

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Emulátor polarizační vidové disperze v optických sítích

Bc. Tomáš Ficnar

Vedoucí práce: prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Specialista: Ing. Jan Bohata, Ph.D.

Studijní program: Elektronika a komunikace

Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ficnar** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **466137**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav:
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Fotonika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Emulátor polarizační vidové disperze v optických sítích

Název diplomové práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

V rámci diplomové práce analyzujte vlivy polarizační vidové disperze (PMD) v optických sítích. V dalším kroku navrhnete a sestrojíte emulátor PMD pro účely testování optických sítí a měřicí aparatury. Zaměřte se na realizaci emulátoru s Maxwellovým rozložením diferenciálního skupinového zpoždění tvořeného z řady úseků vysoce dvojlomných vláken tak, aby co výsledná přenosová charakteristika nejvíce odpovídala statistice PMD v reálných optických trasách. Proveďte experimentální proměření a charakterizaci dílčích komponent i celkového emulátoru PMD.
Specialista: Ing. Jan Bohata, Ph.D.

Seznam doporučené literatury:

- [1] R. Hui , M. O'Sullivan, „Fiber Optic Measurement Techniques”, Academic Press, 2009.
[2] J. Bohata, J. Jaros, S. Pisarik, S. Zvanovec, M. Komanec, Long-term PMD Evolution and Accelerated Aging in Old Optical Cables, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 29, no. 5, pp.519-522, 2017.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **24.01.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Ailing Zhong za výpomoc při svařování vláken.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 19. května 2022

Abstrakt

Tato práce se zabývá účinky polarizační vidové disperze (PMD) na optické sítě a realizací emulátoru PMD za pomoci polarizačních kontrolérů a svařených úseků polarizaci zachovávajících vláken.

Klíčová slova: polarizační vidová disperze, PMD, emulátor, disperze, polarizaci zachovávající vlákna, PMF, polarizační kontrolér

Vedoucí práce: prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Abstract

This thesis deals with problematic effects polarization mode dispersion (PMD) has on optical networks. Realization of PMD emulator with the help of polarization maintaining fibers and polarization controllers is described.

Keywords: polarization modal dispersion, PMD, emulator, dispersion, polarization maintaining fiber, PMF, polarization controller

Title translation: Polarization mode dispersion emulator in optical networks

Obsah

1 Úvod	1	4.3 PM vlákno dlouhé 7 m se třemi svary	18
2 Polarizace světla	3	4.4 Tři 7 m dlouhé PM vlákna za sebou	19
2.1 Stokesovy parametry a Poincareho koule	4	4.5 PM vlákno dlouhé 10 metrů se čtyřmi svary	20
2.2 Polarizační vidová disperze	5	4.6 Kaskáda tří úseků PM vláken se svary	20
2.3 Vliv PMD na přenosové vlastnosti	7	4.7 PM vlákno dlouhé 5 metrů se třemi svary	21
2.4 Polarizaci zachovávající vlákna . .	8	4.8 PM vlákno dlouhé 10 metrů se šesti svary	22
2.5 PMD emulátory a PMD zdroje . .	9	4.9 Druhá kaskáda ze všech předchozích sekcí	23
3 Metody měření PMD	11	4.10 Druhá kaskáda bez použití PC	24
3.1 Metoda fixního analyzátoru	11	5 Měření charakteristik PMD emulátoru	25
3.2 Metoda Jonesovy matice (JME)	12	5.1 Časová a teplotní závislost PMD	25
3.3 Interferometrická metoda TINTY a GINTY	13	5.2 Vliv polarizačních kontrolérů mezi sekcemi PM vláken	31
4 Realizace PMD emulátoru	15	5.3 Měření a porovnání vlastností s emulátorem PE4200	34
4.1 Samostatné PM vlákno dlouhé 7 m	15	5.4 Vliv PMD na BER systému GBd NRZ	36
4.2 PM vlákno dlouhé 7 m se dvěma svary	16		

