



# 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

## NÁVRH LABORATORNÍCH ÚLOH: DISPERZE V OPTICKÝCH VLÁKNECH

LABORATORY EXERCISES: DISPERSION IN OPTICAL FIBERS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Maroš Bilek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.**

**BRNO 2024**

# Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Maroš Bilek

**ID:** 220883

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh laboratorních úloh: disperze v optických vláknech

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem diplomové práce je detailní teoretický rozbor problematiky disperzí v optických vláknech a možností jejich měření a kompenzace. Na základě teoretického rozboru bude proveden návrh zapojení pro demonstraci alespoň dvou typů disperzí nebo jejich měření. Cílem diplomové práce bude příprava dvou laboratorních úloh sloužících k pochopení dané problematiky.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] MOHAMMAD, Nur a Tofael AHMED, ed., 2010. Dispersion Compensation of the Fiber Optic Cable. VDM Verlag. ISBN 978-3639314014.

[2] GALTAROSSA, Andrea a Curtis R. MENYUK, ed., 2005. Polarization mode dispersion. New York: Springer. ISBN 978-0387231938.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 21.5.2024

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

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

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## ABSTRAKT

Táto práca sa najprv venuje teoretickému rozboru optovláknových prenosov so zameraním na disperzie vyskytujúce sa v optických vláknach. Detailne sú popísané chromatická a polarizačná vidová disperzia. To zahrňuje ich vznik, dôsledky a ich meracie metódy. Na základe teoretického rozboru meracích metód boli vybrané dve na uplatnenie v praktickej časti pri návrhu zapojení pre laboratórne úlohy. Navrhnuté zapojenia boli prakticky prevedené na niekoľkých typoch vlákien o rôznych dĺžkach. Namerané hodnoty sa zhodovali s teoretickými a vyhovovali limitným hodnotám testovaných vlákien.

Hlavným výstupom tejto diplomovej práce sú laboratórne úlohy venované chromatickej disperzii a polarizačnej vidovej disperzii. V týchto návrhoch laboratórnych úloh sa nachádza stručný teoretický rozbor danej disperzie, sú uvedené potrebné limitné hodnoty a charakteristiky disperzií pre vyhodnotenie správnych výsledkov a implementované zapojenia meracích metód pre obe disperzie. Menovite sú to metóda oneskorenia impulzov pre chromatickú disperziu a metóda s fixným analyzátrom pre polarizačnú vidovú disperziu.

## KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Disperzia, vlákno, polarizácia, CD, PMD, DGD

## ABSTRACT

This thesis first addresses the theoretical analysis of optical fiber transmissions with a focus on the dispersions occurring in optical fibers. Chromatic and polarization mode dispersion are described in detail, including their origin, impact on the transmitted signal, and measurement methods. Based on the theoretical analysis of measurement methods, two were selected for application in the practical part of the thesis, specifically for designing measuring setups for laboratory exercises. The designed setups were practically implemented on several types of fibers with different lengths. The measured values corresponded with predicted theoretical values and met the limit values of the tested fibers.

The main output of this thesis consists of two laboratory exercises focused on chromatic dispersion and polarization mode dispersion. These laboratory exercise designs include a brief theoretical analysis of the respective dispersion, specify the necessary limit values and characteristics of the dispersions for evaluating correct results, and implement the measurement method setups for both dispersions. Specifically, these are the pulse delay method for chromatic dispersion and the fixed analyzer method for polarization mode dispersion.

## KEYWORDS

Dispersion, fiber, polarization, CD, PMD, DGD

BILEK, Maroš. *Návrh laboratorních úloh: disperze v optických vláknech*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2024. Vedúci práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

## Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko autora:** Bc. Maroš Bilek  
**VUT ID autora:** 220883  
**Typ práce:** Diplomová práca  
**Akademický rok:** 2023/24  
**Téma záverečnej práce:** Návrh laboratorných úloh: disperze v optických vláknech

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 diplomovej práce pánovi doc. Ing. Petrovi Münsterovi Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	12
<b>1 Všeobecné základy prenosu v optických vláknach</b>	<b>13</b>
1.1 Vlnová dĺžka	13
1.2 Index lomu	13
1.3 Rýchlosti - skupinová a fázova	15
1.4 Útlm v optických vláknach	17
1.4.1 Materiálová absorbcia	18
1.4.2 Rayleighov rozptyl	18
1.4.3 Vlnovodové nedokonalosti	19
1.5 Optické vlákna	19
1.5.1 Jednovidové a mnohovidové optické vlákna	19
1.5.2 Vlákna zachovávajúce polarizáciu	22
<b>2 Chromatická disperzia</b>	<b>25</b>
2.1 Charakteristika chromatickej disperzie	25
2.2 Kompenzácia CD	27
<b>3 Spôsoby merania CD</b>	<b>31</b>
3.1 Metóda fázového posunu	31
3.2 Metóda diferenciálneho fázového posunu	32
3.3 Metóda oneskorenia impulzov	32
<b>4 Polarizačná vidová disperzia</b>	<b>34</b>
4.1 Polarizácia	34
4.2 PMD	34
4.3 DGD	35
4.4 Koeficient PMD	36
<b>5 Spôsoby merania PMD</b>	<b>39</b>
5.1 Metóda skenovaním vlnovej dĺžky (s fixným analyzérrom)	40
5.2 Polarimetrická metóda	41
5.3 Metóda POTDR	42
5.3.1 Metóda DOP	44
5.3.2 Metóda SOP	45
5.4 TINTY	45
5.5 GINTY	47

<b>6</b>	<b>Vidová disperzia</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Návrhy zapojení pre meranie disperzií</b>	<b>51</b>
7.1	Návrh zapojenia pre PMD metódou s fixným analyzátorom . . . . .	51
7.2	Návrh zapojenia pre CD metódou oneskorenia impulzov . . . . .	53
<b>8</b>	<b>Laboratórne merania PMD a CD</b>	<b>56</b>
8.1	Zapojenie merania PMD s fixným analyzérrom . . . . .	56
8.2	Namerané hodnoty PMD . . . . .	57
8.3	Zapojenie merania oneskorenia impulzov . . . . .	64
8.4	Namerané hodnoty CD . . . . .	65
<b>9</b>	<b>Návrhy laboratórnych úloh</b>	<b>71</b>
	<b>Záver</b>	<b>86</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>87</b>
	<b>Zoznam symbolov a skratiek</b>	<b>90</b>



# Zoznam obrázkov

1.1	Elektromagnetické spektrum v metroch . . . . .	13
1.2	Závislosť indexu lomu od vlnovej dĺžky pre disprezné prostredie [4] . .	14
1.3	Normálna a anomálna disperzia [12] . . . . .	15
1.4	Závislosť indexu lomu a skupinového indexu lomu na vlnovej dĺžke [21]	16
1.5	Útlmová charakteristika optického vlákna s označenými pásmami vlnových dĺžok [4] . . . . .	17
1.6	Optické vlákna, a) so skokovým indexom lomu, b) s gradientným indexom lomu, c) jednovidové vlákno [7] . . . . .	20
1.7	Prierezy PM vlákien s nazornenými stresovými prvkami, zľava: PANDA, motýlik, eliptický plášť [23] . . . . .	23
1.8	Vývoj polarizačných stavov svetla propagujúceho dvojlomným prostredím [26] . . . . .	24
2.1	Zobrazenie celkovej chromatickej disperzie, materiálovej disperzie a vlnodovovej disperzie [12] . . . . .	26
2.2	Porovnanie indexu lomu vlákna so skokovým indexom s posunutou disperziou a konvenčného vlákna s neposunutou disperziou [25] . . .	28
2.3	Charakteristiky celkovej disperzie niektorých typov jednovidových vlákien [25] . . . . .	29
4.1	Znázornenie polarizačných stavov [14] . . . . .	35
4.2	DGD závislosť na vlnovej dĺžke . . . . .	36
4.3	Faktory generujúce vútorny stres a) elipticita jadra, b) skrut, c) postranné pnutie, d) osové magnetické pole, e) kovová vrstva, f) ohyb [26] . . . . .	38
4.4	Rozširovanie pulzov vplyvom PMD [26] . . . . .	38
5.1	Všobecné zapojenie metódy s fixným analyzátom [29] . . . . .	41
5.2	Zapojenie metódy s fixným analyzátom so širokopásmovým zdrojom [29] . . . . .	41
5.3	Zapojenie metódy s fixným analyzátom s laditeľným laserom [29] . . .	41
5.4	Bloková schéma polarimetrickej metódy [4] . . . . .	43
5.5	Bloková schéma metódy DOP [4] . . . . .	45
5.6	Bloková schéma metódy SOP [4] . . . . .	46
5.7	Bloková schéma metódy TINTY [4] . . . . .	47
5.8	Bloková schéma metódy GINTY [4] . . . . .	48
7.1	Zapojenie pre meranie PMD metódou s fixným analyzátorom [29] . .	52
7.2	Návrhované zapojenie pre meranie CD metódou oneskorenia impulzov	54
8.1	Príklad vhodnej výkonovej závislosti . . . . .	56

8.2	Porovnanie koeficientu PMD pri zmene zobrazovacieho okna pre vlákno G.652.D 20 km . . . . .	59
8.3	Porovnanie koeficientu PMD pri zmene zobrazovacieho okna pre vlákno G.652.D 50 km . . . . .	61
8.4	Porovnanie koeficientu PMD pri zmene zobrazovacieho okna pre vlákno G.653.B 7 km . . . . .	64
8.5	Zapojenie pre meranie CD metódou oneskorenia impulzov . . . . .	65
8.6	Porovnanie vplyvu dĺžky impulzu na hodnotu koeficientu CD, pre vlákno 20 km G.652.D . . . . .	67
8.7	Závislosť chromatickej disperzie na meraných vlnových dĺžkach, pre vlákno 20 km G.652.D . . . . .	67
8.8	Porovnanie vplyvu dĺžky impulzu na hodnotu koeficientu CD, pre vlákno 7 km G.653.B . . . . .	68
8.9	Závislosť chromatickej disperzie na meraných vlnových dĺžkach, pre vlákno 7 km G.653.B . . . . .	70

# Zoznam tabuliek

2.1	Limitné hodnoty chromatickej disperzie podľa ITU-T G.695 [3] . . . . .	30
5.1	Tabuľka limitných hodnôt PMD podľa ITU-T [4] . . . . .	39
8.1	Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 20 km G.652.D, SPAN 140 nm . . . . .	57
8.2	Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 20 km G.652.D, SPAN 100 nm . . . . .	58
8.3	Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 20 km G.652.D, SPAN 60 nm . . . . .	58
8.4	Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 50 km G.652.D, SPAN 140 nm . . . . .	60
8.5	Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 50 km G.652.D, SPAN 100 nm . . . . .	60
8.6	Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 50 km G.652.D, SPAN 60 nm . . . . .	61
8.7	Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 7 km G.653.B, SPAN 140 nm . . . . .	62
8.8	Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 7 km G.653.B, SPAN 100 nm . . . . .	63
8.9	Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 7 km G.653.B, SPAN 60 nm . . . . .	63
8.10	Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 20 km G.652.D, s dĺžkou pulzu 20 ns . . . . .	65
8.11	Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 20 km G.652.D, s dĺžkou pulzu 30 ns . . . . .	66
8.12	Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 20 km G.652.D, s dĺžkou pulzu 40 ns . . . . .	66
8.13	Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 7 km G.653.B, s dĺžkou pulzu 20 ns . . . . .	68
8.14	Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 7 km G.653.B, s dĺžkou pulzu 40 ns . . . . .	69
8.15	Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 7 km G.653.B, s dĺžkou pulzu 60 ns . . . . .	69

# Úvod

V dnešnej dobe optovláknové prenosy predstavujú kľúčový prvok telekomunikačnej infraštruktúry, ktorý umožňuje diaľkový prenos dát vysokou rýchlosťou a s nízkymi stratami. Tieto prenosy ale značne obmedzuje disperzia, jav, ktorý môže výrazne ovplyvniť kvalitu prenášaného signálu. Disperzia spôsobuje rozširovanie optických signálov, čo spôsobuje zníženie prenosovej kapacity a chyby v prenose dát.

Existujú 3 typy disperzií ktoré sa v optických prenosoch vyskytujú. Najvýznamnejšie sú chromatická disperzia a polarizačná vidová disperzia, poslednou je vidová disperzia. Chromatickú disperziu spôsobujú rozdielne rýchlosti šírenia svetelného signálu na rôznych vlnových dĺžkach svetla. Polarizačná vidová disperzia je spôsobená rozdielnymi rýchlosťami šírenia svetelných vidov v rôznych polarizačných stavoch. Obe tieto disperzie môžu mať značný vplyv na výkon optických prenosových systémov, a preto je dôležité nielen pochopiť ich podstatu, ale aj vedieť ich merať a kompenzovať.

V tejto diplomovej práci je popísaný detailný teoretický rozbor problematiky disperzií v optických vláknach, to znamená ich vznik, vplyv a dôsledok na prenosový systém a meracie metódy. Na základe teoretického rozboru budú navrhnuté dve zapojenia implementujúce meracie metódy pre chromatickú a polarizačnú vidovú disperziu. Na navrhnuté merania bude nadväzovať príprava dvoch laboratórnych úloh, ktoré poslúžia na praktické pochopenie danej problematiky. Tieto úlohy budú navrhnuté tak, aby umožnili študentom získať praktické skúsenosti s meraním disperzií.

Diplomová práca bude rozdelená do niekoľkých častí. Prvá časť sa zameria na všeobecný teoretický základ v optických vláknach a prenosoch. Následuje detailný rozbor chromatickej a polarizačnej vidovej disperzie s rozobratím ich meracích metód. Na začiatku praktickej časti sú predstavené návrhy zapojenia pre meranie disperzií. V poslednej časti budú na základe meraní podrobne popísané, navrhnuté a vypracované dve laboratórne úlohy venujúce sa problematike disperzií.

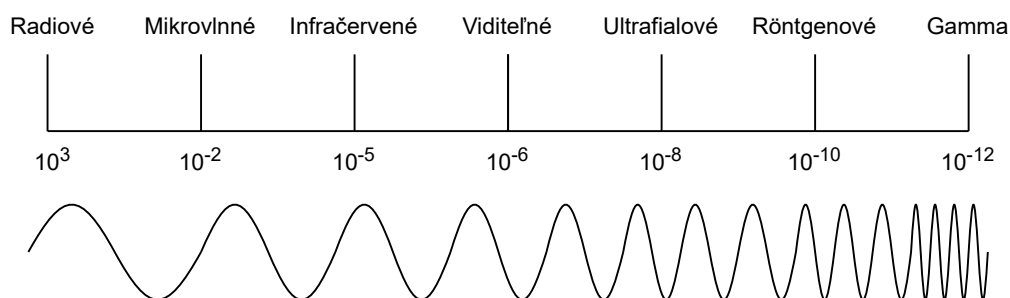
Výstupy tejto práce majú prispieť študentom k lepšiemu pochopeniu problematiky disperzií v optických vláknach a poskytnú praktické nástroje a postupy pre ich meranie.

# 1 Všeobecné základy prenosu v optických vláknach

## 1.1 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.

Najjednoduchší typ vlny je monochromatická rovinná vlna. Vlnovú dĺžku vlny potom určíme ako priestorovú periódu tejto vlny. Je to v podstate vzdialenosť medzi dvoma po sebe nasledujúcimi amplitúdami vlnenia. Je závislá na frekvencii a delí sa na rádiové, mikrovlnné, infračervené, viditeľné, ultrafialové, röntgenové a gamma žiarenie. Pre prenos signálov v optických systémoch sa využíva hlavne infračervená oblasť [1, 14, 20].



Obr. 1.1: Elektromagnetické spektrum v metroch

## 1.2 Index lomu

Rýchlosť ktorou sa svetlo šíri v oprickom prostredí určujú materiálové konštanty daného prostredia - relatívna permitivita a relatívna permeabilita. Rýchlosť šírenia v optickom prostredí je následne definovaná ako [4, 28]

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad [m/s] \quad (1.1)$$

kde

- $\varepsilon$  je permitivita,  $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ , kde  $\varepsilon_r$  je relatívna permitivita prostredia a  $\varepsilon_0$  je permitivita vo vákuu

- $\mu$  je permeabilita,  $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ , kde  $\mu_r$  je relatívna permeabilita prostredia a  $\mu_0$  je permeabilita vo vákuu

S rýchlosťou šírenia svetla úzko súvisí aj index lomu. Index lomu svetla určuje pomer rýchlosti prostredia v ktorom sa svetlo šíri a rýchlosti svetla. Ten závisí od polarizácie, vlnovej dĺžky, smeru šírenia vlny a nie je konštantný [11, 28]. Je definovaný ako

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

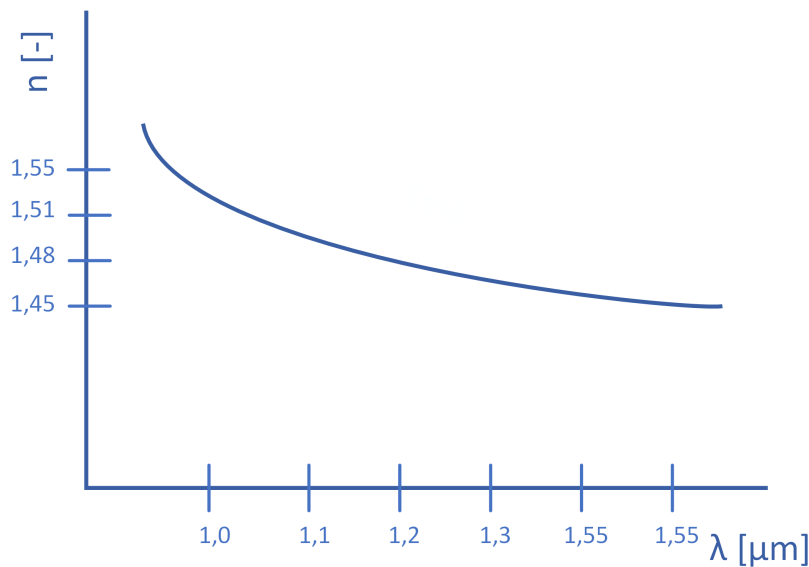
kde

- $c$  je rýchlosť svetla vo vákuu,  $c = 299\,792\,458$  [m/s]
- $v$  je rýchlosť šírenia svetla v danom prostredí

Pri strátových prostrediach je  $n$  komplexné a teda pri dielektrických prostrediach (optické vlákna) sa dá zjednodušiť na [11, 28]

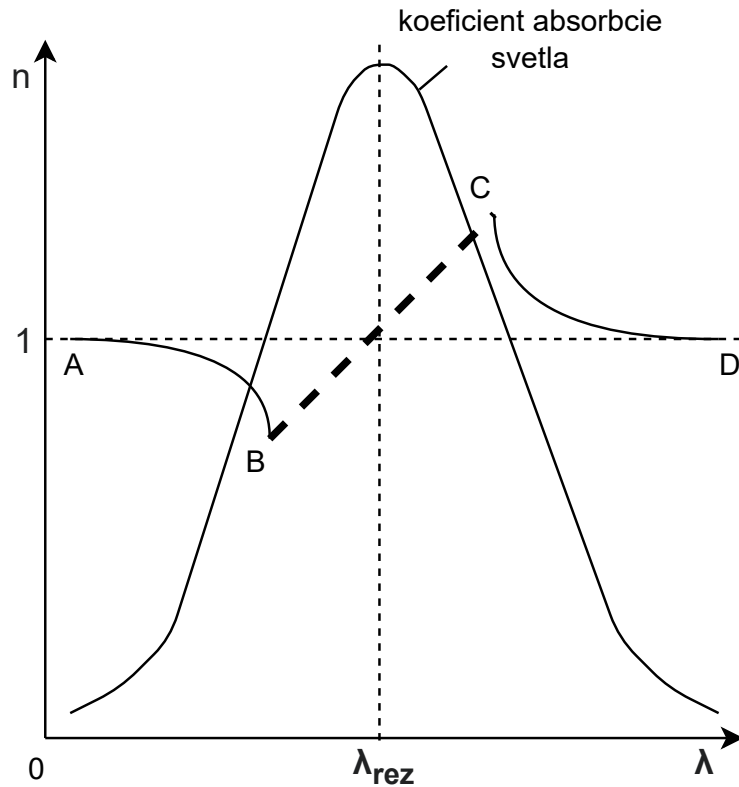
$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \quad [-] \quad (1.3)$$

Disperzia sa delí na *normálnu* a *anomálnu*. Pri normálnej disperzii sa index lomu



Obr. 1.2: Závislosť indexu lomu od vlnovej dĺžky pre disperzné prostredie [4]

zmenšuje ak sa dĺžka vlny zväčšuje. V opačnom prípade, ak sa index lomu zväčšuje počas toho ako vlnová dĺžka rastie tak sa jedná o disperziu anomálnu, ktorá sa vyskytuje len výnimočne [4]. Koeficient absorpcie vlny v mnohých prostrediach je závislý na vlnovej dĺžke. To znamená, že niektoré vlnové dĺžky sú pohlcované viac ako iné. V prostredí kedy je koeficient absorpcie najväčší vykazuje disperzia anomáliu, je to konkrétne v časti závislosti kde  $dn/d\lambda > 0$ , na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Normálna a anomálna disperzia [12]

## 1.3 Rýchlosti - skupinová a fázová

### Fázová rýchlosť

Pre rovinnu harmonickú vlnu ktorá sa šíri v kladnom smere osi  $z$ , platí:

$$u(z, t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot z) \quad [-] \quad (1.4)$$

kde

- $A$  je amplitúda vlny,
- $\omega$  je uhlová frekvencia,
- $t$  je čas,
- $k = 2\pi/\lambda$  je vlnové číslo,
- $x$  je poloha.

Ak vyššie uvedený výraz položíme rovný konštante a zderivujeme dostaneme:

$$\omega - k \cdot \frac{dz}{dt} = 0 \quad [-] \quad (1.5)$$

po úprave dostaneme výraz pre výpočet *fázovej rýchlosti*:

$$v_f = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} \quad [m/s] \quad (1.6)$$

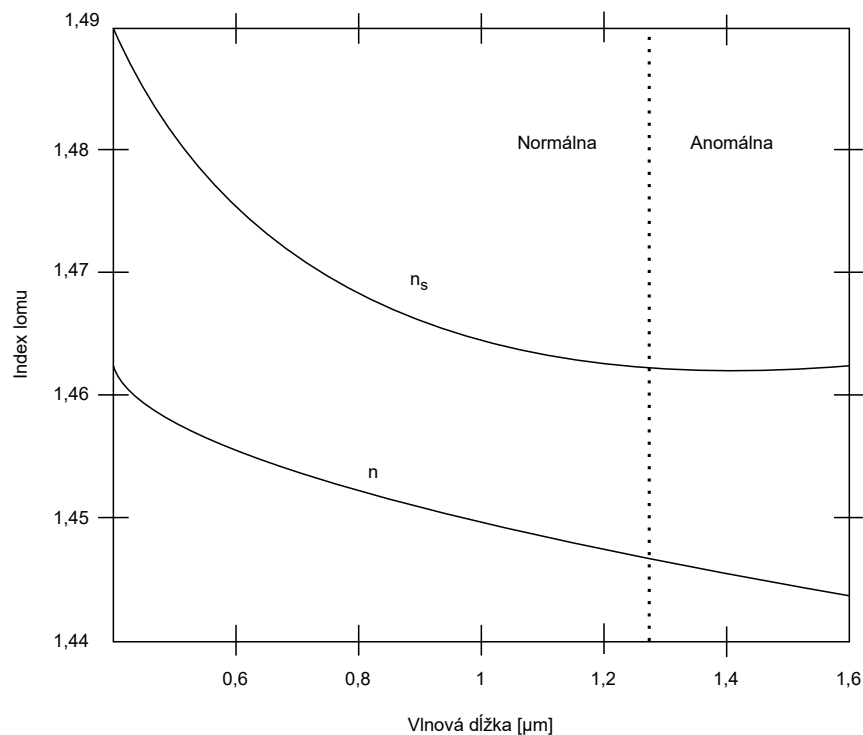
Je zrejmé, že je funkciou vlnového čísla  $k$  a teda aj vlnovej dĺžky. Z toho vyplýva, že od fázovej rýchlosti je závislý aj index lomu [4, 12]. Fázová rýchlosť predstavuje rýchlosť, ktorou sa posúva miesto (uzol) vlny alebo pohybu fáze vlny [4, 9, 12].

### Skupinová rýchlosť

Vlna definovaná pomocou 1.4 je v čase a priestore len sled maxim a miním, a teda takáto vlna žiadne signály neprenáša, pretože všetky nasledujúce maximá su rovnaké ako predchádzajúce. Ak chceme signály prenášať je potrebné vlnu pozmeniť, aby bolo možné určiť jej začiatok a koniec, napríklad moduláciou. Tým sa vytvorí *vlnový balík* alebo *grupa vln*. Skupinová rýchlosť je rýchlosť ktorou grupa vln propaguje prostredím [25]. Je definovaná ako:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n + \frac{dn}{d\omega}} = \frac{c}{n_s} \quad [m/s] \quad (1.7)$$

kde  $n_s$  je skupinový index lomu, ktorému bude venovaná pozornosť v neskorších kapitolách. Uzly jednotlivých vln o rôznych frekvenciách a fázach sa pohybujú rôznymi rýchlosťami a svetelný impulz sa prostredím pohybuje len vtedy keď sú všetky uzly v rovnakom okamžiku v približne rovnakej fáze [1].

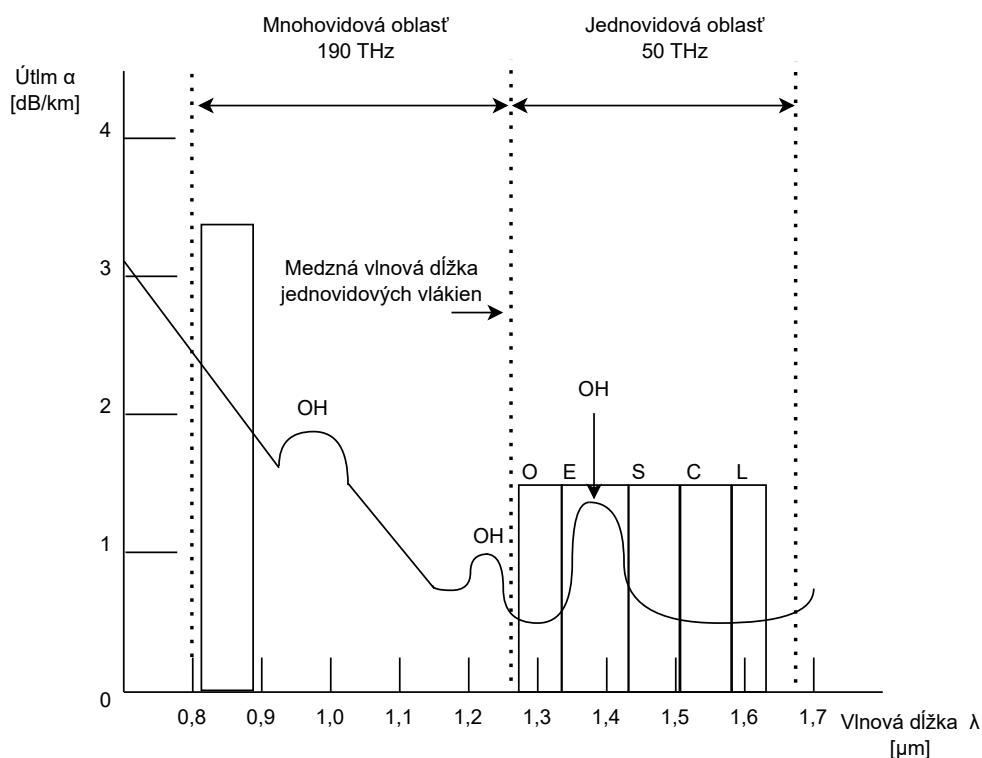


Obr. 1.4: Závislosť indexu lomu a skupinového indexu lomu na vlnovej dĺžke [21]



## 1.4 Útlm v optických vláknach

Útlm je lineárny jav. Keď svetelný impulz prechádza optickým vláknom stráca časť svojho optického výkonu. To je spôsobené útlmom vlákna. Útlm je závislý na vlnovej dĺžke prenášaného svetla. Uvádza sa v jednotkách dB/km. V dnešnej dobe sa tento parameter značne kompenzuje už výrobou vlákna (obohatené kremíkove vlákno), kde sa koeficient tlmenia pohybuje približne okolo hodnoty 0,2 dB/km pre vlnovú dĺžku 1550 nm. Pri nasadzovaní optickej trasy sa ďalej inštalujú optické zosilňovače, opakovače a regenerátory signálu pre dodatočnú kompenzáciu. Pri výrobe ho spôsobujú najmä nehomogenity, geometria a absorpcia použitého materiálu, pri prevádzke su to hlavne ohyby vlákna na trase. Do vlákna sa najčastejšie viaže optické žiarenie z rozsahu vlnových dĺžok 1,3–1,6  $\mu\text{m}$ . V tomto rozsahu sú útlmové hodnoty najideálnejšie, vykazujú najmenšie straty a minimálnu materiálovú disperziu [12, 14, 21]. Na obrázku 1.5 je znázornená útlmová charakteristika optického vlákna s označenými pásmami vlnových dĺžok. Útlmový koeficient je definovaný ako



Obr. 1.5: Útlmová charakteristika optického vlákna s označenými pásmami vlnových dĺžok [4]

$$\alpha = \frac{10}{L} \cdot \log_{10}\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right) \quad [\text{dB}/\text{km}] \quad (1.8)$$

kde

- $\alpha$  je koeficient útlmu,
- $L$  je dĺžka vlákna,
- $P_{in}$  je výkon na vstupe,
- $P_{out}$  je výkon na výstupe.

### 1.4.1 Materiálová absorbcia

Môže byť rozdelená do dvoch kategórií, *intrinzičnú* a *extrinzičnú*. Intrinzičné materiálové straty sú spôsobované interakciou medzi vlnovou dĺžkou a jednej alebo aj viacerými zložkami skla z ktorého je vlákno vyrábané ( $SiO_2$ ). Pre vlnové dĺžky (infračervené pásmo 0,8–0,9 a 1,2–1,5  $\mu m$ ) ktoré sa používajú v telekomunikáciách sú ale tieto straty zanedbateľné. Naopak, extrinzičné straty, ktoré sú spôsobované prítomnosťou malých množstiev kovových iónov (Cu, Fe, Ni, Cr) alebo vody a spôsobujú absorbciu v oblasti 0,6–1,6  $\mu m$ . Už 1 ppm (part per milion) železa dokáže spôsobiť 0,68 dB/km na vlnovej dĺžke 1100 nm. Pre vodu je táto hodnota ešte vyššia, 1 ppm  $OH^-$  iónu (hydroxid) spôsobuje útlm 4 dB/km na vlnovej dĺžke 1380 nm. Tieto straty sú dôvodom prečo sa pri výrobe optických vlákien kladie tak vysoký dôraz na čistotu materiálu [4, 21, 22].

### 1.4.2 Rayleighov rozptyl

Je to strátový mechanizmus ktorý vzniká mikroskopickými nehomogenitami ktoré vzniknú pri výrobe vlákna. Pri výrobe vlákna je materiál roztavený, teda v tekutej forme. Molekuly kremíka sa teda v roztavenom stave pohybujú v materiály a následne keď vlákno stvrdne tak dochádza k lokálnym výkyvom v hustote týchto molekúl vo vlákne. Výkyvy v hustote spôsobia malé (malé v porovnaní s vlnovou dĺžkou prenášanej svetelnej vlny) výkyvy v indexe lomu. Rozptyl svetla v takomto médiu sa Rayleighov rozptyl. Ak monochromatické svetlo ktoré dopadá na rozptyľujúce prostredie nemení svoju vlnovú dĺžku ide taktiež o Rayleighov rozptyl. Útlm spôsobovaný týmto rozptylom je úmerný  $\lambda^{-4}$  a klesá s narastajúcou vlnovou dĺžkou [12, 21, 22]. Dá sa zapísať ako

$$\alpha_R = \frac{C}{\lambda^4} \quad [dB/km] \quad (1.9)$$

kde

- $\alpha_R$  je koeficient útlmu spôsobený Rayleighovým rozptylom,
- $C$  je konštanta v intervale 0,7–0,9 (dB/km)- $\mu m^4$  a závisí na zložkách jadra,
- $\lambda$  je vlnová dĺžka.

