôt polarizácie – dlhodobé merania

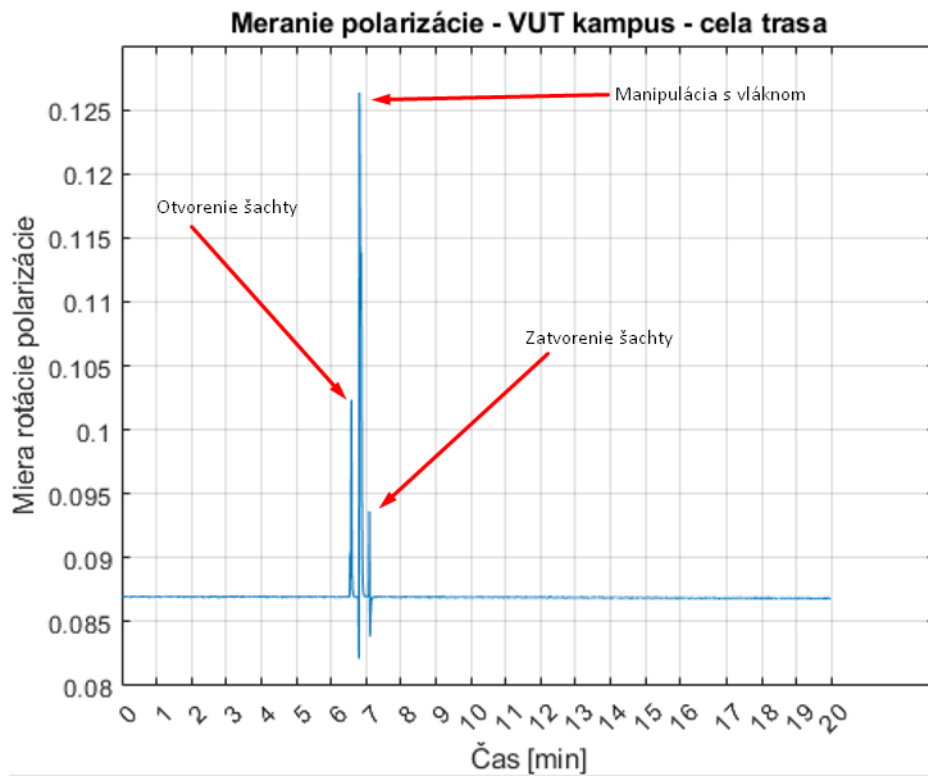
Uskutočnili sa celkovo dve dlhodobé merania, na dvoch rôznych trasách. Jedno meranie na trase 5.2 a jedno na trase 5.4. Výsledky meraní z trasy okolo kampusu sú zobrazené na 5.17 a 5.18, a výsledky merania z trasy Praha-Holešovice – Řež su zobrazené na 5.19 a 5.21.

Pri meraní polarizácie na trase okolo kampusu bolo meranie spustené a následne sa šlo k 1. šachte (viď. 5.2). Tam sa najprv niekoľkokrát poklopalo po poklope šachty, potom bol poklop otvorený a došlo k manipulácii s vláknom. Následne sa postupovalo po trase, pri ostatných šachtách nebolo možné otvorenie a manipulácia. Klopanie, búchanie a dupnutia na ostatných šachtách neboli dostatočné silné, aby ovplyvnili polarizáciu vlákna. Teplotné grafy 5.20 a 5.22 sú uvedené pre porovnanie zmien polarizácie voči teplote v daný deň.

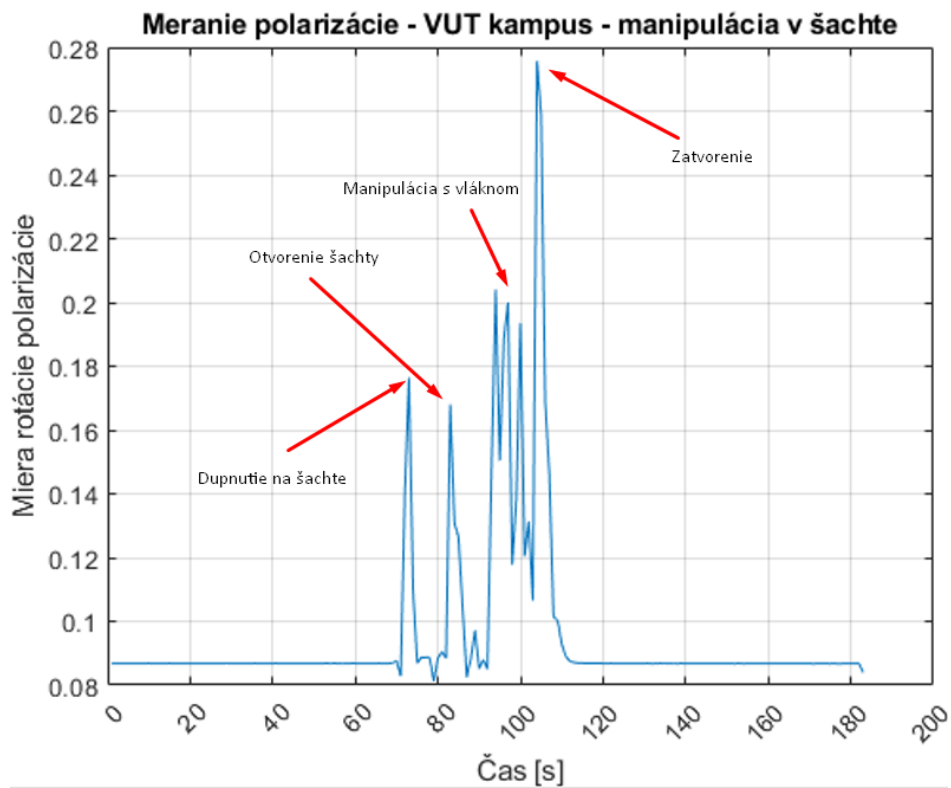
V prípade meraní na trase Praha-Holešovice – Řež je jasne vidieť rozdiel zmien rotácie v noci a cez deň, podľa toho sa dá usudzovať, že na mieru rotácie polarizácie majú značný vplyv okolité faktory, ako napríklad vibrácie a teplota. Z meraní nie je možné určiť konkrétny faktor spôsobujúci závislosť. Závislosť na lokálnych vibráciách sa v meraniach neprejavila (napr. prejazdy vlakov na blízkej trati).

#### Prehľad výsledkov meraní

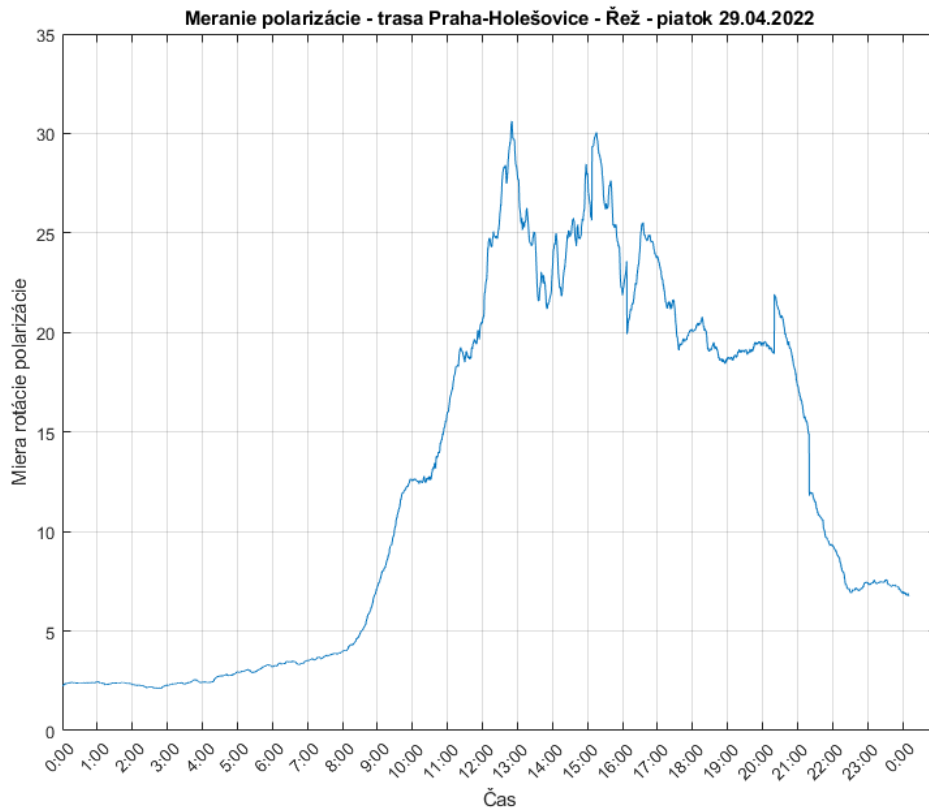
- Graf merania rotácie polarizácie 5.17 pri simulácii práce v šachtách na celej trase.
- Graf merania rotácie polarizácie 5.18 pri simulácii práce v prvej šachte.
- Graf merania rotácie polarizácie 5.19 prislúcha k rozloženiu teplôt na grafe 5.20.
- Graf merania rotácie polarizácie 5.21 prislúcha k rozloženiu teplôt na grafe 5.22.



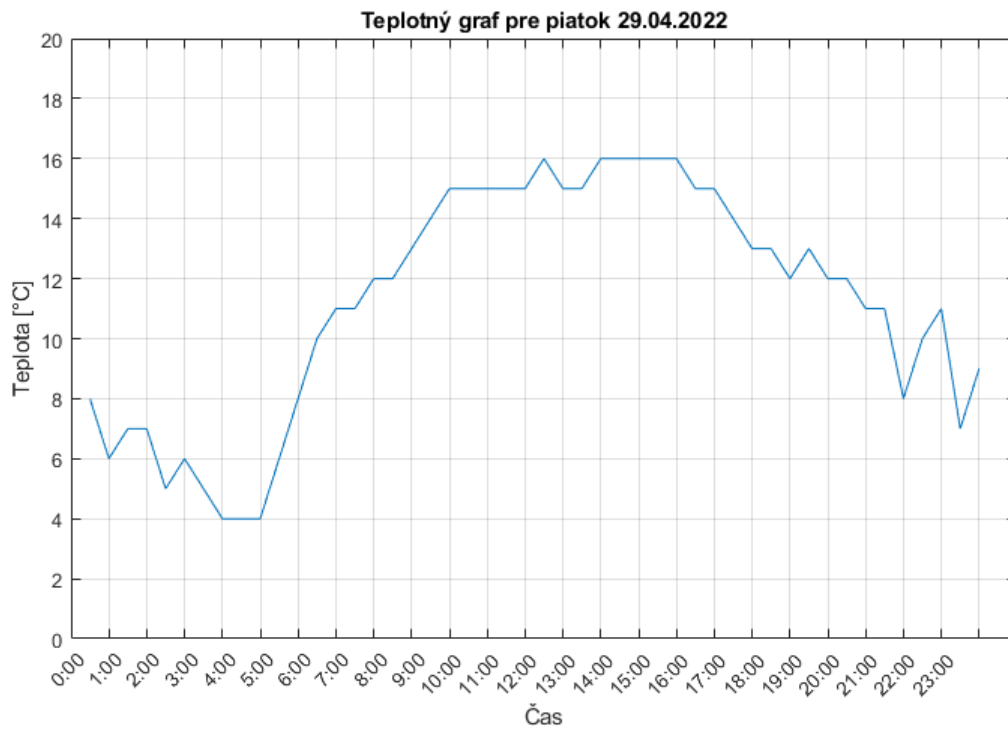
Obr. 5.17: Zmeny miery rotácie polarizácie v šachte - celá trasa



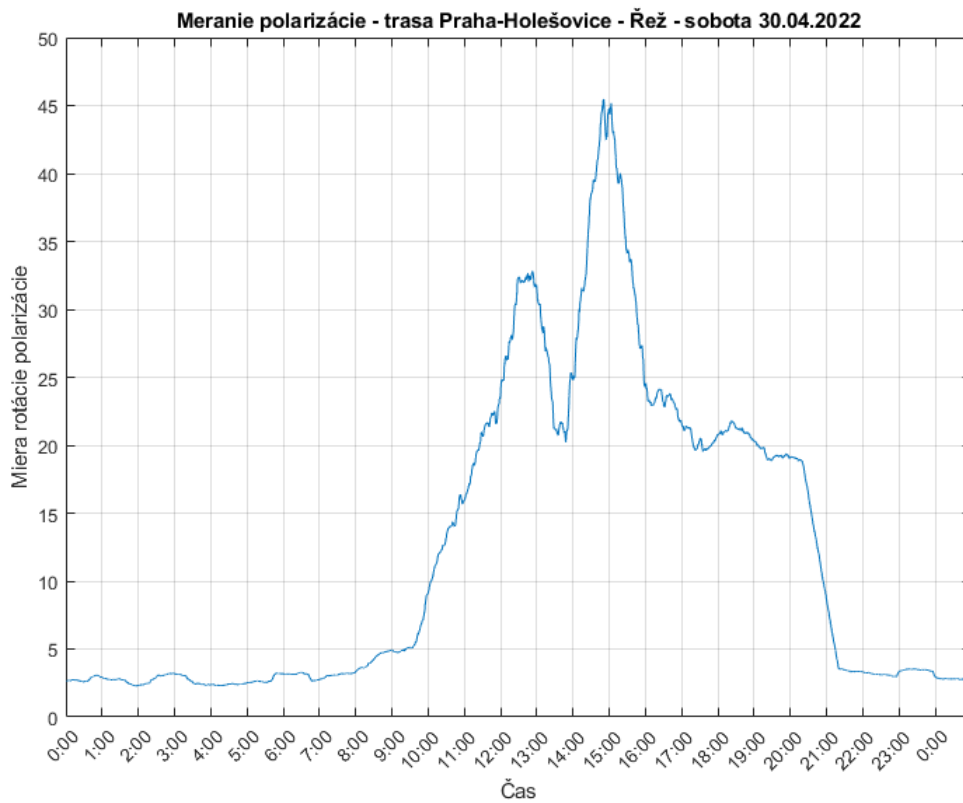
Obr. 5.18: Zmeny miery rotácie polarizácie v šachte - iba prvá šachta