5.5 Vliv PMD na BER systému 28,9 GBd PAM4	39
5.6 Porovnání PMD emulátoru s reálnou trasou	40
6 Závěr	43
Literatura	45

Obrázky

2.1 Tři typy polarizací: lineární, kruhová a eliptická [1]	4	3.4 PMD analyzátor FTB5500	14
2.2 Poincareho koule [1]	5	3.5 Zdroj záření pro PMD analyzátor FLS5834A	14
2.3 Základní polarizační módy [1]	5	3.6 Spektrum zdroje záření FLS5834A	14
2.4 Závislost DGD na vlnové délce [4]	6	4.1 Konfigurace trasy 7metrového PM vlákna	15
2.5 Maxwellovo rozložení DGD [1]	7	4.2 Interferogram trasy 7metrového PM vlákna	16
2.6 Profil PM vlákna "panda"	8	4.3 Výsledky 7 m PM vlákna	16
2.7 Profil indexu lomu podél pomalé osy	8	4.4 Konfigurace trasy 7metrového PM vlákna se dvěma svary	16
2.8 Další typy PM vláken	9	4.5 Odhad úhlu svaru a jeho útlumu	17
2.9 Jednoduchý zdroj PMD [1]	10	4.6 Detail jednoho z provedených svarů	17
2.10 Jednoduchý emulátor PMD [1]	10	4.7 Interferogram trasy 7metrového PM vlákna se dvěma svary	17
2.11 Jednoduchý emulátor PMD s polarizačními kontroléry [1]	10	4.8 Konfigurace trasy 7metrového PM vlákna se třemi svary	18
3.1 Schéma metody fixního analyzátoru s a) laditelným laserem a měřičem výkonu b) širokopásmovým zdrojem a spektroskopem [1]	12	4.9 Interferogram trasy 7metrového PM vlákna se třemi svary ve směru A-B	18
3.2 Schéma pro měření Stokesových parametrů [1]	12	4.10 Interferogram trasy 7metrového PM vlákna se třemi svary ve směru B-A	19
3.3 Konfigurace metody GINTY [4]	13		

4.11 Konfigurace trasy dvou 7metrových PMF a jednoho 7metrového PMF se třemi svary propojených polarizačními kontroléry	19	4.21 Konfigurace trasy ze všech úseků PM vláken se svary propojených polarizačními kontroléry	23
4.12 Interferogram trasy dvou 7metrových PMF a jednoho 7metrového PMF se třemi svary propojených polarizačními kontroléry	19	4.22 Interferogram trasy ze všech úseků PM vláken se svary propojených polarizačními kontroléry	23
4.13 Konfigurace trasy 10metrového PM vlákna se čtyřmi svary	20	4.23 Výsledky PMD analyzátoru ...	23
4.14 Interferogram trasy 10metrového PM vlákna se čtyřmi svary	20	4.24 Konfigurace trasy ze všech úseků PM vláken se svary bez použití polarizačních kontrolérů	24
4.15 Konfigurace trasy tří úseků PM vláken se svary propojených polarizačními kontroléry	21	4.25 Interferogram trasy ze všech úseků PM vláken se svary bez použití polarizačních kontrolérů	24
4.16 Interferogram trasy tří úseků PM vláken se svary propojených polarizačními kontroléry	21	5.1 Ukázka zapojení měření	25
4.17 Konfigurace trasy 5metrového PM vlákna se třemi svary	21	5.2 Schéma měřené trasy pěti úseků PM vláken se svary	26
4.18 Interferogram trasy 5metrového PM vlákna se třemi svary	22	5.3 Průběh hodnot PMD za 3 hodiny	26
4.19 Konfigurace trasy 10metrového PM vlákna s šesti svary	22	5.4 Průběh hodnot SO PMD za 3 hodiny	26
4.20 Interferogram trasy 10metrového PM vlákna s šesti svary	22	5.5 Rozložení hodnot PMD	27
		5.6 Průběh hodnot PMD za 48 hodin	27
		5.7 Průběh hodnot SO PMD za 48 hodin	28
		5.8 Rozložení hodnot PMD	28