### 1.4.3 Vlnodové nedokonalosti

Dokonalé jednovidové optické vlákno by dokázalo viesť svetelný impulz po celej trase bez akéhokoľvek uniku energie. V skutočnosti ale nedokonalosti na rozhraní jadro-plášť spôsobujú útlm. Tento útlm spôsobuje najmä Mieho rozptyl. Ten sa prejavuje kvôli výkyvom indexu lomu na škále väčšej ako vlnová dĺžka. Kládne sa dôraz na to aby priemer jadra vlákna bol nemenný. Zmeny jadra sa v dnešnej dobe dajú udržať pod 1%, vďaka tomu sú hodnoty útlmu spôsobeného týmito nedokonalosťami zvyčajne pod 0,03 dB/km. Ohyby dokážu taktiež spôsobovať nežiadúci nárast útlmu. Svetelný lúč vstupuje do vlákna pod uhlom väčším ako je kritický uhol, aby došlo k úplnému odrazu na rozhraní jadro-plášť. V mieste ohybu sa tento uhol ale mení a môže klesnúť pod hodnotu ktorá je potrebná na úplny odraz. Ak sa to stane tak lúč unikne mimo vlákno a teda v rámci vidov sa stratí energia ktorá sa rozťali v plášti vlákna. Podstatným zdrojom útlmu sú osovú deformácie ktoré sú často spôsobené pri inštalácii optického káblu. Sú spôsobené keď je vlákno pritlačené o povrch ktorý nie je dokonalo hladký. Týmto strádam sa hovorí mikroohybové straty. Prejavujú sa v jednovidových aj mnohovidových vláknach a dokážu spôsobiť veľmi veľké straty ( $\sim 100$  dB/km) v prípade zanedbania prevencie [21].

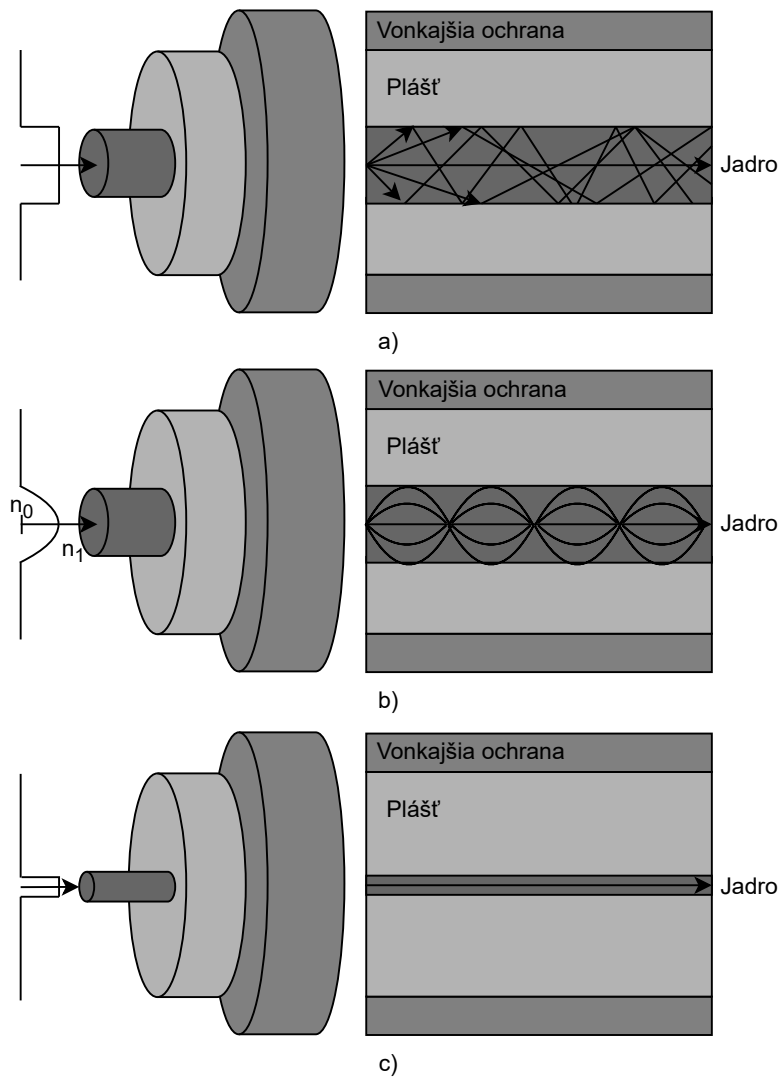
## 1.5 Optické vlákna

Optické vlákna sú dielektrickými vlnodmi. Vlákno je zložené z valcovitého jadra a plášťa. Na výrobu jadra sa najčastejšie používa obohatené kremičité sklo. Sklo je obohatené prímiesami germánia, vďaka ktorému dosahuje malé hodnoty útlmu a vysokú čistotu, taktiež zvyšuje index lomu. Princíp vedenia svetla funguje na úplnom odraze svetla na rozhraní jadro-plášť. Plášť aj jadro majú svoje určité indexy lomu, aby prenos vnútri fungoval musí platiť, že index lomu jadra je *väčší* ako index lomu plášťa. V opačnom prípade by k úplnému odrazu nedošlo a prenos by nebol efektívny. Svetelné lúče prenášané vnútri vlákna sa nazývajú *vidy*, podľa počtu prenášaných vidov sa vlákna delia na [14, 21, 22, 23]:

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

### 1.5.1 Jednovidové a mnohovidové optické vlákna

Priemer jadra pre mnohovidové vlákna je 62,5 (OM1) alebo 50  $\mu\text{m}$ , pre jednovidové vlákna je priemer jadra 8 – 10  $\mu\text{m}$ . Priemer plášťa je pre všetky typy telekomunikačných vlákien 125  $\mu\text{m}$ . Optické vlákna bývajú často označované podľa ITU-T



Obr. 1.6: Optické vlákna, a) so skokovým indexom lomu, b) s gradientným indexom lomu, c) jednoovidové vlákno [7]

štandardov. International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector je jeden z troch sektorov patriacich pod International Telecommunication Union (ITU). Tento sektor je zodpovedný za tvorbu a správu štandardov v rámci telekomunikácií a informačných technológií [13, 14].

### ITU-T G.651.1

Štandard ITU-T G.651.1 definuje mnohovidové optické vlákno s gradientným indexom lomu. Toto vlákno ma priemer jadro-plášť 50/125  $\mu\text{m}$  a funguje v oblasti vlnových dĺžok 850 a 1300 nm. Priemer makro ohybu tohto vlákna je stanovený na 15 mm, žiadne iné mnohovidové vlákno nemá menší priemer ohybu, preto je toto vlákno považované za necitlivé na ohyby. Najčastejšie sa používa v obytných

budovách (Fiber to the Home) a podnikových sieťach (napr. Fiber to the Zone architektúra) [13].

### **ITU-T G.652**

Štandard ITU-T G.652 definuje jednoividvé vlákno a je rozdelený na štyri triedy, G.652.A, G.652.B, G.652.C, a G.652.D. Pričom vlákna v prvých dvoch triedach sa v dnešnej dobe zvyčajne nevyužívajú kvôli ich podradnému výkonu pri využití moderných WDM aplikácií. Vlákna G.652.C a G.652.D sú vlákna s redukovanou vodnou špičkou (Zero Water Peak alebo Dry fiber). To im umožňuje fungovanie v oblasti 1310 – 1550 nm, pričom podporujú hrubé multiplexovanie s delením vlnových dĺžok (CWDM). Najmodernejšie a teda aj najvýhodnejšie a najpoužívanejšie vlákno je zatiaľ G.652.D. Disponuje najlepšou ochranou a maximálny investičný návrat [13].

### **ITU-T G.653**

Štandard ITU-T G.653 definuje jednoividvé vlákna s posunutou disperziou na prenos na veľké vzdialenosti. Sú to vlákna ktoré vykazujú nulovú hodnotu disperzie na vlnovej dĺžke 1550 nm, kde je útlm vlákna najmenší. Štandard obsahuje dve triedy: G.653.A a G.653.B. Obidve vlákna fungujú na už spomínanej vlnovej dĺžke 1550 nm ale je možné ich nasadiť aj na vlnovú dĺžku 1310 nm v prípade, že útlmový koeficient by bol menší ako 0,55 dB/km. Tieto vlákna sú do veľkej miery ovplyvňované šumom ktorý vzniká nelineárnym javom - štvorvlnným zmiešavaním, tento jav sa prejavuje pri použití WDM. Preto sa v dnešnej dobe už v praxi veľmi nenasadzujú [13].

### **ITU-T G.654**

ITU-T G.654 je štandard ktorý definuje jednoividvé vlákna s posunutou deliacou vlnovou dĺžkou na pod morské prenosy a pozemné siete. Je rozdelený na 5 vlákien: G.654.A, G.654.B, G.654.C, G.654.D, a G.654.E. Vlákna tohto štandardu sú optimalizované na fungovanie na vlnových dĺžkach 1500–1600 nm. Prvé štyri vlákna sú vhodné na podmorské prenosy na veľké vzdialenosti. Vlákno G.654.E je navrhnuté na vysokorýchlostne ďalekonosné pozemné siete. Je považované za vhodného kandidáta na optimalizovanie prenosov novej generácie ultra vysokorýchlostných ďalekonosných optických sietí [13].

### **ITU-T G.655**

Vlákna v štandarde ITU-T G.655 sú jednoividé vlákna s nenulovou posunutou disperziou a fungujú v oblasti vlnových dĺžok 1550–1625 nm. Tento štandard zastrešuje

celkovo 5 tried: G.655.A, G.655.B, G.655.C, G.655.D, a G.655.E. Pôvodne boli zamýšľané na použitie na vlnových dĺžkach 1530–1565 nm ale pri určitých opatreniach sa dajú použiť aj vlnové dĺžky okolo 1625 nm aj 1460 nm. V minulosti boli veľmi populárne pri nasadzovaní WDM systémov na dlhé vzdialenosti. V dnešnej dobe ich vytláča už spomínané vlákno G.652.D [13].

### **ITU-T G.656**

Vlákno s nenulovou disperziou vhodné pre CDWDM aj DWDM systémy spadá pod štandard ITU-T G.656. Toto vlákno bolo dedikované na použitie v širokopásmových systémoch využívajúcich CWDM a DWDM. Funguje v oblasti vlnových dĺžok 1460–1625 nm, pričom ale okolo vlnovej dĺžky 1530 nm má veľmi malú disperziu pre využitie WDM. Kvôli tomu sa skôr nasadzuje na vlnové dĺžky vyššie ako 1530 nm [13].

### **ITU-T G.657**

Posledným štandardom pre jednoividové vlákna je zatiaľ ITU-T G.657. Hlavnou charakteristikou tohto vlákna je necitlivosť na ohyby. Používajú sa hlavne v širokopásmových prístupových sieťach v kancelárskych a zákazníckych obytných budovách a domoch. Pod štandard spadajú dve triedy: G.657.A a G.657.B. Pričom vlákno G.657.A je veľmi podobné vláknu G.652.D s tým rozdielom že ponúka približne 10-krát lepšiu odolnosť proti makro ohybom. Kdežto vlákno G.657.B je celkovo necitlivé na ohyby, ponúka stonásobne lepšiu odolnosť voči ohybom než štandardné jednoividové vlákno a približne 10-krát lepšiu odolnosť než G.657.A. Vlákno G.657.B sa nepodobá žiadnému predchádzajúcemu ITU-T štandardu. Obe vlákna sa ešte dajú ďalej rozdeliť na G.657.A1, G.657.A2, G.657.B2, a G.657.B3 podľa ich požiadavok na makro ohyby [13].

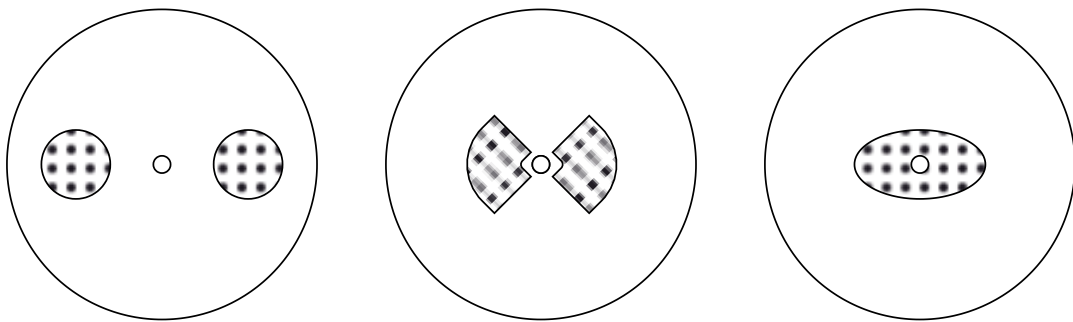
## **1.5.2 Vlákna zachovávajúce polarizáciu**

Jedná sa o vlákna PMF (Polarization-maintaining fiber), ktoré dokážu udržať polarizačný stav svetla ktoré bolo do vlákna naviazané počas celého prenosu. Vo vnútri vlákna sa nachádzajú dve osi, *rýchla* a *pomalá*. Aby bolo možné polarizačný stav udržať je potrebné aby polarizačný smer polarizovaného svetla bol zarovnaný pozdĺž jednej z týchto osí. PMF vlákna bývajú značne drahšie ako obyčajne jednoividvé vlákna. Ďalšou nevýhodou týchto vlákien sú vyššie straty propagácie. Polarizačný stav polarizovaného svetla ktoré sa naviaže do obyčajného jednoividvého vlákna sa rýchlo zmení už po pár metroch prenosu. Optické vlákno býva často ovplyvňované vonkajšími vplyvmi alebo zaobchádzaním s vláknom, ktoré vyvoláva vnútorný stres

v optickom vlákne. Jedná sa napríklad o tvar jadra, ohyb, skrut, asymetrie vnútri vlákna. Na kompenzáciu niektorých týchto vplyvov sa do vlákna vkladajú *stresové prvky*. Stresové prvky pomáhajú vo vlákne vyvolávať stres pomocou ktorého dokážeme udržiavať požadovaný polarizačný stav [1, 2, 14, 23, 26]. Vlákna PMF možno rozdeliť na:

- vlákna s nízkym dvojlomom,
- vlákna s vysokým dvojlomom,
- jednovidové vlákna s jedným polarizačným stavom.

Hovoríme, že vláknom má dvojlom ak polarizačné vidy majú rôzne rýchlosti. Rozdiel v rýchlosti vidov spôsobuje materiál ktorý má rôzne indexy lomu pre polarizačné vidy.



Obr. 1.7: Prierezy PM vlákien s nazorenými stresovými prvkami, zľava: PANDA, motýlik, eliptický plášť [23]

### Vlákna s nízkym dvojlomom

Vlákna sú vyrábané s oveľa väčším dôrazom na symetriu jadra ako obyčajné jednovidové vlákna. Tieto vlákna musia mať dokonalú geometriu a musia byť kompletne symetrické pozdĺž optickej osi. To má za následok nízku hodnotu dvojlomu, približne v intervale  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$ . Používajú sa na prenos polarizovaného svetla v prípade, že zarovnanie polarizovaného svetla pozdĺž jednej z osí je nemožné alebo nevyhovujúce. V niektorých sensorických nasadeniach je možné využiť samotné vlákno ako sensorický prvok [2, 14, 23, 26].

### Vlákna s vysokým dvojlomom

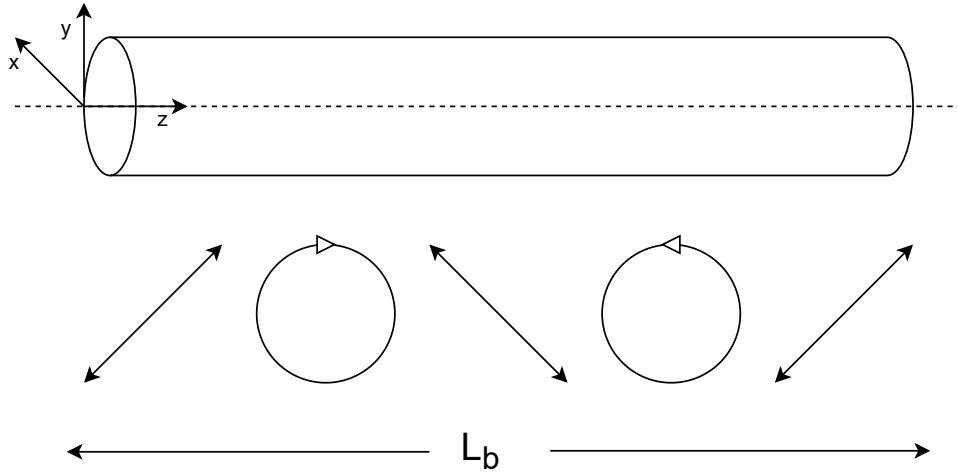
Vo vláknoch s vysokým dvojlomom sú propagačné konštanty polarizačných vidov značne rozdielne a teda väzba medzi nimi nie je veľmi silná. Kvôli tomu, ak sa svetlo naviaže len do jedného z polarizačných vidov, väčšina svetla potom ostane počas prenosu v tomto jednom vide. Vďaka tomu je polaračný stav zachovaný počas prechodu

vláknom [2, 14, 23, 26]. Miera do ktorej sa vláknu darí uchovávať si polarizačný stav je definovaná ako:

$$L_b = \frac{2\pi}{\beta_x - \beta_y} = \frac{\lambda_0}{\Delta n_{eff}} \quad (1.10)$$

kde

- $\beta_x$  a  $\beta_y$  sú propagačné konštanty ortogonálnych polarizačných vidov,
- $\lambda_0$  je vlnová dĺžka,
- $\Delta n_{eff}$  je rozdiel medzi indexami polarizačných vidov.



Obr. 1.8: Vývoj polarizačných stavov svetla propagujúceho dvojlomným prostredím [26]

Platí, že čím je hodnota  $L_b$  menšia, tým lepšie dokáže vlákno udržať polarizačný stav.  $L_b$  vyjadruje vzdialenosť po ktorej sa fázový rozdiel medzi dvoma základnými vidmi rovná  $2\pi$ . Ak je svetlo naviazané do oboch základných vidov vlákna s vysokým dvojlomom, polarizačný stav sa bude opakovať po každej urazenej vzdialenosti  $L_b$ . Typická hodnota  $L_b$  sa pre tieto vlákna pohybuje v rozmedzí 1 – 2 mm. Ďalším parametrom ktorý dokáže ovplyvniť to ako si vlákno udrží polarizáciu je presluch (Cross talk CT). CT vyjadruje mieru výkonu naviazaného do polarizačných vidov. Je spôsobovaný náhodným naviazaním výkonu do polarizačných vidov pozdĺž vlákna keď sa do vlákna začne vysielat signál [23, 26]. Dá sa vyjadriť ako:

$$CT = 10 \log\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \quad [dB] \quad (1.11)$$

kde

- $P_x$  je výkon signálu naviazaného do x-polarizačného vidu na vstupe,
- $P_y$  je výkon signálu detekovaného v y-polarizačnom vide na výstupe.



## 2 Chromatická disperzia

### 2.1 Charakteristika chromatickej disperzie

Pretože žiaden zdroj optického žiarenia nie je dokonalo monochromatický, žiarenie ktoré sa prenáša vláknom obsahuje *spektrum* vlnových dĺžok. Tieto vlnové dĺžky sa vo vlákne šíria rôznymi rýchlosťami.

Materiálová disperzia sa prejavuje, pretože index lomu kremíka sa mení s vlnovou dĺžkou. Svetlo ktoré je prenášané vláknom je spomalené o hodnotu  $1/n$ , kde  $n$  je index lomu. Je to tak, pretože elektromagnetická vlna a viazané elektróny materiálu na seba navzájom pôsobia. Spomínané elektróny oscilujú o určitých rezonančných frekvenciách pre daný materiál a teda, elektróny a elektromagnetická vlna závisia od frekvencie. Práve to spôsobuje závislosť indexu lomu na frekvencii. Táto závislosť sa dá vyjadriť ako model kde sú viazané elektróny považované za harmonické oscilátory [2, 15, 25]. Má takýto tvar:

$$n^2 - 1 = \sum_{j=1}^M \frac{\lambda^2 B_j}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \quad [-] \quad (2.1)$$

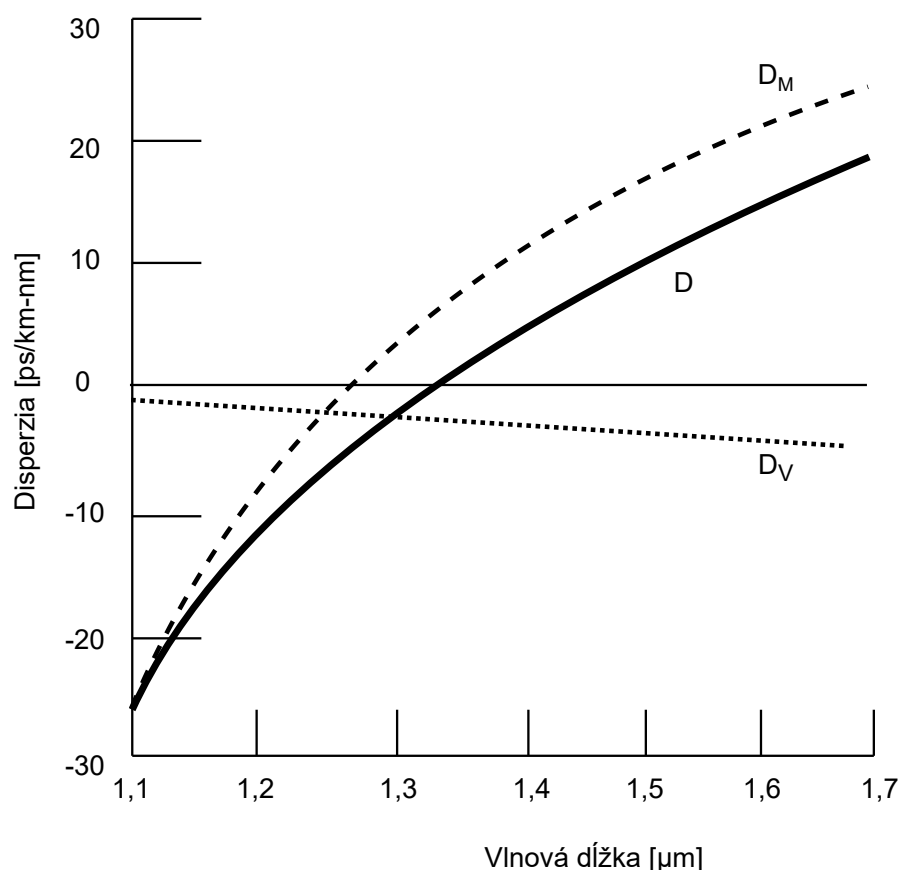
kde

- $M$  je počet elektrónových rezonancií,
- $\lambda_j$  sú vlnové dĺžky elektrónových rezonancií,
- $B_j$  sú konštanty získané experimentálne dosadzovaním disperzných meraní.

Vlnovodová disperzia závisí na disperzných vlastnostiach vlnovodu. Tým sa rozumie geometria vidu a aj pomer polomer jadra vlákna k indexu lomu. Je spôsobovaná zmenami rozloženia elektrického poľa optického vidu na určitej vzdialenosti. Zmena poľa závisí na geometrii vlákna. Pri mnohovidových vláknach je vlnovodová disperzia zanedbateľná alebo sa vôbec neprejavuje. Je to kvôli tomu, že vidy v mnohovidových vláknach sa prenášajú ďaleko od deliacej vlnovej dĺžky (cutoff). Pre jednovidvé vlákna môže byť vlnovodová disperzia podstatne významná, pretože efekty rôznych disperzných mechanizmov sa ťažko rozoznávajú a oddeľujú. Vlnovodová disperzia v jednovidových vláknach sa dá pozorovať na tom ako sa mení propagačná konštantka  $\beta$  s vlnovou dĺžkou.

V prípade, že je vlnová dĺžka veľká vzhľadom na priemer jadra, tak základný vid je do jadra vlákna naviazaný veľmi na voľno. To spôsobí, že výkon ktorý sa dostal do *plášťa* vlákna sa približuje celkovému výkon. A teda propagačná konštantka základného vidu sa približuje propagačnej konštantke rovinnej vlny prenášanej v plášti. Skupinové oneskorenie sa taktiež približuje k skupinovému oneskoreniu rovinnej vlny prenášanej v plášti vlákna, propagačná konštantka sa blíži k svojej spodnej limite viazaného vidu a skupinová rýchlosť je maximalizovaná.

V prípade, že je vlnová dĺžka veľmi krátka vzhľadom na priemer jadra, je základný vid navizovaný do jadra vlákna veľmi na tesno. Výkon ktorý sa dostane a prenáša v plášti je veľmi malý alebo nulový. Propagačná konštanta základného vidu sa v tomto prípade približuje k propagačnej konštante rovinnej vlny prenášanej v jadre a k svojej hornej limite. To spôsobí, že propagačná konštanta v jadre vlákna a skupinová rýchlosť sú minimalizované. Súvislosť medzi týmito disperziami je možno vidieť na obr. 2.1 [2, 4, 7, 12, 21, 25] Materiálová a vlnododová disperzia spolu tvo-



Obr. 2.1: Zobrazenie celkovej chromatickej disperzie, materiálovej disperzie a vlnododovej disperzie [12]

ria chromatickú disperziu. Preto celková chromatická disperzia môže mať pozitívnu alebo negatívnu hodnotu.

Chromatická disperzia je definovaná ako rozširovanie svetelného impulzu v optickom vlákne. Toto rozširovanie je spôsobené tým, že jednotlivé vlnové dĺžky, z ktorých sa skladá svetelné spektrum zdroja, majú rôzne skupinové rýchlosti. Skupinové oneskorenie  $\tau$  je čas ktorý je potrebný na to aby svetelný impulz prešiel jednotku dĺžky vlákna. Je funkciou vlnovej dĺžky a udáva sa v jednotkách [ps/km] [25]. Dá sa vy-

počítat ako:

$$\tau = \frac{1}{c} \cdot (n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda}) \quad [ps/km] \quad (2.2)$$

kde

- $c$  je rýchlosť svetla,
- $n$  je index lomu,
- $\lambda$  je vlnová dĺžka.

*Koeficient chromatickej disperzie* udáva ako sa mení skupinové oneskorenie svetelného impulzu v jednotke dĺžky vlákna spôsobené zmenou vlnovej dĺžky. Koeficient je definovaný ako:

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \cdot d\tau/d\lambda \quad [ps/nm \cdot km] \quad (2.3)$$

Koeficient sa špecifikuje v intervale vlnových dĺžok. Existujú dve metódy na vymedzenie hraníc.

Pri prvej metóde sa koeficient špecifikuje určením rozsahu povolených absolútnych hodnôt koeficientu chromatickej disperzie. Jednovidové optické vlákna s posunutou nenulovou disperziou majú ešte dodatočný požiadavok kde koeficient nesmie prekročiť nulu vo vymedzenom rozsahu. Rozsah sa dá zapísať ako:

$$D_{min} \leq |D(\lambda)| \leq D_{max} \quad pre \quad \lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max} \quad (2.4)$$

kde hodnoty  $D_{min}$ ,  $D_{max}$ ,  $\lambda_{min}$  a  $\lambda_{max}$  určuje odporúčanie ITU pre každý typ vlákna.

Druhá metóda špecifikuje koeficient pomocou páru limitných krivok pre každú vlnovú dĺžku. Nimi je koeficient obmedzený na rozsah hodnôt závislých na týchto krivkách. Krivky sa označujú ako  $D_{min}$  a  $D_{max}$ , pre jeden alebo viacero určených rozsahov vlnových dĺžok  $\lambda_{min}$  a  $\lambda_{max}$ . Krivky sa môžu líšiť v závislosti na zvolenom rozsahu vlnových dĺžok.

K chromatickej disperzii patrí ešte strmosť alebo sklon disperznej charakteristiky  $S(\lambda)$  [3, 4, 7], ten sa dá definovať ako:

$$S(\lambda) = \frac{dD}{d\lambda} \quad [ps \cdot nm^{-2} \cdot km^{-1}] \quad (2.5)$$

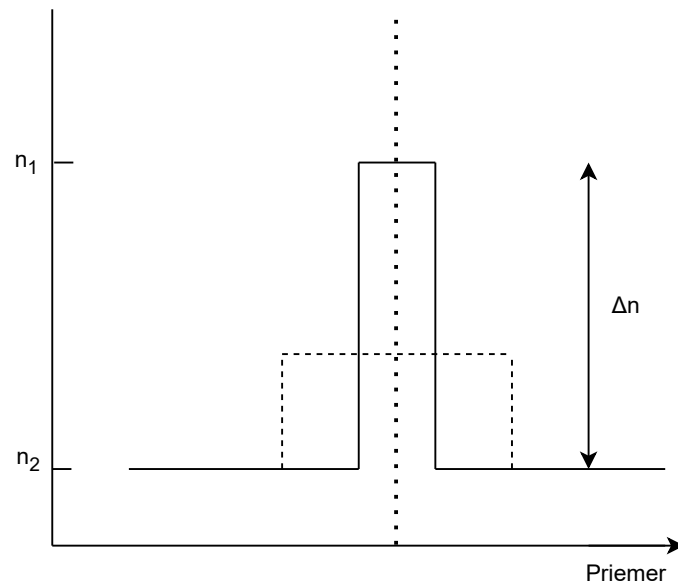
Existujú vlnové dĺžky pri ktorých sa chromatická disperzia neprejaví, takú vlnovú dĺžku označujeme ako *vlnová dĺžka nulovej chromatickej disperzie*. Všetky vyššie spomenuté parametre sa bežne nachádzajú v katalógoch výrobcov optických vlákien.

## 2.2 Kompenzácia CD

Chromatická disperzia sa dá kompenzovať využitím špecificky upravenými optickými vláknami, ktorých disperzné vlastnosti boli výrazne pozmenené tak, aby boli

viac využiteľné na optický prenos. Vzhľadom na to že materiálovú disperziu takmer nemožno ovplyvniť, ku kompenzácii teda dochádza prostredníctvom zmeny vlnovodovej disperzie. Voľbou rôznych hodnôt indexu lomu boli postupne vyvíjane optické vlákna ktoré majú spektrálnu závislosť koeficientu disperzie *upravenú*. Kompenzácia nastáva už pri výrobe vlákna, je dosiahnutá pomocou znižovania priemeru jadra pričom sa zvyšuje rozdiel medzi indexami lomu. Dosiahnutím určitých hodnôt disperzie, útlmu, vidového priemeru a ohybového útlmu, boli výsledkom vlákna so špecifickými, odlišnými profilmi jadra [15, 19].

Tieto vlákna sa nazývajú *vlákna s posunutou disperziou* (DSF), konkrétnejšie vlákna ITU-T G.653. Už jednoduchá zmena profilu jadra ako na obr. 2.2 posúva disperznú krivku na väčšie vlnové dĺžky, zmena je dosiahnutá znížením priemeru jadra a zvýšením zlomkového rozdielu indexov lomu. Typickými hodnotami pre tieto parametre sú  $4,4 \mu\text{m}$  pre priemer jadra a  $0,012$  pre indexy lomu. Profil jadra pre štandardné jednovidové vlákno je zobrazený čiarokvanou čiarou na obr. 2.2 [2, 25].