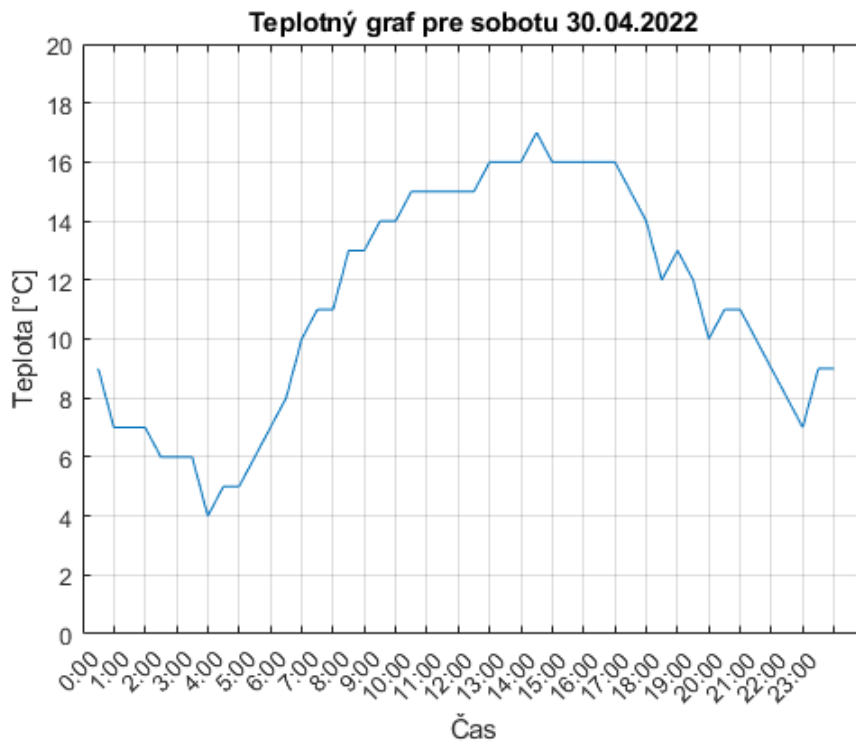
Obr. 5.19: Zmeny miery rotácie polarizácie na trase Praha-Holešovice – Řež



Obr. 5.20: Teplotný graf pre vizualizáciu teplotnej závislosti polarizácie- 29.04.2022



Obr. 5.21: Zmeny miery rotácie polarizácie na trase Praha-Holešovice – Řež



Obr. 5.22: Teplotný graf pre vizualizáciu teplotnej závislosti polarizácie - 30.04.2022

## **5.5 Laboratórne úlohy**

### **5.5.1 Laboratórna úloha - Meranie polarizácie**

V tejto laboratórnej budú študenti oboznámení s vplyvom polarizácie na prenášaný signál. Pozorované budú časové priebehy signálu pri rôznych polarizačných stavoch uskutočnených pomocou polarizačného kontroléra. Študenti zapoja meranie podľa troch pripravených schém a následne z osciloskopu zaznamenajú časové priebehy pri určitých polohách doštičiek polarizačného kontroléru. Na záver pri týchto polohách zaznamenajú aj výkon.

# Meranie polarizácie

Meno a priezvisko:

Ročník:

ID:

Študijná skupina:

Dátum merania:

Kontroloval:

## Cieľ merania

Cieľom tohto merania je oboznámiť študenta s vplyvom polarizácie na prenášaný signál. Pozorované budú časové priebehy signálu pri rôznych polarizačných stavoch uskutočnených pomocou polarizačného kontroléra.

## Zadanie

1. Oboznámiť sa s javom polarizácie.
2. Príprava pracoviska, zapojenie merania.
3. Zapísať a zakresliť namerané hodnoty a priebehy.
4. Stručne vysvetliť rušenie/prelínanie priebehov zobrazených na osciloskope.

## Teoretický rozbor

### Polarizácia

Polarizácia je smer, v ktorom vlna osciluje. Svetelné vlny su elektromagnetické vlny, ktoré sa skladajú z elektrickej (**E**) a magnetickej (**B**) intenzity. Tieto elektromagnetické vlny ležia v rovine priechnej ku smeru šírenia svetla. Hovoríme, že svetlo je nepolarizované (slnko, žiarovka) ak sa vektor elektrického poľa mení náhodne v čase (veľkosť aj smer). Ak sa mení predvídateľným spôsobom hovoríme, že sa jedná o polarizované svetlo. Podľa toho akým spôsobom sa elektrické pole v čase mení, sa určuje druh polarizácie svetla. Svetlo môže byť: lineárne, kruhovo alebo elipticky polarizované podľa toho, či sa vektor elektrického poľa pohybuje na priamke, kruhu alebo všeobecne, elipse.

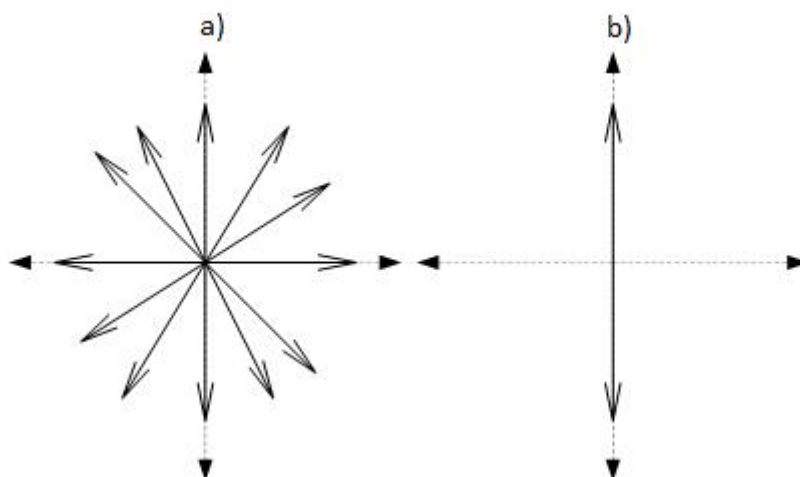
### Polarizačné stavy

#### Lineárna polarizácia

Ak je priamka, po ktorej sa vektor elektrického poľa pohybuje rovnobežná s osou x, potom je táto svetelná vlna lineárne polarizovaná (viď. obr. 1 b)).

#### Kruhová polarizácia

Hovoríme, že svetlo je kruhovo polarizované, ak vektor elektrického poľa opisuje kruh v postupne narastajúcom čase. Takáto vlna sa dá opísať ako dve ortogonálne a lineárne polarizo-

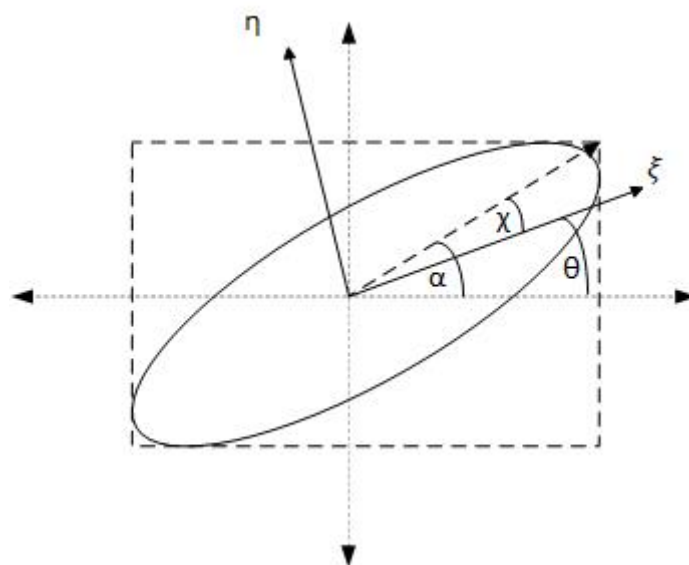


Obr. 1: Porovnanie a) nepolarizovanej a b) polarizovanej vlny

vané zložky s rovnakými amplitúdami ale rozdielnymi fázami, konkrétne  $\pi/2$ . Vlna je ľavotočivá kruhovo polarizovaná, ak  $y$  zložka fázovo zaostáva za  $x$  zložkou. V takom prípade vektor elektrického poľa rotuje v protismere hodinových ručičiek v narastajúcom čase. Hovoríme, že stav polarizácie je ľavotočivá kruhová polarizácia. Vlna je pravotočivá kruhovo polarizovaná, ak  $y$  zložka fázovo predbieha  $x$  zložku. V takom prípade vektor elektrického poľa rotuje v smere hodinových ručičiek v narastajúcom čase. Hovoríme, že stav polarizácie je pravotočivá kruhová polarizácia.

### Eliptická polarizácia

Hovoríme, že vlna je elipticky polarizovaná, ak sa vektor elektrického poľa v akomkoľvek zvolenom mieste pohybuje po elipse, tzv. polarizačnej elipse. Takáto polarizácia sa dá opísať podobne ako kruhová polarizácia, ak je opísaná dvoma lineárnymi zložkami polarizovanými podľa osí elipsy (napr.  $\xi$  a  $\eta$ ). Jedna os je hlavná a druhá je vedľajšia.



Obr. 2: Zobrazenie pomocných uhlov a osí pre elipticky polarizovanú vlnu

## **Polarizačný kontrolér**

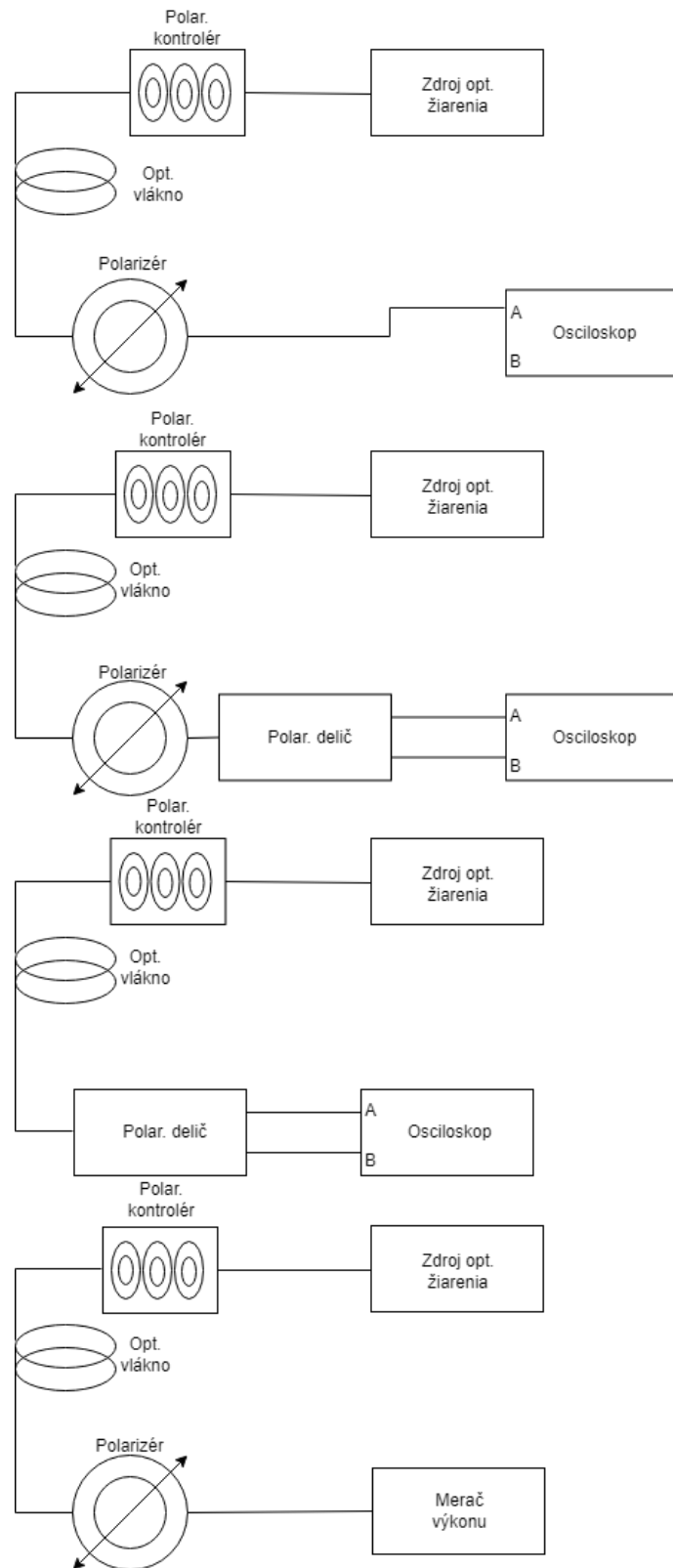
Je nástroj, ktorý obsahuje vlnové doštičky (wave-plate, retarder) a pomocou ich rôznych polôh je na výstupe možné docieľiť akéhokoľvek polarizačného stavu. Vlnové doštičky pozostávajú z optického vlákna ktoré je niekoľkokrát natočené na nástavci vnútri. Podľa toho koľkokrát je vlákno natočené sa rozlišujú  $\pi/2$  (približne 1 slučka pre 1310 nm vlnovú dĺžku) a  $\pi/4$  (približne 3 slučky pre 1310 nm vlnovú dĺžku) doštičky. V tomto meraní je konfigurácia kontroléra 2-3-2 slučky. V takejto konfigurácii 2-slučkové doštičky menia polarizáciu zväčša vo vertikálnom smere a 3-slučková doštička mení polarizáciu zväčša v horizontálnom smere.