5.9 Schéma měřené trasy 10metrového PM vlákna s šesti svary	28	5.25 Interferogram celkové trasy PM vláken	35
5.10 Průběh hodnot PMD za 17 hodin	29	5.26 Výsledky emulátoru PE4200 . .	35
5.11 Průběh hodnot SO PMD za 17 hodin	29	5.27 Průběh hodnot PMD	36
5.12 Schéma měřené trasy tří úseků PM vláken se svary	29	5.28 Průběh hodnot SO PMD	36
5.13 Průběh hodnot PMD za tři dny	30	5.29 Ukázka zapojení měření	37
5.14 Schéma měřené trasy 5metrového PM vlákna se třemi svary	30	5.30 Schéma zapojení měření BER a diagramu oka	37
5.16 Průběh hodnot PMD za tři dny	30	5.31 Závislost BER na vlnové délce .	38
5.15 Ukázka zapojení měření	31	5.32 Diagram oka na 1535 nm s BER = $1,2 \cdot 10^{-4}$	38
5.17 Pádlový polarizační kontrolér . .	32	5.33 Diagram oka na 1550 nm s BER = $2,8 \cdot 10^{-7}$	39
5.18 Průběh hodnot PMD	32	5.34 Závislost BER na vlnové délce .	39
5.19 Průběh hodnot SO PMD	32	5.35 Rozložení hodnot BER	40
5.20 Průběh hodnot PMD	33	5.36 Interferogram 36 km telekomunikačního vlákna s PMD 4,45 ps	41
5.21 Průběh hodnot SO PMD	33	5.37 Interferogram 7 metrů PMF se třemi svary	41
5.22 Rozložení hodnot PMD	34	5.38 Interferogram 36 km telekomunikačního vlákna s PMD 9,48 ps	41
5.23 PMD emulátor PE4200	34		
5.24 Interferogram emulátoru PE4200	35		

5.39 Interferogram kaskády tří PM
vláken 42

Tabulky

5.1 Specifikace emulátoru PE4200 .. 34



Kapitola 1

Úvod

Předmětem této diplomové práce je analýza účinků polarizační vidové disperze (polarization mode dispersion, PMD) na přenosové vlastnosti optických komunikačních sítí a realizace emulátoru PMD pro účely testování optických sítí a měřící aparatury. Polarizační vidová disperze v jednovidových vláknech se stala v moderních vysokorychlostních optických sítích jedním z hlavních důvodů zhoršování přenosových vlastností především kvůli svému náhodnému charakteru.

Cílem práce je vytvoření emulátoru PMD s Maxwellovým rozložením diferenciálního skupinového zpoždění (differential group delay, DGD), tak aby co nejvíce odpovídalo reálným optickým trasám. Pro realizaci emulátoru byly použity polarizační kontroléry (polarization controller, PC) a polarizaci zachovávající vlákna (polarization maintaining fiber, PMF), která byla po úsecích náhodné délky svařena s úhlem 45° .

Kapitola 2

Polarizace světla

Světlo prostupující vláknem může být popsáno vektory elektromagnetického pole kolnými na směr šíření [1]

$$\vec{E} = \vec{a}_x E_{x0} \cos(\omega t - kz) + \vec{a}_y E_{y0} \cos(\omega t - kz - \Phi) \quad (2.1)$$

,kde \vec{a}_x a \vec{a}_y jsou jednotkové vektory, E_{x0} a E_{y0} jsou intenzity elektrického pole jednotlivých vektorů, Φ je fázový rozdíl mezi složkami tohoto pole, ωt je součin úhlové frekvence s časem a kz je součin pozice na ose šíření z s vlnovým číslem k vyjádřeným jako

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.2)$$

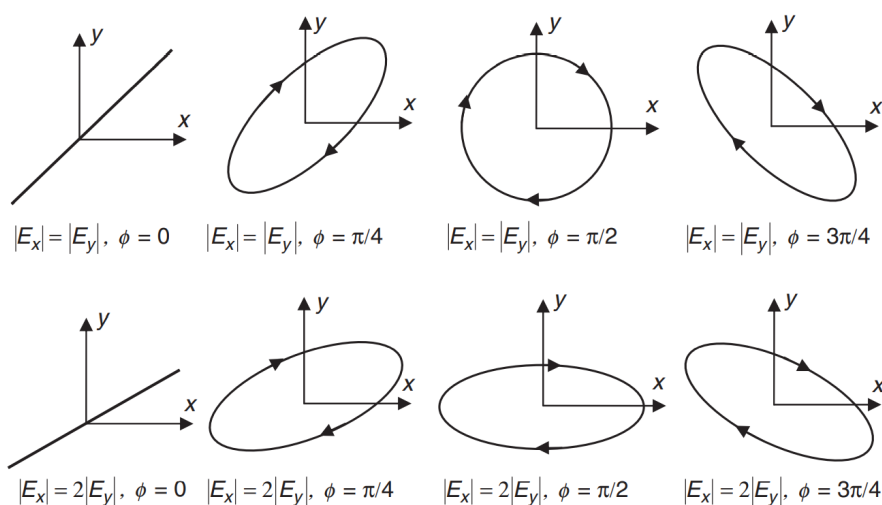
Existují tři typy polarizace: lineární, kruhová a eliptická. O jakou polarizaci se jedná, udává chování jednotlivých složek vektoru \vec{E} v ose x a y v průběhu šíření elektromagnetické vlny. Stav polarizace může být popsán v rovině xy pomocí elipsy

$$\frac{E_x^2}{E_{x0}^2} + \frac{E_y^2}{E_{y0}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{x0} E_{y0}} \cos \Phi = \sin^2 \Phi \quad (2.3)$$

na obrázku 2.1.