Obr. 2.2: Porovnanie indexu lomu vlákna so skokovým indexom s posunutou disperziou a konvenčného vlákna s neposunutou disperziou [25]

Vlákna s plochou disperznou krivkou (napr. G.654) majú viacvrstvomý index lomu. Ten je dosiahnutý postupným zvyšovaním vlnovodovej disperzie, ktorá je v tomto prípade využitá na postupné znižovanie celkovej chromatickej disperzie. Využíva sa k tomu okno v oblasti  $1300\text{--}1600 \text{ nm}$ , kde je nízky útlm aj celková disperzia. Tieto vlákna majú dva vlnové dĺžky s nulovou celkovou disperziou ako je možné vidieť na obr. 2.3.

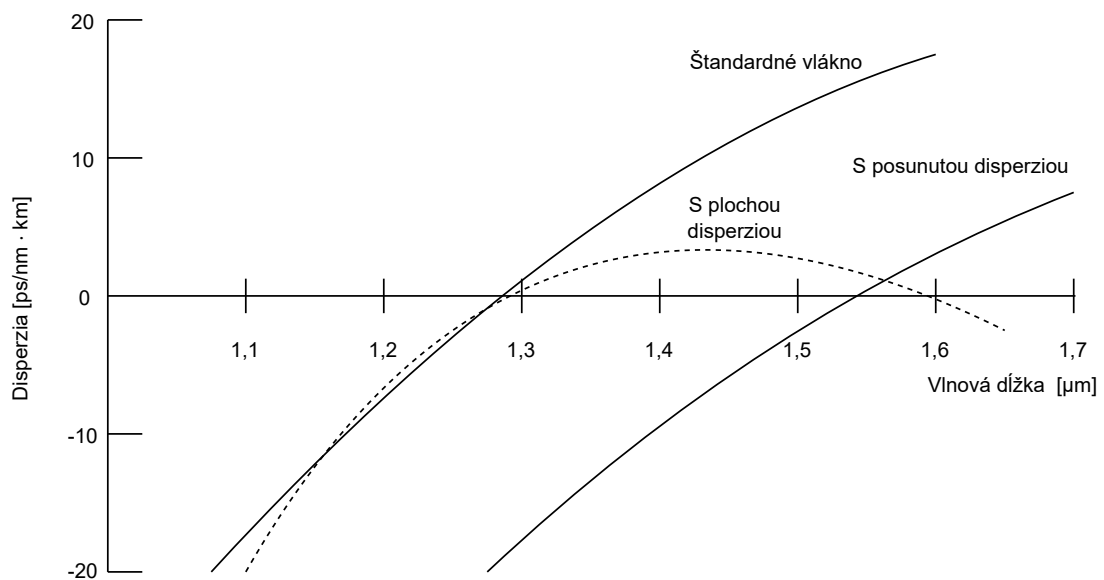
Ďalej existujú vlákna typu NZ-DSF, tzv. vlákna s nenulovou posunutou disperziou. Prenosová oblasť týchto vlákien je  $1,530\text{--}1,565 \mu\text{m}$ , ich nulová hodnota dis-

perzie sa ale nachádza *mimo* oblasť využívanú na prenos. V ich prenosovej oblasti majú určitú disperziu ale jej hodnoty su veľmi malé. V tomto prípade je ale disperzia *chcená*, a to z toho dôvodu, že nenulová disperzia zamedzuje vzniku nelineárnych javov [2, 15, 19, 25]. Pre výpočet maximálnej dĺžky trasy neovplyvnenej chromatickou disperziou sa dá použiť vzťah:

$$L = \frac{104,000}{D \cdot B^2} \quad [km] \quad (2.6)$$

kde

- $L$  je dĺžka po ktorej je nutné CD kompenzovať,
- $D$  je hodnota disperzie pre dané vlákno,
- $B$  je prenosová rýchlosť v Gbps,



Obr. 2.3: Charakteristiky celkovej disperzie niektorých typov jedovidových vlákien [25]

Tab. 2.1: Limitné hodnoty chromatickej disperzie podľa ITU-T G.695 [3]

Vlnová dĺžka [nm]	Maximálny disperzný koeficient [ps/nm/km]					
	<i>ITU-T G.652</i>		<i>ITU-T G.653</i>		<i>ITU-T G.655</i>	
	Neg.	Poz.	Neg.	Poz.	Neg.	Poz.
1291	-3,85	-	-	-	-	-
1311	-1,85	1,60	-	-	-	-
1331	-	3,34	-	-	-	-
1351	-	5,02	-	-	-	-
1371	-	6,62	-	-	-	-
1391	-	7,97	-	-	-	-
1411	-	9,14	-	-	-	-
1431	-	10,31	-	-	-	-
1451	-	11,49	-	-	-	-
1471	-	12,68	-8,64	-	-2,99	4,78
1491	-	13,86	-6,94	-	-1,45	5,79
1511	-	15,06	-5,24	0,82	-	6,80
1531	-	16,25	-3,54	1,75	-	8,85
1551	-	17,46	-2,59	2,68	-	8,85
1571	-	18,66	-1,66	3,71	-	9,90
1591	-	19,87	-0,72	5,41	-	10,96
1611	-	21,09	-	7,77	-	12,01

## 3 Spôsohy merania CD

Meranie chromatickej disperzie je potrebné aj napriek tomu, že je celkom jednoduché ju spočítať aj s pomerne vysokou presnosťou. Je to práve kvôli zvyšovaniu bitovej rýchlosti. Impulzy ktoré informáciu prenášajú sa zvyšovaním rýchlosti približujú k sebe a teda disperzia obmedzuje prenos spoja ešte výraznejšie. Kompenzácia a eliminácia vplyvu disperzie musí byť ešte presnejšia a dokonalejšia. Pri rýchlostiach 40 Gbit/s už treba dávať pozor aj na teplotné vplyvy, ktoré sú inak zanedbateľné. Liberizáciou telekomunikačného trhu taktiež vznikla potreba myslieť na to, že optické trasy môžu pozostávať z rôznych vlákien rôznych prevádzkárrov. V tomto prípade spočítanie celkom chromatickej disperzie už nie je také jednoduché. Meranie chromatickej disperzie je v podstate meranie časového oneskorenia signálov na rôznych vlnových dĺžkach a následné aproximovanie hodnôt nameraných na týchto vlnových dĺžkach. Základné merania CD sú už dlhú dobu a ich užívanie v praxi závisí hlavne na technologickom vývoji. Presnosť meraní závisí hlavne na použítom prístroji, na parametroch jeho komponentov a ich stabilite. Niektoré metódy merania merajú skupinové oneskorenie ako funkciu vlnovej dĺžky, v tomto prípade je potom celková chromatická disperzia a jej stírnosť dopočítavané. Iné meracie metódy dokážu merať hodnotu chromatickej disperzie priamo [3, 4, 15, 19].

### 3.1 Metóda fázového posunu

Koeficient chromatickej disperzie je vypočítaný pomocou merania skupinového oneskorenia na rôznych vlnových dĺžkach na vlákne so známou dĺžkou. Skupinové oneskorenie je merané vo frekvenčnej oblasti detekovaním, zaznamenaním a následným spracovaním fázového posunu sínusového modulačného signálu. Meranie sa vykonáva buď na určitých vlnových dĺžkach alebo v oblasti vlnových dĺžok. Fáza modulačného signálu je analyzovaná na výstupe a následne porovnaná s fázou referenčného signálu, ktorý je modulovaný rovnakou frekvenciou. Vlnová dĺžka referenčného signálu je určená, pričom vlnová dĺžka meraného signálu sa počas merania mení. Pri tomto meraní sa predpokladá prítup k obom koncom vlákna. Výber vlnových dĺžok je stanovený buď na vysielačnej strane, napr. laditeľným laserom, alebo na prijímacej strane, kde sa použije na vstupe širokopásmový zdroj žiarenia a na výstupe sa použije laditeľný filter vlnových dĺžok. Filter ale musí mať úzku spektrálnu šírku aby sa zaistil jeho malý vplyv na presnosť merania. Podľa ITU-T G650.1 je toto referenčná metóda merania chromatickej disperzie. Táto meracia metóda je vhodná na laboratórne merania pretože vyžaduje prístroje ktoré sú často veľmi drahé a rozmerné a ako bolo už spomenuté vyžaduje prístup k obom koncom vlákna. Tieto faktory robia túto metódu nevhodnú na používanie v teréne [3, 4, 15, 16, 17, 19]. Skupinové

oneskorenie sa vypočíta ako:

$$\tau = \frac{\phi}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad [s/km] \quad (3.1)$$

kde:

- $\tau$  je skupinové oneskorenie,
- $\phi$  je fázový posun,
- $f$  je modulačná frekvencia,

Jednou z nevýhod tejto meracej metódy je aj potreba použitia referenčného vlákna, v ktorom sa prenáša vstupná fáza signálu.

## 3.2 Metóda diferenciálneho fázového posunu

Je to meracia metóda ktorá je veľmi podobná predchádzajúcej metóde. V tomto prípade sa fáza modulovaného signálu na prvej vlnovej dĺžke porovná s fázou na druhej vlnovej dĺžke, v predchádzajúcej metóde sa nameraná fáza porovnávala s referenčnou fázou. Priemerná hodnota chromatickej disperzie na intervale medzi dvoma vlnovými dĺžkami je určená fázovým posunom a intervalom medzi vlnovými dĺžkami. Do vlákna sa potom naviaže signál s ďalšou vlnovou dĺžkou a proces sa opakuje, nameraním niekoľkých lokálnych hodnôt chromatickej disperzie a ich aproximáciou sa získa hodnota celkovej chromatickej disperzie. V porovnaní s klasickou metódou fázového posunu je táto metóda rýchlejšia a nie je potrebné pri nej nasadzovať referenčné vlákno. Nevýhodou tejto metódy je potreba dobre zvolených krokových intervalov medzi meranými vlnovými dĺžkami, táto voľba značne ovplyvňuje presnosť merania [3, 4, 15, 16, 17, 19].

## 3.3 Metóda oneskorenia impulzov

Impulzy rôznych vlnových dĺžok sú do vlákna vysielané v presne stanovených časových intervaloch. Meria sa rozdiel časových intervalov na vstupe a na výstupe. Koeficient chromatickej disperzie je potom vypočítaný pomocou zmeraného oneskorenia spôsobeného rôznymi rýchlosťami šírenia jednotlivých vlnových dĺžok. Oneskorenie medzi impulzami je merané v časovej oblasti. Je možné merať na jednej určitej vlnovej dĺžke aj na oblasti vlnových dĺžok. Časové intervaly medzi vysielanými pulzami určujú aj maximálne oneskorenie ktoré je možné zmerať. V prípade, že by bolo zmerané oneskorenie impulzu väčšie ako časový interval medzi impulzami, dôjde k zámene impulzov a meranie by bolo chybné. Výhodou tejto metódy je, že referenčné vlákno nie je potrebné. Jedná sa o veľmi rýchlu metódu, s dĺžkou merania jedného vlákna len niekoľkých sekúnd. Presnosť merania závisí na určení rozstupov



medzi impulzami ale taktiež treba mysliet na to, že vplyvom chromatickej disperzie sa jednotlivé impulzy od seba nie len vzdiaľujú ale aj roztahujú. Toto roztahovanie môže spôsobiť problémy pri určovaní časovej polohy daného pulzu a teda aj jeho odstupu od druhého pulzu [3, 4, 15, 16, 17, 19].

## 4 Polarizačná vidová disperzia

### 4.1 Polarizácia

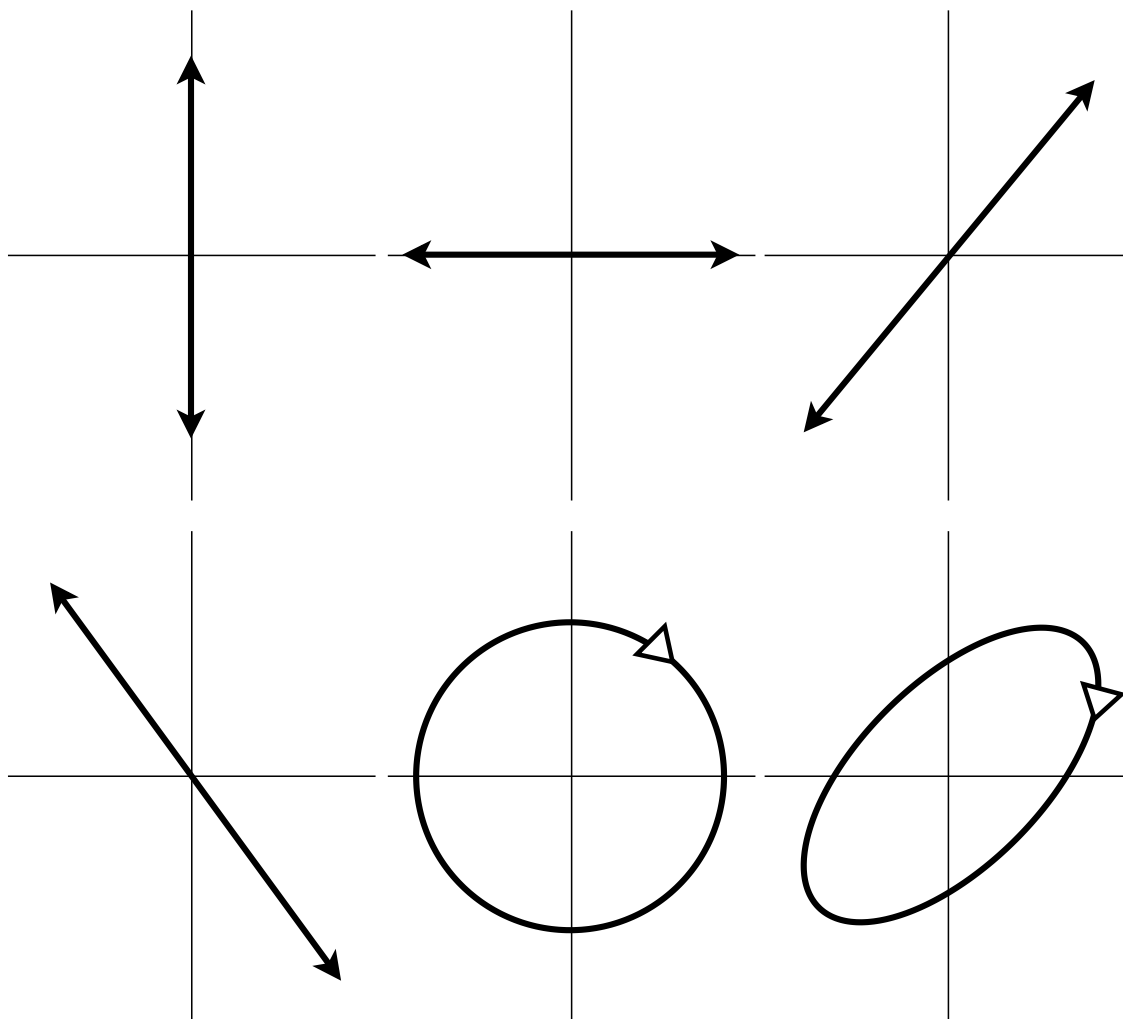
Vektory magnetického a elektrického poľa rovinatej elektromagnetickej vlny ležia v rovine kolmej na smer propagácie tejto vlny. V prípade, že elektrické pole sa mení náhodne hovoríme, že je vlna nepolarizovaná. Kdežto ak sa elektrické pole mení spôsobom ktorý sa opakuje alebo sa dá predpovedať, hovoríme že je vlna polarizovaná. Podľa toho ako sa mení elektrické pole vlny sa určujú polarizačné stavy (SOP) vlny. Rozlišujeme lineárnu, kruhovú alebo eliptickú polarizáciu. Pričom lineárne stavy môžu byť horizontálne, vertikálne alebo natočené pod  $45^\circ$ . Podobne, kruhové a eliptické stavy môžu byť ľavo- alebo pravotočivé, kde pri eliptických sa uvádza aj sklon elipsy. Polarizácia je teda *smer* v ktorom vlna osciluje. Svetlo je možné polarizovať anizotropnými kryštálmi s dvojlomom, polarizačnými filtermi alebo odrazom pod Brewsterovým uhlom [10, 23, 26].

### 4.2 PMD

Jednovidové vlákna aj napriek ich názvu prenášajú dva vidy naraz. Tieto vidy sú ortogonálne polarizované. V ideálnom vlákne by sa šírili rovnakou fázovou rýchlosťou. V skutočnosti ale žiadne vlákno nie je dokonalo kruhovo symetrické, to spôsobuje, že sa tieto dva vidy pohybujú *rôznymi* fázami a skupinovými rýchlosťami. Na vlákno taktiež pôsobí množstvo vonkajších vplyvov ako skrut, ohyb a anizotropický stres. Tieto vonkajšie vplyvy vyvolávajú vo vlákne *dvojlom*. Dvojlom vyvoláva zmeny polarizačného stavu. Vo vláknových prenosoch je potrebné aby polarizačný stav ostal čo najstabilnejší. Taktiež, tým že vidy ktoré sa vo vlákne prenášajú majú rôzne skupinové rýchlosti, tak na detektor dorazia v rôznych časoch. Tejto problematike sa hovorí *Polarizačná vidová disperzia*. Prejavuje sa najmä pri dlhších trasách a obmedzuje prenosové schopnosti komunikačných systémov do značnej miery. PMD je náhodného charakteru, preto je ťažké ju efektívne kompenzovať. Je náhodná práve kvôli intrinzičným (napr. stresové prvky, nehomogenity, geometrickosť jadra) aj extrinzičným vplyvom ( zaobchádzanie s vláknom počas prenosu, hádzanie, skrut, ohyb). Tieto vplyvy spôsobujú rozdielnosť skupinových rýchlostí vidov [1, 2, 7, 14, 21, 25, 26]. PMD vo frekvenčnej doméne sa prejavuje ako rozdiel fázových rýchlostí, zapísať sa dá ako:

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

Tento rozdiel je aj frekvenčne závislý, to znamená, že polarizačný stav na vstupe sa na výstupe zmení podľa frekvencie  $\omega$ .



Obr. 4.1: Znázornenie polarizačných stavov [14]

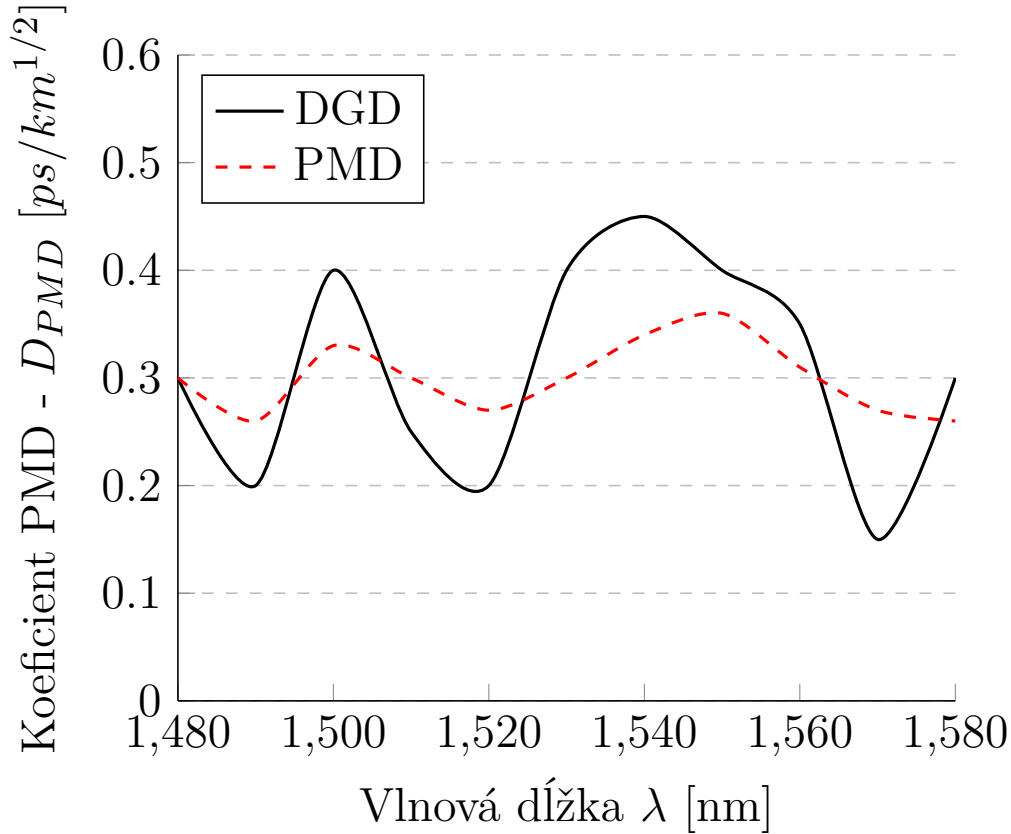
### 4.3 DGD

Diferenciálne skupinové oneskorenie (DGD), je parameter ktorý vyjadruje časový rozdiel medzi polarizačnými vidmi. Tento časový rozdiel spôsobuje rozširovanie pulzov v digitálnych systémoch a rušenie v analógových systémoch. Hodnota DGD sa mení náhodne v čase aj v celej dĺžke vlákna, čož vysvetľuje PMD závislosť na čase aj vlnovej dĺžke. V určitom čase sa hodnota DGD mení náhodne s vlnovou dĺžkou. Hodnota PMD je potom priemerná hodnota DGD hodnôt. Hodnotu DGD dokáže ovplyvniť aj zaobchádzanie s vláknom a teplota, pretože dochádza k zmene dvojlomu. Pre dlhé optické vlákna platí, že hodnoty DGD nadobúdajú obzvlášť náhodného charakteru v závislosti na vlnovej dĺžke alebo teplote [3, 4, 7]. Pre tieto vlákna sa dá uplatniť Maxwellové pravdepodobnostné rozloženie hodnôt DGD, po-

písané funkciou hustoty pravdepodobnosti:

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

kde  $\alpha = \sqrt{\frac{\pi}{8}}$  je úmerné priemernej hodnote DGD. Toto Maxwellovské rozdelenie ale nemusí platiť ak sa vo vlákne vyskytujú miesta s mimoriadne zvýšeným dvojlomom (vzhľadom na celkový dvojlom vlákna) [3, 4, 7].



Obr. 4.2: DGD závislosť na vlnovej dĺžke

## 4.4 Koeficient PMD

Veľmi dôležitým parametrom je koeficient PMD, ktorý udáva ako sa hodnota PMD mení dĺžkou vlákna. Je rozdielne definovaný pre dlhé a krátke vlákna. Taktiež sa dá vysvetliť ako hodnota popisujúca Maxwellovské rozloženie hodnôt DGD daného vlákna.

## Vidová väzba

Dvojlom je v dnešnej dobe adresovaný už pri výrobe vlákien. Aj napriek snahe dosahovať minimálny dvojlom vo vlákne, hodnota dvojlomu v moderných vláknach je stále nezanedbateľná. Špeciálne vlákna zachovávajúce polarizáciu majú dvojlomnosť nemennú a teda aj hodnoty DGD jednotné v celej dĺžke. To ale nie je prípad konvenčných vlákien kde je dvojlom premenlivý a teda aj hodnota DGD je na rôznych miestach vo vlákne rôzna. Premennivý dvojlom spôsobujú najmä mikroohyby, makroohyby a skrut vlákna. Takéto vlákno možno potom modelovať ako súbor veľmi krátkych dvojlomných vlákien, ktoré majú svoju rýchlu a pomalú os náhodne orientovanú [4, 7, 8].

## PMD v krátkych vláknach

V krátkych vláknach je možné považovať hodnotu dvojlomu za konštatnú, to isté platí aj pre jeho smer. To spôsobuje slabú väzbu medzi vidmi (mode coupling), takže výkon naviazaný v jednom vide sa ani čiastočne neviaže do druhého vidu. Vďaka tejto skutočnosti je DGD málo závislé alebo úplne nezávislé na vlnovej dĺžke [4, 26]. Koeficient PMD je v tomto prípade definovaný ako:

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{L} \quad [ps/km] \quad (4.3)$$

kde

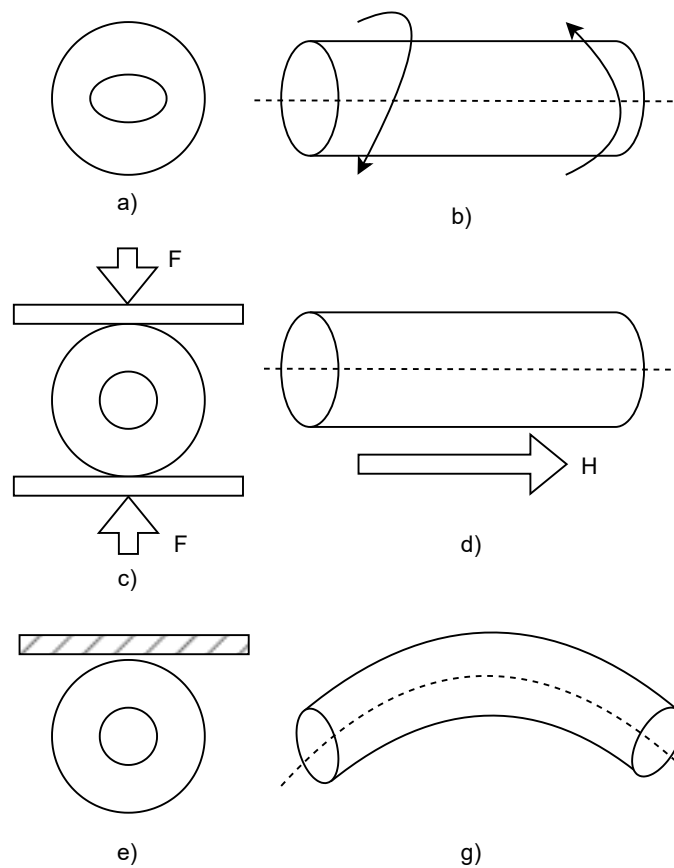
- $L$  je dĺžka trasy,
- $\Delta\tau$  je skupinové oneskorenie signálu vo vlákne.

Pre polarizáciu v krátkych vláknach platí, že nadobúda postupne všetky polarizačné stavy za sebou a pravidelne, hovoríme že sa nevyskytuje polarizačná nepravidelnosť.

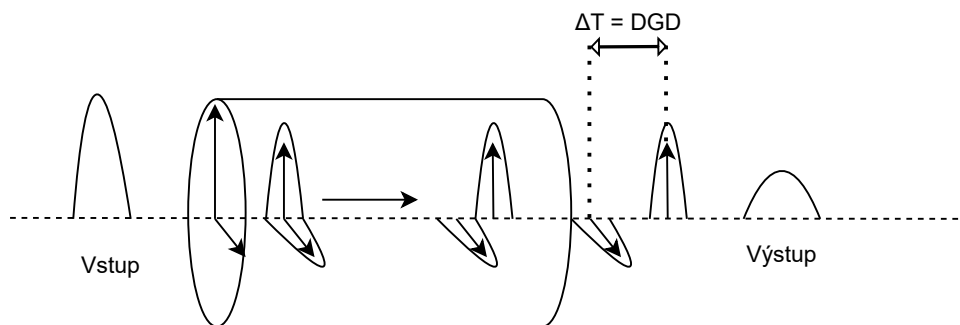
## PMD v dlhých vláknach

Pretože na dlhé vlákna, v porovnaní s krátkymi vláknami, pôsobí zvyčajne väčšie množstvo vnútorného stresu, ohybov, skrutov a teplotných zmien, dochádza k výrazným zmenám dvojlomu vlákna. Mení sa jeho veľkosť aj smer. Dvojlom už potom nie je aditívny a podobné model aký bol uplatnený pri krátkych vláknach už nemožno použiť. Hodnota PMD sa už nemení lineárne s dĺžkou vlákna. Mení sa s druhou odmocninou dĺžky vlákna. Polarizačné stavy už nenasledujú postupne za sebou a pravidelne ako tomu je pri krátkych vláknach [4, 26]. PMD koeficient pre dlhé vlákna je definovaný ako:

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad [ps/\sqrt{km}] \quad (4.4)$$



Obr. 4.3: Faktory generujúce víťorný stres a) elipticita jadra, b) skrut, c) postranné pnutie, d) osovú magnetické pole, e) kovová vrstva, f) ohyb [26]



Obr. 4.4: Rozširovanie pulzov vplyvom PMD [26]

## 5 Spôsoby merania PMD

Meranie PMD je zložitú kvôli niekoľkým faktorom, medzi ktoré patrí hlavne štatistická povaha tohto javu a citlivosť na okolité podmienky ako sú teplota a zaobchádzanie s vláknom. Znalosť hodnoty PMD pre dané vlákno je potrebná ak chceme vytvoriť efektívny optovláknový prenos, obzvlášť pre rýchlosti  $\geq 10$  Gbit/s, pričom PMD je možné pozorovať už pri rýchlosti 2,5 Gbit/s. Je to hlavne kvôli štatistickej povahe tohto javu, že potreba opakovaných meraní je nevyhnutná. Vhodné sú aj dlhodobé merania práve kvôli analýze premenlivosti PMD [4, 5, 6, 14]. Typickými situáciami kedy sa uskutočňuje meranie PMD je pri:

- modernizácii alebo zmene v použitých komponentoch na už existujúcej trase pri zvyšovaní prenosovej rýchlosti
- nasadzovaní kompletne novej vysokorýchlostnej trasy
- pri výrobe vlákna
- pri/po inštalácii vlákna do trasy

PMD je možné merať meracími metódami:

- Skenovaním vlnovej dĺžky (s fixným analyzárom),
- Polarimetrickou metódou,
- Metóda POTDR,
- Interferometrickými metódami,
  - TINTY - tradičná interferometrická metóda,
  - GINTY - všeobecná interferometrická metóda.

V tabuľke 5.1 sú vypísané limitné hodnoty pre optické vlákna podľa štandardu ITU-T.