## **Polarizér**

Je to súčiastka, ktorá prepúšťa vlny polarizované iba v špecifickom polarizačnom stave, zatiaľ čo blokuje ostatné zložky polarizačných stavov v danej vlne. Filtruje svetelný lúč s nedefinovaným alebo zmiešaným polarizačným stavom do lúča s jednotným polarizačným stavom – polarizuje ho.



# Schéma zapojenia merania



Obr. 3: Blokové schémy zapojení merania

## Postup spracovania merania

1. Zapojte meranie podľa schémy **a)** na obr. 3. Zakreslite si tvar časového priebehu z osciloskopu pri najväčšom rozkmitu, poznamenajte si polohy jednotlivých doštičiek kontroléru pri najväčšom rozkmitu. Pomocou kurzorov zistite napäťový rozdiel rozkmitu. Pri polohovaní kontroléra popíšte prelínanie/rušenie časového priebehu.
2. Zapojte meranie podľa schémy **b)** na obr. 3. Zakreslite si tvar časového priebehu z osciloskopu pri najväčšom rozkmitu, poznamenajte si polohy jednotlivých doštičiek kontroléru pri najväčšom rozkmitu. Pomocou kurzorov zistite napäťový rozdiel rozkmitu. Popíšte ako sa v tomto prípade menili časové priebehy z jednotlivých kanálov pri polohovaní kontroléra.
3. Zapojte meranie podľa schémy **c)** na obr. 3. Zakreslite si tvar časového priebehu z osciloskopu pri najväčšom rozkmitu, poznamenajte si polohy jednotlivých doštičiek kontroléru pri najväčšom rozkmitu. Pomocou kurzorov zistite napäťový rozdiel rozkmitu. Popíšte rozdiely oproti predošlým zapojeniam.
4. Zapojte meranie podľa schémy **d)** na obr. 3. Nastavte doštičky do zaznamenaných polôh z predošlých meraní a zapíšte si nameraný výkon.

časového priebehu zakreliste do vopred pripravených rámciekov. Pri každom zapojení vyskúšajte s predradnými vláknami manipulovať (ohyb, stočenie, stlačenie a pod.) a všímajte si vplyv tejto manipulácie na časový priebeh na osciloskope.

## Použité prístroje

- Zdroj optického žiarenia
- Polarizačný kontrolér
- Polarizačný delič
- Polarizér
- Merač optického výkonu
- Osciloskop

# Spracovanie merania

Meno a priezvisko:

Ročník:

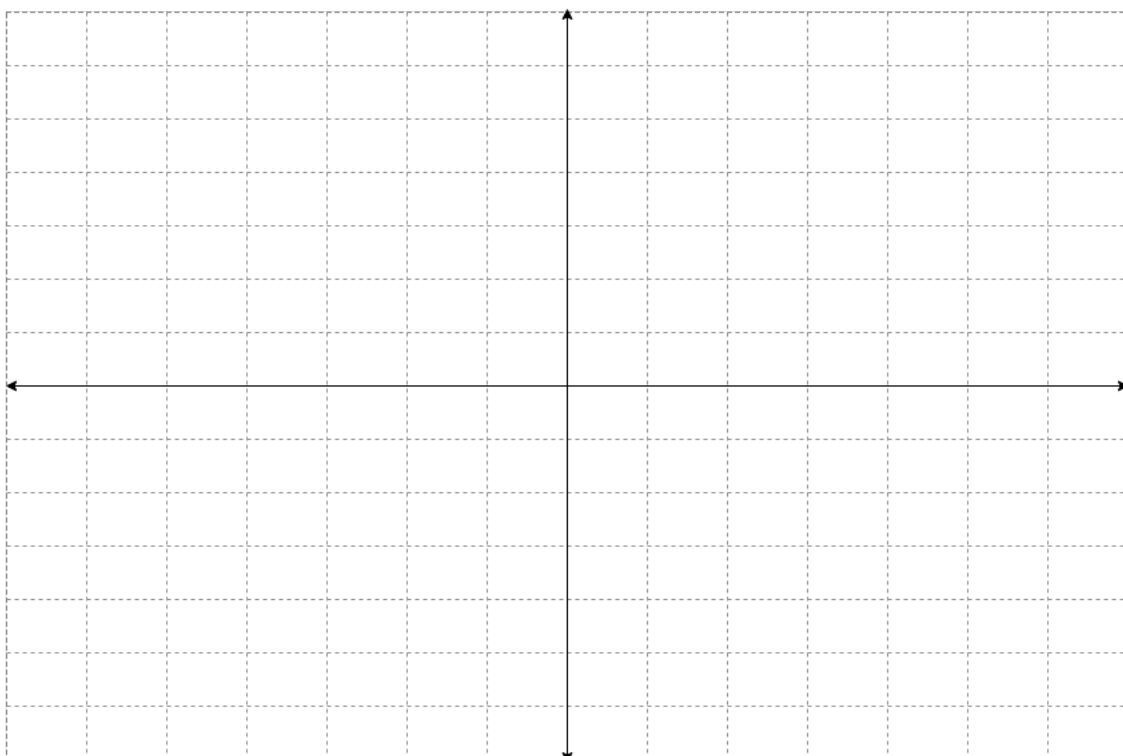
ID:

Študijná skupina:

Dátum merania:

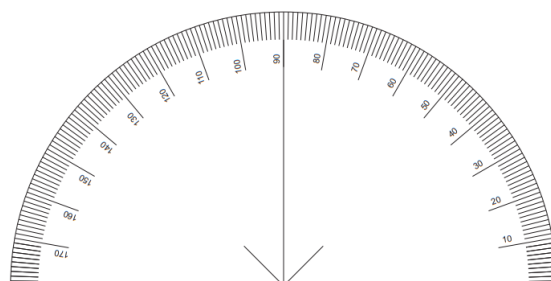
Kontroloval:

## Bod spracovania zadania č. 1.)



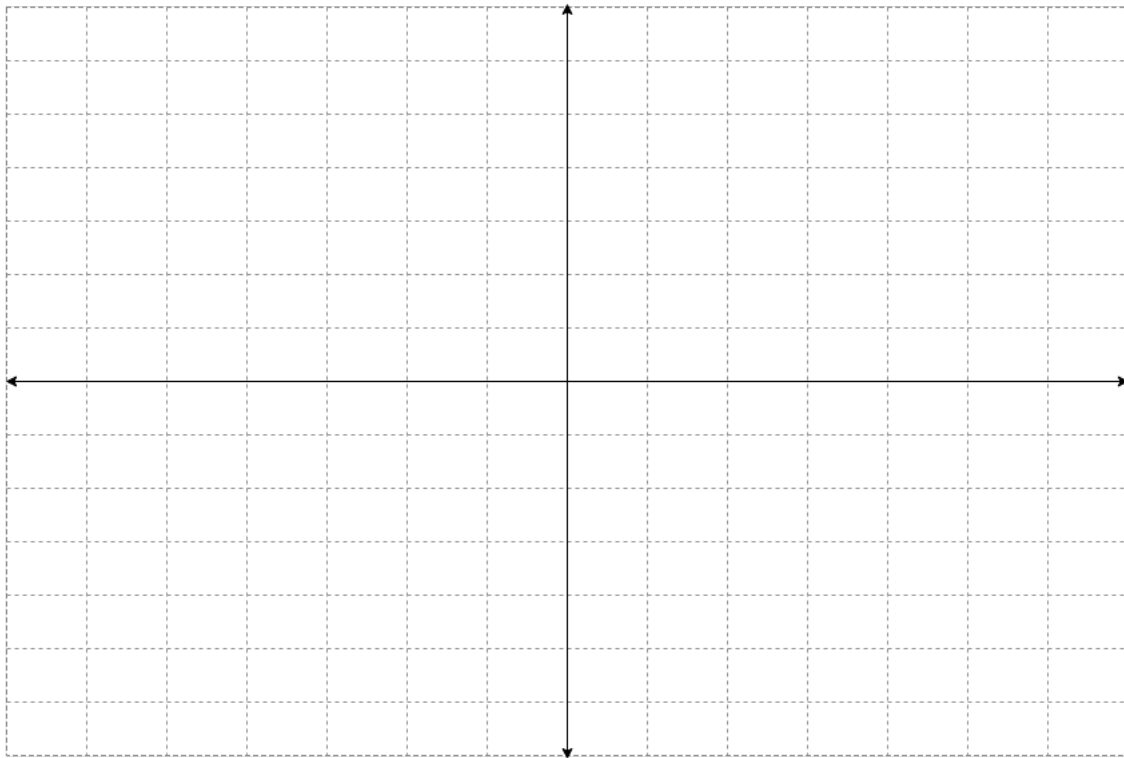
Vert. rozlíšenie:

Horiz. rozlíšenie:



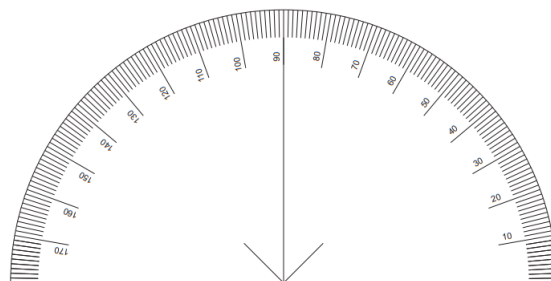
Vysvetlenie prelínania/rušenia časového priebehu pri minimalizovaní rozkmitu:

**Bod spracovania zadania č. 2.)**



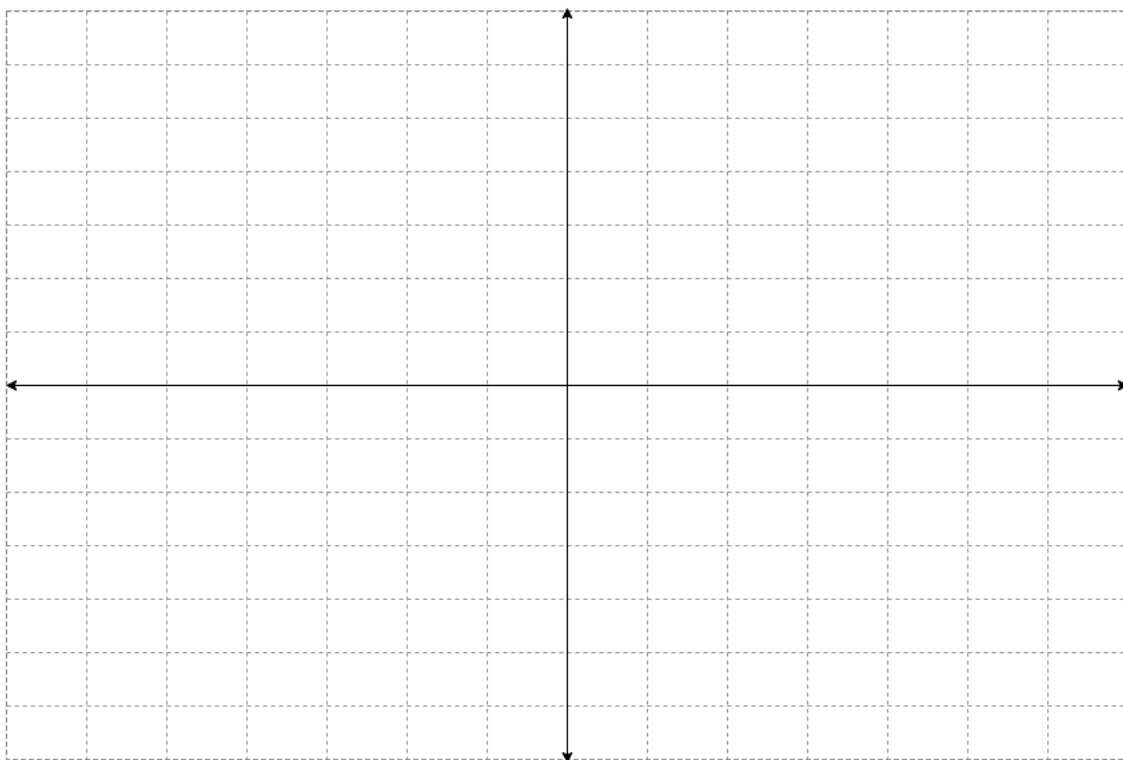
Vert. rozlíšenie:

Horiz. rozlíšenie:



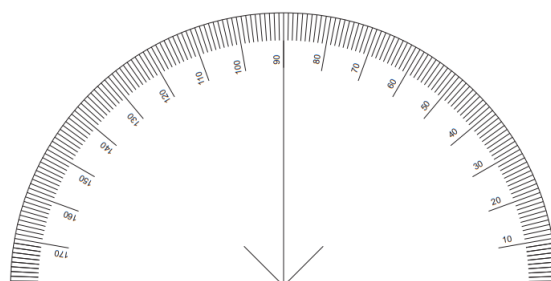
Popis zmien/správania časových priebehov na jednotlivých kanáloch:

**Bod spracovania zadania č. 3.)**



Vert. rozlíšenie:

Horiz. rozlíšenie:



**Bod spracovania zadania č. 4.)**

<i>Výkon</i>	[uW]	[dBm]
Zapojenie a)		
Zapojenie b)		
Zapojenie c)		

## Záver

## 5.5.2 Laboratórna úloha - Meranie polarizačnej vidovej a chromatickej disperzie

V tejto laboratórnej úlohe budú študenti oboznámení s polarizačnou vidovou disperziou (PMD), jej vplyvom na prenášaný signál a jej porovnaním s chromatickou disperziou. Študenti si vyskúšajú prácu s meracím nástrojom značky EXFO s modulom FTB-200 v kombinácii s modulom FTB-5700, ktorý je v praxi veľmi využívaný. Podľa ich vlastného uváženia uložia vlákno 5-krát do rôznej polohy ktorá bude budiť dvojlomný stres vo vlákne a tým dosiahnu rôzne hodnoty PMD a CD koeficientov podľa uloženia. Ďalej podobne namerajú hodnoty koeficientov keď budú s vláknom manipulovať počas meracieho cyklu. Nakoniec numericky vypočítajú hodnoty dvoch trás rôznych dĺžok.