Tab. 5.1: Tabuľka limitných hodnôt PMD podľa ITU-T [4]

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	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$

## 5.1 Metóda skenovaním vlnovej dĺžky (s fixným analyzérrom)

Jedná sa o v celku jednoduché meranie vhodné na laboratórne merania. PMD sa zobrazuje vo frekvenčnej doméne. Všeobecné zapojenie tejto meracej metódy je na obr. 5.1. Pozostáva zo zdroja optického žiarenia, polarizéru, testovaného vlákna, ďalšieho polarizéru ktorý je využitý ako analyzér a optického spektrálneho analyzátoru. Ako zdroj môže byť použitý širokopásmový zdroj alebo laditeľný laser. Zapojenie s laditeľným laserom je považované za pomalšie vzhľadom na potrebu opakovaného ladenia vlnovej dĺžky lasera. Do zapojenia je vhodné implementovať aj polarizačný kontrolér ktorý by slúžil na zmenu polarizácie a ovplyvňovanie kolísania výkonu. Najmenšia merateľná hodnota PMD závisí na rozsahu vlnových dĺžok zdroja. Najväčšia merateľná hodnota závisí na rozlíšení optického spektrálneho analyzátoru. Pomocou extrémov na zobrazenej závislosti je možné dopočítať hodnotu DGD, pomocou nej následne aj koeficient PMD. Zapojenie so širokopásmovým zdrojom optického žiarenia je na obr. 5.2 a zapojenie s laditeľným laserom je na obr. 5.3. Pri meraní sa pozoruje kolísanie optického výkonu v závislosti na vlnovej dĺžke. Signál prenášaný vláknom mení náhodne svoj polarizačný stav, to spôsobí zmeny výkonu na náhodných vlnových dĺžkach [4, 5, 14, 29]. Hodnota PMD (DGD) je potom určená ako:

$$\Delta\tau = \frac{k \cdot \pi \cdot N}{\Delta\omega} \quad (5.1)$$

kde

- $k$  je väzobná konštanta vidov,  $k = 0,82$  (pre dlhé vlákna),  $k = 1$  (pre dlhé vlákna)
- $N$  je počet extrémov
- $\Delta\omega$  je frekvenčný rozsah

Hodnotu DGD je možné vypočítať aj použitím rýchlej Fourierovej transformácie (FFT), kde sa namerané spektrum transformuje do časovej domény a následne preloží Gaussovou funkciou. Pri použití FFT je veľkou výhodou grafické zobrazenie medzividových väzieb a možnosť filtrovať vysokofrekvenčné zložky, ktoré by pri postupe s výpočtom mohli byť považované za extrémny a tak ovplyvniť správnosť výslednej hodnoty. Ďalšími výhodami sú:

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

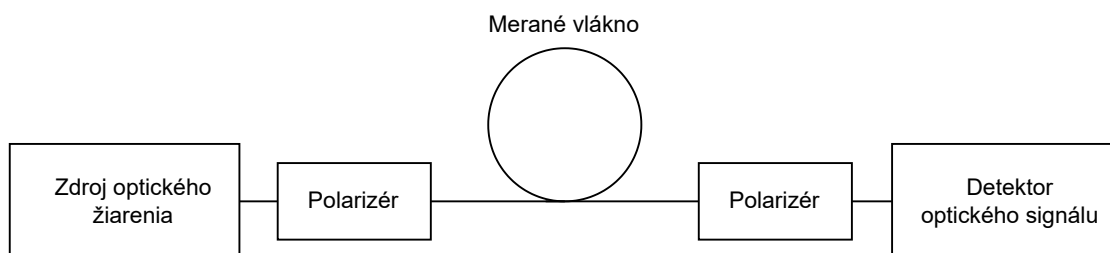
Nevýhodami tejto meracej metódy sú:

---

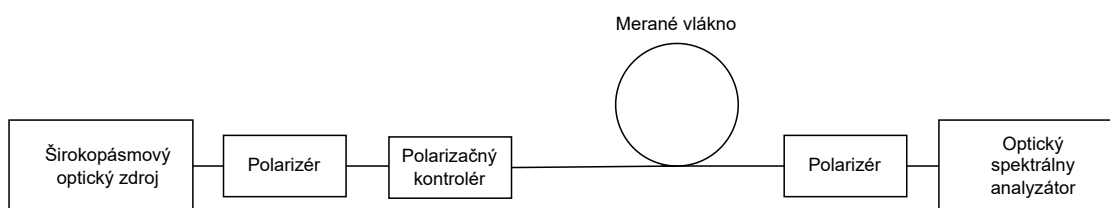
<sup>1</sup>Erbium Doped Fibre Amplifier



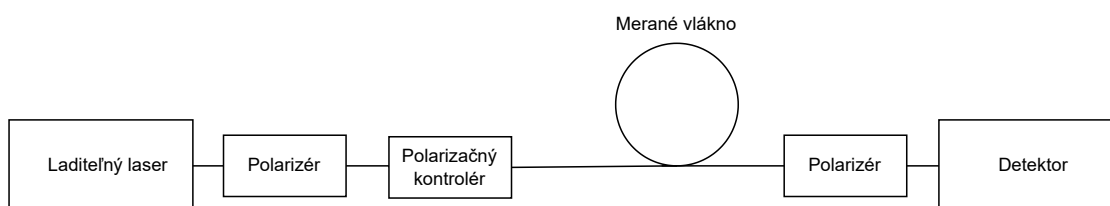
- náchylnosť vlákna na manuálnu manipuláciu a vibrácie
  - potreba vykonať viacero meracích krokov,
  - limit pri meraní vyšších hodnôt PMD,
  - citlivosť na vstupnú polarizáciu,
  - nemožnosť merať PMD druhého rádu priamo, je možné ale hodnotu vypočítať.
- Táto metóda s postupom podľa výpočtu je využitá aj v praktickej časti tejto práce.



Obr. 5.1: Všobecné zapojenie metódy s fixným analyzéróm [29]



Obr. 5.2: Zapojenie metódy s fixným analyzéróm so širokopásmovým zdrojom [29]



Obr. 5.3: Zapojenie metódy s fixným analyzéróm s laditeľným laserom [29]

## 5.2 Polarimetrická metóda

Taktiež nazývana aj ako metóda analýzy Jonesovej matice. Je jedna z najpresnejších a najpoužívanějších meracích metód. Je štandardizovaná podľa ITU-T G.650.2, IEC 60793-1-48 a TIA (FOTP)-122A. Určuje sa zmena polarizačného stavu na výstupe vlákna v závislosti na vlnovej dĺžke. Túto zmenu je potom možné charakterizovať

pomocou Eigenovej analýzy Jonesovej matice, alebo rotáciou vektora polarizačného stavu na Poincarého guli. Je možné merať na dlhých aj krátkych vláknach. Kompletná PMD charakteristika je obsiahnutá stanovením optimálnej frekvenčnej závislosti polarizácie disperzného vektora. Hodnota DGD je daná veľkosťou tohto vektora a orientácia tohto vektora určuje hlavný stav polarizácie meraného vlákna. Meranie prebieha tak, že laditeľným laserom sa postupne vysiela žiarenie na rôznych vlnových dĺžkach, polarizačným kontrolérom sa nastaví polarizačné filtre ktoré vyprodukujú tri rôzne polarizačné stavy pre jednotlivé vlnové dĺžky. Polarizácie na polarizačných filtroch sú lineárne polarizácie ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  alebo  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ). Polarizačné stavy vystupujúce z vlákna potom analyzuje polarimeter [4, 5]. Výhody tejto metódy sú [5]:

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

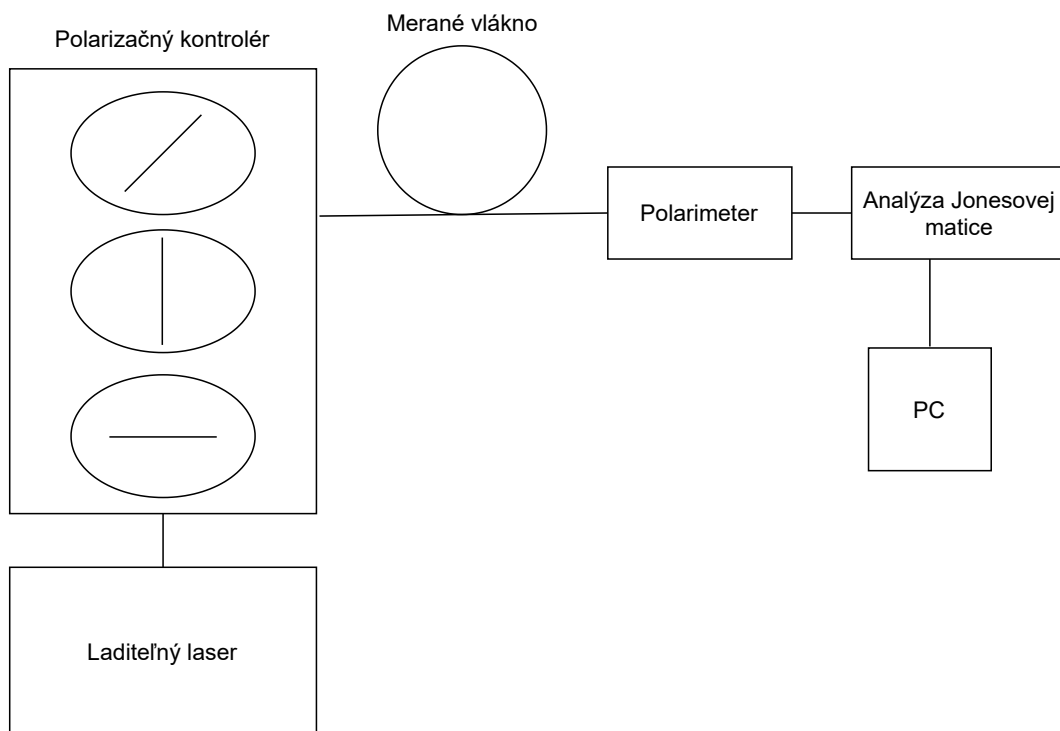
Nevýhody tejto metódy sú:

- drahé meracie komponenty,
- časovo aj technologicky náročné systémy,
- nutnosť vyhodnocovania každej vlnovej dĺžky samostatne,
- vhodné iba pre laboratórne merania,
- náchylné na kolísanie teploty
- náchylné na vibrácie vlákna
- možnosť merania PMD **maximálne** do 50 ps

Táto metóda sa používa na meranie PMD hlavne v laboratóriách na optických komponentoch alebo na premeriavanie PMD pri výrobe vlákna.

### 5.3 Metóda POTDR

Ide o meranie hodnoty PMD v určitom úseku optickej trasy pomocou optickej reflektometrie. Pomocou tejto metódy je zisťovanie problémových úsekov z pohľadu PMD veľmi jednoduché. Stačí pár kilometrový úsek optického vlákna so zvýšeným PMD, v pomerne dlhej optickej trase, na to aby nasadenie tejto trasy bolo z pohľadu vysokorýchlostných systémov nedostačujúce na prevádzku. Po premeraní trasy touto metódou je potom oprava, výmena komponentov alebo výmena vlákna jednoduchá pretože vieme celkom presne určiť na ktorom úseku sa nepriaznivé PMD hodnoty kumulujú. Funguje na princípe merania spätného rozptylu ako klasická metóda OTDR. Do optickej trasy na vyšle niekoľko impulzov, na konci vlákna sa žiarenie rozptýli a odrazí späť. Zo spätne rozptýleného žiarenia sa vyčítajú informácie



Obr. 5.4: Bloková schéma polarimetrickej metódy [4]

o hodnote PMD na jednotlivých úsekoch trasy. Meranie hodnoty PMD teda nie je priame, vyhodnocuje sa pomocou vzťahu:

$$PMD \approx \beta \cdot \sqrt{L \cdot h} \quad (5.2)$$

kde

- $\beta$  [ps/km] je veľkosť dvojlomu vo vlákne,
- $L$  je dĺžka vlákna,
- $h$  je väzobná dĺžka (charakterizuje väzby medzi polarizačnými vidmi).

Parameter  $h$  je dĺžka vlákna po ktorej sa osy dvojlomu zmenia a to spôsobí aj výraznú výmenu energie medzi polarizačnými vidmi. Hodnoty PMD rastú ak sa zväčšuje dvojlom vo vlákne, dĺžka vlákna a väzobná dĺžka. Pri tejto metóde sa analyzuje PMD pozdĺžne, teda získavame informácie o lokálnom dvojlome a väzobnej dĺžke postupne z každého miesta meraného vlákna. Na správne fungovanie metódy je potrebné do vlákna vysielat ešte polarizované signály. Využitím POTDR môžeme získať vyššie spomínané parametre dvoma spôsobmi – DOP<sup>2</sup> alebo SOP<sup>3</sup>. Tieto metódy sa líšia v tom ako jednotlivé parametry získavajú [4, 31].

<sup>2</sup>Degree of Polarization

<sup>3</sup>State of Polarization

### 5.3.1 Metóda DOP

Táto metóda sleduje zmeny stupňa polarizácie. Platí:

- impulz celý zhodne polarizovaný,  $DOP = 1$ ,
- impulz celý zhodne depolarizovaný,  $DOP = 0$ ,
- spätne rozptýlené žiarenie depolarizovaného impulzu,  $DOP = 1/3$ .

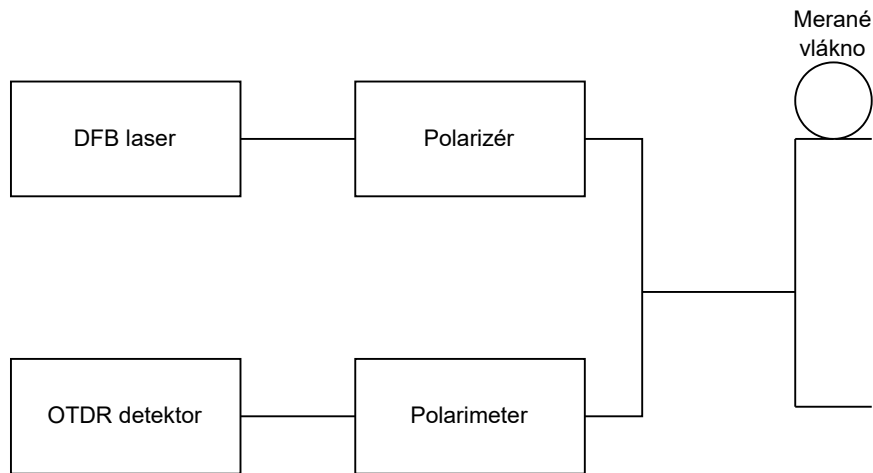
Táto metóda nie je exaktná, je to skôr doplnková meracia metóda k meracím metódam ktoré dokážu určiť presnú celkovú hodnotu PMD. Túto metódu je potom možné využiť na lokalizovanie miesta v trase kde sa PMD akumuluje. Touto metódou je možné merať na trasách dlhých desiatky kilometrov s dĺžkovou rozlišovacou schopnosťou rádovou v stovkách metrov. Zdroj žiarenia pri tejto metóde je DFB laser, pretože je veľmi úzkospektrálny, je to hlavne z toho dôvodu, aby nedošlo k depolarizácii signálu vplyvom šírenia na viacerých vlnových dĺžkach. Prostredníctvom dvojlomu by na rôznych vlnových dĺžkach signál dosahoval rôznych polarizačných stavov a teda by došlo k depolarizácii celkového signálu. Z laseru teda vychádza úzkospektrálne žiarenie ktoré je ešte polarizované polarizátorom a následne naviazané do meraného vlákna. Spätne rozptýlené žiarenie je potom analyzované polarimetrom a OTDR detektorom. Hodnota DOP potom závisí na kombinácii dvojlomu vlákna a väzobnej dĺžke.

- slabý dvojlom – malá hodnota parametru  $\beta$ , celková hodnota DOP je potom blízka 1, v tomto prípade na vidovej väzbe nezáleží, jedná sa o vlákna s veľmi nízkou celkovou hodnotou PMD,
- silný dvojlom, silná vidová väzba – veľká hodnota parametru  $\beta$  a krátka väzobná dĺžka  $h$ , DOP je potom malý ( $\approx 1/3$ ) a mení sa rýchlo kvôli silnej medzi vidovej väzbe, jedná sa o vlákna so strednou hodnotou PMD,
- silný dvojlom, slabá vidová väzba – veľká hodnota parametru  $\beta$  a dlhá väzobná dĺžka  $h$ , DOP nadobúda malých aj veľkých hodnôt ale mení sa pomaly, jedná sa o vlákna s vysokou hodnotou PMD.

Vzhľadom na to že DOP sa môže meniť pomerne rýchlo je vhodné sledovať strednú hodnotu (napr. z niekoľkých desiatok námerov). Prístroj taktiež vykonáva každé meranie pre dva stavy vstupnej polarizácie, tým získame DOP a  $DOP_c$  (doplnkové). Celková hodnota DOP je potom  $DOP_{geo}$ .

$$DOP_{geo} = \sqrt{DOP^2 + DOP_c^2} \quad (5.3)$$

Vyššie spomínané hodnoty PMD – malá, stredná a vysoká – sú určené limitnými medzami meracieho prístroja [31].



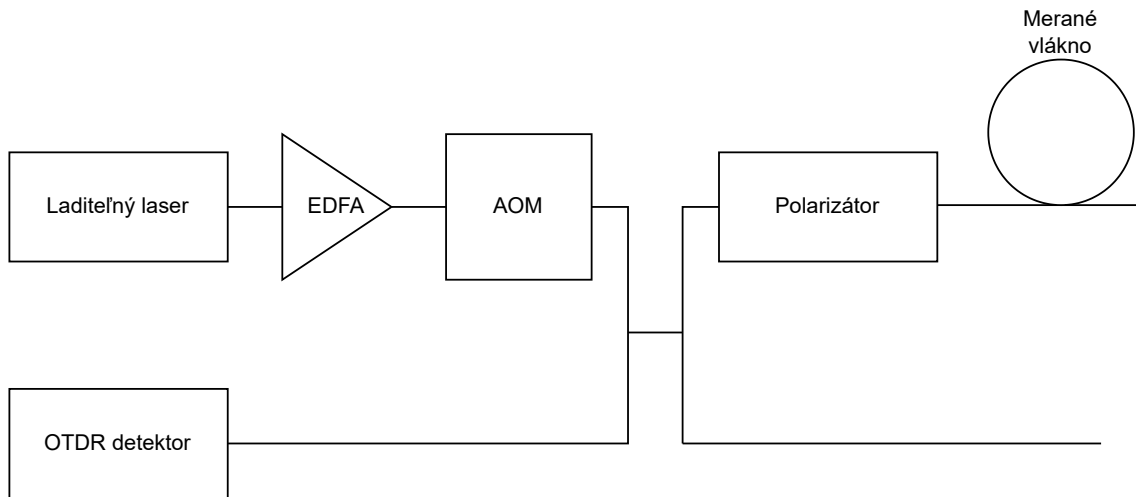
Obr. 5.5: Bloková schéma metódy DOP [4]

### 5.3.2 Metóda SOP

Táto metóda sleduje zmeny stavu polarizácie. Polarizácia signálu sa pri prenose mení vplyvom dvojlomu a vidovej väzby, tieto zmeny sú pozorované na spätne rozptýlenom žiarení. Rýchlosť ktorou sa polarizačné stavy menia je úmerná veľkosti dvojlomu vlákna a "charakter" zmeny závisí na vidovej väzbe, teda väzobnej dĺžke. Pomocou spektrálnej závislosti zmien polarizačných stavov na jednotlivých miestach na trase a vysielaním žiarenia zo zdroja na rôznych vlnových dĺžkach dostaneme celkom dobrú predstavu o veľkosti PMD. Pomocou laditeľného lasera s malou spektrálnou šírkou je možné vysielat žiarenia na rôznych vlnových dĺžkach, toto žiarenie je potom zosilnené vláknovým EDFA zosilňovačom a modulované akusticko-optickým modulátorom AOM, tým dostaneme meracie impulzy ktoré sú následne polarizované a naviazané do meraného vlákna. Rozptýlené žiarenie je pri spätnom prenose znovu polarizované a privedené na OTDR detektor. Meraním spektrálnej závislosti výkonu spätne rozptýleného žiarenia so zaradeným polarizérom sledujeme vlastne spektrálnu závislosť zmien polarizačných stavov na jednotlivých úsekoch trasy. Nevýhodou tejto metódy je potreba užívať len veľmi krátke meracie impulzy (kvôli depolarizácii), čož značne obmedzuje dĺžku meraných vlákien. Práve kvôli tomu je zdrojový signál zosilňovaný, aj napriek tomu je táto metóda nevhodná na meranie na dlhých trasách. Je vhodné ju použiť na trasy o dĺžke jednotiek kilometrov kde sú nasadené vlákna s malou hodnotou PMD ( $\leq 0,7ps/\sqrt{km}$ ) [4, 31].

## 5.4 TINTY

Interferometrická metóda pre meranie PMD je najčastejšie používaná, tradičná interferometrická metóda sa nazýva TINTY (Traditional INTY). Najčastejšou je



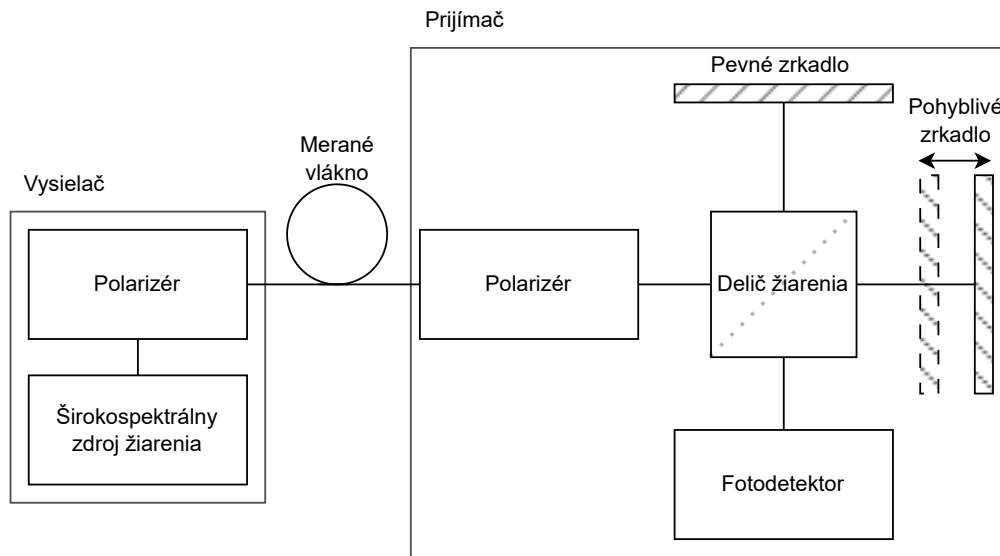
Obr. 5.6: Bloková schéma metódy SOP [4]

preto, lebo je rýchla, relatívne jednoduchá a taktiež vhodná na meranie v teréne. Princíp merania spočíva v interferencii nízko koherentného optického žiarenia. Ako zdroj optického žiarenia sa v tejto metóde používa širokospektrálny zdroj (napr. LED dióda). Žiarenie zo zdroja je polarizované polarizérom a naviazané do meraného vlákna. Po prechode cez vlákno je žiarenie znovu polarizované na vstupe PMD analyzátoru a privedené na interferometer (najačastejšie Michelsonov interferometer). V interferometri je polarizované žiarenie rozdelené do dvoch ramien, kde na jednom ramene je uchytené pohyblivé zrkadlo a na druhom nepohyblivé. Žiarenia sa od zrkadiel odrážajú a na detektore je možné pozorovať interferenciu týchto žiarení. Tým, že jedno zrkadlo je pohyblivé vieme meniť vzájomný časový posun medzi signálmi, postupným posúvaním zrkadla dostávame celkový interferogram, z ktorého vieme určiť oneskorenie spôsobené vplyvom PMD. Vďaka širokospektrálnemu zdroju dokážeme priamo určiť hodnotu PMD celej trasy ako strednú hodnotu oneskorenia získaného z interferogramu. Pri tejto metóde sa interferogram preloží Gaussovou krivkou, oneskorenie je potom úmerné smerodatnej odchýlke krivky [4, 5, 6, 31]:

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot \sigma \quad (5.4)$$

kde  $\sigma$  je smerodajná odchýlka. Na interferograme sa zobrazuje korelačná funkcia dvoch ortogonálnych polarizačných rovín. Na krivke tejto funkcie sú malé špičky spôsobované silnou vidovou väzbou a hlavná špička je spôsobovaná autokorelačnou funkciou meracieho signálu, táto špička závisí na tvare spektra. Vzniká v momente kedy sú dĺžky ramien rovnaké. Metóda TINTY nie je veľmi vhodná na meranie PMD na trasách s EDFA zosilňovačmi, pretože sú to prvky spektrálne závislé, meranie na takýchto trasách je možné, ale iba v prípade že sa každý zosilňovací úsek premeria samostatne a celková hodnota PMD sa spočíta. Hlavná špička autokorelačnej funkcie

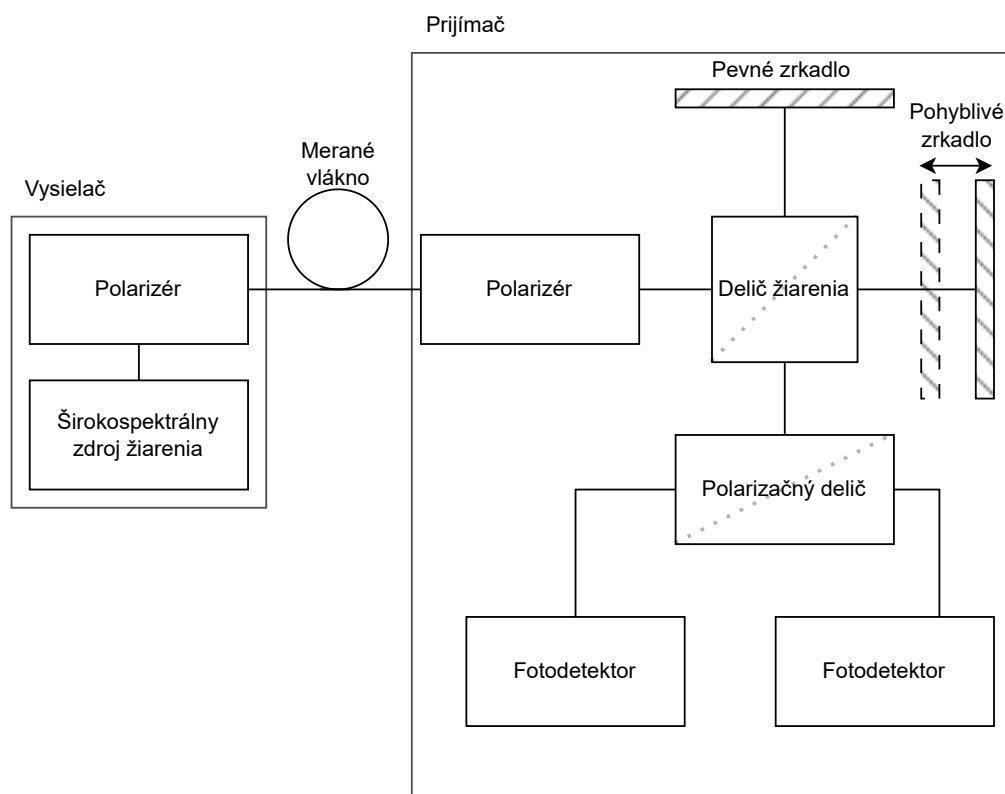
taktiež znižuje presnosť merania, to sa prejavuje hlavne pri malých hodnotách PMD, kde chyba môže byť desiatky percent [4, 6, 31].



Obr. 5.7: Bloková schéma metódy TINTY [4]

## 5.5 GINTY

Rozdiel oproti TINTY je ten, že žiarenie z ramien je ešte rozdelené polarizačným deličom na dve navzájom ortogonálne polarizované zložky. Tieto zložky sú potom detekované na samostatne ja vlastnom detektore kde dôjde k interferencii. Takto obidva detektory budú mať vlastný interferogram s korelačnou zložkou. Tieto korelačné zložky je možné od seba oddeliť matematickými operáciami z jednotlivých interferogramov. Sčítaním interferogramov sa zobrazí autokorelácia a odčítaním zase vzájomná korelácia. Touto metódou je možné odstrániť autokorelačnú špičku výsledného interferogramu. Umožňuje teda získať hodnotu PMD zo vzájomnej korelačnej funkcie a odstraňuje potrebu prekladania interferogramu Gaussovou krivkou. Pri malých hodnotách PMD sa autokorelácia meracieho signálu uplatňuje aj vo vzájomnej korelačnej funkcii. Je to z toho dôvodu, že signály z ortogonálnych polarizačných vidov sú takmer zhodné, a teda vzájomná korelácia je ako keby autokoreláciou. Výsledná hodnota PMD sa upresňuje tým, že od RMS hodnoty vzájomnej korelácie sa odpočíta RMS hodnota autokorelácie [4, 5, 6, 31].



Obr. 5.8: Bloková schéma metódy GINTY [4]



## 6 Vidová disperzia

Táto disperzia sa vyskytuje v mnohovidových vláknach (850–1300 nm). Je spôsobovaná tým, že jednotlivé vidy ktoré su do vlákna viazané sa viažu pod rôznymi uhlami. Kvôli tomu sa jednotlivé vidy pri prenose taktiež odrážajú na rozhraní jadro-plášť pod iným uhlom. Dôsledkom toho je že vidy aj keď boli v rovnaký moment do vlákna naviazané, na detektor optického žiarenia dorazia v rôznych časoch. Platí, že čím vyšší vid, tým dlhšiu má prenosovú dráhu a taktiež platí, že čím viac vidov sa do vlákna viaže, tým viac sa táto disperzia prejavuje. Táto disperzia vzniká aj v prípade že zdroj optického žiarenia vysiela žiarenie so šírkou pásma blízkej nule [6]. Vidy v mnohovidových vláknach, ktoré tvoria svetelný impulz sa prenášajú rôznymi skupinovými rýchlosťami. A teda na prijímacej strane záleží šírka prijatého pulzu na najrýchlejšom ale aj na najpomalšom vide. Takto dochádza k roširovaniu impulzu na prijímacej strane. Tento disperzný mechanizmus tvorí fundamentálny rozdiel v celkovej disperzii pre vlákna zobrazené na obr. 1.6 [25]. Z definície disperzie plynie že túto disperziu vykazuje hlavne mnohovidové vlákno so skokovým indexom lomu, kde je roširovanie impulzov najviac viditeľné. Túto disperziu je možné do určitej miery redukovať zavedením vhodným profilom indexu lomu vlákna ako je napríklad na vlákne s gradientným indexom lomu, kde je profil parabolického tvaru. Roširovanie impulzov je vo vláknach s gradientným index lomu približne 100-krát menšie. Vďaka tomu majú tieto vlákna v mnohovidových prenosoch oveľa väčšiu šírku pásma ako vlákna so skokovou zmenou indexu lomu. V prípade že je prenos čisto jednovidový k vidovej disperzii nedochádza. Táto disperzie je jedným z hlavných faktorov ktoré obmedzujú prenosovú rýchlosť pri využití mnohovidových vlákien [24]. Matematicky sa táto disperzia dá popísať indexami lomu a dĺžkou vlákna [4]. Pre vlákno so skokovou zmenou indexu lomu:

$$\tau_{SI} \cong \frac{n_1 \cdot L}{c} \cdot \Delta n \approx \frac{L}{2 \cdot n_1 \cdot c} \cdot (NA)^2 \quad [ns/km] \quad (6.1)$$

Pre vlákno s gradientným indexom lomu:

$$\tau_{GI} \cong \frac{n_2 \cdot L}{2 \cdot c} \cdot \Delta n^2 \approx \frac{L}{8 \cdot n_1^3 \cdot c} \cdot (NA)^4 \quad [ns/km] \quad (6.2)$$

kde

- $\tau_{SI}$  je skupinové oneskorenie pre vlákno so skokovou zmenou indexu lomu,
- $n_1$  je index lomu jadra vlákna,
- $L$  je dĺžka vlákna,
- $c$  je rýchlosť svetla,
- $\Delta n$  je rozdiel indexu lomu jadra a plášťa,
- $NA$  je numerická apertúra

- $\tau_{GI}$  je skupinové oneskorenie pre vlákno s gradientným indexom lomu
- $n_2$  je index lomu plášťa.

Pričom pre kremíkové vlákna platí, že  $\Delta n \ll 1$ , takže  $n_1$  je blízke  $n_2$ . Podľa týchto rovníc je pre vlákno so skokovou zmenou indexu lomu s parametrami:

- $n_1 = 1,465$
- $\Delta n = 0,01$ ,  $n_2 = 1,45$
- $L = 1$  km
- $\tau_{SI} = 50$  ns/km.

Pre vlákno s gradientným indexom lomu a s tými istými parametrami je hodnota  $\tau_{GI} = 0,25$  ns/km.