# Meranie polarizačnej vidovej a chromatickej disperzie

Meno a priezvisko:

Ročník:

ID:

Študijná skupina:

Dátum merania:

Kontroloval:

## Cieľ merania

Cieľom toho merania je oboznámiť študentov s **polarizačnou vidovou disperziou (PMD)**, jej vplyvom na prenášaný signál a jej porovnaním s chromatickou disperziou. Študenti si vyskúšajú prácu s meracím nástrojom značky EXFO s modulom FTB-200 v kombinácii s modulom FTB-5700, ktorý je v praxi veľmi využívaný.

## Zadanie

1. Oboznámiť sa s javom polarizačnej vidovej disperzie a chromatickej disperzie.
2. Oboznámiť sa s obsluhou meracieho prístroja EXFO FTB-200/FTB-5700.
3. Vykonať minimálne 5 statických meraní v ktorých vybudíte dvojlomný stres vnútri vlákna.
4. Vykonať 3 manipulačné merania v ktorých vybudíte dvojlomný stres vnútri vlákna.
5. Numericky vypočítajte koeficient PMD pre rôzne hodnoty.

## Teoretický rozbor

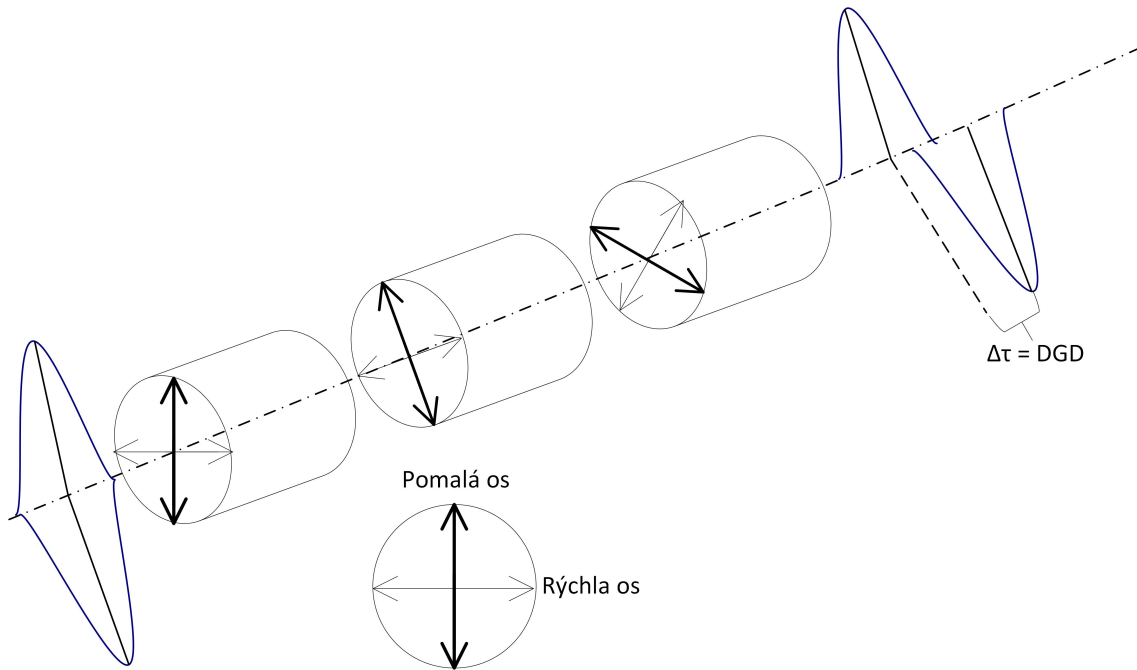
### Polarizačná vidová disperzia – PMD

Základom tejto disperzie je polarizačný stav svetla. Kvôli zvyšovaniu rýchlosti prenosu ( $2,5\text{--}10\text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ) vznikla potreba merania PMD. Táto disperzia je zdrojom pulzového rozširovania, ktoré vychádza z dvojlomu vlákna a dokáže byť obmedzujúcim faktorom pri vysokorýchlostnom prenose. Je to náhodný jav kvôli intrinzičným (vplyvy vnútri vlákna, napr. stresové prvky, nehomogenity, geometrickosť jadra) aj extrinzičným vplyvom (vplyvy spôsobené zaobchádzaním s vláknom, ohýbanie, stočenie), ktoré vo vyrobených vláknach vedú k rôznej skupinovej rýchlosti polarizačných stavov. V ideálnom prípade (dokonale homogénne vlákno) sa vidy vo vlákne šíria rovnakou rýchlosťou, ide o tzv. degenerované vidy. V skutočnosti sa táto degenerácia vidov odstráni dvojlomom, vidy sa potom šíria rôznymi rýchlosťami a dôjde k polarizačnej vidovej disperzii.

#### PMD na krátke vzdialenosti - slabá väzba

V krátkych optických vláknach sa dá predpokladať, že dvojlom je konštantný veľkosťou aj smerom, takže nedochádza k spojovaniu polarizačných vidov. DGD je potom buď veľmi málo





Obr. 1: Zobrazenie vzniku DGD šírením sa v optickom vlákne

závislé alebo je úplne nezávislé na  $\lambda$ . Koeficient PMD pre krátke vzdialenosti sa udáva v  $ps \cdot km^{-1}$  a je vyjadrený ako

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{L} \quad (1)$$

kde  $L$  je dĺžka trasy a  $\Delta\tau$  je oneskorenie signálu vo vlákne (PMD). Polarizácia v krátkych vláknach nadobúda všetky polarizačné stavy postupne za sebou a pravidelne - nevyskytuje sa polarizačná nepravidelnosť.

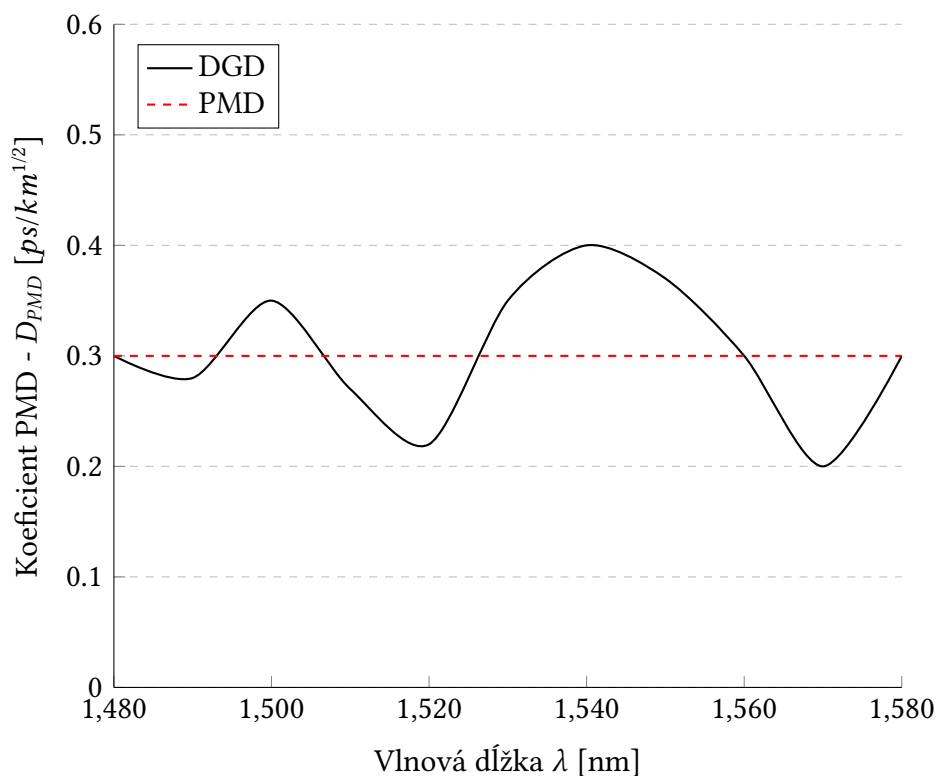
### PMD na dlhé vzdialenosti - silná väzba

Pri prenose na dlhé vzdialenosti je optické vlákno vystavené stresu, ohybom, skrutom, teplotným zmenám a podobne náhodným spôsobom pozdĺž dĺžky vlákna. Tým dochádza k zmene veľkosti aj smeru dvojlomu pozdĺž vlákna, čo má za dôsledok, že dvojlom už nie je aditívny. PMD sa potom už nemení lineárne s dĺžkou vlákna, ale mení sa druhou odmocninou dĺžky vlákna. V každom segmente je rozloženie polarizačných stavov náhodné. Koeficient pre dlhé vzdialenosti sa udáva v  $ps \cdot (\sqrt{km^{-1}})$  a je vyjadrený ako

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad (2)$$

### Diferenciálne skupinové oneskorenie vidov – DGD

Je to časový rozostup medzi polarizačnými vidmi, taktiež je to miera PMD daného vlákna. DGD parameter je závislý na vlnovej dĺžke a teplote, a taktiež sa mení už len pri manuálnom zaobchádzaní s vláknom, pretože to ovplyvňuje dvojlom. Mení sa v čase a býva označovaný ako  $t_g$ . Primerná hodnota DGD je samotná veličina PMD, ako je znázornené na obrázku 2.



Obr. 2: DGD závislosť na vlnovej dĺžke

Tabuľka 1: Tabuľka limitných hodnôt PMD pre STM systémy

Prenosová rýchlosť [Gbit/s]	Limit PMD (10%) [ps]
2,5 (STM16)	40
10 (STM64)	10
10 (GE)	10
40 (STM256)	2,5

Tabuľka 2: Tabuľka limitných hodnôt PMD podľa ITU-T

Druh vlákna podľa ITU-T	Hodnota $D_{PMD}(\lambda)$
G.652.A, C	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.652.B, D	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.653.A, B	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.654.A, B, C	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.655.A, B	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.655.C	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.656	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$

## Chromatická disperzia – CD

Túto disperziu tvoria dve zložky – materialová a vlnovodová. Kde materialová zložka spočíva v závislosti indexu lomu prostredia (pre opt. vlákna najčastejšie  $\text{SiO}_2$ ) na vlnovej dĺžke prostredia. Vlnovodová disperzia závisí na geometrii vidu, konkrétne na zmenách profilu indexu lomu vo vlákne a pomere polomeru jadra vlákna s vlnovou dĺžkou signálu. Zmenami priemeru jadra,

dokážeme ovplyvňovať priebeh CD. Tieto vlastnosti totiž menia fázové a skupinové rýchlosti v pozdĺžnom smere šírenia pri zmenách frekvencie. Táto disperzia je často označovaná aj ako **farebná disperzia**. Spôsobuje ju to, že nie je možné vytvoriť monochromatický zdroj svetla. Optické zdroje nie sú dokonalo monochromatické, to znamená že opt. žiarenie obsahuje určité spektrum vlnových dĺžok – vlnovodová disperzia. Tým, že niektoré vlnové dĺžky zaostávajú za inými sa prenášaný impulz vo vlákne postupom času rozťahuje, deformuje a na prijímacej strane je potom prijatý skreslený signál. To môže spôsobiť chybné vyhodnotenie rozhodovacej úrovne na prijímacej strane. Veľkosť chromatickej disperzie sa vyjadruje ako koeficient  $D(\lambda)$ , podľa vzťahu

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad [ps \cdot nm^{-1} \cdot km^{-1}] \quad (3)$$

Vyjadruje zmenu skupinového oneskorenia svetelného pulzu (DGD) optického vlákna jednotkovej dĺžky, v závislosti na jednotkovej zmene vlnovej dĺžky. Limitná hodnota koeficientu pre konvečné telekomunikačné vlákno je 17 ps/(nm · km).

Tabuľka 3: Tabuľka limitných hodnôt pre CD podľa štandardu ITU-T G.695

<i>Vlnová dĺžka <math>\lambda</math> [nm]</i>	<i>Koeficient chr. disp. <math>D(\lambda)</math>[ps/(nm · km)]</i>
1291–1351	5,7
1311–1371	6,8
1391–1451	11,5
1531–1591	19,9
1471–1611	21,1

## Postup spracovania merania

1. Po zapnutí meracieho prístroja otvorte program CompactTool na ploche
2. Zvoľte meranie chromatickej (CD) aj polarizačnej vidovej (PMD) disperzie
3. Pripravte vlákno na statické alebo manipulačné meranie
4. Spust'te meranie

**Poznámka:** V prípade manipulačných meraní si merací prístroj "myslí", že prebieha meranie na vonkajších závesných trasách. Z toho dôvodu sa zobrazí dialógové okno krátko po začiatku merania ktoré vás upozorní, že meranie prepína do módu merania vonkajších závesných tras. Tieto merania trvajú približne 10-15 minút podľa miery manipulácie s vláknom počas merania.

## Použité prístroje

- EXFO FTB–200/FTB–5700

# Spracovanie merania

Meno a priezvisko:

Ročník:

ID:

Študijná skupina:

Dátum merania:

Kontroloval:

## Bod zadania č. 1.)

V krátkosti vysvetlite rozdiel medzi chromatickou a polarizačnou vidovou disperziou (na čom sú závislé, charakter, vznik):

## Bod zadania č. 3.)

Ako prvé vykonajte referenčné meranie (vlákno v pokoji, bez manipulácie, bez akéhokoľvek stresu). V prvom stĺpci stručne popíšte spôsob uloženia vlákna počas merania (napr. stočené, slučky, škrípnutie, prudký ohyb/ohyby, na rôznych priemeroch, napnuté a pod.) Limit uvádzajte iba pre koeficient PMD ( $D_{PMD}$ ).

<i>Statické merania</i>	PMD	$D_{PMD}$	PMD 2. rádu	$D(\lambda)$
Popis uloženia vlákna	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]	[ps/km]	[ps · nm <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> ]
Referenčné				
<b><i>LIMIT</i></b>				

Tabuľka 4: Tabuľka nameraných PMD hodnôt statickými meraniami

#### Bod zadania č. 4.)

V tomto prípade vykonajte 3 merania počas ktorých budete s vláknom manipulovať. Počas prvých dvoch meraní manipulujte s vláknom jedným spôsobom (napr. opakované stláčanie, hádzanie, natáčanie, krútenie a pod.). Počas tretieho merania manipulujte s vláknom rôznymi spôsobmi (napr. kombinácie z predošlých meraní). Limit uvádzajte iba pre koeficient PMD ( $D_{PMD}$ ).

<i>Manipulačné merania</i>	PMD	$D_{PMD}$	PMD 2. rádu	CD
Popis manipulácie	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]	[ps/km]	[ps · nm <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> ]
<b><i>LIMIT</i></b>				

Tabuľka 5: Tabuľka nameraných PMD hodnôt manipulačnými meraniami

#### Bod zadania č. 5.)

Vypočítajte hodnoty koeficientu PMD pre krátku trasu (do 10 km) a pre dlhú trasu (nad 300 km) s tým, že merací prístroj dokáže zmerať trasu dlhú 200 km. Hodnoty oneskorenia signálu použite z bodu zadania č. 3.

## Záver

# Záver

Bakalárska práca bola rozdelená do dvoch častí, teoretickej a praktickej.

Teoretickou časťou sa zaoberajú kapitoly 1 až 4. V prvej kapitole, boli vysvetlené všeobecné poznatky z optiky, optických prenosov a popísané optické vlákna týkajúce sa problematiky zadania.

Ďalšie dve kapitoly sa venujú polarizácii. Najprv je vysvetlený samotný jav polarizácie a jej stavov, potom sú popísané jednotlivé spôsoby ako zobrazit polarizáciu a ako ju popísať. Vysvetlené sú spôsoby zobrazenia na Poincarého guli, Stokesove parametre, Stokesove a Jonesove vektory. V tejto bakalárskej práci sú v praktickej časti využité práve Stokesove vektory, pomocou ktorých sa zobrazujú polarizačné stavy na Poincarého guli. A v rámci dlhodobých meraní je na výsledných grafoch zobrazená zmena miery polarizácie, ktorá vychádza taktiež zo Stokesových parametrov, v daný deň alebo dni.

V poslednej kapitole teoretickej časti je detailne vysvetlená polarizačná vidová disperzia. Sú objasnené otázky prečo predstavuje táto disperzia problém v optických prenosoch pri vysokých rýchlostiach, ako je definovaná, na čom závisí a aké existujú meracie metódy PMD.

Do praktickej časti spadá posledná kapitola. V tejto kapitole boli popísané krátkodobé a dlhodobé merania, konkrétne merania polarizácie a merania hodnôt PMD. Krátkodobé merania boli prevedené na jednovidovom vlákne G.657 o dĺžke 20 km. Dlhodobé merania boli prevedené na optickej trase okolo kampusu VUT FEKT a taktiež na trase Praha-Holešovice – Řež.

Na meranie polarizácie pri krátkodobých meraniach bol použitý polarimeter spolu s polarizačným analyzér. Slúžili na získanie hodnôt pre výpočet Stokesových vektorov pomocou ktorých sú na konci kapitoly v grafickej podobe uvedené výsledky meraní. Z výsledkov krátkodobých meraní zobrazených na Poincarého guli a polarizačnej elipse je vidieť zmeny polarizácie vybudené, či už statickým uložením alebo manipuláciou počas merania. V prípade dlhodobých meraní je možné z výsledkov usudzovať vplyv teploty a prítomnosti vibrácií na zmeny polarizácie.

Ďalšie merania sa zaoberali polarizačnou vidovou disperziou. Na tieto merania bol použitý merací prístroj EXFO FTB-200 s meracím modulom CD/PMD, EXFO FTB-5700, v prípade dlhodobých meraní bol taktiež využitý program „Plánovač měření pro EXFO FTB-5700“, ktorý je výsledkom bakalárskej práce „Návrh a realizace programu pro měřící přístroj EXFO FTB-5700“, výsledky z tohto merania boli porovnané s limitnými hodnotami PMD meraného vlákna. Z výsledkov uvedených či už, v tabuľkovej alebo grafickej forme, je zrejme že ani jedna hodnota sa nepriblížila ku limitnej hodnote. Z nameraných hodnôt je ale vidieť ako sa dajú hodnoty PMD ovplyvniť spôsobom uloženia vlákna alebo manipuláciou s ním počas merania.

V rámci bakalárskej práce boli navrhnuté dve laboratórne úlohy venované problematike polarizácie a polarizačnej vidovej disperzie. Príklady vyplnených laboratórných úloh su vložené ako prílohy.

## Literatúra

- [1] MACHÁČEK, I. *Polarizační stav optické vlny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 74 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.
- [2] COLLETT, E. (2005). *Field guide to polarization*. Bellingham, Wash, SPIE Press.
- [3] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Centa, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [4] JAKOUBEK, P. *Využití polarizačního multiplexu v optických přístupových sítích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Šifta
- [5] VALÁŠEK, Martin. *Lineární a nelineární jevy v optických přístupových sítích: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 75 s. Vedoucí práce Ing. Radim Šifta
- [6] GOLDSTEIN, D. H., COLLETT, E. (2003). *Polarized light*. New York, Marcel Dekker.
- [7] AGRAWAL, Govind P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3rd ed. New York: John Wiley. ISBN 0-471-21571-6.
- [8] GHATAK, A., THYAGARAJAN, K. (1998). *An Introduction to Fiber Optics*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139174770
- [9] STRÍTESKÝ, Radek Návrh a realizace programu pro měřicí přístroj EXFO FTB-5700: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 47 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Münster, Ph.D.
- [10] KUMAR, Arun a Ajoy GHATAK. *Polarization of Light with Applications in Optical Fibers*. 1th edit. Bellingham: SPIE Press, c2011. ISBN 9780819482150
- [11] PERLICKI Krzysztof (February 25th 2015). *Polarization Effects in Optical Fiber Links* Polarization Effects in Optical Fiber Links, Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications, Moh Yasin, Hamzah Arof and Sulaiman Wadi Harun, IntechOpen, DOI: 10.5772/59000. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/47749B5>



- [12] ROGERS Alan , *Polarization in Optical Fibers* , Artech, 2008.
- [13] PANASČÍ, Marco. *Vliv dvojlomu na změnu polarizace a frekvence u senzorických optických vláken* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-11-04]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/173530>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Miloslav Filka.
- [14] SENIOR, J. M. (1992). *Optical fiber communications: principles and practice*. New York, Prentice Hall.
- [15] FILKA, M. *Přenosová média: skripta*. Prvé vydanie. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012. 122 s. Elektronické dokumenty
- [16] PASCHOTTA, Rüdiger. *Field Guide to Optical Fiber Technology*. 1th ed. Bellingham: SPIE Press, c2010. ISBN 978-0819480903
- [17] MENDEZ, Alexis a T. MORSE. *Specialty Optical Fibers Handbook*. Cambridge: Academic Press, c2007. ISBN 9780123694065
- [18] WEIHONG Huang (2007). *Fiber Birefringence Modeling for Polarization Mode Dispersion*. UWSpace. <http://hdl.handle.net/10012/2647>
- [19] MOTÚZ, Rastislav *Řešení problematiky CD a PMD v optických sítích: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 95 s. Vedúci práce bol prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [20] MOTÚZ, Rastislav *Měření disperzí optických přenosů: diplomová práce*. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 95 s. Vedúci práce bol prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [21] International Telecommunication Union. *Handbook Optical fibres, cables and systems* [online]. 2009, posledná aktualizácia 2010-2-24 [cit. 2012-10-26]. Dostupné z: <<http://goo.gl/hj0kg> >
- [22] DAMASK, Jay N. *Polarization optics in telecommunications*. p. cm — (Springer series in optical sciences, ISSN 0342-4111 ; v. 101) Includes bibliographical references and index. ISBN 0-387-22493-9 1. Optical communication systems. 2. Fiber optics. 3. Polarization (Light) I. Title. II. Series. TK5103.592.F52.D36 2004 621.3827—dc22

- [23] ŤUPA, Martin *Polarizační vidová disperze – PMD: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. 111 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miloslav FILKA, CSc.
- [24] MORANT, Maria; PÉREZ, Joaquin; LLORENTE, Roberto. *Polarization division multiplexing of OFDM radio-over-fiber signals in passive optical networks*. Advances in Optical Technologies, 2014, 2014.
- [25] YAO X., YAN L., ZHANG B., WILLNER A., JIANG J., *All-optic scheme for automatic polarization division demultiplexing* Opt. Express 15, 7407-7414 (2007)
- [26] BORZYCKI, Krzysztof. (2005). *Temperature dependence of PMD in optical fibres and cables*. Proceedings of 2005 7th International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON 2005. 1. 441 - 444 Vol. 1. 10.1109/ICTON.2005.1505839.
- [27] IREETA W. T., LEITCH A. W. R., MUSARA V. (2014). *Monitoring FO-PMD and SO-PMD over Time with Respect to Environmental Conditions*. Applied Physics Research. 6. 10.5539/apr.v6n4p10.
- [28] TASSÉ, J.-S., DAAB, W. (2015). *Why Coherent Detection Systems May Fail at Compensating for Polarization Mode Dispersion*. Dostupné online na: <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/White-Paper-Coherent-Detection-Systems-PMD-Compensation.pdf>

## Zoznam symbolov a skratiek

<b>SM</b>	Single-mode – jednovidové
<b>MM</b>	Multi-mode – mnohovidové
<b>HE<sub>11</sub></b>	fundamental mode – základný vid
<b>PMF</b>	Polarization Maintaining fibers – polarizáciu zachovávajúce vlákna
<b>PMD</b>	Polarization mode dispersion – polarizačná vidová disperzia
<b>DGD</b>	Differential Group Delay – diferenciálne skupinové oneskorenie
<b>PDM</b>	Polarization-division multiplex – polarizačný multiplex
<b>SOP</b>	State of Polarization – polarizačný stav
<b>SSA</b>	SOP Scrambling Analysis – metóda scramblingovania polarizačných stavov
<b>POTDR</b>	Polarization optical time domain reflectometry
<b>TINTY</b>	Traditional Interferometry Analysis – Tradičná interferometrická metóda
<b>GINTY</b>	General Interferometry Analysis – Všeobecná interferometrická metóda
<b>FFT</b>	Rýchla Fourierová transformácia
<b>EDFA</b>	Erbium Doped Fibre Amplifier – erbiom dopované optické zosilňovače
<b>dB</b>	decibel – jednotka útlmu
<b>I/O-SOP</b>	Input/Output State Of Polarization – Vstupný/Výstupný polarizačný stav
<b>DOP</b>	Degree of Polarization – stupeň/miera polarizácie
<b>AOM</b>	Akusticko-optickým modulátorom
<b>DFB</b>	Distributed Feedback
<b>LED</b>	Light Emitting Diode – elektroluminiscenčná dióda
<b>PBS</b>	Polarization Beam Splitter – polarizačný delič

**RMS**      Root Mean Square

# **A Laboratorná úloha - Meranie polarizácie**

# Meranie polarizácie

Meno a priezvisko:

Ročník:

ID:

Študijná skupina:

Dátum merania:

Kontroloval:

## Cieľ merania

Cieľom tohto merania je oboznámiť študenta s vplyvom polarizácie na prenášaný signál. Pozorované budú časové priebehy signálu pri rôznych polarizačných stavoch uskutočnených pomocou polarizačného kontroléra.

## Zadanie

1. Oboznámiť sa s javom polarizácie.
2. Príprava pracoviska, zapojenie merania.
3. Zapísať a zakresliť namerané hodnoty a priebehy.
4. Stručne vysvetliť rušenie/prelínanie priebehov zobrazených na osciloskope.

## Teoretický rozbor

### Polarizácia

Polarizácia je smer, v ktorom vlna osciluje. Svetelné vlny su elektromagnetické vlny, ktoré sa skladajú z elektrickej (**E**) a magnetickej (**B**) intenzity. Tieto elektromagnetické vlny ležia v rovine priechnej ku smeru šírenia svetla. Hovoríme, že svetlo je nepolarizované (slnko, žiarovka) ak sa vektor elektrického poľa mení náhodne v čase (veľkosť aj smer). Ak sa mení predvídateľným spôsobom hovoríme, že sa jedná o polarizované svetlo. Podľa toho akým spôsobom sa elektrické pole v čase mení, sa určuje druh polarizácie svetla. Svetlo môže byť: lineárne, kruhovo alebo elipticky polarizované podľa toho, či sa vektor elektrického poľa pohybuje na priamke, kruhu alebo všeobecne, elipse.