## 7 Návrhy zapojení pre meranie disperzií

### 7.1 Návrh zapojenia pre PMD metódou s fixným analyzátorom

Táto meracia metóda je šandarizovaná podľa ITU-T G.650.2 alebo IEC60793-1-48. Taktiež nazývaná ako Metóda skenovania vlnovej dĺžky. Princíp merania spočíva v meraní závislosti optického výkonu na vlnovej dĺžke. Polarizačná vidová disperzia sa mení s vlnovou dĺžkou. Takže polarizované žiarenie na vstupe do vlákna bude prechodom cez merané vlákno náhodne meniť svoje polarizačné stavy. Tým sa náhodne mení aj optický výkon na jednotlivých vlnových dĺžkach. Na výstupe vlákna teda dostaneme depolarizované žiarenie. Hodnota DGD pre zobrazenú oblasť vlnových dĺžok na spektrálnom analyzátoze (OSA) sa dá určiť ako:

$$\Delta\tau = \frac{k \cdot N \cdot \lambda_{start} \cdot \lambda_{stop}}{2 \cdot c \cdot (\lambda_{stop} - \lambda_{start})} \quad [ps] \quad (7.1)$$

kde

- $k$  je väzobná konštanta vidov,  $k = 0,82$  (pre dlhé vlákna),  $k = 1$  (pre dlhé vlákna)
- $N$  je počet extrémov (miním a maxím) závislosti zobrazenej na OSA
- $\lambda_{start}$  a  $\lambda_{stop}$  sú hraničné vlnové dĺžky zobrazené na OSA
- $c$  je rýchlosť svetla

Po získaní hodnoty DGD je možné vypočítať ako sa hodnota PMD bude vo vlákne meniť podľa dĺžky. Koefficient PMD pre krátke vlákna sa vypočíta ako:

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{L} \quad [ps/km] \quad (7.2)$$

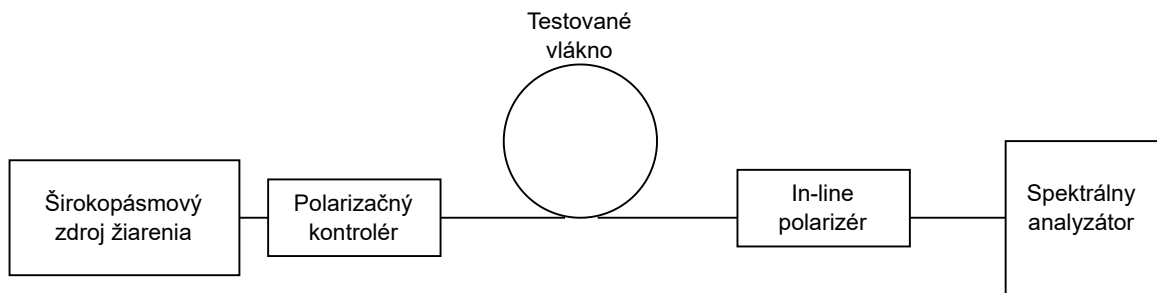
kdežto koefficient PMD pre dlhé vlákna sa vypočíta ako:

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad [ps/\sqrt{km}] \quad (7.3)$$

kde  $L$  je dĺžka vlákna v kilometroch. Zobrazenie zapojenia meracej metódy a použité komponenty a prístroje sú zobrazené na obr 7.1.

#### Zdroj

Ako zdroj je nutné použiť širokopásmový zdroj. Je to z toho dôvodu, že je potrebné na OSA zobraziť niekoľko oblastí vlnových dĺžok s minimálnym rozsahom 70 nm. Inak by meranie bolo neefektívne a výsledné hodnoty by vychádzali príliš vysoké, tým pádom by sa merané vlákna vyhodnocovali ako že nespĺňajú limitné hodnoty



Obr. 7.1: Zapojenie pre meranie PMD metódou s fixným analyzátorom [29]

dané výrobcom alebo ITU-T štandardom, čož nie je pravda. Ideálnym zdrojom na toto meranie je Superluminiscenčná LED-ka (SLED). K tomuto meraniu je navrhovaná SLED so šírkou pásma okolo 250 nm v oblasti 1200-1700 nm, a minimálnym výkonom 4 mW ( $\sim 6$  dBm).

### Polarizačný kontrolér

Polarizačný kontrolér sa využije na nastavenie vstupnej polarizácie do meraného vlákna. To sa dosiahne nastavením lopatiek kontroléru do potrebnej polohy. Tým sa nepolarizované žiarenie zo zdroja polarizuje na lineárnu polarizáciu. Dá sa povedať že tento kontrolér slúži ako polarizér. Žiarenie polarizujeme preto, lebo závislosť PMD na vlnovej dĺžke spôsobuje zmeny vstupnej polarizácie. Tieto zmeny chceme limitovať, preto sa do meraného vlákna naviaže iba jeden polarizačný stav ktorý sa prechodom vlákna bude náhodne meniť. Tým sa bude meniť aj optický výkon. Kontrolér pozostáva zo vstupného a výstupného prepojovacie vlákna a troch lopatiek na ktorých je navinuté vlákno. Tým že je vlákno skrútené a ohýbané vzniká dvojlom ktorý mení polarizačný stav ktorý vstupuje do kontroléru. Vlákno je na lopatkách natočené v presne určených počtoch slučiek tak aby indukovaný dvojlom sa menil spojito. To umožňuje meniť akýkoľvek vstupný polarizačný stav na požadovaný výstupný polarizačný stav. Pre tento návrh bude použitý polarizačný kontrolér s tromi lopatkami v konfigurácii 2-3-2, kde čísla znázorňujú počet slučiek.

### Testované vlákno

V tomto návrhu budú použité viaceré vlákna. Pri meraní ide hlavne o dĺžku vlákna, na typ vlákna (G.652, G.653 a pod.) sa nekladie dôraz. Je to z toho dôvodu aby bola zaručená čo najširšia rôznorodosť výsledných hodnôt, pretože hlavne hodnota koeficientu PMD je závislá na dĺžke vlákna. Pričom sa rozoznáva či je vlákno dlhé alebo krátke podľa čoho sa volí hodnota väzobnej konštanty pri výpočte oneskorenia DGD. Taktiež sa podľa dĺžky vlákna volí spôsob počítania koeficientu PMD,

kde pre krátke vlákna koeficient rastie lineárne a pre dlhé vlákna sa mení s druhou odmocninou dĺžky vlákna.

### **Polarizér**

Polarizér na výstupe vlákna sa využíva ako analyzér. Slúži vlastne na to aby do OSA vstupovalo žiarenie rovnaké ako vstupovalo do testovaného vlákna. Keďže polarizované žiarenie sa vo vlákne znovu depolarizuje na náhodných vlnových dĺžkach, je možné opätovnou polarizáciou tieto zmeny zaznamenať na závislosti zobrazenej na OSA. Napríklad keby sa ako testované vlákno použilo vlákno PMF, opätovná polarizácia by nebola ani potrebná, a ku kolísaniu výkonu na vlnových dĺžkach by nedošlo.

### **Optický spektrálny analyzátor**

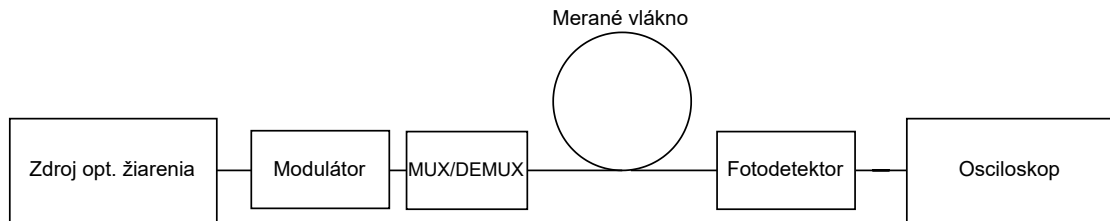
Optický spektrálny analyzátor (OSA), slúži na zobrazenie závislosti výkonu na oblasti vlnových dĺžok. Je potrebné mať OSA s takou spektrálnou šírkou aby dokázala zobraziť žiarenie z použitého širokopásmového zdroja. V tomto prípade maximálna veľkosť okna je 300 nm. Takúto šírku by mal mať použitý zdroj aby na závislosti ktorá sa zobrazí na displeji OSA bolo možné pozorovať kolísanie výkonu na vlnových dĺžkach a teda aj odčítať počet extrémov. Veľkosť okna (parameter Span) určuje hraničné vlnové dĺžky ( $\lambda_{start}$  a  $\lambda_{stop}$ ) použité pri výpočte hodnoty DGD. Zmenou veľkosti okna (napr. 20 nm, 100 nm, 200 nm, 500 nm) sa mení aj počet extrémov aj hraničné vlnové dĺžky. Pri malej veľkosti okna je meranie neefektívne a je možné ho považovať za chybné. Minimálna veľkosť okna pri ktorej je presnosť meracej metódy akceptovateľná je 60 nm. Na 60 nm je potrebné zobraziť 10–20 extrémov preto aby sme dosahovali limitnú hodnotu pre vysokorýchlostné prenosy PMD 1 ps.

## **7.2 Návrh zapojenia pre CD metódou oneskorenia impulzov**

Táto meracia metóda je šandarizovaná podľa ITU-T G.650.1 podľa tohto štandardu je uvádzaná aj ako alternatívna metóda na meranie chromatickej dispezie. Princíp merania spočíva v obsiahnutí modulovaného signálu pred prechodom a po prechode skrz vlákna na zobrazovacom prístroji (napr. osciloskop). Pri zobrazení signálu na osciloskope je možné určiť zmenu oneskorenia medzi signálom bez vlákna a signálom prechádzajúcim meraným optickým vláknom. Rôzne vlnové dĺžky sa vláknom prenášajú rôznymi skupinovými rýchlosťami a teda vzniká časový rozdiel, kde dlhšie vlnové dĺžky sa prenášajú cez vlákno pomalšie ako krátke vlnové dĺžky. Tento

časový rozdiel sa vypočíta pomocou získaného fázového posunu a modulačnej frekvencie ako:

Navrhované zapojenie tejto meracej metódy je zobrazené na 7.2.



Obr. 7.2: Navrhované zapojenie pre meranie CD metódou oneskorenia impulzov

## Zdroj

Zdroj musí spĺňať dve podmienky. Je potrebné aby vysielal žiarenie v oblasti vlnových dĺžok na ktorých chceme chromatickú disperziu merať, v tomto prípade oblasť okolo 1550 nm alebo 1310 nm. Ďalším dôležitým parametrom je šírka pásma zdroja, kde pre dosiahnutie aspoň štyroch hodnôt je potrebná šírka pásma  $\geq 6$  nm, napr. laserová dióda (10 mW) alebo širópásmový zdroj (napr. ASE, 10mW). Dostačujúce časové rozlíšenie pre meranie skupinového oneskorenia bude zaručované modulačným signálom.

## Modulátor

Dôležitým komponentom je modulátor, ktorý bude optický signál modulovať. Signál sa moduluje pre jednoduchšie charakterizovanie vplyvu chromatickej disperzie na prenášaný signál a pre podstatne vyššiu presnosť merania (napr. vyhnutie sa nelineárnym javom). Taktiež umožňuje kompatibilitu medzi komponentami. Pri tejto metóde sa využíva hlavne pulzová modulácia. Platí že čím vyššia frekvencia, tým menšia neistota merania.

## MUX/DEMUX

MUX/DEMUX modul v tomto zapojení slúži na selekciu vlnových dĺžok. Je navrhovaný aspoň 4-kanálový modul so 100 (0,8 nm rozostup) alebo 200 (1,6 nm rozostup) GHz rozostupmi podľa ITU-T G.694.1 štandardu. Pomocou tohto modulu budú zaručené stále rovnaké rozostupy medzi jednotlivými vlnovými dĺžkami. Je potrebné mať zvolené správne kanály aby sa prepúšťali vlnové dĺžky v oblasti ktorá chceme merať, tj. oblasť 1550 alebo 1310 nm.

## **Merané vlákno**

Pre toto zapojenie je potrebné poznať dĺžku vlákna a pre jednoduchšiu kontrolu výsledných hodnôt aj jeho typ, to znamená či sa jedná o vlákno s posunutou disperziou, s plochou disperznou krivkou a podobne. Oba parametre majú vplyv na hodnotu koeficientu chromatickej disperzie.

## **Detektor optického signálu**

Ako detektor optického signálu v tomto zapojení posluži fotodetektor s adekvátnym SNR a časovým rozlíšením. Na tento komponent sa nevyžadujú vysoké nároky, keďže štandardná fotodióda (napr. InGaAs fotodióda) má parametre ktoré pokrývajú oblasť vlnových dĺžok a sú dostatočne rýchle na detekovanie modulovaného signálu.

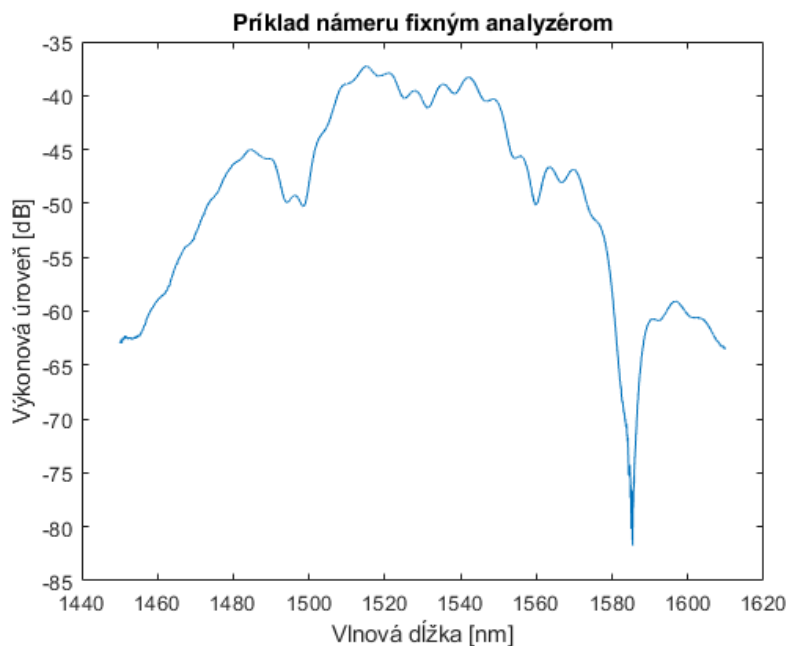
## **Osciloskop**

Na odčítanie časového oneskorenia sa použije osciloskop. Pri využití dvojkanálového osciloskopu sa na jednotlivé kanály privedú výstupy fotodektora na ktorý sú detekované filtrované vlnové dĺžky z MUX/DEMUX modulu. Je potrebné aby vo frekvenčnom rozsahu osciloskopu bola zahrnutá modulačná frekvencia použitého modulátoru.

## 8 Laboratórne merania PMD a CD

### 8.1 Zapojenie merania PMD s fixným analyzérom

V nasledujúcom texte je popísané praktické zapojenie navrhovaného merania PMD pomocou meracej metódy s fixným analyzérom. Na obr. 7.1 je zobrazené zapojenie tejto meracej metódy v laboratóriu prenosových médií na FEKT VUT Brno, k zmenám oproti navrhovanému zapojeniu teda nedošlo. V zapojení je využitý opt. zdroj typu SLED so šírkou pásma približne 140 nm, ktorý je pripojený k trojplatničkovému polarizačnému kontroléru. Ďalej optický signál putuje do testovaného vlákna, kde najdôležitejším parametrom je dĺžka vlákna. Po prechode cez vlákno je signál depolarizovaný, preto je hneď za vláknom pripojený in-line polarizér aby signál znovu polarizoval (zafixoval zmeny polarizácie po prechode vláknom), v tomto zapojení je teda využití ako analyzér. Znovu polarizované svetlo je následne privedené na optický spektrálny analyzátor kde je zobrazená závislosť optického výkonu na spektre vlnových dĺžok. Po zapojení všetkých prístrojov, sa na OSA zobrazí spomínaná závislosť, nastavením platničiek na polarizačnom kontroléry potom hľadáme vhodnú závislosť na ktorej je zobrazený dostatočný počet extrémov (miním a maxím kolísania výkonu) na dostatočne veľkom zobrazovacom okne (Span [nm]). Táto meracia metóda funguje pri zobrazovacom okne minimálne 60 nm, pričom zvyčajne sa meria na pár stovkách nm. Na spomínaných 60 nm je potrebné dosiahnuť medzi 10–15 extrémov. Na obr. 8.1 je zobrazený príklad vhodnej výkonovej závislosti.



Obr. 8.1: Príklad vhodnej výkonovej závislosti



## 8.2 Namerané hodnoty PMD

Celkovo boli premerané 3 vlákna o rôznych dĺžkach (7, 20 a 50 km). Hodnoty sa získavajú využitím zobrazenej závislosti (spočítaním extrémov) a následne pomocou vzorca:

$$\Delta\tau = \frac{k \cdot N \cdot \lambda_{start} \cdot \lambda_{stop}}{2 \cdot c \cdot (\lambda_{stop} - \lambda_{start})} \quad [ps] \quad (8.1)$$

kde sa menila hodnota väzobného člena  $k$  podľa dĺžky vlákna. Každé vlákno bolo premerané 10 krát a vypočítané hodnoty sú uvedené v tabuľkách pre nižšie.

### G.652.D, 20 km

Ako prvé bolo premerané štandardné vlákno využívane v telekomunikáciach označené podľa ITU-T štandardu ako G.652.D o dĺžke 20 km. Limitná hodnota koeficienta PMD pre toto vlákno podľa tab. 5.1 je  $D_{PMD} \leq 0,2 \frac{ps}{\sqrt{km}}$ . Ak chceme určiť maximálnu hodnotu oneskorenia ktoré neprekročí limit  $D_{PMD} \leq 0,2 \frac{ps}{\sqrt{km}}$  tak úpravou vzorca 4.4 dostaneme pre vlákno o dĺžke 20 km:

$$DGD \leq 0,2 \cdot \sqrt{20} \Rightarrow DGD \leq 0,8944 \quad [ps] \quad (8.2)$$

Podľa tabuliek 8.1, 8.2 a 8.3 ani jedna hodnota pri ktoromkoľvek zobrazovacom okne neprekročila limitnú hodnotu, niektoré sa ale priblížili a to hlavne pri meraniach na najmenšom zobrazovacom okne. Pozornosť treba venovať aj trendu klesajúcich hodnôt pri zväčšovaní zobrazovacieho okna.

Tab. 8.1: Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 20 km G.652.D, SPAN 140 nm

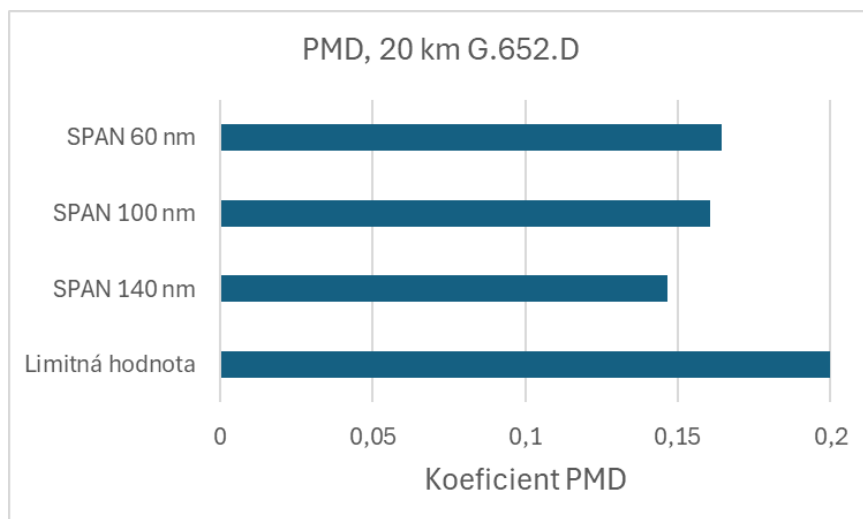
20 km G.652.D, SPAN 140 nm		
Č. merania	DGD [ps]	Koef. PMD [ $ps/km^{1/2}$ ]
1	0,695	0,155
2	0,667	0,149
3	0,612	0,137
4	0,751	0,168
5	0,584	0,131
6	0,667	0,149
7	0,667	0,149
8	0,751	0,168
9	0,612	0,137
10	0,556	0,124
<b>AVG</b>	<b>0,656</b>	<b>0,147</b>

Tab. 8.2: Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 20 km G.652.D, SPAN 100 nm

20 km G.652.D, SPAN 100 nm		
Č. merania	DGD [ps]	Koef. PMD [ $ps/km^{1/2}$ ]
1	0,759	0,170
2	0,721	0,161
3	0,607	0,136
4	0,797	0,178
5	0,721	0,161
6	0,835	0,187
7	0,759	0,170
8	0,870	0,154
9	0,645	0,144
10	0,645	0,144
<b>AVG</b>	<b>0,736</b>	<b>0,161</b>

Tab. 8.3: Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 20 km G.652.D, SPAN 60 nm

20 km G.652.D, SPAN 60 nm		
Č. merania	DGD [ps]	Koef. PMD [ $ps/km^{1/2}$ ]
1	0,740	0,165
2	0,801	0,179
3	0,678	0,152
4	0,801	0,179
5	0,740	0,165
6	0,801	0,179
7	0,616	0,138
8	0,863	0,193
9	0,678	0,152
10	0,537	0,143
<b>AVG</b>	<b>0,726</b>	<b>0,165</b>



Obr. 8.2: Porovnanie koeficientu PMD pri zmene zobrazovacieho okna pre vlákno G.652.D 20 km

### G.652.D, 50 km

Ďalšie premerané vlákno bolo opäť typu G.652.D, tentokrát ale o dĺžke 50 km. Limitná hodnota koeficienta PMD pre toto vlákno podľa tab. 5.1 je teda opäť  $D_{PMD} \leq 0,2 \frac{ps}{\sqrt{km}}$ . Maximálna hodnota oneskorenia ktoré neprekročí limit pre vlákno o dĺžke 50 km je potom:

$$DGD \leq 0,2 \cdot \sqrt{50} \Rightarrow DGD \leq 1,4142 \text{ [ps]} \quad (8.3)$$

Podľa tabuliek 8.4, 8.5 a 8.6 opäť ani jedna hodnota pri ktoromkoľvek zobrazovacom okne neprekročila limitnú hodnotu, a dôsledkom dĺžky vlákna sa k limitnej hodnote nepribližovali ani hodnoty namerané na najmenšom zobrazovacom okne. Trend klesajúcich hodnôt so zväčšovaním zobrazovacieho okna sa opäť prejavil.

Tab. 8.4: Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 50 km G.652.D, SPAN 140 nm

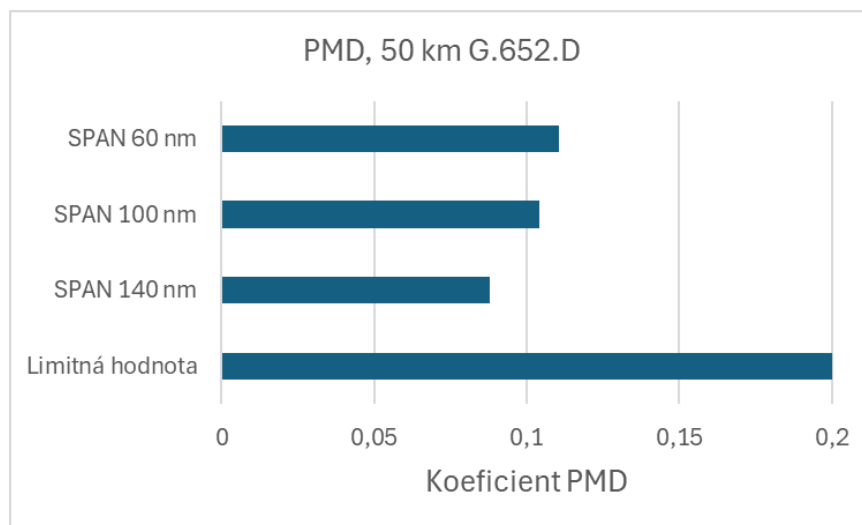
50 km G.652.D, SPAN 140 nm		
Č. merania	DGD [ps]	Koef. PMD [ $ps/km^{1/2}$ ]
1	0,612	0,087
2	0,804	0,114
3	0,493	0,070
4	0,584	0,083
5	0,667	0,094
6	0,556	0,079
7	0,695	0,098
8	0,723	0,102
9	0,445	0,063
10	0,695	0,098
<b>AVG</b>	<b>0,627</b>	<b>0,088</b>

Tab. 8.5: Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 50 km G.652.D, SPAN 100 nm

50 km G.652.D, SPAN 100 nm		
Č. merania	DGD [ps]	Koef. PMD [ $ps/km^{1/2}$ ]
1	0,683	0,097
2	0,911	0,129
3	0,683	0,097
4	0,683	0,097
5	0,683	0,097
6	0,759	0,107
7	0,949	0,134
8	0,759	0,107
9	0,456	0,064
10	0,797	0,113
<b>AVG</b>	<b>0,736</b>	<b>0,104</b>

Tab. 8.6: Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 50 km G.652.D, SPAN 60 nm

50 km G.652.D, SPAN 60 nm		
Č. merania	DGD [ps]	Koef. PMD [ $ps/km^{1/2}$ ]
1	0,986	0,139
2	0,925	0,131
3	0,740	0,105
4	0,555	0,078
5	0,740	0,105
6	0,616	0,087
7	0,986	0,139
8	0,801	0,113
9	0,493	0,070
10	0,986	0,139
<b>AVG</b>	<b>0,783</b>	<b>0,111</b>



Obr. 8.3: Porovnanie koeficientu PMD pri zmene zobrazovacieho okna pre vlákno G.652.D 50 km

### G.653.B, 7 km

Ďalšie premerané vlákno bolo typu G.653.B, o dĺžke 7 km. Vlákno je teda typu s posunutou chromatickou disperziou (DSF). Limitná hodnota koeficienta PMD pre toto vlákno podľa tab. 5.1 je  $D_{PMD} \leq 0,5 \frac{ps}{\sqrt{km}}$ . Pri výpočte maximálnej hodnoty oneskorenia ktoré neprekročí limit nastáva ale zmena. Pre vlákno o dĺžke 7 km, ktoré sa považuje za krátke vlákno, sa teda uplatňuje vzorec 4.3. Výsledná hodnota je potom:

$$DGD \leq 0,5 \cdot 7 \Rightarrow DGD \leq 3,5 \text{ [ps]} \quad (8.4)$$

Podľa tabuliek 8.7, 8.8 a 8.9 opäť ani jedna hodnota pri ktoromkoľvek zobrazovacom okne neprekročila limitnú hodnotu, ani v prípade meraní s najmenším zobrazovacím oknom. Ku klesaniu hodnôt so zväčšovaním zobrazovacieho okna došlo.

Tab. 8.7: Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 7 km G.653.B, SPAN 140 nm

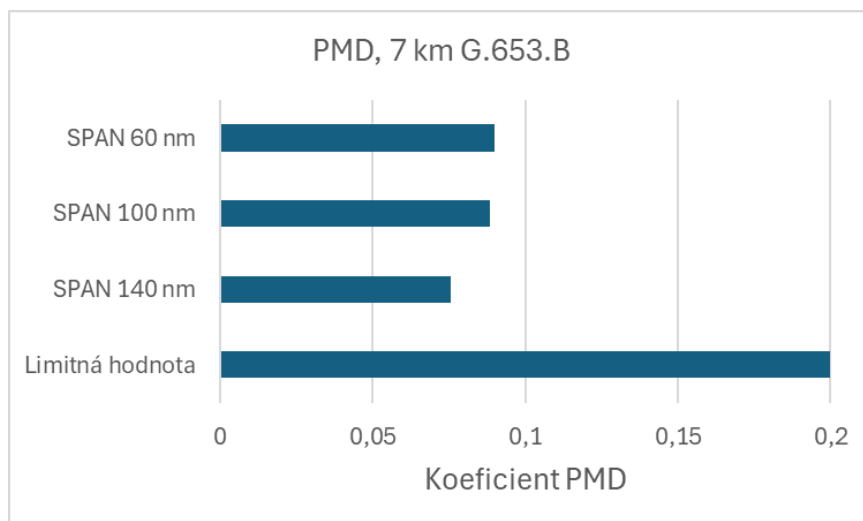
7 km G.653.B, SPAN 140 nm		
Č. merania	DGD [ps]	Koef. PMD [ps/km]
1	0,593	0,082
2	0,570	0,079
3	0,616	0,086
4	0,502	0,070
5	0,524	0,073
6	0,570	0,079
7	0,456	0,063
8	0,479	0,067
9	0,524	0,073
10	0,593	0,082
<b>AVG</b>	<b>0,543</b>	<b>0,075</b>

Tab. 8.8: Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 7 km G.653.B, SPAN 100 nm

7 km G.653.B, SPAN 100 nm		
Č. merania	DGD [ps]	Koef. PMD [ps/km]
1	0,591	0,082
2	0,654	0,091
3	0,623	0,086
4	0,716	0,099
5	0,560	0,078
6	0,654	0,091
7	0,529	0,073
8	0,685	0,095
9	0,716	0,099
10	0,623	0,086
<b>AVG</b>	<b>0,635</b>	<b>0,088</b>

Tab. 8.9: Tabuľka nameraných hodnôt PMD pre vlákno 7 km G.653.B, SPAN 60 nm

7 km G.653.B, SPAN 60 nm		
Č. merania	DGD [ps]	Koef. PMD [ps/km]
1	0,607	0,084
2	0,758	0,105
3	0,708	0,098
4	0,708	0,098
5	0,607	0,084
6	0,505	0,070
7	0,657	0,091
8	0,556	0,077
9	0,758	0,105
10	0,607	0,084
<b>AVG</b>	<b>0,647</b>	<b>0,090</b>

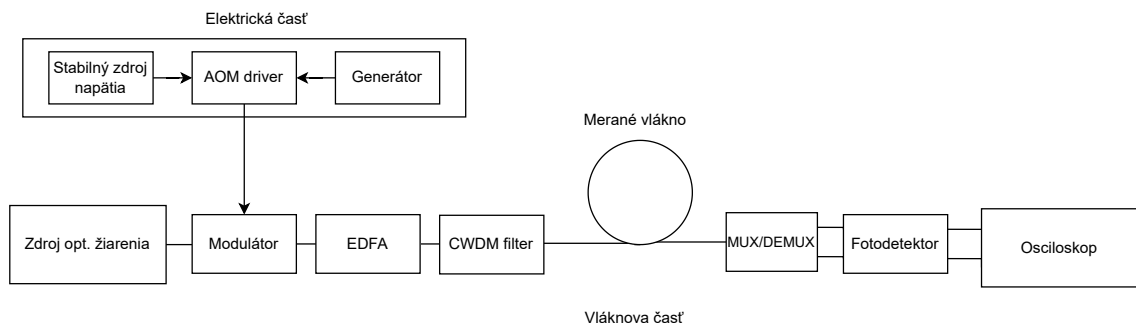


Obr. 8.4: Porovnanie koeficientu PMD pri zmene zobrazovacieho okna pre vlákno G.653.B 7 km

### 8.3 Zapojenie merania oneskorenia impulzov

V nasledujúcom texte je popísané praktické zapojenie navrhovaného merania CD pomocou meracej metódy oneskorenia impulzov. Na obr. 8.5 je zobrazené zapojenie tejto meracej metódy v laboratóriu prenosových médií na FEKT VUT Brno. V zapojení je využitý opt. zdroj typu SLED (rovnaký ako pri meraní PMD) so šírkou pásma približne 140 nm, ktorý je pripojený k akusticko-optickému modulátoru (AOM). AOM driver je napájaný vlastným zdrojom (24 V) a pomocou stabilného napäťového zdroja sa nastaví jeho výstupná frekvencia pre modulátor. K driveru je pripojený generátor impulzov s frekvenciou 5 MHz, parameter dĺžka impulzu sa v tomto meraní bude meniť v rozmedzí 20 – 60 ns. Za modulátorom je pripojený EDFA zosilňovač ktorý modulovaný signál zosilní na úroveň citlivosti fotodetektoru. Za zosilňovačom je pripojený CWDM filter na filtrovanie  $\pm 20$  nm v oblasti 1550 nm. Následne je pripojené merané optické vlákno. Pri meraní sa ale vždy meria na dvojici filtrovaných vlnových dĺžok najprv bez vlákna a po zaznamenaní oneskorenia impulzov sa pripojí vlákno a znovu sa zaznamená oneskorenie impulzov. Filtrovanie vlnových dĺžok vykonáva MUX/DEMUX modul s 8 kanálmi, ktoré pokrývajú oblasť 1546,12 – 1553,33 nm. Vyfiltrované signály z kanálov DEMUXU su potom privedené na dvojkanálový fotodetektor. Výstupy fotodetektoru sú potom zobrazované na osciloskope.