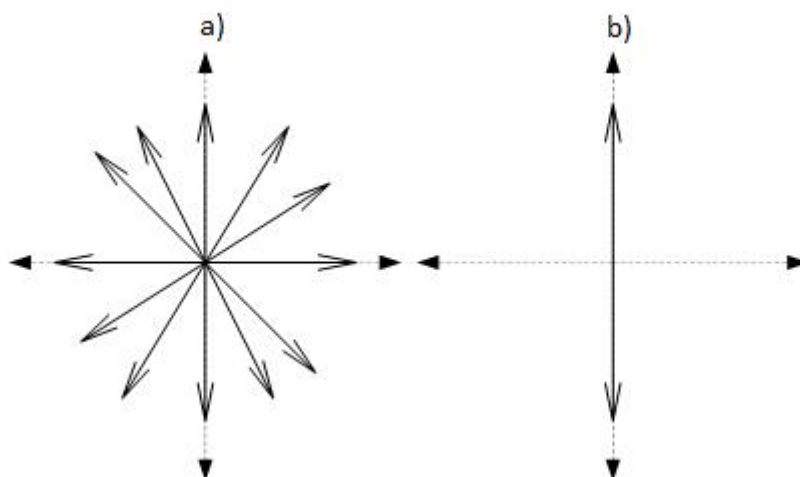
### Polarizačné stavy

#### Lineárna polarizácia

Ak je priamka, po ktorej sa vektor elektrického poľa pohybuje rovnobežná s osou x, potom je táto svetelná vlna lineárne polarizovaná (viď. obr. 1 b)).

#### Kruhová polarizácia

Hovoríme, že svetlo je kruhovo polarizované, ak vektor elektrického poľa opisuje kruh v postupne narastajúcom čase. Takáto vlna sa dá opísať ako dve ortogonálne a lineárne polarizo-

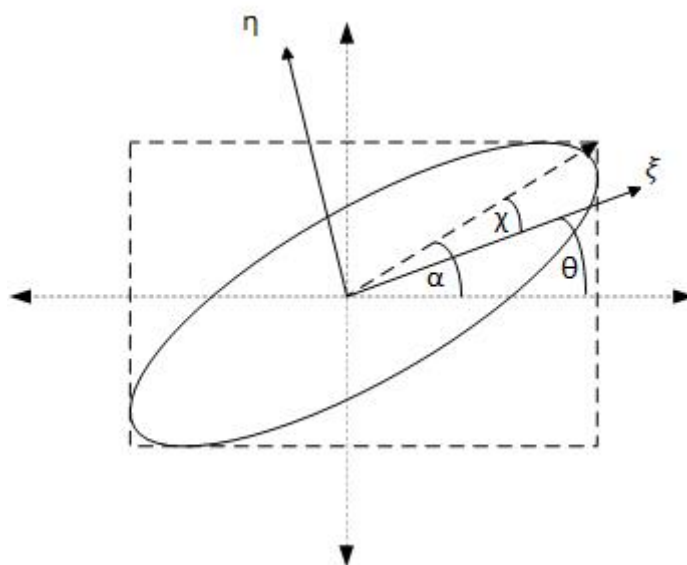


Obr. 1: Porovnanie a) nepolarizovanej a b) polarizovanej vlny

vané zložky s rovnakými amplitúdami ale rozdielnymi fázami, konkrétne  $\pi/2$ . Vlna je ľavotočivá kruhovo polarizovaná, ak  $y$  zložka fázovo zaostáva za  $x$  zložkou. V takom prípade vektor elektrického poľa rotuje v protismere hodinových ručičiek v narastajúcom čase. Hovoríme, že stav polarizácie je ľavotočivá kruhová polarizácia. Vlna je pravotočivá kruhovo polarizovaná, ak  $y$  zložka fázovo predbieha  $x$  zložku. V takom prípade vektor elektrického poľa rotuje v smere hodinových ručičiek v narastajúcom čase. Hovoríme, že stav polarizácie je pravotočivá kruhová polarizácia.

### Eliptická polarizácia

Hovoríme, že vlna je elipticky polarizovaná, ak sa vektor elektrického poľa v akomkoľvek zvolenom mieste pohybuje po elipse, tzv. polarizačnej elipse. Takáto polarizácia sa dá opísať podobne ako kruhová polarizácia, ak je opísaná dvoma lineárnymi zložkami polarizovanými podľa osí elipsy (napr.  $\xi$  a  $\eta$ ). Jedna os je hlavná a druhá je vedľajšia.



Obr. 2: Zobrazenie pomocných uhlov a osí pre elipticky polarizovanú vlnu

## **Polarizačný kontrolér**

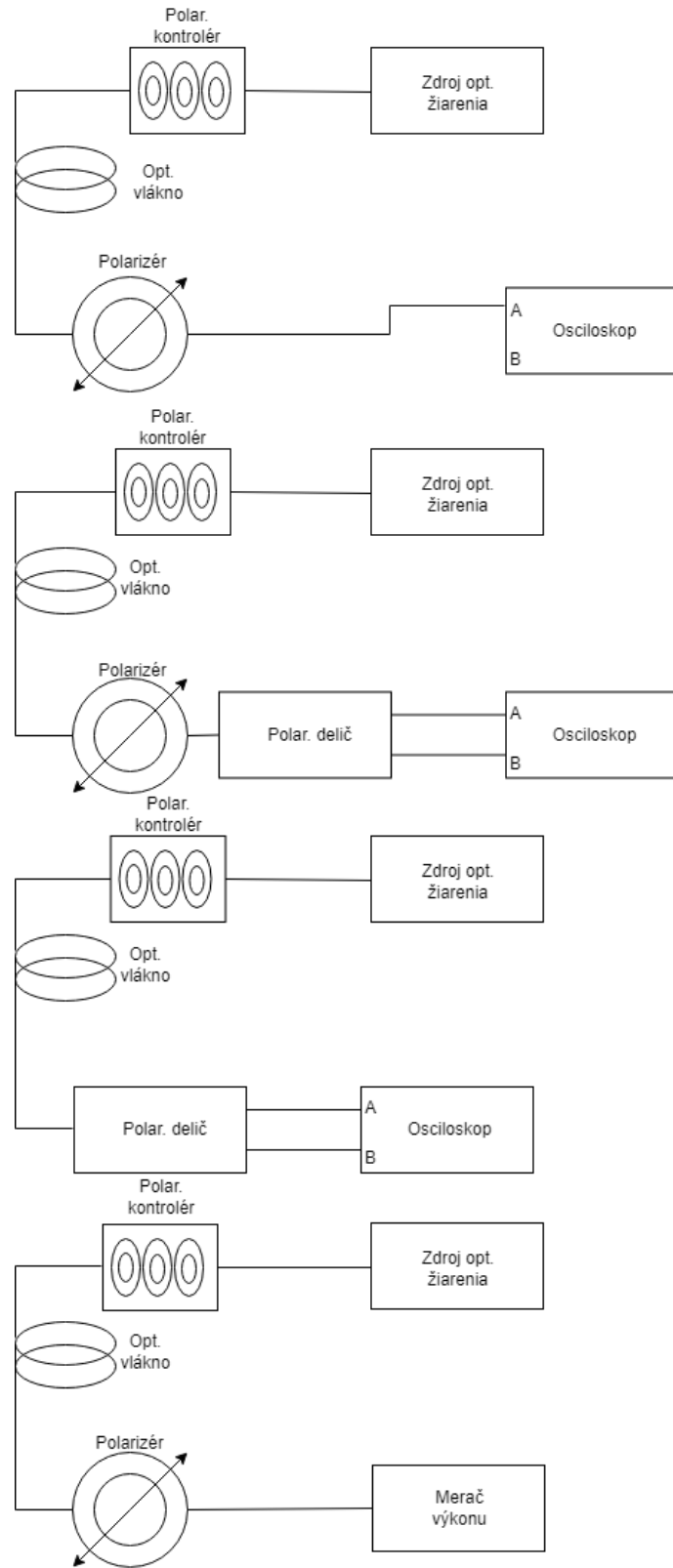
Je nástroj, ktorý obsahuje vlnové doštičky (wave-plate, retarder) a pomocou ich rôznych polôh je na výstupe možné docieľiť akéhokoľvek polarizačného stavu. Vlnové doštičky pozostávajú z optického vlákna ktoré je niekoľkokrát natočené na nástavci vnútri. Podľa toho koľkokrát je vlákno natočené sa rozlišujú  $\pi/2$  (približne 1 slučka pre 1310 nm vlnovú dĺžku) a  $\pi/4$  (približne 3 slučky pre 1310 nm vlnovú dĺžku) doštičky. V tomto meraní je konfigurácia kontroléra 2-3-2 slučky. V takejto konfigurácii 2-slučkové doštičky menia polarizáciu zväčša vo vertikálnom smere a 3-slučková doštička mení polarizáciu zväčša v horizontálnom smere.

## **Polarizér**

Je to súčiastka, ktorá prepúšťa vlny polarizované iba v špecifickom polarizačnom stave, zatiaľ čo blokuje ostatné zložky polarizačných stavov v danej vlne. Filtruje svetelný lúč s nedefinovaným alebo zmiešaným polarizačným stavom do lúča s jednotným polarizačným stavom – polarizuje ho.



# Schéma zapojenia merania



Obr. 3: Blokové schémy zapojení merania

## Postup spracovania merania

1. Zapojte meranie podľa schémy **a)** na obr. 3. Zakreslite si tvar časového priebehu z osciloskopu pri najväčšom rozkmitu, poznamenajte si polohy jednotlivých doštičiek kontroléru pri najväčšom rozkmitu. Pomocou kurzorov zistite napäťový rozdiel rozkmitu. Pri polohovaní kontroléra popíšte prelínanie/rušenie časového priebehu.
2. Zapojte meranie podľa schémy **b)** na obr. 3. Zakreslite si tvar časového priebehu z osciloskopu pri najväčšom rozkmitu, poznamenajte si polohy jednotlivých doštičiek kontroléru pri najväčšom rozkmitu. Pomocou kurzorov zistite napäťový rozdiel rozkmitu. Popíšte ako sa v tomto prípade menili časové priebehy z jednotlivých kanálov pri polohovaní kontroléra.
3. Zapojte meranie podľa schémy **c)** na obr. 3. Zakreslite si tvar časového priebehu z osciloskopu pri najväčšom rozkmitu, poznamenajte si polohy jednotlivých doštičiek kontroléru pri najväčšom rozkmitu. Pomocou kurzorov zistite napäťový rozdiel rozkmitu. Popíšte rozdiely oproti predošlým zapojeniam.
4. Zapojte meranie podľa schémy **d)** na obr. 3. Nastavte doštičky do zaznamenaných polôh z predošlých meraní a zapíšte si nameraný výkon.

časového priebehu zakreliste do vopred pripravených rámciekov. Pri každom zapojení vyskúšajte s predradnými vláknami manipulovať (ohyb, stočenie, stlačenie a pod.) a všímajte si vplyv tejto manipulácie na časový priebeh na osciloskope.

## Použité prístroje

- Zdroj optického žiarenia
- Polarizačný kontrolér
- Polarizačný delič
- Polarizér
- Merač optického výkonu
- Osciloskop

# Spracovanie merania

Meno a priezvisko:

Ročník:

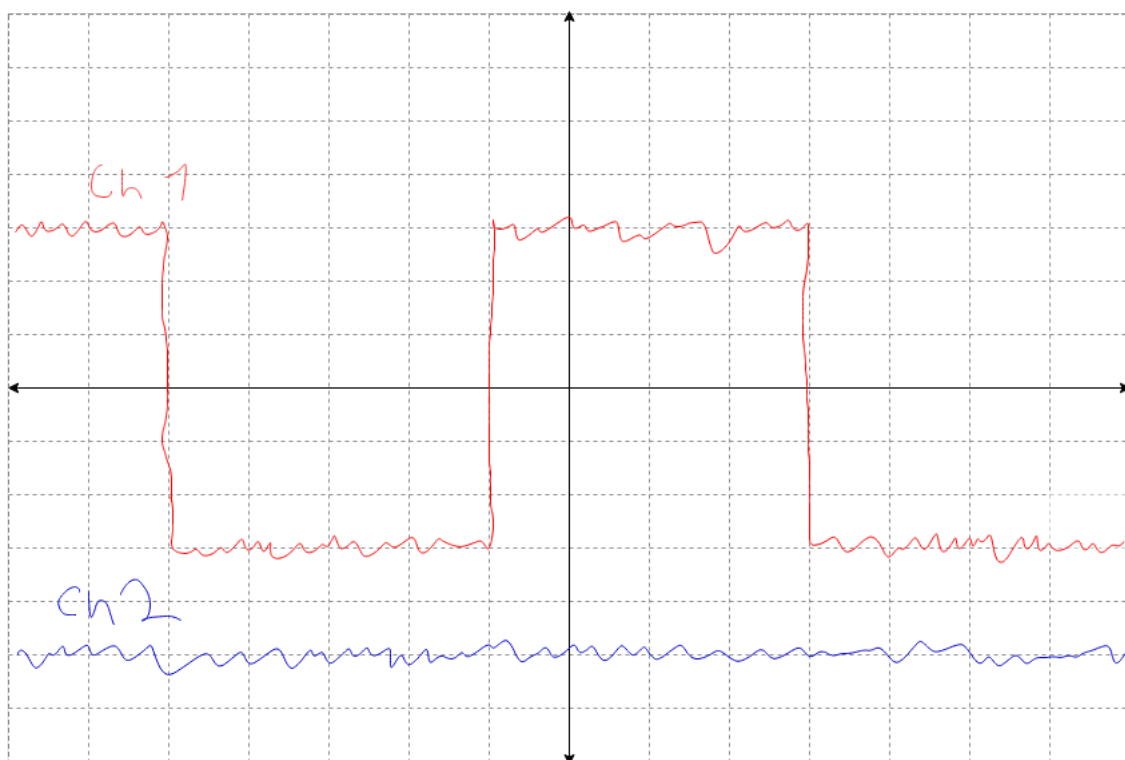
ID:

Študijná skupina:

Dátum merania:

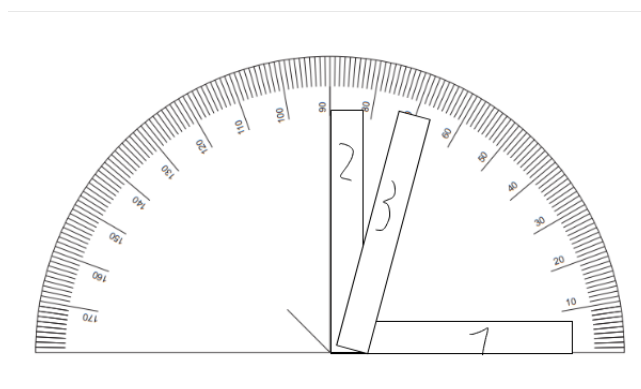
Kontroloval:

## Bod spracovania zadania č. 1.)



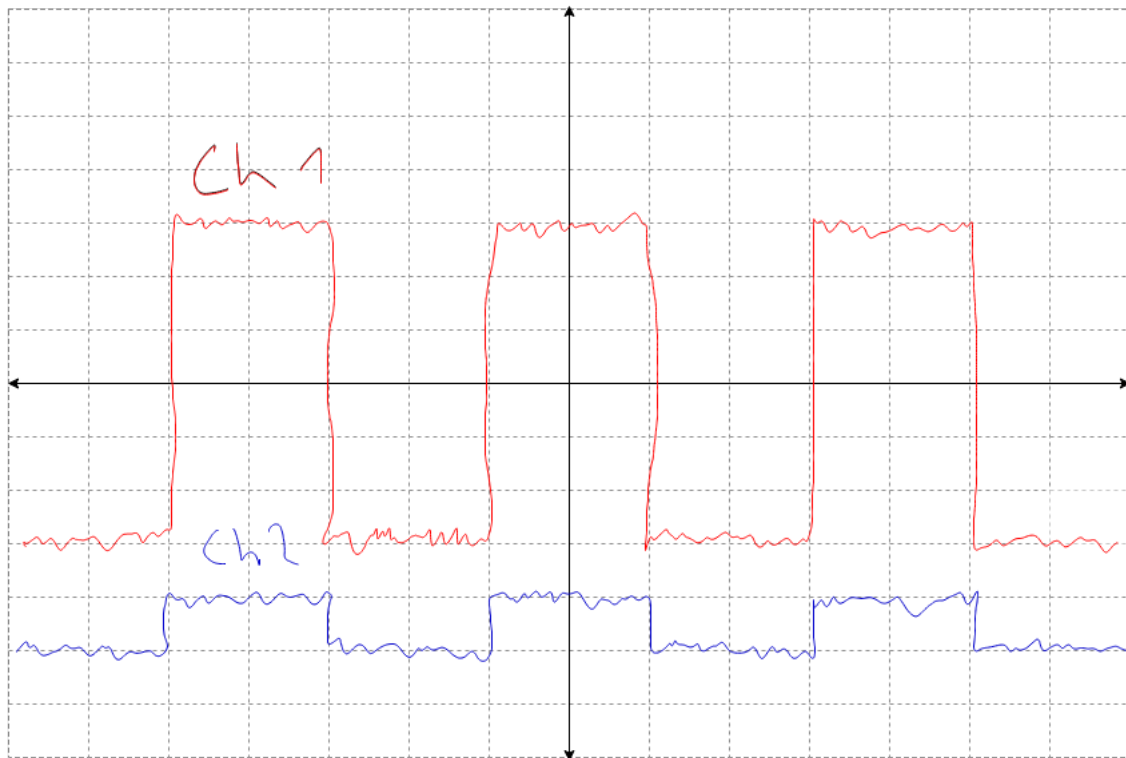
Vert. rozlíšenie: 500 mV

Horiz. rozlíšenie: 200 ms



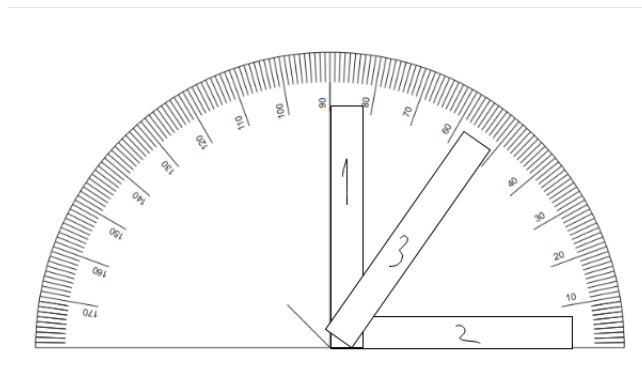
Vysvetlenie prelínania/rušenia časového priebehu pri minimalizovaní rozkmitu:  
Presah a postupné spájanie/prelínanie polarizačných rovín.

Bod spracovania zadania č. 2.)



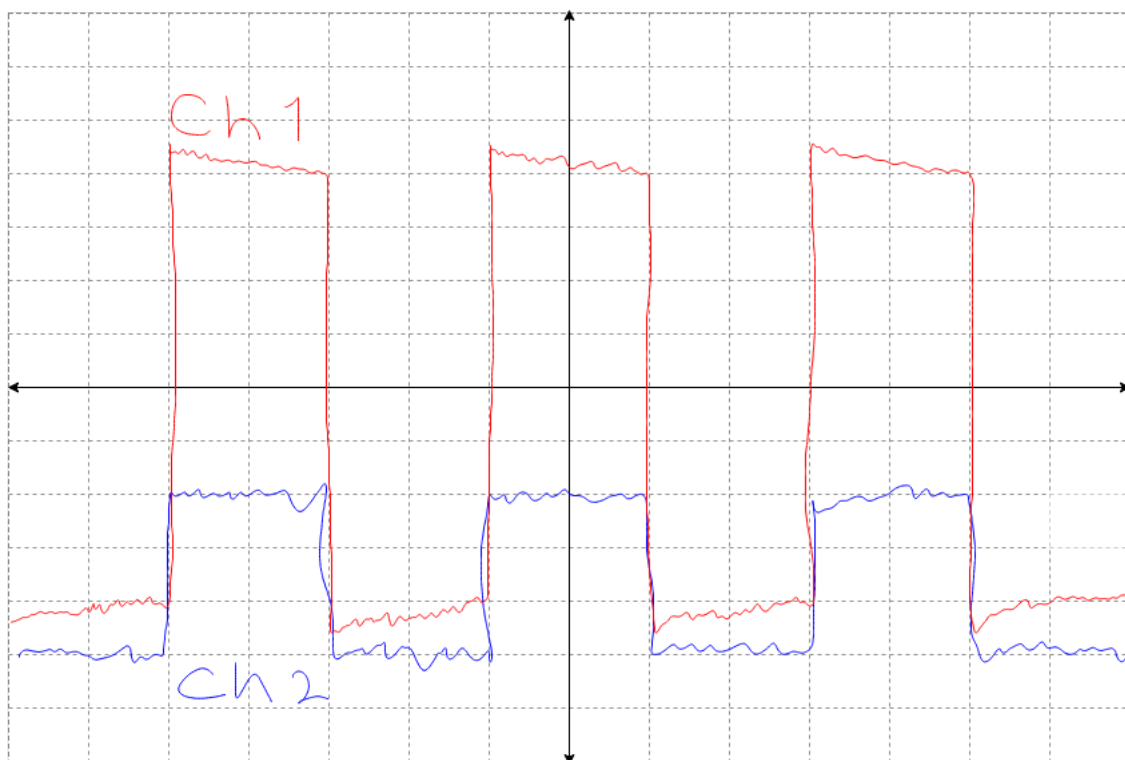
Vert. rozlíšenie: 500 mV

Horiz. rozlíšenie: 200 us



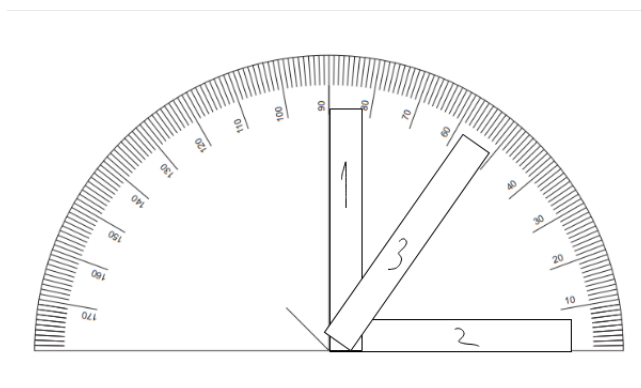
Popis zmien/správania časových priebehov na jednotlivých kanáloch:

Bod spracovania zadania č. 3.)



Vert. rozlíšenie: 500 mV

Horiz. rozlíšenie: 200 us



Bod spracovania zadania č. 4.)

<b>Výkon</b>	[uW]	[dBm]
Zapojenie a)	269,3	34,31
Zapojenie b)	63,82	-41,94
Zapojenie c)	0,075	-41,23

## Záver

V bode zadania 1.) bol zaznamenaný čas. priebeh zapojenia len s polarizérom. K prelínaniu ktoré sa javilo ako rušenie pri minimalizácii rozkmitu dochádzalo pri postupnom spájaní polarizačných rovin.

V bode zadania 2.) bol taktiež zaznamenaný časový priebeh ale po zmene zapojenia, v tomto prípade bol pridaný polarizačný delič medzi osciloskop a polarizér. Časové priebehy na oboch kanáloch sa akokeby kopírovali.

V bode zadania 3.) sa zapojenie zmenilo, polarizér bol odobraný a teda na osciloskope bolo vidieť obe polarizačné roviny samostatne. Pri polohovaní doštičiek sa priebehy menili nezávisle. V poslednom bode zadania boli namerané hodnoty výkonu pri zaznamenaných polohách doštičiek pri jednotlivých zapojeniach.

## **B Laboratorná úloha - Meranie PMD**

# Meranie polarizačnej vidovej a chromatickej disperzie

Meno a priezvisko:

Ročník:

ID:

Študijná skupina:

Dátum merania:

Kontroloval:

## Cieľ merania

Cieľom toho merania je oboznámiť študentov s **polarizačnou vidovou disperziou (PMD)**, jej vplyvom na prenášaný signál a jej porovnaním s chromatickou disperziou. Študenti si vyskúšajú prácu s meracím nástrojom značky EXFO s modulom FTB-200 v kombinácii s modulom FTB-5700, ktorý je v praxi veľmi využívaný.

## Zadanie

1. Oboznámiť sa s javom polarizačnej vidovej disperzie a chromatickej disperzie.
2. Oboznámiť sa s obsluhou meracieho prístroja EXFO FTB-200/FTB-5700.
3. Vykonať minimálne 5 statických meraní v ktorých vybudíte dvojlomný stres vnútri vlákna.
4. Vykonať 3 manipulačné merania v ktorých vybudíte dvojlomný stres vnútri vlákna.
5. Numericky vypočítajte koeficient PMD pre rôzne hodnoty.

## Teoretický rozbor

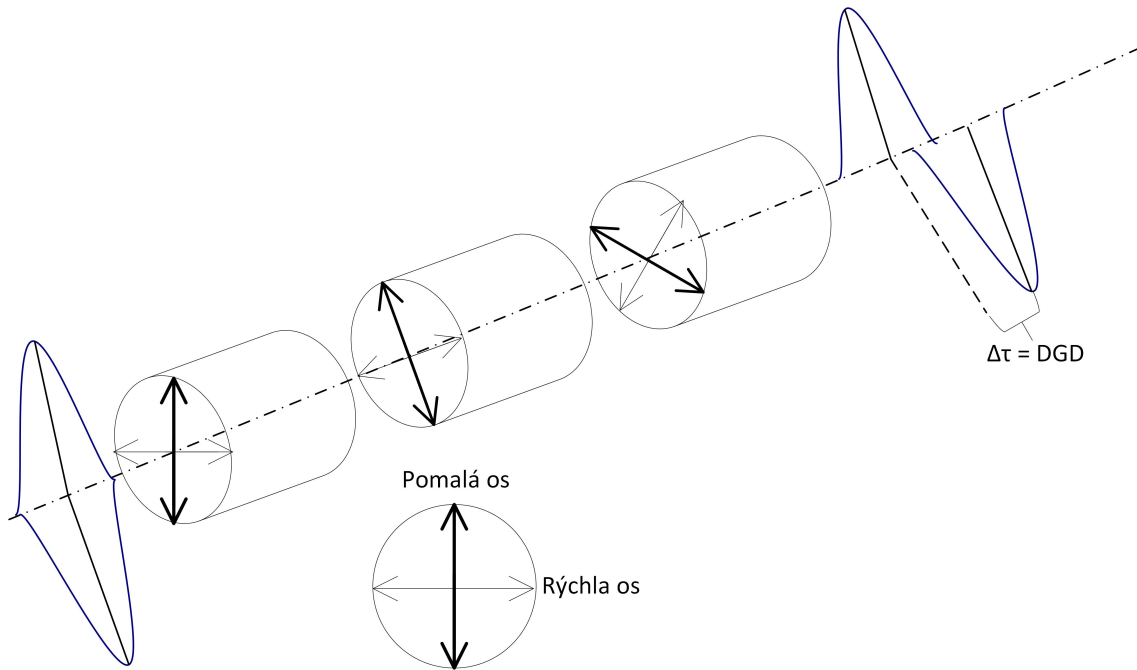
### Polarizačná vidová disperzia – PMD

Základom tejto disperzie je polarizačný stav svetla. Kvôli zvyšovaniu rýchlosti prenosu ( $2,5\text{--}10\text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ) vznikla potreba merania PMD. Táto disperzia je zdrojom pulzového rozširovania, ktoré vychádza z dvojlomu vlákna a dokáže byť obmedzujúcim faktorom pri vysokorýchlostnom prenose. Je to náhodný jav kvôli intrinzičným (vplyvy vnútri vlákna, napr. stresové prvky, nehomogenity, geometrickosť jadra) aj extrinzičným vplyvom (vplyvy spôsobené zaobchádzaním s vláknom, ohýbanie, stočenie), ktoré vo vyrobených vláknach vedú k rôznej skupinovej rýchlosti polarizačných stavov. V ideálnom prípade (dokonale homogénne vlákno) sa vidy vo vlákne šíria rovnakou rýchlosťou, ide o tzv. degenerované vidy. V skutočnosti sa táto degenerácia vidov odstráni dvojlomom, vidy sa potom šíria rôznymi rýchlosťami a dôjde k polarizačnej vidovej disperzii.