Obr. 8.5: Zapojenie pre meranie CD metódou oneskorenia impulzov

## 8.4 Namerané hodnoty CD

### G.652.D, 20 km

Prvé merané vlákno bolo typu G.652.D, o dĺžke 20 km. Limitné hodnoty chromatickej disperzie pre toto vlákno na vlnovej dĺžke 1550 nm sú  $13,3 - 18,6 \frac{ps}{nm \cdot km}$ . Celkovo boli vykonané tri merania, každé s rôznou dĺžkou pulzu. Merania na kanáloch 31-32 vykazujú mierne prekročenie limitnej hodnoty ale taktiež je pravda že táto dvojica kanálov je tesne nad 1550 nm, takže zvýšená hodnota sa tu očakáva. Inak ku prekročeniu limitných hodnôt nedošlo a namerané hodnoty sa zhodujú s teoretickými tabulkovými hodnotami daného typu vlákna.

Tab. 8.10: Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 20 km G.652.D, s dĺžkou pulzu 20 ns

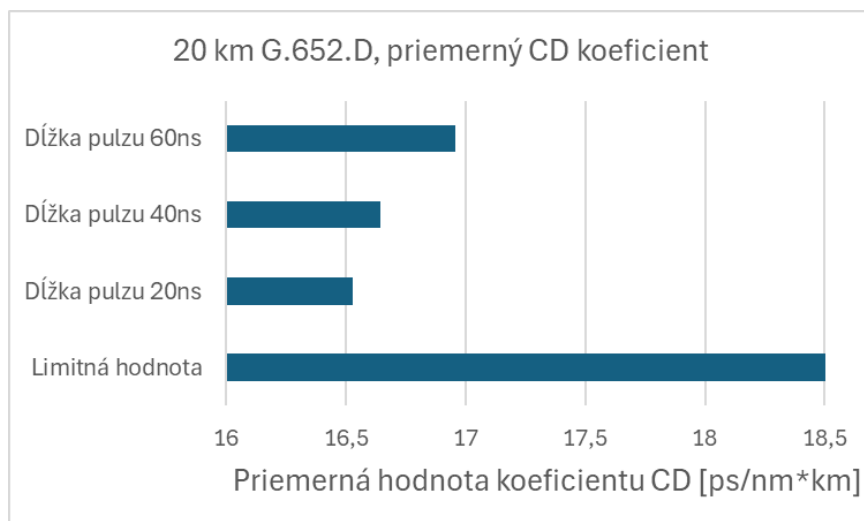
20 km G.652.D, dĺžka pulzu 20 ns				
Kanály	$\lambda$ [nm]	Rozostup [nm]	Oneskorenie [ps]	$D(\lambda)$ [ps/nm*km]
31-32	1551,72	0,80	333	20,81
31-33	1550,92	1,60	567	17,72
31-34	1550,12	2,40	833	17,35
31-36	1548,51	4,00	1200	15,00
31-37	1547,72	4,80	1500	15,63
31-38	1546,92	5,60	1650	14,73
31-39	1546,12	6,40	1850	14,45
<b>AVG</b>				<b>16,53</b>

Tab. 8.11: Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 20 km G.652.D, s dĺžkou pulzu 30 ns

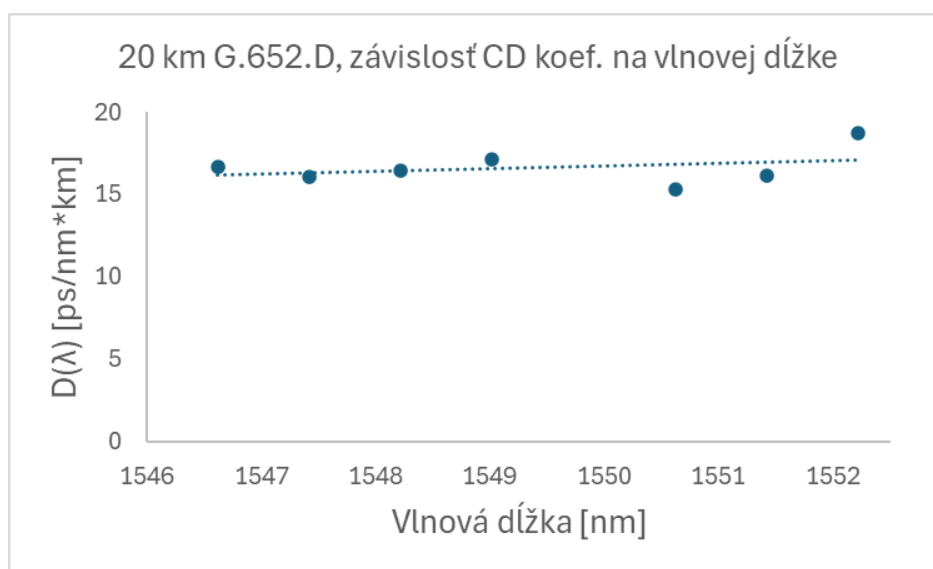
20 km G.652.D, dĺžka pulzu 30 ns				
Kanály	$\lambda$ [nm]	Rozostup [nm]	Oneskorenie [ps]	$D(\lambda)$ [ps/nm*km]
31-32	1551,72	0,80	300	18,75
31-33	1550,92	1,60	517	16,16
31-34	1550,12	2,40	734	15,29
31-36	1548,51	4,00	1367	17,09
31-37	1547,72	4,80	1580	16,46
31-38	1546,92	5,60	1800	16,07
31-39	1546,12	6,40	2135	16,68
<b>AVG</b>				<b>16,64</b>

Tab. 8.12: Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 20 km G.652.D, s dĺžkou pulzu 40 ns

20 km G.652.D, dĺžka pulzu 40 ns				
Kanály	$\lambda$ [nm]	Rozostup [nm]	Oneskorenie [ps]	$D(\lambda)$ [ps/nm*km]
31-32	1551,72	0,80	350	21,88
31-33	1550,92	1,60	520	16,25
31-34	1550,12	2,40	800	16,67
31-36	1548,51	4,00	1050	13,13
31-37	1547,72	4,80	1750	18,23
31-38	1546,92	5,60	1850	16,52
31-39	1546,12	6,40	2050	16,02
<b>AVG</b>				<b>16,96</b>



Obr. 8.6: Porovnanie vplyvu dĺžky impulzu na hodnotu koeficientu CD, pre vlákno 20 km G.652.D

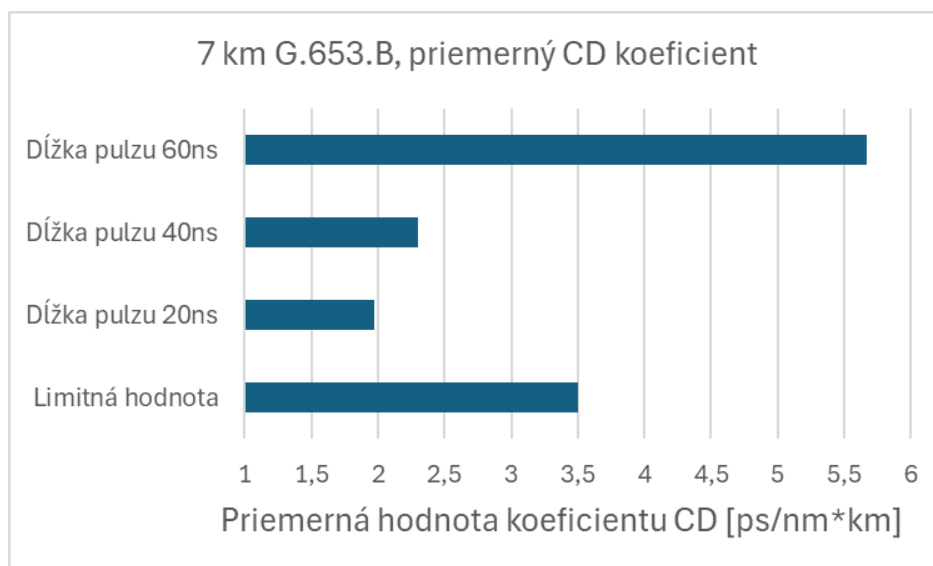


Obr. 8.7: Závislosť chromatickej disperzie na meraných vlnových dĺžkach, pre vlákno 20 km G.652.D

### G.653.B, 7 km

Druhé merané vlákno bolo typu G.653.B, o dĺžke 7 km. Limitná hodnota chromatickej disperzie pre toto vlákno na vlnovej dĺžke 1550 nm je  $3,5 \frac{ps}{nm \cdot km}$ . Opäť boli vykonané tri merania s rôznou dĺžkou pulzu. Vlákno je typu s posunutou chromatickou disperziou a teda vlnová dĺžka nulovej disperzie je okolo 1550 nm. Tomu odpovedajú aj namerané hodnoty v tab. 8.13, ktoré nepresiahli limitnú hodnotu.

Pri zvyšovaní dĺžky pulzu narastali aj hodnoty oneskorenia pulzov a teda pri nastavení maximálnej merateľnej dĺžky pulzu už došlo aj k značnému prekročeniu limitnej hodnoty daného vlákna. Za zmienku stojí aj meranie na kanáloch 31-36 kde je oneskorenie nezvyčajne veľké, a tým ovplyvňuje celkový priemer CD koeficientu na tejto malej oblasti.



Obr. 8.8: Porovnanie vplyvu dĺžky impulzu na hodnotu koeficientu CD, pre vlákno 7 km G.653.B

Tab. 8.13: Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 7 km G.653.B, s dĺžkou pulzu 20 ns

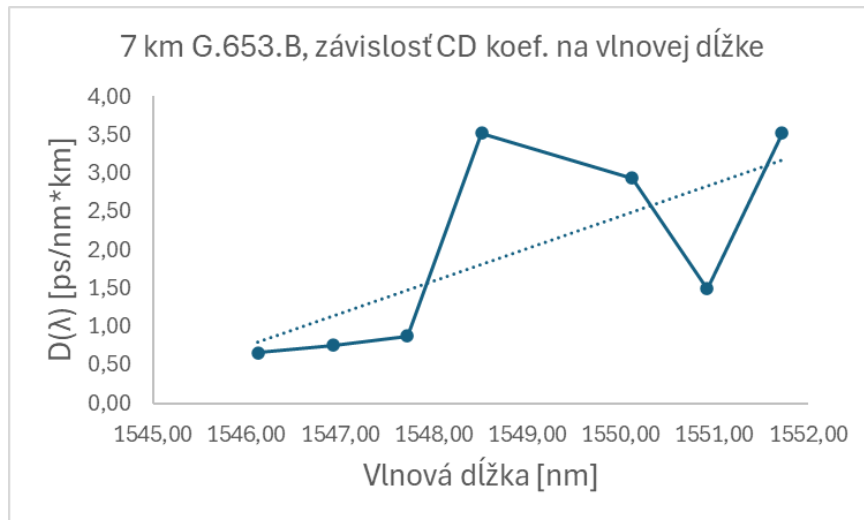
7 km G.653.B, dĺžka pulzu 20ns				
Kanály	$\lambda$ [nm]	Rozostup [nm]	Oneskorenie [ps]	$D(\lambda)$ [ps/nm*km]
31-32	1551,72	0,80	20	3,52
31-33	1550,92	1,60	17	1,50
31-34	1550,12	2,40	50	2,93
31-36	1548,51	4,00	100	3,52
31-37	1547,72	4,80	30	0,88
31-38	1546,92	5,60	30	0,75
31-39	1546,12	6,40	30	0,66
<b>AVG</b>				<b>1,97</b>

Tab. 8.14: Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 7 km G.653.B, s dĺžkou pulzu 40 ns

7 km G.653.B, dĺžka pulzu 40ns				
Kanály	$\lambda$ [nm]	Rozostup [nm]	Oneskorenie [ps]	$D(\lambda)$ [ps/nm*km]
31-32	1551,72	0,80	20	3,52
31-33	1550,92	1,60	16	1,41
31-34	1550,12	2,40	66	3,87
31-36	1548,51	4,00	100	3,52
31-37	1547,72	4,80	40	1,17
31-38	1546,92	5,60	60	1,51
31-39	1546,12	6,40	50	1,10
<b>AVG</b>				<b>2,30</b>

Tab. 8.15: Tabuľka nameraných hodnôt CD pre vlákno 7 km G.653.B, s dĺžkou pulzu 60 ns

7 km G.653.B, dĺžka pulzu 60ns				
Kanály	$\lambda$ [nm]	Rozostup [nm]	Oneskorenie [ps]	$D(\lambda)$ [ps/nm*km]
31-32	1551,72	0,80	50	8,80
31-33	1550,92	1,60	50	4,40
31-34	1550,12	2,40	100	5,87
31-36	1548,51	4,00	400	14,08
31-37	1547,72	4,80	100	2,93
31-38	1546,92	5,60	100	2,52
31-39	1546,12	6,40	50	1,10
<b>AVG</b>				<b>5,67</b>



Obr. 8.9: Závislosť chromatickej disperzie na meraných vlnových dĺžkach, pre vlákno 7 km G.653.B

## 9 Návrhy laboratórných úloh

Na nasledujúcich stránkach sú vložené dva nevyplnené návrhy laboratórných úloh slúžiacich k pochopeniu problematiky disperzií v optických vláknach na základe teoretického rozboru a meraní vykonaných v rámci tejto záverečnej práce.

# Meranie polarizačnej vidovej disperzie

## Cieľ merania

Cieľom toho merania je oboznámiť študentov s **polarizačnou vidovou disperziou (PMD)** a jej vplyvom na prenášaný signál. Študenti si vyskúšajú zapojiť merané vlákno v kombinácii s polarizačným kontrolérom, polarizérom a budú zobrazovať závislosť výkonu na jednotlivých vlnových dĺžkach pomocou optického spektrálneho analyzátoru (OSA). Toto meranie sa nazýva Meranie s fixným analyzátorom.

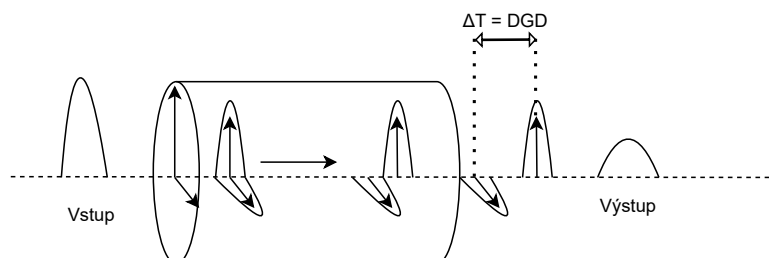
## Zadanie

1. Oboznámiť sa s javom polarizačnej vidovej disperzie.
2. Oboznámiť sa s obsluhou optického spektrálneho analyzátoru.
3. Vykonať 4 merania pre aspoň dve vlákna o rôznej dĺžke.
4. Numericky vypočítajte koeficient PMD z hodnoty DGD získanej z nameranej závislosti pomocou vzorca 3.

## Teoretický rozbor

### Polarizačná vidová disperzia – PMD

Základom tejto disperzie je polarizačný stav svetla. Táto disperzia spôsobuje rozširovanie pulzov, ktoré vzniká dvojlomom vo vnútri vlákna a dokáže takto byť obmedzujúcim faktorom pri optickom vysokorýchlostom prenose signálu. Je náhodného charakteru. Tento charakter nadobúda hlavne kvôli intrinzičným (vplyvy vnútri vlákna, napr. stresové prvky, nehomogenity, geometrickosť jadra) aj extrinzičným vplyvom (vplyvy spôsobené zaobchádzaním s vláknom, ohýbanie, stočenie). Tieto vplyvy spôsobujú vo vyrobených vláknach rôznorodosť skupinovej rýchlosti polarizačných vidov a stavov. V dokonale homogénnom vlákne sa vidy vo vlákne šíria rovnakou rýchlosťou (tzv. degenerované vidy), v skutočnosti ale dvojlomom túto degeneráciu značne obmedzí alebo úplne odstráni a vidy sa potom šíria rôznymi rýchlosťami. Výsledkom je potom polarizačná vidová disperzia.



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



## PMD na krátke vzdialenosti - slabá väzba

V krátkych vláknach je možné považovať hodnotu dvojlomu za konštatnú, to isté platí aj pre jeho smer. To spôsobuje slabú väzbu medzi vidmi (mode coupling), takže výkon naviazaný v jednom vide sa ani čiastočne neviaže do druhého vidu. Vďaka tejto skutočnosti je DGD málo závislé alebo úplne nezávislé na vlnovej dĺžke. Koeficient PMD je v tomto prípade definovaný ako:

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{L} \quad [ps/km] \quad (1)$$

kde

- $L$  je dĺžka trasy,
- $\Delta\tau$  je skupinové oneskorenie signálu vo vlákne.

Pre polarizáciu v krátkych vláknach platí, že nadobúda postupne všetky polarizačné stavy za sebou a pravidelne, hovoríme že sa nevyskytuje polarizačná nepravidelnosť.

## PMD na dlhé vzdialenosti - silná väzba

Pretože na dlhé vlákna, v porovnaní s krátkymi vláknami, pôsobí zvyčajne väčšie množstvo vnútorného stresu, ohybov, skrutov a teplotných zmien, dochádza k výrazným zmenám dvojlomu vlákna. Mení sa jeho veľkosť aj smer. Dvojlom už potom nie je aditívny a podobný model aký bol uplatnený pri krátkych vláknach už nemožno použiť. Hodnota PMD sa už nemení lineárne s dĺžkou vlákna. Mení sa s druhou odmocninou dĺžky vlákna. Polarizačné stavy už nenasledujú postupne za sebou a pravidelne ako tomu je pri krátkych vláknach. PMD koeficient pre dlhé vlákna je definovaný ako:

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad [ps/\sqrt{km}] \quad (2)$$

## Diferenciálne skupinové oneskorenie vidov – DGD

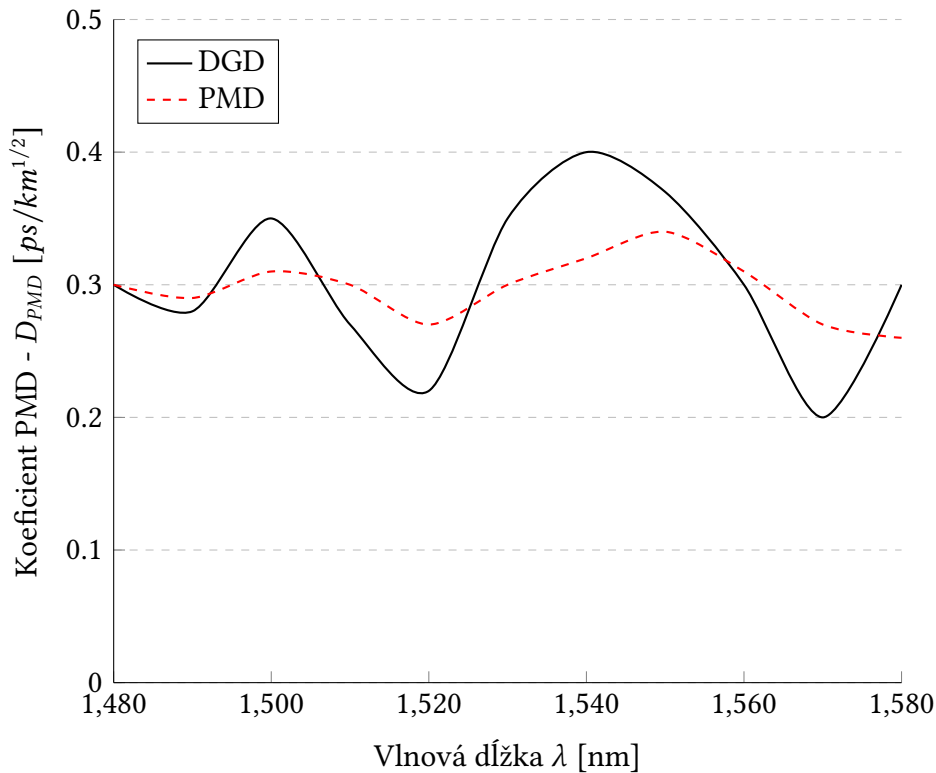
Je to časový rozstup medzi polarizačnými vidmi, taktiež je to miera PMD daného vlákna. DGD parameter je závislý na vlnovej dĺžke a teplote, a taktiež sa mení už len pri manuálnom zaobchádzaní s vláknom, pretože to ovplyvňuje dvojlom. Mení sa v čase a býva označovaný ako  $t_g$ . Primerná hodnota DGD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

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

## Meracia metóda - metóda s fixným analyzérrom

Jedná sa o v celku jednoduché meranie vhodné na laboratórne merania. PMD sa zobrazuje vo frekvenčnej doméne. Pozostáva zo širokopásmového zdroja optického žiarenia, polarizačného kontroléru, testovaného vlákna, in-line polarizéru ktorý je využitý ako analyzér a optického spektrálneho analyzátoru. Do zapojenia je implementovaný polarizačný kontrolér ktorý



Obr. 2: DGD závislosť na vlnovej dĺžke

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	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$

slúži na zmenu polarizácie a ovplyvňovanie kolísania výkonu. Najmenšia merateľná hodnota PMD závisí na rozsahu vlnových dĺžok zdroja. Najväčšia merateľná hodnota závisí na rozlíšení optického spektrálneho analyzátoru. Pomocou extrémov (miním a maxím kolísania výkonu) na zobrazenej závislosti je možné dopočítať hodnotu DGD, pomocou nej následne aj koeficient PMD.

$$\Delta\tau = \frac{k \cdot N_e \cdot \lambda_{start} \cdot \lambda_{stop}}{2 \cdot c \cdot (\lambda_{stop} - \lambda_{start})} \quad [s] \quad (3)$$

## Použitie prístroje

- Zdroj optického žiarenia (SLED)
- Polarizačný kontrolér
- Merané vlákno

- Polarizér
- Optický spektrálny analyzátor

# Spracovanie merania

Meno a priezvisko:

Ročník:

ID:

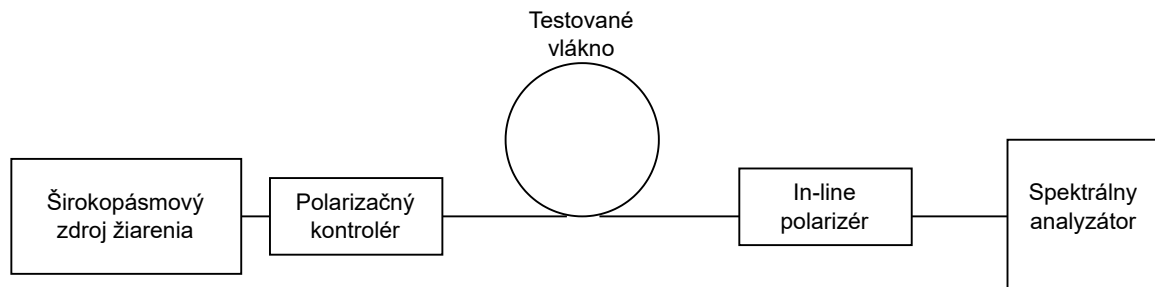
Študijná skupina:

Dátum merania:

Kontroloval:

## Postup merania

1. Zapojte meranie podľa schémy.
2. Predtým než zdroj zapnete uistite sa že je nastavený minimálny prúd (otočte potenciometrom čo najviac doľava)
3. Zapnite optický spektrálny analyzátor (OSA) a zdroj
4. Na zdroji nastavte prúd na 80 mA
5. Na OSA zapnite analyzačný režim OSA
6. Spusťte prvotný scan
7. Natačaním platničiek na polarizačnom kontroléri zobrazte na OSA vhodnú závislosť na výpočet DGD



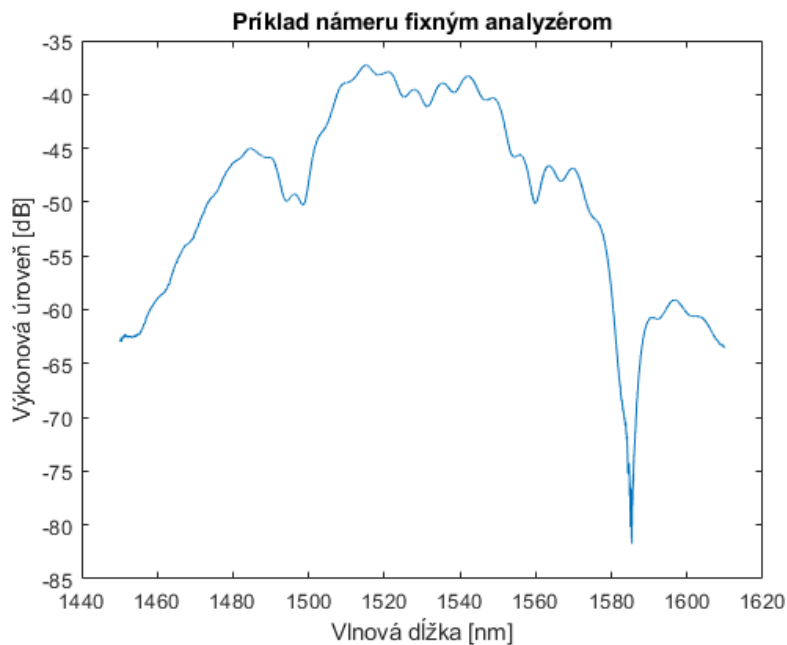
Obr. 3: Zapojenie pre meranie PMD metódou s fixným analyzátorom

V hornej časti obrazovky OSA môžete meniť rozlíšenie skenovania a tým teda aj ovplyvňovať dobu skenovania. Nastavte rozlíšenie na 200 nm/s a režim skenovania na kontinuálny. Otačením platničiek polarizačného kontroléru nájdite vhodnú závislosť na ktorej sa prejavuje zvlnenie optického výkonu v závislosti na vlnovej dĺžke spôsobené spojovaním polarizačných vidov. Po nájdení závislosti na ktorej je zhruba 10-20 zjavných extrémov, zvolte rozlíšenie skenovania na 0,5 nm/s a režim skenovania na "Single". Takto nastavené skenovanie bude trvať približne 3-4 minúty. Po zobrazení závislosti spočítajte počet extrémov. Týmto spôsobom prevedte merania na šírke okna 70, 80, 90 a 100 nm. Pre každú zobrazenú šírku vypočítajte hodnotu DGD pomocou vzorca:

$$\Delta\tau = \frac{k \cdot N_e \cdot \lambda_{start} \cdot \lambda_{stop}}{2 \cdot c \cdot (\lambda_{stop} - \lambda_{start})} \quad [s] \quad (4)$$

kde

- $k$  je väzobná konštanta vidov,  $k = 0,82$  (pre dlhé vlákna),  $k = 1$  (pre krátke vlákna)
- $N_e$  je počet extrémov (miním a maxím) závislosti zobrazenej na OSA
- $\lambda_{start}$  a  $\lambda_{stop}$  sú hraničné vlnové dĺžky zobrazené na OSA
- $c$  je rýchlosť svetla



Obr. 4: Príklad vhodnej výkonovej závislosti

Meranie vykonajte aspoň na dvoch vláknoch, jednom krátkom ( $<10$  km) a jednom dlhom vlákne ( $>20$  km). Taktiež premerajte vlákna pri zobrazení “nesprávnej” závislosti (počet extrémov nedostačujúci alebo príliš veľký) ale na správnej veľkosti zobrazovacieho okna (SPAN = 70 – 100 nm). A naopak, pri dosiahnutí optimálneho počtu extrémov ale na nedostačujúcom veľkosti okna (SPAN  $< 70$  nm). Z nameraných hodnôt v tabuľkách vyveďte krátky záver merania.

## Príklad výpočtu

## Záver

<u>SPAN</u>	$N_e$	DGD	$D_{PMD}$	<u>SPAN</u>	$N_e$	DGD	$D_{PMD}$
[nm]	[-]	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]	[nm]	[-]	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]
70				70			
80				80			
90				90			
100				100			
<i>L vlákna [km]</i>		LIMIT		<i>L vlákna [km]</i>		LIMIT	

Tabuľka 3: Tabuľky nameraných PMD hodnôt

<u>SPAN</u>	$N_e$	DGD	$D_{PMD}$	<u>SPAN</u>	$N_e$	DGD	$D_{PMD}$
[nm]	[-]	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]	[nm]	[-]	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]
70							
80							
90							
100							
<i>L vlákna [km]</i>		LIMIT		<i>L vlákna [km]</i>		LIMIT	

Tabuľka 4: Tabuľky nameraných PMD hodnôt pri nesprávnych parametroch merania

# Meranie chromatickej disperzie

## Cieľ merania

Cieľom toho merania je oboznámiť študentov s **chromatickou disperziou (CD)** a jej vplyvom na prenášaný signál. Študenti si vyskúšajú zapojiť merané vlákna v kombinácii s modulátorom, MUX/DEMUX modulom a osciloskopom. Toto meranie sa nazýva Meranie oneskorenia impulzov.

## Zadanie

1. Oboznámiť sa s javom chromatickej disperzie.
2. Oboznámiť sa so správnym nastavením parametrov jednotlivých komponentov zapojenia.
3. Premerať 2 typy optických vlákien a určiť ich koeficienty chromatickej disperzie v oblasti 1550 nm.

## Teoretický rozbor

### Chromatická disperzia – CD

Pretože žiaden zdroj optického žiarenia nie je dokonalo monochromatický, žiarenie ktoré sa prenáša vláknom obsahuje *spektrum* vlnových dĺžok. Tieto vlnové dĺžky sa vo vlákne šíria rôznymi rýchlosťami.

Materiálová disperzia sa prejavuje, pretože index lomu kremíka sa mení s vlnovou dĺžkou. Svetlo ktoré je prenášané vláknom je spomalené o hodnotu  $1/n$ , kde  $n$  je index lomu. Vlnovodová disperzia závisí na disperzných vlastnostiach vlnovodu. Tým sa rozumie geometria vidu a aj pomer polomer jadra vlákna k indexu lomu. Je spôsobovaná zmenami rozloženia elektrického poľa optického vidu na určitej vzdialenosti. Zmena poľa závisí na geometrii vlákna. Materiálová a vlnovodová disperzia spolu tvoria chromatickú disperziu, viď obr. 1. Preto celková chromatická disperzia môže mať pozitívnu alebo negatívnu hodnotu.

Chromatická disperzia je definovaná ako rozširovanie svetelného impulzu v optickom vlákne. Toto rozširovanie je spôsobené tým, že jednotlivé vlnové dĺžky, z ktorých sa skladá svetelné spektrum zdroja, majú rôzne skupinové rýchlosti. Skupinové oneskorenie  $\tau$  je čas ktorý je potrebný na to aby svetelný impulz prešiel jednotku dĺžky vlákna. Je funkciou vlnovej dĺžky a udáva sa v jednotkách [ps/km]. Dá sa vypočítať ako:

$$\tau = \frac{1}{c} \cdot \left( n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad [ps/km] \quad (1)$$

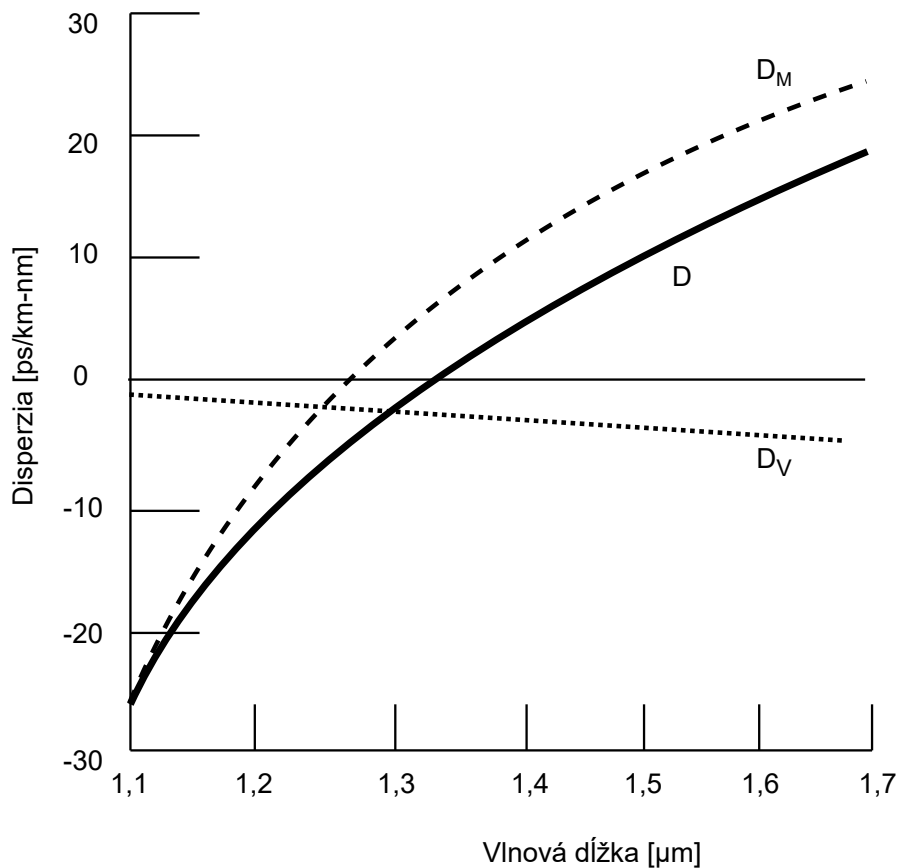
kde

- $c$  je rýchlosť svetla,
- $n$  je index lomu,
- $\lambda$  je vlnová dĺžka.

Koeficient chromatickej disperzie udáva ako sa mení skupinové oneskorenie svetelného impulzu v jednotke dĺžky vlákna spôsobené zmenou vlnovej dĺžky. Koeficient je definovaný ako:

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \cdot d\tau/d\lambda \quad [\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}] \quad (2)$$

Existujú vlnové dĺžky pri ktorých sa chromatická disperzia neprejaví, takú vlnovú dĺžku označujeme ako *vlnová dĺžka nulovej chromatickej disperzie*. Všetky vyššie spomenuté parametre sa bežne nachádzajú v katalógoch výrobcov optických vlákien.

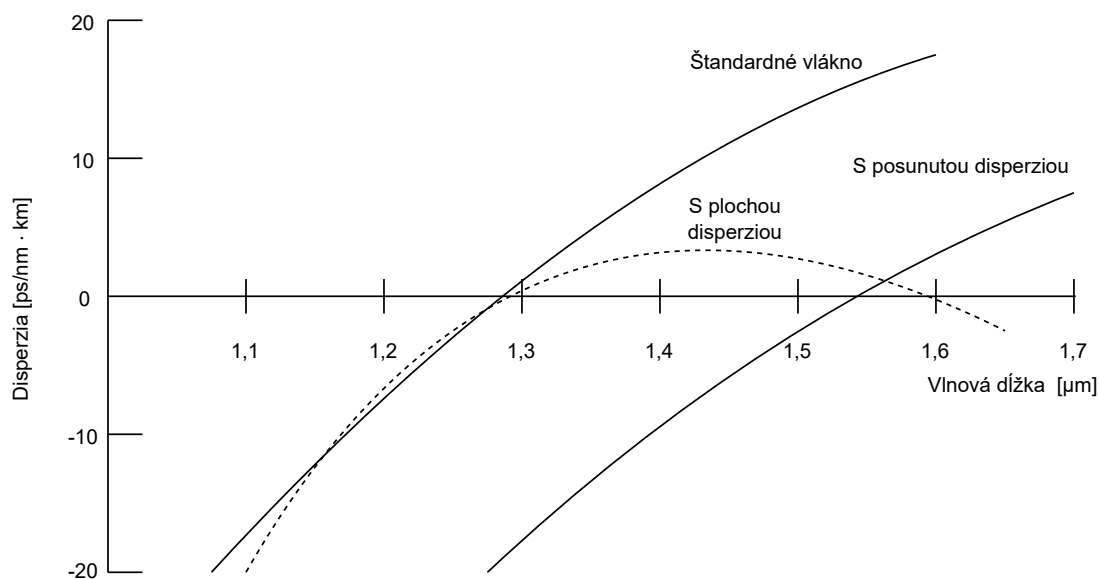


Obr. 1: Zobrazenie celkovej chromatickej disperzie  $D$ , materiálovej disperzie  $D_M$  a vlnovodovej disperzie  $D_V$

## Meracia metóda - metóda oneskorenia impulzov

Impulzy rôznych vlnových dĺžok sú do vlákna vysielané v presne stanovených časových intervaloch. Meria sa rozdiel časových intervalov na vstupe (pred prechodom cez vlákno) a na výstupe (po prechode cez vlákno). Koeficient chromatickej disperzie je potom vypočítaný pomocou zmeraného oneskorenia spôsobeného rôznymi rýchlosťami šírenia jednotlivých vlnových dĺžok. Oneskorenie medzi impulzami je merané v časovej oblasti. Je možné merať na jednej určitej vlnovej dĺžke aj na oblasti vlnových dĺžok. Časové intervaly medzi vysielanými pulzami určujú aj maximálne oneskorenie ktoré je možné zmerať. V prípade, že by bolo zmerané oneskorenie impulzu väčšie ako časový interval medzi impulzami, dôjde k zámene impulzov a meranie by bolo chybné. Výhodou tejto metódy je, že referenčné vlákno nie je potrebné. Jedná





Obr. 2: Charakteristiky celkovej disperzie niektorých typov jedovidových vlákien

sa o veľmi rýchlu metódu, s dĺžkou merania jedného vlákna len niekoľkých sekúnd. Presnosť merania závisí na určení rozstupov medzi impulzami ale taktiež treba myslieť na to, že vplyvom chromatickej disperzie sa jednotlivé impulzy od seba nie len vzdiaľujú ale aj rozťahujú. Toto rozťahovanie môže spôsobiť problémy pri určovaní časovej polohy daného pulzu a teda aj jeho odstupe od druhého pulzu <sup>1</sup>.

Č. kanálu	Frekvencia [GHz]	Vlnová dĺžka [nm]
31	193100	1552,52
32	193200	1551,72
33	193300	1550,92
34	193400	1550,12
35	193500	1549,32
36	193600	1548,51
37	193700	1547,72
38	193800	1546,92
39	193900	1546,12

Tabuľka 1: Tabuľka 100 GHz rozdelenia DWDM kanálov

Typ vlákna	Min $D_\lambda$ [ps/nm · km]	Max $D_\lambda$ [ps/nm · km]
G.652	13,3	18,6
G.653	–	3,5

Tabuľka 2: Tabuľka limitných hodnôt pre vlákna G.652 a G.653 v oblasti 1550 nm

V tab.2 sú uvádzané 2 typy opt. vlákien, ktoré sú v lab. úlohe používané. Vlákno G.652 je štandardné vlákno a G.653 je vlákno s posunutou disperziou.

<sup>1</sup>Text čerpaný z: MENDEZ, Alexis a T. MORSE. *Specialty Optical Fibers Handbook*; CHAUVEL, Gildas, *Dispersion in Optical Fibers*; SENIOR, J. M., *Optical fiber communications: principles and practice*

## ITU-T G.652

Štandard ITU-T G.652 definuje jednoividvé vlákno a je rozdelený na štyri triedy, G.652.A, G.652.B, G.652.C, a G.652.D. Pričom vlákna v prvých dvoch triedach sa v dnešnej dobe zvyčajne nevyužívajú kvôli ich podradnému výkonu pri využití moderných WDM aplikácií. Vlákna G.652.C a G.652.D sú vlákna s redukovanou vodnou špičkou (Zero Water Peak alebo Dry fiber). To im umožňuje fungovanie v oblasti 1310 – 1550 nm, pričom podporujú hrubé multiplexovanie s delením vlnových dĺžok (CWDM). Najmodernejšie a teda aj najvýhodnejšie a najpoužívanejšie vlákno je zatiaľ G.652.D. Disponuje najlepšou ochranou a maximálny investičný návrat.

## ITU-T G.653

Štandard ITU-T G.653 definuje jednoividové vlákna s posunutou disperziou na prenos na veľké vzdialenosti. Sú to vlákna ktoré vykazujú nulovú hodnotu disperzie na vlnovej dĺžke 1550 nm, kde je útlm vlákna najmenší. Štandard obsahuje dve triedy: G.653.A a G.653.B. Obidve vlákna fungujú na už spomínanej vlnovej dĺžke 1550 nm ale je možné ich nasadiť aj na vlnovú dĺžku 1310 nm v prípade, že útlmový koeficient by bol menší ako 0,55 dB/km. Tieto vlákna sú do veľkej miery ovplyvňované šumom ktorý vzniká nelineárnym javom - štvorvlnným zmiešavaním, tento jav sa prejavuje pri použití WDM. Preto sa v dnešnej dobe už v praxi veľmi nenasadzujú.

## Použité prístroje

- Širokopásmovy zdroj opt. žiarenia (SLED)
- Modulátor
- EDFA zosilňovač
- CWDM filter
- MUX/DEMUX modul
- Testované vlákna
- Dvojkanálový fotodetektor
- Osciloskop
- Stabilný zdroj napätia
- Generátor impulzov

# Spracovanie merania

Meno a priezvisko:

Ročník:

ID:

Študijná skupina:

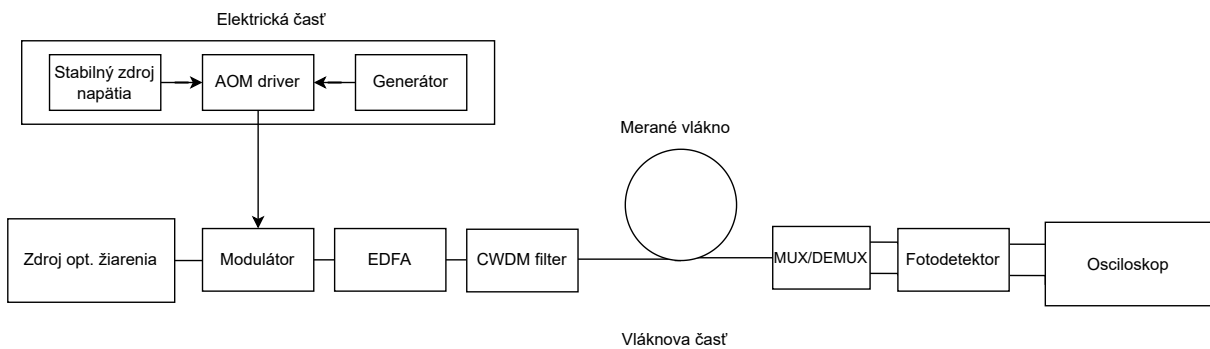
Dátum merania:

Kontroloval:

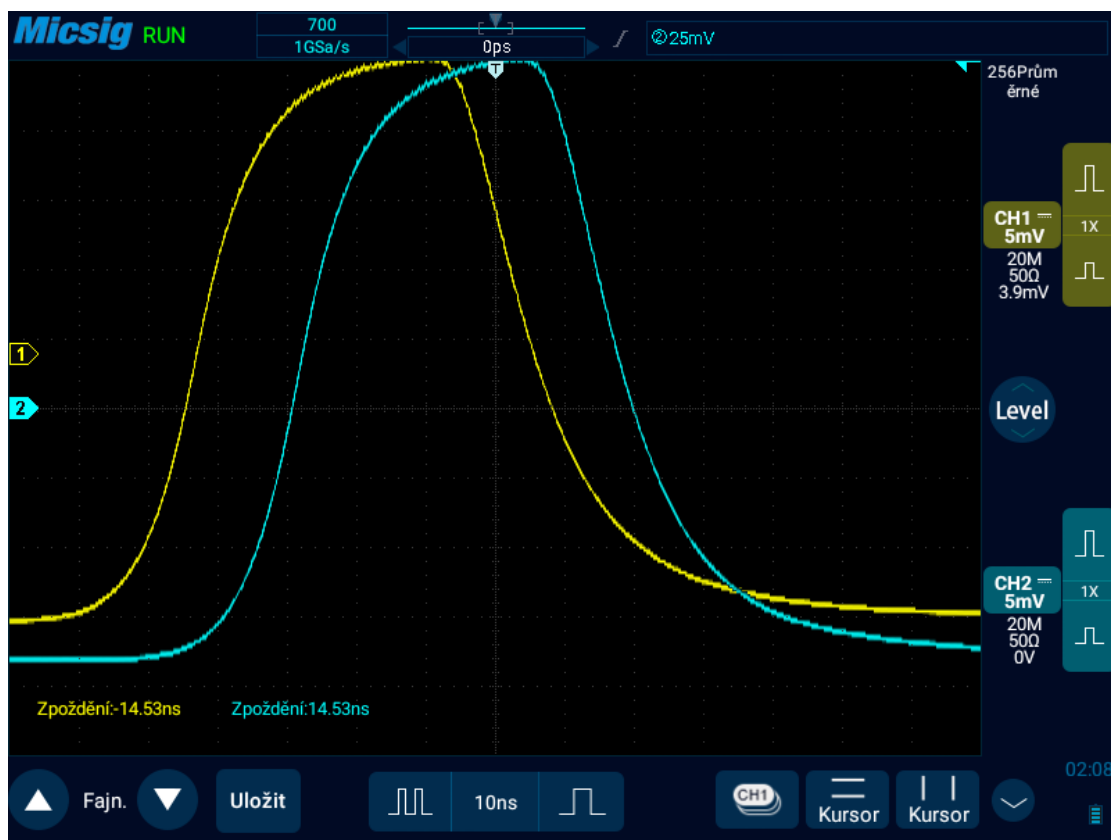
## Postup merania

1. Zapojte meranie podľa schémy, najprv ale bez vlákna.
2. 1550 port z CWDM filtra privedte na DCOM vstup DEMUXu, COM port CWDM filtra pripojte k výstupu EDFA zosilňovača
3. Z DEMUX kanálu D31 vyvedte patch kabel na jeden vstup fotodetektoru, na druhý vstup pripojte kanál D32.
4. Na generátore nastavte:
  - (a) generovanie pulzov (tlačítko pulse)
  - (b) frekvencia = 5 MHz (perióda = 200 ns),
  - (c) amplitúda = 525 mV<sub>PP</sub>,
  - (d) HiLevel = 527,5 mV (Offset = +265 mV<sub>DC</sub>),
  - (e) LoLevel = +2,5 mV,
  - (f) šírka pulzu = 30 ns,
  - (g) strieda = 15%,
  - (h) Edge Time = 5 ns.
5. AOM driver (pravá strana) pripojte na samostatný zdroj napätia (24 V).
6. AOM driver pripojte SMA konektorom (biely kabel, ľavá strana) na výstup generátoru.
7. Na AOM driver (čierny kabel, ľavá strana) pripojte stabilný zdroj napätia s hodnotou 5,66 V.
8. Predtým než optický zdroj zapnete uistite sa že je nastavený minimálny prúd (otočte potenciometrom čo najviac doľava).
9. Pred zapnutím nechajte skontrolovať vyučujúcim.
10. Na optickom zdroji nastavte prúd na 80 mA.
11. Spusťte generovanie impulzov (na generátore "Output").
12. Na osciloskope nastavte časovú základňu 10 ns, vo vertikálnom menu nastavte obmedzenie na 20 M
13. Na osciloskope nastavte max priemerovanie vzorkov (horné menu → *vzorek* → 256 ) a automatické vypočítavanie oneskorenia (horné menu → *meranie* → *oneskorenie*).

14. Na kanály osciloskopu pripojte výstupy fotodetektoru



Obr. 3: Schéma zapojenia



Obr. 4: Príklad vhodne nastaveného osciloskopu

Na osciloskope by ste mali vidieť 2 signály (viď. obr. 4) s rovnakou moduláciou pod ktorými je vypočítavané oneskorenie medzi nimi. Určte hodnotu oneskorenia a zapíšte si ju. Teraz medzi CDWM filter a DEMUX pripojte merané vlákno. Na osciloskope by ste opäť mali vidieť 2 signály, teraz by ale malo dôjsť k zmene oneskorenia, môže sa zväčšiť alebo zmenšiť. Oneskorenie si zapíšte a určte rozdiel oneskorení bez vlákna a po prechode vláknom ako absolútnu hodnotu. Tento rozdiel dosadte do:

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} \quad [ps/nm \cdot km] \quad (3)$$

Tento postup opakujte pre kombináciu všetkých zvyšných kanálov na DEMUXe.

<u>Kanály</u>	<u>Rozostup <math>\Delta\lambda</math></u>	<u>Oneskorenie <math>\Delta\tau</math></u>	<u><math>D_\lambda</math></u>
<u>[-]</u>	<u>[nm]</u>	<u>[ps]</u>	<u>[ps/nm·km]</u>
31-32	0,8		
31-33	1,6		
31-34	2,4		
31-36	4,0		
31-37	4,8		
31-38	5,6		
31-39	6,4		
<u><i>L</i> vlákna [km]</u>		<u>Typ vlákna</u>	
<u>Kanály</u>	<u>Rozostup <math>\Delta\lambda</math></u>	<u>Oneskorenie <math>\Delta\tau</math></u>	<u><math>D_\lambda</math></u>
<u>[-]</u>	<u>[nm]</u>	<u>[ps]</u>	<u>[ps/nm·km]</u>
31-32	0,8		
31-33	1,6		
31-34	2,4		
31-36	4,0		
31-37	4,8		
31-38	5,6		
31-39	6,4		
<u><i>L</i> vlákna [km]</u>		<u>Typ vlákna</u>	

Tabuľka 3: Tabuľky nameraných CD hodnôt

## Záver

## Záver

Táto diplomová práca sa zaoberala detailným rozborom problematiky disperzií v optovláknových prenosoch. Pozornosť bola upriamena hlavne na chromatickú a polarizačnú vidovú disperziu, ich vznik, dôsledky a možnosti merania. Práca je v podstate rozdelená na dva časti, teoretickú a praktickú.

V teoretickej časti sa najprv pojednáva o všeobecných základoch optiky ktoré sa najviac uplatňujú pri prenosoch v optických vláknach a systémoch. Taktiež sú popísané typy optických vlákien podľa štandardu ITU-T. Potom sa venuje chromatickej disperzii, ako vzniká, z čoho pozostáva, ako sa dá kompenzovať. K chromatickej disperzii taktiež patrí kapitola ktorá sa venuje popisu meracích metód tejto disperzii, z ktorých sa metóda oneskorení impulzov uplatní aj v praktickej časti.

Podobne bola popísaná aj polarizačná vidová disperzia. V kapitolách venovaných tejto disperzii sa pojednáva o jej vzniku, parametroch, dôsledkoch, charakteru a význame. Následne sú popísané jednotlivé meracie metódy pre PMD, z ktorých metóda s fixným analyzérrom je vybraná a využitá v praktickom prevedení. V závere teoretickej časti je ešte teoretický rozbor poslednej disperzie vyskytujúcej sa v optických vláknach, menovite vidovej disperzie.

Praktická časť začína návrhom zapojení meracích metód na meranie chromatickej a polarizačnej vidovej disperzie. V týchto návrhoch bola snaha implementovať čo najjednoduchšie zapojenie danej meracej metódy s využitím prípravkov a prístrojov dostupných v laboratóriu prenosových médií na FEKT VUT Brno. Následne boli návrhy pretvorené do praktického merania obidvoch disperzií. Návrhy sa od skutočných zapojení líšia iba v prípade merania chromatickej disperzie.

Následne prebehli merania viacerých optických vlákien pomocou navrhnutých zapojení meracích metód a získané namerané hodnoty boli spracované v tabuľkovej forme a porovnané s teoretickými hodnotami každého vlákna. Pri meraniach sa menili určité parametri zapojení a boli pozorované ich vplyvy na merané hodnoty. Pri štandardných zapojeniach meracích metód každé vlákno vyhovovalo limitným hodnotám.

Po vykonaných meraniach boli na základe získaných skúseností navrhnuté laboratórne úlohy venované problematike chromatickej a polarizačnej vidovej disperzii. Tieto laboratórne úlohy sú určené pre výučbu a prax v oblasti optických komunikácií, prispievajúc k vyššej úrovni vzdelávania a odbornej prípravy študentov v tejto dynamicky sa rozvíjajúcej oblasti.

## Literatúra

- [1] PASCHOTTA, Rüdiger. *Field Guide to Optical Fiber Technology*. 1th ed. Bellingham: SPIE Press, c2010. ISBN 978-0819480903
- [2] MENDEZ, Alexis a T. MORSE. *Specialty Optical Fibers Handbook*. Cambridge: Academic Press, c2007. ISBN 9780123694065
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [6] KOVÁČ, Filip *Reprodukovatelnost a přesnost měření polarizační vidové disperze: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 129 s. Vedúci práce bol Ing. Radim Šifta,
- [7] 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> >
- [8] 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
- [9] FEYNMAN, Richard Phillips; LEIGHTON, Robert B. a SANDS, Matthew. *The Feynman lectures on physics*. New millennium edition. New York: Basic Books, [2010]. ISBN 978-0-465-02414-8.
- [10] COLLETT, E. (2005). *Field guide to polarization*. Bellingham, Wash, SPIE Press.

- [11] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013. ISBN isbn9788024622460.
- [12] DADO, Milan. *Kapitoly z optiky: pre technikov*. Žilina: EDIS, 1998. ISBN isbn80-7100-390-5.
- [13] *Understanding ITU-T Standards for Various Optical Fibers*. Online. In: . 12.4.2021. Dostupné z: <https://community.fs.com/article/itu-t-standards-for-various-optical-fibers.html>. [cit. 2023-12-02].
- [14] BILEK, Maroš. *Polarizace v optickém vlákně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 119 s. Bakalářská práce. Vedúci práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.
- [15] CHAUVEL, Gildas. *Dispersion in Optical Fibers*. 2008. Dostupné z: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Technical-Notes/White-Paper/DispersionOptFibersPMDCD.pdf>
- [16] *Chromatic Dispersion at High Bit Rates*. Online. 2012. ISBN ISBN 978-1-55342-100-9. Dostupné z: <https://www.exfo.com/contentassets/ffd861480032477cb01b18a77e494cf3/>
- [17] AUDET, Francis. *CHROMATIC DISPERSION ANALYSIS METHODS*. Online. 2011. Dostupné z: <https://www.exfo.com/contentassets/483bece798e246ba8aed7fc165f61452/>
- [18] WEIHONG Huang (2007). *Fiber Birefringence Modeling for Polarization Mode Dispersion*. UWSpace. <http://hdl.handle.net/10012/2647>
- [19] HÁJEK, Martin a HOLOMEČEK, Petr. *Chromatická disperze jednovíkových optických vláken a její měření*. 2003, poslední aktualizácia 2003-12- 4.
- [20] 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
- [21] AGRAWAL, Govind P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3rd ed. New York: John Wiley. ISBN 0-471-21571-6.
- [22] GHATAK, A., THYAGARAJAN, K. (1998). *An Introduction to Fiber Optics*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139174770



- [23] PANASCÍ, 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.
- [24] STÍSKAL, Radoslav. Vplyv disperzie v optických vláknach G.652-655 na prenášaný signál pri prenosových rýchlostiach vyšších ako 2,5 Gbit/s. Diplomová práca. Žilina: ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE, 2006.
- [25] SENIOR, J. M. (1992). *Optical fiber communications: principles and practice*. New York, Prentice Hall.
- [26] KUMAR, Arun a Ajoy GHATAK. *Polarization of Light with Applications in Optical Fibers*. 1th edit. Bellingham: SPIE Press, c2011. ISBN 9780819482150
- [27] 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
- [28] 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.
- [29] B. Batagelj, P. Ritoso and T. Korosec, *Measurement of PMD with a Fixed Analyzer Measurement Technique*, Proceedings ELMAR 2006, Zadar, Croatia, 2006, pp. 379-382, doi: 10.1109/ELMAR.2006.329589.
- [30] COLLETT, E. (2005). *Field guide to polarization*. Bellingham, Wash, SPIE Press.
- [31] 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.

## Zoznam symbolov a skratiek

<b>SM</b>	Single-mode
<b>MM</b>	Multi-mode
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>ITU-T</b>	International Telecommunication Union – Telecommunications
<b>CD</b>	Chromatic dispersion
<b>CWDM</b>	Coarse Wavelength division Multiplexing
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing
<b>DWDM</b>	Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>PMF</b>	Polarization Maintaining Fiber
<b>CT</b>	Cross Talk
<b>DSF</b>	Dispersion Shifted Fiber
<b>NZ-DSF</b>	Non-zero Dispersion Shifted Fiber
<b>SOP</b>	State of Polarization
<b>PMD</b>	Polarization Mode Dispersion
<b>DGD</b>	Differential Group Delay
<b>TINTY</b>	Traditional Interferometry Analysis
<b>TINTY</b>	General Interferometry Analysis
<b>POTDR</b>	Polarization Optical Time Domain Reflectometry
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transformation
<b>EDFA</b>	Erbium Doped Fibre Amplifier
<b>DOP</b>	Degree of Polarization
<b>OTDR</b>	Optical Time Domain Reflectometry
<b>AOM</b>	Acousto-Optic modulator
<b>LED</b>	Light Emitting Diode

<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>OSA</b>	Optical Spectrum Analyzer
<b>SLED</b>	Superluminescent Diode
<b>ASE</b>	Amplified spontaneous emission
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio

# Meranie polarizačnej vidovej disperzie

## Cieľ merania

Cieľom toho merania je oboznámiť študentov s **polarizačnou vidovou disperziou (PMD)** a jej vplyvom na prenášaný signál. Študenti si vyskúšajú zapojiť merané vlákno v kombinácii s polarizačným kontrolérom, polarizérom a budú zobrazovať závislosť výkonu na jednotlivých vlnových dĺžkach pomocou optického spektrálneho analyzátoru (OSA). Toto meranie sa nazýva Meranie s fixným analyzátrom.

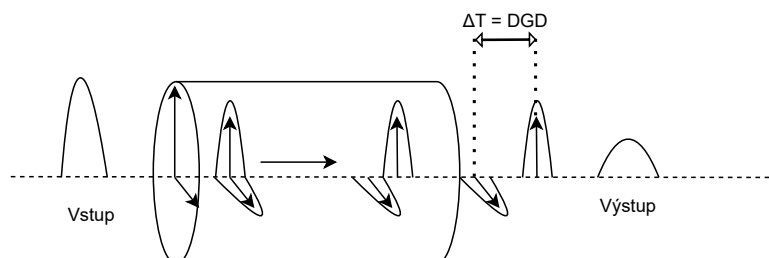
## Zadanie

1. Oboznámiť sa s javom polarizačnej vidovej disperzie.
2. Oboznámiť sa s obsluhou optického spektrálneho analyzátoru.
3. Vykonať 4 merania pre aspoň dve vlákna o rôznej dĺžke.
4. Numericky vypočítajte koeficient PMD z hodnoty DGD získanej z nameranej závislosti pomocou vzorca 3.

## Teoretický rozbor

### Polarizačná vidová disperzia – PMD

Základom tejto disperzie je polarizačný stav svetla. Táto disperzia spôsobuje rozširovanie pulzov, ktoré vzniká dvojlomom vo vnútri vlákna a dokáže takto byť obmedzujúcim faktorom pri optickom vysokorýchlostom prenose signálu. Je náhodného charakteru. Tento charakter nadobúda hlavne kvôli intrinzičným (vplyvy vnútri vlákna, napr. stresové prvky, nehomogenity, geometrickosť jadra) aj extrinzičným vplyvom (vplyvy spôsobené zaobchádzaním s vláknom, ohýbanie, stočenie). Tieto vplyvy spôsobujú vo vyrobených vláknach rôznorodosť skupinovej rýchlosti polarizačných vidov a stavov. V dokonale homogénnom vlákne sa vidy vo vlákne šíria rovnakou rýchlosťou (tzv. degenerované vidy), v skutočnosti ale dvojlomom túto degeneráciu značne obmedzí alebo úplne odstráni a vidy sa potom šíria rôznymi rýchlosťami. Výsledkom je potom polarizačná vidová disperzia.



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

## PMD na krátke vzdialenosti - slabá väzba

V krátkych vláknach je možné považovať hodnotu dvojlomu za konštatnú, to isté platí aj pre jeho smer. To spôsobuje slabú väzbu medzi vidmi (mode coupling), takže výkon naviazaný v jednom vide sa ani čiastočne neviaže do druhého vidu. Vďaka tejto skutočnosti je DGD málo závislé alebo úplne nezávislé na vlnovej dĺžke. Koeficient PMD je v tomto prípade definovaný ako:

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{L} \quad [ps/km] \quad (1)$$

kde

- $L$  je dĺžka trasy,
- $\Delta\tau$  je skupinové oneskorenie signálu vo vlákne.

Pre polarizáciu v krátkych vláknach platí, že nadobúda postupne všetky polarizačné stavy za sebou a pravidelne, hovoríme že sa nevyskytuje polarizačná nepravidelnosť.