#### PMD na krátke vzdialenosti - slabá väzba

V krátkych optických vláknach sa dá predpokladať, že dvojlom je konštantný veľkosťou aj smerom, takže nedochádza k spojovaniu polarizačných vidov. DGD je potom buď veľmi málo





Obr. 1: Zobrazenie vzniku DGD šírením sa v optickom vlákne

závislé alebo je úplne nezávislé na  $\lambda$ . Koeficient PMD pre krátke vzdialenosti sa udáva v  $ps \cdot km^{-1}$  a je vyjadrený ako

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{L} \quad (1)$$

kde  $L$  je dĺžka trasy a  $\Delta\tau$  je oneskorenie signálu vo vlákne (PMD). Polarizácia v krátkych vláknach nadobúda všetky polarizačné stavy postupne za sebou a pravidelne - nevyskytuje sa polarizačná nepravidelnosť.

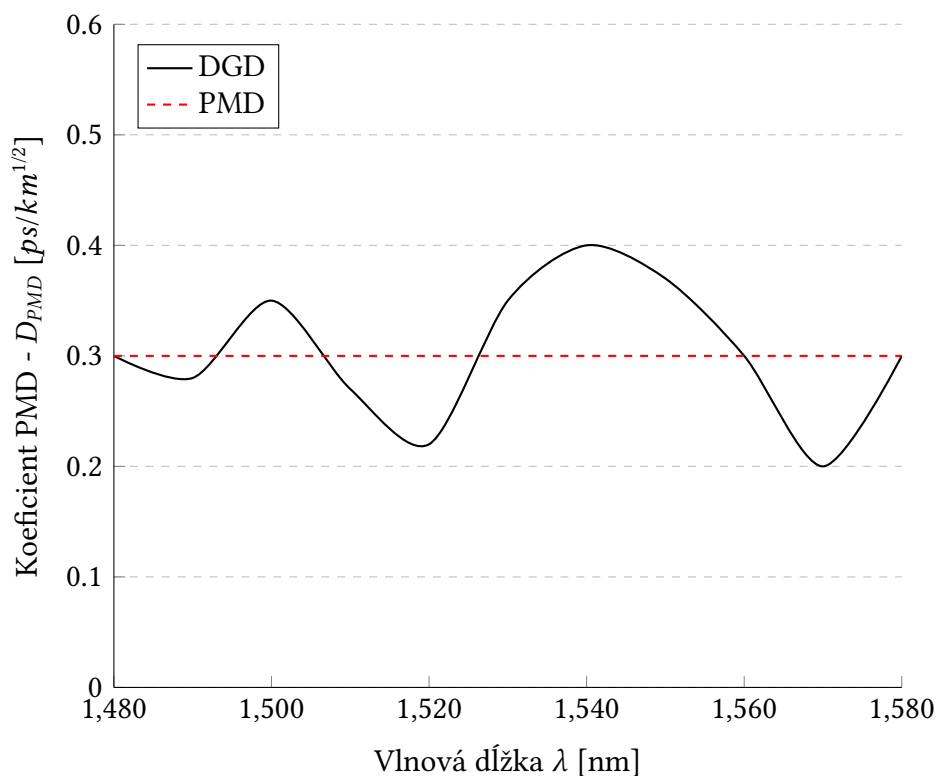
### PMD na dlhé vzdialenosti - silná väzba

Pri prenose na dlhé vzdialenosti je optické vlákno vystavené stresu, ohybom, skrutom, teplotným zmenám a podobne náhodným spôsobom pozdĺž dĺžky vlákna. Tým dochádza k zmene veľkosti aj smeru dvojlomu pozdĺž vlákna, čo má za dôsledok, že dvojlom už nie je aditívny. PMD sa potom už nemení lineárne s dĺžkou vlákna, ale mení sa druhou odmocninou dĺžky vlákna. V každom segmente je rozloženie polarizačných stavov náhodné. Koeficient pre dlhé vzdialenosti sa udáva v  $ps \cdot (\sqrt{km^{-1}})$  a je vyjadrený ako

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad (2)$$

### Diferenciálne skupinové oneskorenie vidov – DGD

Je to časový rozostup medzi polarizačnými vidmi, taktiež je to miera PMD daného vlákna. DGD parameter je závislý na vlnovej dĺžke a teplote, a taktiež sa mení už len pri manuálnom zaobchádzaní s vláknom, pretože to ovplyvňuje dvojlom. Mení sa v čase a býva označovaný ako  $t_g$ . Primerná hodnota DGD je samotná veličina PMD, ako je znázornené na obrázku 2.



Obr. 2: DGD závislosť na vlnovej dĺžke

Tabuľka 1: Tabuľka limitných hodnôt PMD pre STM systémy

Prenosová rýchlosť [Gbit/s]	Limit PMD (10%) [ps]
2,5 (STM16)	40
10 (STM64)	10
10 (GE)	10
40 (STM256)	2,5

Tabuľka 2: Tabuľka limitných hodnôt PMD podľa ITU-T

Druh vlákna podľa ITU-T	Hodnota $D_{PMD}(\lambda)$
G.652.A, C	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.652.B, D	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.653.A, B	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.654.A, B, C	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.655.A, B	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.655.C	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$
G.656	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$

## Chromatická disperzia – CD

Túto disperziu tvoria dve zložky – materialová a vlnovodová. Kde materialová zložka spočíva v závislosti indexu lomu prostredia (pre opt. vlákna najčastejšie  $\text{SiO}_2$ ) na vlnovej dĺžke prostredia. Vlnovodová disperzia závisí na geometrii vidu, konkrétne na zmenách profilu indexu lomu vo vlákne a pomere polomeru jadra vlákna s vlnovou dĺžkou signálu. Zmenami priemeru jadra,

dokážeme ovplyvňovať priebeh CD. Tieto vlastnosti totiž menia fázové a skupinové rýchlosti v pozdĺžnom smere šírenia pri zmenách frekvencie. Táto disperzia je často označovaná aj ako **farebná disperzia**. Spôsobuje ju to, že nie je možné vytvoriť monochromatický zdroj svetla. Optické zdroje nie sú dokonalo monochromatické, to znamená že opt. žiarenie obsahuje určité spektrum vlnových dĺžok – vlnovodová disperzia. Tým, že niektoré vlnové dĺžky zaostávajú za inými sa prenášaný impulz vo vlákne postupom času rozťahuje, deformuje a na prijímacej strane je potom prijatý skreslený signál. To môže spôsobiť chybné vyhodnotenie rozhodovacej úrovne na prijímacej strane. Veľkosť chromatickej disperzie sa vyjadruje ako koeficient  $D(\lambda)$ , podľa vzťahu

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad [ps \cdot nm^{-1} \cdot km^{-1}] \quad (3)$$

Vyjadruje zmenu skupinového oneskorenia svetelného pulzu (DGD) optického vlákna jednotkovej dĺžky, v závislosti na jednotkovej zmene vlnovej dĺžky. Limitná hodnota koeficientu pre konvečné telekomunikačné vlákno je 17 ps/(nm · km).

Tabuľka 3: Tabuľka limitných hodnôt pre CD podľa štandardu ITU-T G.695

<i>Vlnová dĺžka <math>\lambda</math> [nm]</i>	<i>Koeficient chr. disp. <math>D(\lambda)</math>[ps/(nm · km)]</i>
1291–1351	5,7
1311–1371	6,8
1391–1451	11,5
1531–1591	19,9
1471–1611	21,1

## Postup spracovania merania

1. Po zapnutí meracieho prístroja otvorte program CompactTool na ploche.
2. Zvoľte meranie chromatickej (CD) aj polarizačnej vidovej (PMD) disperzie.
3. Pripravte vlákno na statické alebo manipulačné meranie.
4. Spust'te meranie.

**Poznámka:** V prípade manipulačných meraní si merací prístroj "myslí", že prebieha meranie na vonkajších závesných trasách. Z toho dôvodu sa zobrazí dialógové okno krátko po začiatku merania ktoré vás upozorní, že meranie prepína do módu merania vonkajších závesných tras. Tieto merania trvajú približne 10-15 minút podľa miery manipulácie s vláknom počas merania.

## Použité prístroje

- EXFO FTB–200/FTB–5700

# Spracovanie merania

Meno a priezvisko:

Ročník:

ID:

Študijná skupina:

Dátum merania:

Kontroloval:

## Bod zadania č. 1.)

V krátkosti vysvetlite rozdiel medzi chromatickou a polarizačnou vidovou disperziou (charakter, vznik):

PMD - náhodný jav, ovplyvňovaná najmä okolnosťami, napr. teplota, vibrácie, uloženie.

CD - ovplyvňovaná najmä pri výrobe vlákna, materiálom, pomere polomeru jadra s vlnovou dĺžkou.

## Bod zadania č. 3.)

Ako prvé vykonajte referenčné meranie (vlákno v pokoji, bez manipulácie, bez akéhokoľvek stresu). V prvom stĺpci stručne popíšte spôsob uloženia vlákna počas merania (napr. stočenie, slučky, škripnutie, prudký ohyb/ohyby, na rôznych priemeroch, napnuté a pod.) Limit uvažujte iba pre koeficient PMD ( $D_{PMD}$ ).

<u>Statické merania</u>	PMD	$D_{PMD}$	PMD 2. rádu	$D(\lambda)$
Popis uloženia vlákna	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]	[ps/km]	[ps · nm <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> ]
Referenčné	0,2	0,0786	0,0203	0,33
Dvojitý prudký ohyb	0,25	0,0952	0,0293	0,71
Dvojitá slučka	0,26	0,0966	0,0302	0,38
Natočené na cievkach	0,24	0,0902	0,0263	0,27
Natočené na dvoch rôznych priemeroch	0,22	0,0823	0,0219	0,2
Škripnutie	0,24	0,0903	0,0264	0,32
<u>LIMIT</u>		0,5		

Tabuľka 4: Tabuľka nameraných PMD hodnôt statickými meraniami

#### Bod zadania č. 4.)

V tomto prípade vykonajte 3 merania počas ktorých budete s vláknom manipulovať. Počas prvých dvoch meraní manipulujte s vláknom jedným spôsobom (napr. opakované stláčanie, hádzanie, natáčanie, krútenie a pod.). Počas tretieho merania manipulujte s vláknom rôznymi spôsobmi (napr. kombinácie z predošlých meraní). Limit uvádzajte iba pre koeficient PMD ( $D_{PMD}$ ).

<i>Manipulačné merania</i>	PMD	$D_{PMD}$	PMD 2. rádu	CD
Popis manipulácie	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]	[ps/km]	[ps · nm <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> ]
Stláčanie	0,38	0,1328	0,0886	0,43
Skrúcanie	0,40	0,1481	0,0914	0,47
Kombinácia	0,39	0,1373	0,0899	0,44
<b>LIMIT</b>		<b>0,5</b>		

Tabuľka 5: Tabuľka nameraných PMD hodnôt manipulačnými meraniami

#### Bod zadania č. 5.)

Vypočítajte hodnoty koeficientu PMD pre krátku trasu (do 10 km) a pre dlhú trasu (nad 300 km) s tým, že merací prístroj dokáže zmerať trasu dlhú 200 km. Hodnoty oneskorenia signálu použite z bodu zadania č. 3.

9 km trasa

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{L} = \frac{0,27}{9} = 0,03 \text{ ps/km} \quad (4)$$

311 km trasa

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} = \frac{0,26}{\sqrt{200}} + \frac{0,22}{\sqrt{111}} = 0,18 + 0,021 = 0,039 \text{ ps}/\sqrt{km} \quad (5)$$

## Záver

V bode zadania 1.) boli uvedené hlavné rozdiely medzi PMD a CD.

V bode zadania 3.) bolo vykonaných 5 statických meraní. Vlákno bolo uložené do rôznych polôch na doštičkách k tomu pripravených, napr. ohyby, skrut, natočenie a pod.. Boli zaznamenané zmeny ako PMD tak aj CD koeficientu podľa spôsobu uloženia.

V bode zadania 4.) boli rovnako ako v bode 3.) zaznamenávané zmeny oboch koeficientov, v tomto prípade sa ale podstatnejšie menil koeficient PMD .

V poslednom bode zadania boli vypočítané hodnoty koeficientu pre dlhú a krátku trasu. Z výpočtov je zrejme ako veľmi je táto disperzia závislá na dĺžke trasy.