## PMD na dlhé vzdialenosti - silná väzba

Pretože na dlhé vlákna, v porovnaní s krátkymi vláknami, pôsobí zvyčajne väčšie množstvo vnútorného stresu, ohybov, skrutov a teplotných zmien, dochádza k výrazným zmenám dvojlomu vlákna. Mení sa jeho veľkosť aj smer. Dvojlom už potom nie je aditívny a podobný model aký bol uplatnený pri krátkych vláknach už nemožno použiť. Hodnota PMD sa už nemení lineárne s dĺžkou vlákna. Mení sa s druhou odmocninou dĺžky vlákna. Polarizačné stavy už nenasledujú postupne za sebou a pravidelne ako tomu je pri krátkych vláknach. PMD koeficient pre dlhé vlákna je definovaný ako:

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad [ps/\sqrt{km}] \quad (2)$$

## Diferenciálne skupinové oneskorenie vidov – DGD

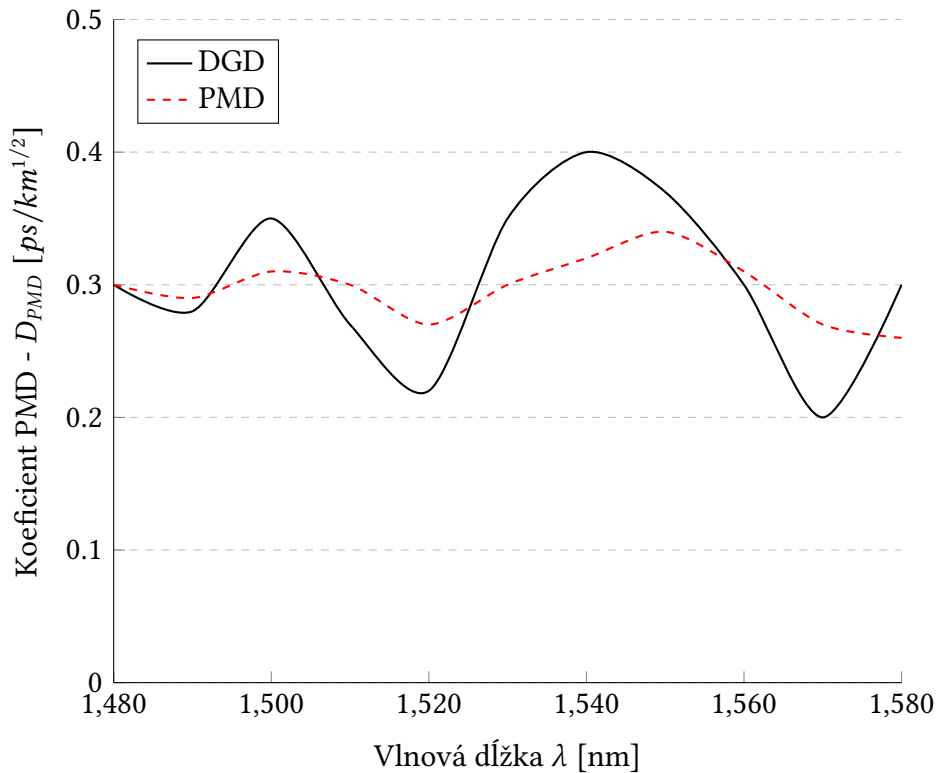
Je to časový rozstup medzi polarizačnými vidmi, taktiež je to miera PMD daného vlákna. DGD parameter je závislý na vlnovej dĺžke a teplote, a taktiež sa mení už len pri manuálnom zaobchádzaní s vláknom, pretože to ovplyvňuje dvojlom. Mení sa v čase a býva označovaný ako  $t_g$ . Primerná hodnota DGD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

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

## Meracia metóda - metóda s fixným analyzérrom

Jedná sa o v celku jednoduché meranie vhodné na laboratórne merania. PMD sa zobrazuje vo frekvenčnej doméne. Pozostáva zo širokopásmového zdroja optického žiarenia, polarizačného kontroléru, testovaného vlákna, in-line polarizéru ktorý je využitý ako analyzér a optického spektrálneho analyzátoru. Do zapojenia je implementovaný polarizačný kontrolér ktorý



Obr. 2: DGD závislosť na vlnovej dĺžke

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	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$

slúži na zmenu polarizácie a ovplyvňovanie kolísania výkonu. Najmenšia merateľná hodnota PMD závisí na rozsahu vlnových dĺžok zdroja. Najväčšia merateľná hodnota závisí na rozlíšení optického spektrálneho analyzátoru. Pomocou extrémov (miním a maxím kolísania výkonu) na zobrazenej závislosti je možné dopočítať hodnotu DGD, pomocou nej následne aj koeficient PMD.

$$DGD = \frac{k \cdot N_e \cdot \lambda_{start} \cdot \lambda_{stop}}{2 \cdot c \cdot (\lambda_{stop} - \lambda_{start})} \quad [s] \quad (3)$$

## Použitú prístroje

- Zdroj optického žiarenia (SLED)
- Polarizačný kontrolér
- Merané vlákno

- Polarizér
- Optický spektrálny analyzátor

# Spracovanie merania

Meno a priezvisko:

Ročník:

ID:

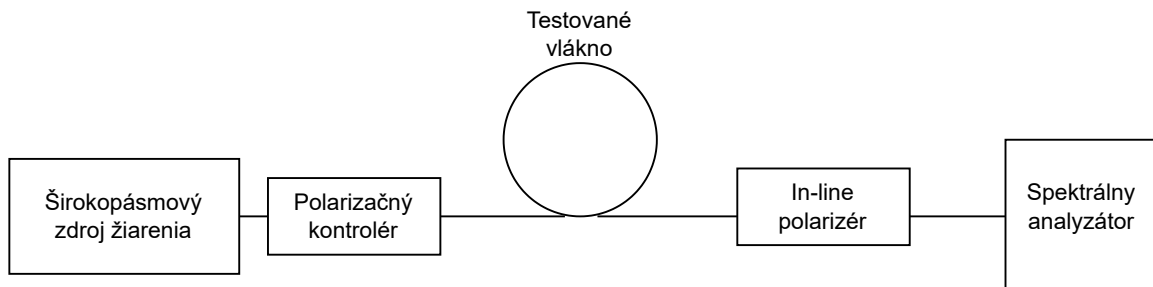
Študijná skupina:

Dátum merania:

Kontroloval:

## Postup merania

1. Zapojte meranie podľa schémy.
2. Predtým než zdroj zapnete uistite sa že je nastavený minimálny prúd (otočte potenciometrom čo najviac doľava)
3. Zapnite optický spektrálny analyzátor (OSA) a zdroj
4. Na zdroji nastavte prúd na 80 mA
5. Na OSA zapnite analyzačný režim OSA
6. Spusťte prvotný scan
7. Natačaním platničiek na polarizačnom kontroléri zobrazte na OSA vhodnú závislosť na výpočet DGD



Obr. 3: Zapojenie pre meranie PMD metódou s fixným analyzátorom

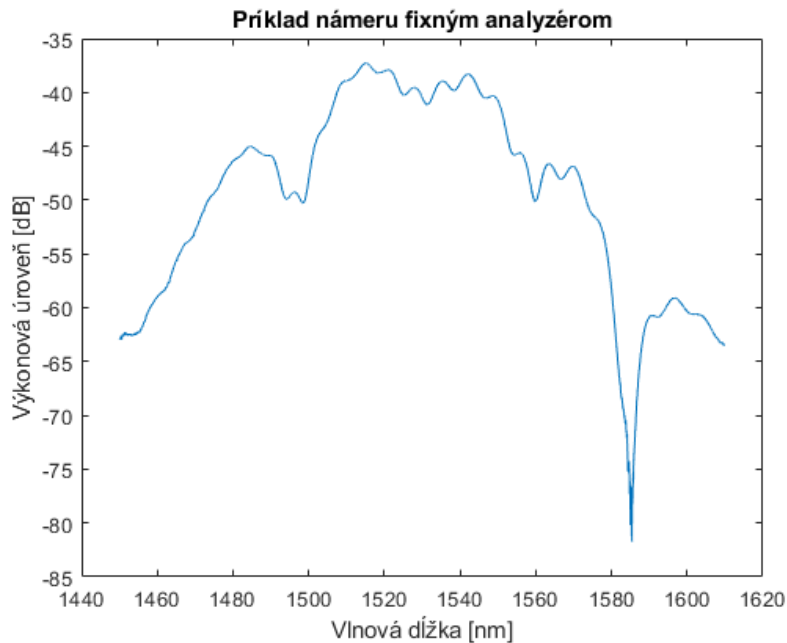
V hornej časti obrazovky OSA môžete meniť rozlíšenie skenovania a tým teda aj ovplyvňovať dobu skenovania. Nastavte rozlíšenie na 200 nm/s a režim skenovania na kontinuálny. Otačaním platničiek polarizačného kontroléru nájdete vhodnú závislosť na ktorej sa prejavuje zvlnenie optického výkonu v závislosti na vlnovej dĺžke spôsobené spojovaním polarizačných vidov. Po nájdení závislosti na ktorej je zhruba 10-20 zjavných extrémov, zvolte rozlíšenie skenovania na 0,5 nm/s a režim skenovania na "Single". Takto nastavené skenovanie bude trvať približne 3-4 minúty. Po zobrazení závislosti spočítajte počet extrémov. Týmto spôsobom prevedte merania na šírke okna 70, 80, 90 a 100 nm. Pre každú zobrazenú šírku vypočítajte hodnotu DGD pomocou vzorca:

$$DGD = \frac{k \cdot N_e \cdot \lambda_{start} \cdot \lambda_{stop}}{2 \cdot c \cdot (\lambda_{stop} - \lambda_{start})} \quad [s] \quad (4)$$



kde

- $k$  je väzobná konštanta vidov,  $k = 0,82$  (pre dlhé vlákna),  $k = 1$  (pre krátke vlákna)
- $N_e$  je počet extrémov (miním a maxím) závislosti zobrazenej na OSA
- $\lambda_{start}$  a  $\lambda_{stop}$  sú hraničné vlnové dĺžky zobrazené na OSA
- $c$  je rýchlosť svetla



Obr. 4: Príklad vhodnej výkonovej závislosti

Meranie vykonajte aspoň na dvoch vláknoch, jednom krátkom ( $<10$  km) a jednom dlhom vlákne ( $>20$  km). Taktiež premerajte vlákna pri zobrazení “nesprávnej” závislosti (počet extrémov nedostačujúci alebo príliš veľký) ale na správnej veľkosti zobrazovacieho okna (SPAN = 70 – 100 nm). A naopak, pri dosiahnutí optimálneho počtu extrémov ale na nedostačujúcom veľkosti okna (SPAN  $< 70$  nm). Z nameraných hodnôt v tabuľkách vyveďte krátky záver merania.

### Príklad výpočtu

$$DGD = \frac{k \cdot N_e \cdot \lambda_{start} \cdot \lambda_{stop}}{2 \cdot c \cdot (\lambda_{stop} - \lambda_{start})} = \frac{0,82 \cdot 14 \cdot 1460 \cdot 10^{-9} \cdot 1520 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 70 \cdot 10^{-9}} = 0,708 \text{ ps} \quad (5)$$

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{DGD}{\sqrt{L}} = \frac{0,708}{\sqrt{20}} = 0,158 \text{ ps}/\sqrt{km} \quad (6)$$

<u>SPAN</u>	$N_e$	DGD	$D_{PMD}$	<u>SPAN</u>	$N_e$	DGD	$D_{PMD}$
[nm]	[-]	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]	[nm]	[-]	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]
60	14	0,708	0,158	60	13	0,801	0,115
90	18	0,619	0,138	90	16	0,671	0,096
120	23	0,604	0,135	120	20	0,641	0,092
140	26	0,592	0,133	140	23	0,640	0,091
<u>L vlákna [km]</u>	20	LIMIT	0,2	<u>L vlákna [km]</u>	7	LIMIT	0,5

Tabuľka 3: Tabuľky nameraných PMD hodnôt

<u>SPAN</u>	$N_e$	DGD	$D_{PMD}$	<u>SPAN</u>	$N_e$	DGD	$D_{PMD}$
[nm]	[-]	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]	[nm]	[-]	[ps]	[ps/ $\sqrt{km}$ ]
60	24	1,48	0,213	20	10	1,8	0,257
90	32	1,34	0,192	30	11	1,33	0,19
120	34	1,09	0,156	40	15	1,37	0,196
140	36	1,00	0,143	50	19	1,4	0,2
<u>L vlákna [km]</u>	20	LIMIT	0,2	<u>L vlákna [km]</u>	20	LIMIT	0,2

Tabuľka 4: Tabuľky nameraných PMD hodnôt pri nesprávnych parametroch merania

## Záver

Pomocou meracej metódy s fixným analyzárom boli premerané 2 vlákna o rôznych dĺžkach (jedno krátke a jedno dlhé). Pri nastavení polarizačného kontroléru podľa požiadaviek správneho nastavenia merania boli namerané hodnoty PMD v oblasti 1460 – 1600 nm vyhovujúce, teda vlákna spĺňajú ich stanovené limitné hodnoty. Pozornosť taktiež treba upriamiť na klesajúci trend koeficientu PMD so zvyšujúcim sa zobrazovacím oknom. V druhej časti merania bolo premerané vlákno s nesprávnymi parametrami meracej metódy a boli obsiahnuté hodnoty diametrálne odlišné od hodnôt obsiahnutých pri dodržaní správneho meracieho postupu. Pri niektorých nastaveniach bola limitná hodnota značne prekročená.

# Meranie chromatickej disperzie

## Cieľ merania

Cieľom toho merania je oboznámiť študentov s **chromatickou disperziou (CD)** a jej vplyvom na prenášaný signál. Študenti si vyskúšajú zapojiť merané vlákna v kombinácii s modulátorom, MUX/DEMUX modulom a osciloskopom. Toto meranie sa nazýva Meranie oneskorenia impulzov.

## Zadanie

1. Oboznámiť sa s javom chromatickej disperzie.
2. Oboznámiť sa so správnym nastavením parametrov jednotlivých komponentov zapojenia.
3. Premerať 2 typy optických vlákien a určiť ich koeficienty chromatickej disperzie v oblasti 1550 nm.

## Teoretický rozbor

### Chromatická disperzia – CD

Pretože žiaden zdroj optického žiarenia nie je dokonalo monochromatický, žiarenie ktoré sa prenáša vláknom obsahuje *spektrum* vlnových dĺžok. Tieto vlnové dĺžky sa vo vlákne šíria rôznymi rýchlosťami.

Materiálová disperzia sa prejavuje, pretože index lomu kremíka sa mení s vlnovou dĺžkou. Svetlo ktoré je prenášané vláknom je spomalené o hodnotu  $1/n$ , kde  $n$  je index lomu. Vlnovodová disperzia závisí na disperzných vlastnostiach vlnovodu. Tým sa rozumie geometria vidu a aj pomer polomer jadra vlákna k indexu lomu. Je spôsobovaná zmenami rozloženia elektrického poľa optického vidu na určitej vzdialenosti. Zmena poľa závisí na geometrii vlákna. Materiálová a vlnovodová disperzia spolu tvoria chromatickú disperziu, viď obr. 1. Preto celková chromatická disperzia môže mať pozitívnu alebo negatívnu hodnotu.

Chromatická disperzia je definovaná ako rozširovanie svetelného impulzu v optickom vlákne. Toto rozširovanie je spôsobené tým, že jednotlivé vlnové dĺžky, z ktorých sa skladá svetelné spektrum zdroja, majú rôzne skupinové rýchlosti. Skupinové oneskorenie  $\tau$  je čas ktorý je potrebný na to aby svetelný impulz prešiel jednotku dĺžky vlákna. Je funkciou vlnovej dĺžky a udáva sa v jednotkách [ps/km]. Dá sa vypočítať ako:

$$\tau = \frac{1}{c} \cdot \left( n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad [ps/km] \quad (1)$$

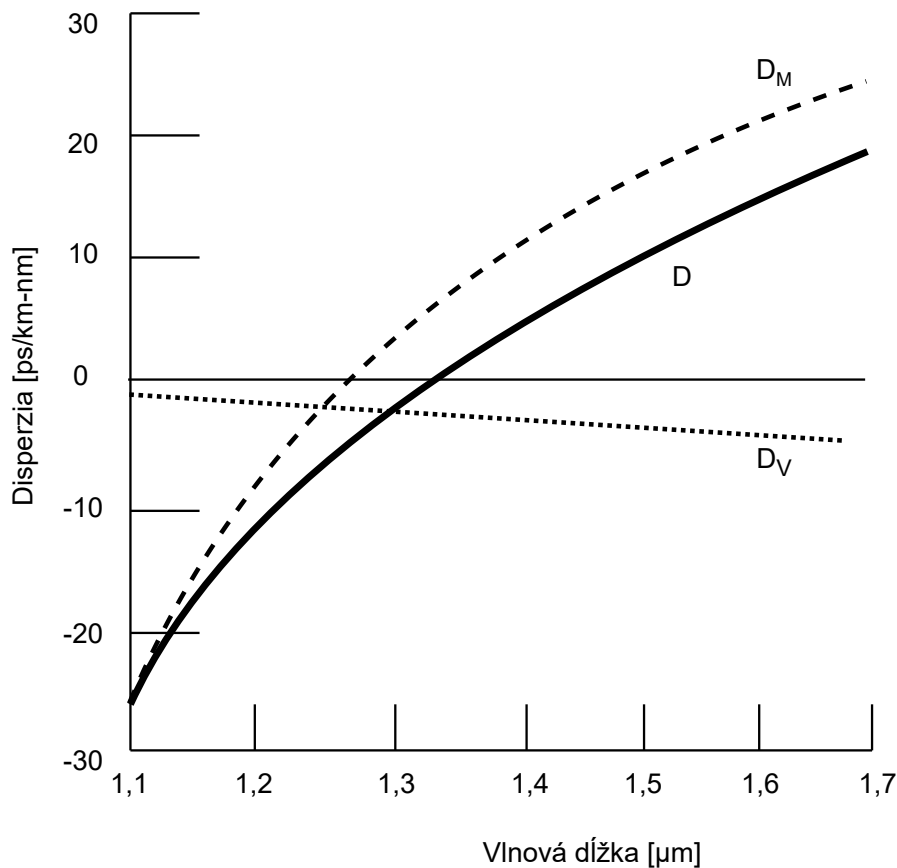
kde

- $c$  je rýchlosť svetla,
- $n$  je index lomu,
- $\lambda$  je vlnová dĺžka.

Koeficient chromatickej disperzie udáva ako sa mení skupinové oneskorenie svetelného impulzu v jednotke dĺžky vlákna spôsobené zmenou vlnovej dĺžky. Koeficient je definovaný ako:

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \cdot d\tau/d\lambda \quad [\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}] \quad (2)$$

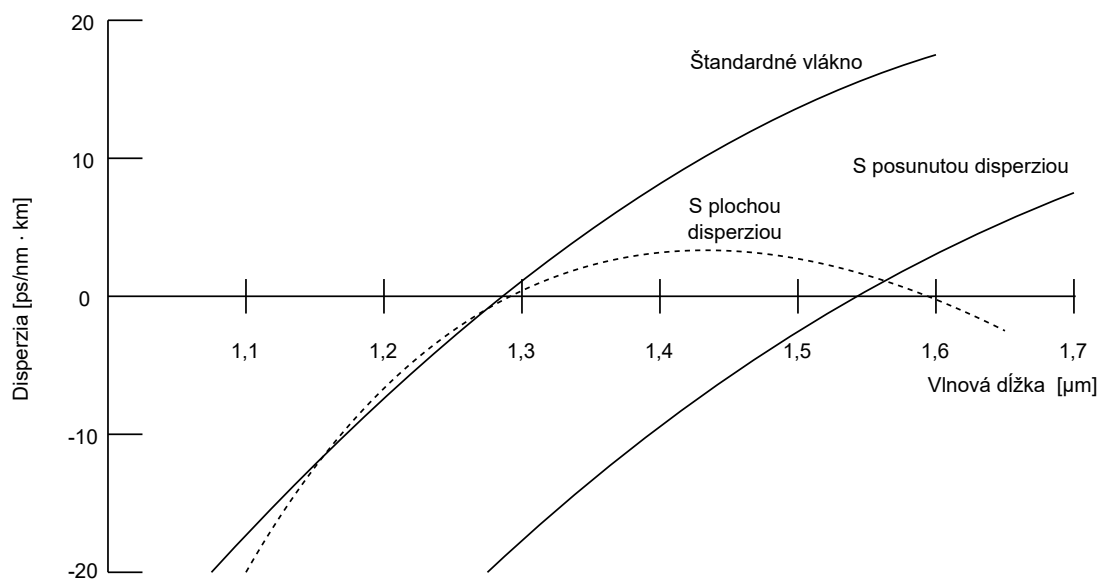
Existujú vlnové dĺžky pri ktorých sa chromatická disperzia neprejaví, takú vlnovú dĺžku označujeme ako *vlnová dĺžka nulovej chromatickej disperzie*. Všetky vyššie spomenuté parametre sa bežne nachádzajú v katalógoch výrobcov optických vlákien.



Obr. 1: Zobrazenie celkovej chromatickej disperzie  $D$ , materiálovej disperzie  $D_M$  a vlnovodovej disperzie  $D_V$

## Meracia metóda - metóda oneskorenia impulzov

Impulzy rôznych vlnových dĺžok sú do vlákna vysielané v presne stanovených časových intervaloch. Meria sa rozdiel časových intervalov na vstupe (pred prechodom cez vlákno) a na výstupe (po prechode cez vlákno). Koeficient chromatickej disperzie je potom vypočítaný pomocou zmeraného oneskorenia spôsobeného rôznymi rýchlosťami šírenia jednotlivých vlnových dĺžok. Oneskorenie medzi impulzami je merané v časovej oblasti. Je možné merať na jednej určitej vlnovej dĺžke aj na oblasti vlnových dĺžok. Časové intervaly medzi vysielanými pulzami určujú aj maximálne oneskorenie ktoré je možné zmerať. V prípade, že by bolo zmerané oneskorenie impulzu väčšie ako časový interval medzi impulzami, dôjde k zámene impulzov a meranie by bolo chybné. Výhodou tejto metódy je, že referenčné vlákno nie je potrebné. Jedná



Obr. 2: Charakteristiky celkovej disperzie niektorých typov jedovidových vlákien

sa o veľmi rýchlu metódu, s dĺžkou merania jedného vlákna len niekoľkých sekúnd. Presnosť merania závisí na určení rozstupov medzi impulzami ale taktiež treba myslieť na to, že vplyvom chromatickej disperzie sa jednotlivé impulzy od seba nie len vzdiaľujú ale aj rozťahujú. Toto rozťahovanie môže spôsobiť problémy pri určovaní časovej polohy daného pulzu a teda aj jeho odstupe od druhého pulzu <sup>1</sup>.

Č. kanálu	Frekvencia [GHz]	Vlnová dĺžka [nm]
31	193100	1552,52
32	193200	1551,72
33	193300	1550,92
34	193400	1550,12
35	193500	1549,32
36	193600	1548,51
37	193700	1547,72
38	193800	1546,92
39	193900	1546,12

Tabuľka 1: Tabuľka 100 GHz rozdelenia DWDM kanálov

Typ vlákna	Min $D_\lambda$ [ps/nm · km]	Max $D_\lambda$ [ps/nm · km]
G.652	13,3	18,6
G.653	–	3,5

Tabuľka 2: Tabuľka limitných hodnôt pre vlákna G.652 a G.653 v oblasti 1550 nm

V tab.2 sú uvádzané 2 typy opt. vlákien, ktoré sú v lab. úlohe používané. Vlákno G.652 je štandardné vlákno a G.653 je vlákno s posunutou disperziou.

<sup>1</sup>Text čerpaný z: MENDEZ, Alexis a T. MORSE. *Specialty Optical Fibers Handbook*; CHAUVEL, Gildas, *Dispersion in Optical Fibers*; SENIOR, J. M., *Optical fiber communications: principles and practice*

## ITU-T G.652

Štandard ITU-T G.652 definuje jednoividvé vlákno a je rozdelený na štyri triedy, G.652.A, G.652.B, G.652.C, a G.652.D. Pričom vlákna v prvých dvoch triedach sa v dnešnej dobe zvyčajne nevyužívajú kvôli ich podradnému výkonu pri využití moderných WDM aplikácií. Vlákna G.652.C a G.652.D sú vlákna s redukovanou vodnou špičkou (Zero Water Peak alebo Dry fiber). To im umožňuje fungovanie v oblasti 1310 – 1550 nm, pričom podporujú hrubé multiplexovanie s delením vlnových dĺžok (CWDM). Najmodernejšie a teda aj najvýhodnejšie a najpoužívanejšie vlákno je zatiaľ G.652.D. Disponuje najlepšou ochranou a maximálny investičný návrat.

## ITU-T G.653

Štandard ITU-T G.653 definuje jednoividové vlákna s posunutou disperziou na prenos na veľké vzdialenosti. Sú to vlákna ktoré vykazujú nulovú hodnotu disperzie na vlnovej dĺžke 1550 nm, kde je útlm vlákna najmenší. Štandard obsahuje dve triedy: G.653.A a G.653.B. Obidve vlákna fungujú na už spomínanej vlnovej dĺžke 1550 nm ale je možné ich nasadiť aj na vlnovú dĺžku 1310 nm v prípade, že útlmový koeficient by bol menší ako 0,55 dB/km. Tieto vlákna sú do veľkej miery ovplyvňované šumom ktorý vzniká nelineárnym javom - štvorvlnným zmiešavaním, tento jav sa prejavuje pri použití WDM. Preto sa v dnešnej dobe už v praxi veľmi nenasadzujú.

## Použité prístroje

- Širokopásmovy zdroj opt. žiarenia (SLED)
- Modulátor
- EDFA zosilňovač
- CWDM filter
- MUX/DEMUX modul
- Testované vlákna
- Dvojkanálový fotodetektor
- Osciloskop
- Stabilný zdroj napätia
- Generátor impulzov

# Spracovanie merania

Meno a priezvisko:

Ročník:

ID:

Študijná skupina:

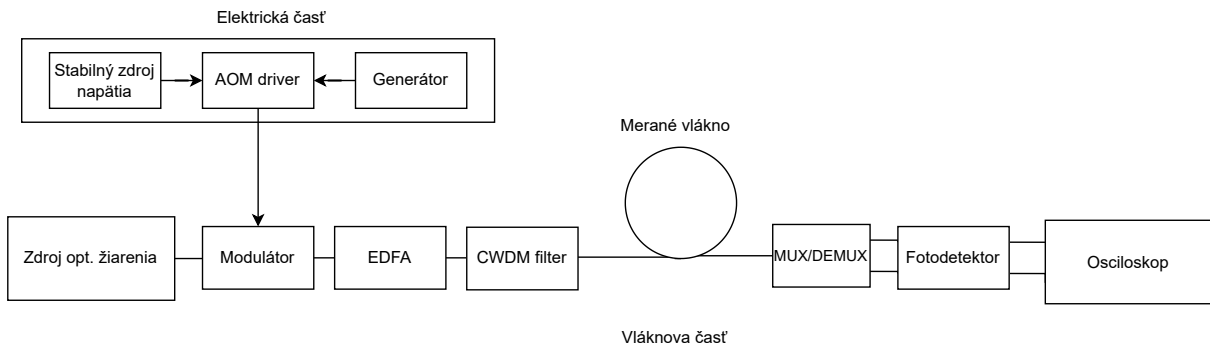
Dátum merania:

Kontroloval:

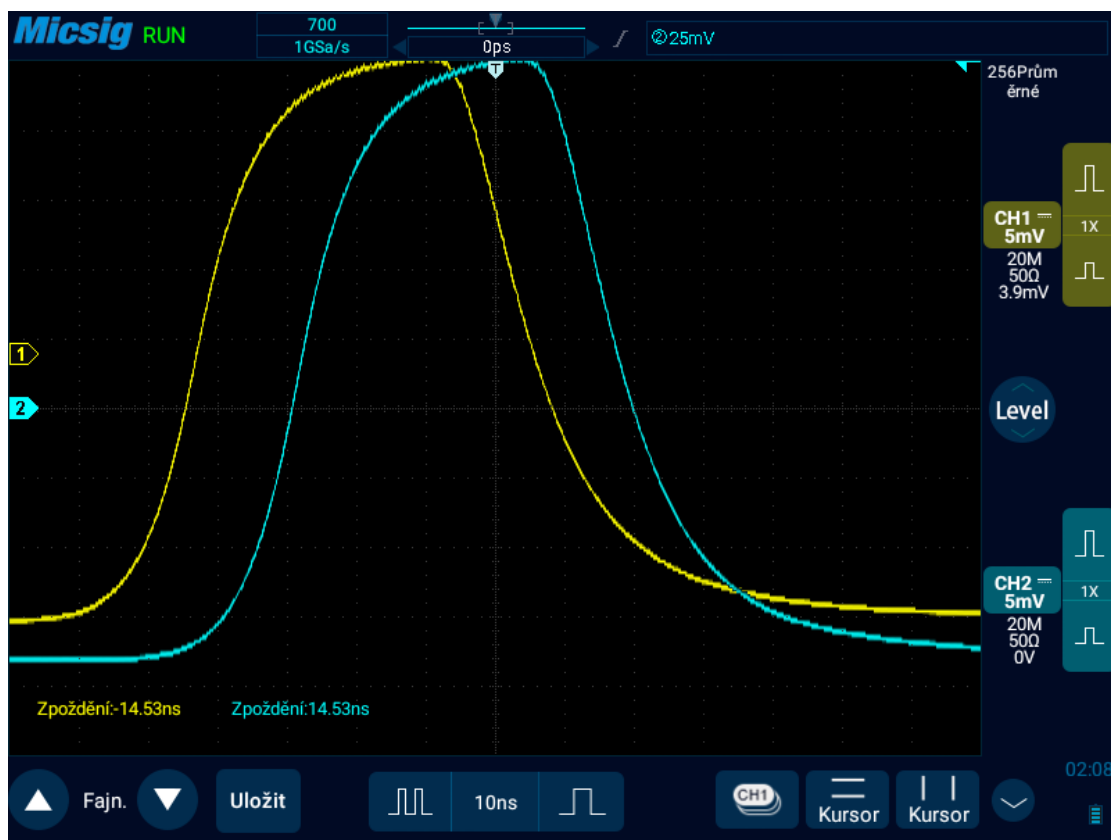
## Postup merania

1. Zapojte meranie podľa schémy, najprv ale bez vlákna.
2. 1550 port z CWDM filtra privedte na DCOM vstup DEMUXu, COM port CWDM filtra pripojte k výstupu EDFA zosilňovača
3. Z DEMUX kanálu D31 vyvedte patch kabel na jeden vstup fotodetektoru, na druhý vstup pripojte kanál D32.
4. Na generátore nastavte:
  - (a) generovanie pulzov (tlačítko pulse)
  - (b) frekvencia = 5 MHz (perióda = 200 ns),
  - (c) amplitúda = 525 mV<sub>PP</sub>,
  - (d) HiLevel = 527,5 mV (Offset = +265 mV<sub>DC</sub>),
  - (e) LoLevel = +2,5 mV,
  - (f) šírka pulzu = 30 ns,
  - (g) strieda = 15%,
  - (h) Edge Time = 5 ns.
5. AOM driver (pravá strana) pripojte na samostatný zdroj napätia (28 V).
6. AOM driver pripojte SMA konektorom (biely kabel, ľavá strana) na výstup generátoru.
7. Na AOM driver (čierny kabel, ľavá strana) pripojte stabilný zdroj napätia s hodnotou 5,66 V.
8. Predtým než optický zdroj zapnete uistite sa že je nastavený minimálny prúd (otočte potenciometrom čo najviac doľava).
9. Pred zapnutím nechajte skontrolovať vyučujúcim.
10. Na optickom zdroji nastavte prúd na 80 mA.
11. Spusťte generovanie impulzov (na generátore "Output").
12. Na osciloskope nastavte časovú základňu 10 ns, vo vertikálnom menu nastavte obmedzenie na 20 M
13. Na osciloskope nastavte max priemerovanie vzorkov (horné menu → *vzorek* → 256 ) a automatické vypočítavanie oneskorenia (horné menu → *meranie* → *oneskorenie*).

14. Na kanály osciloskopu pripojte výstupy fotodetektoru



Obr. 3: Schéma zapojenia



Obr. 4: Príklad vhodne nastaveného osciloskopu

Na osciloskope by ste mali vidieť 2 signály (viď. obr. 4) s rovnakou moduláciou pod ktorými je vypočítavané oneskorenie medzi nimi. Určte hodnotu oneskorenia a zapíšte si ju. Teraz medzi CDWM filter a DEMUX pripojte merané vlákno. Na osciloskope by ste opäť mali vidieť 2 signály, teraz by ale malo dôjsť k zmene oneskorenia, môže sa zväčšiť alebo zmenšiť. Oneskorenie si zapíšte a určte rozdiel oneskorení bez vlákna a po prechode vláknom ako absolútnu hodnotu. Tento rozdiel dosadte do:

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} \quad [ps/nm \cdot km] \quad (3)$$

Tento postup opakujte pre kombináciu všetkých zvyšných kanálov na DEMUXe.



## Príklad výpočtu

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} = \frac{1}{7} \cdot \frac{20}{1,6} = 1,786 \text{ ps/nm} \cdot \text{km} \quad (4)$$

Kanály	Rozostup $\Delta\lambda$	Oneskorenie $\Delta\tau$	$D_\lambda$
[-]	[nm]	[ps]	[ps/nm·km]
31-32	0,8	315	19,68
31-33	1,6	550	17,19
31-34	2,4	800	16,67
31-36	4,0	1250	15,63
31-37	4,8	1580	16,45
31-38	5,6	1727	15,41
31-39	6,4	1950	15,23
<i>L vlákna [km]</i>	20	Typ vlákna	G.652.D
Kanály	Rozostup $\Delta\lambda$	Oneskorenie $\Delta\tau$	$D_\lambda$
[-]	[nm]	[ps]	[ps/nm·km]
31-32	0,8	20	3,57
31-33	1,6	20	1,79
31-34	2,4	40	2,38
31-36	4,0	90	3,21
31-37	4,8	30	0,89
31-38	5,6	37	0,94
31-39	6,4	27	0,60
<i>L vlákna [km]</i>	7	Typ vlákna	G.653.B

Tabuľka 3: Tabuľky nameraných CD hodnôt

## Záver

Meracou metódou oneskorenia impulzov boli namerané hodnoty chromatickej disperzie pre 2 typy vlákien o rôznych dĺžkach. Bolo pozorované narastajúce oneskorenie medzi impulzami na rôznych vlnových dĺžkach a tomu korešpondujúca zmena hodnoty CD. Meralo sa v oblasti 1546,12 – 1553,33 nm, v tejto oblasti hodnota CD pomaly rastie so zvyšujúcou sa hodnotou vlnovej dĺžky. Hodnoty disperzie sa zhodujú s teoretickými hodnotami týchto vlákien, a ani jedno vlákno limitnú hodnotu nepresiahlo.