Obecně však elektromagnetická vlna nemusí být plně polarizovaná. To znamená, že složky v osách x a y spolu plně nekorelují a fázový rozdíl Φ může být náhodný. Pro tyto případy je uveden parametr stupeň polarizace (degree of polarization, DOP), který je definován jako poměr výkonu polarizované části světla ku celkovému výkonu.

$$DOP = \frac{P_{polarizovaný}}{P_{polarizovaný} + P_{nepolarizovaný}} \quad (2.4)$$



Obrázek 2.1: Tři typy polarizací: lineární, kruhová a eliptická [1]

2.1 Stokesovy parametry a Poincareho koule

Podobně jako pomocí elipsy lze popsat stav polarizace pomocí Stokesových parametrů

$$S_0 = P, \quad (2.5)$$

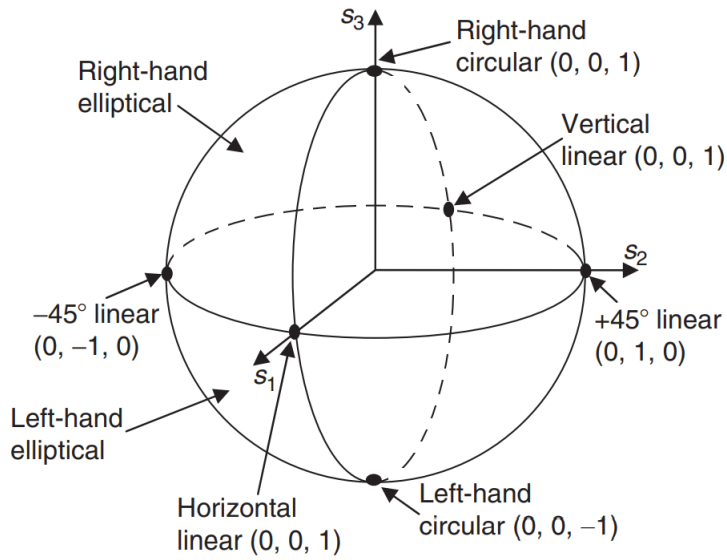
$$S_1 = |E_{x0}|^2 - |E_{y0}|^2, \quad (2.6)$$

$$S_2 = 2|E_{x0}||E_{y0}|\cos\Phi, \quad (2.7)$$

$$S_3 = 2|E_{x0}||E_{y0}|\sin\Phi, \quad (2.8)$$

kde P je celkový výkon.

Pokud zahrneme situaci, při které nemusí být elektromagnetická vlna plně polarizovaná, lze podělením parametrů S_1, S_2, S_3 celkovým výkonem S_0 získat normované parametry s_1, s_2 a s_3 . Každý stav polarizace je poté možné popsat vektorem $s = [s_1, s_2, s_3]$ a délka tohoto vektoru bude vždy rovna stupni polarizace DOP. Konce vektorů všech možných polarizací poté tvoří povrch Poincareho koule s poloměrem DOP na obrázku 2.2.

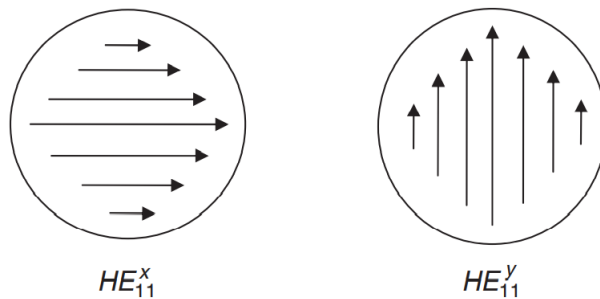


Obrázek 2.2: Poincareho koule [1]

Na povrchu koule lze vidět tři typy polarizací. Na pólech koule se nacházejí kruhové polarizace, na obvodu v rovině s_1s_2 se nacházejí lineární polarizace a mezi těmito body se nacházejí polarizace eliptické.

2.2 Polarizační vidová disperze

Polarizační vidová disperze (PMD) je speciální druh vidové disperze stávající se ze dvou ortogonálně polarizovaných módů dominantního vidu HE_{11} nacházejících se v jednovíkových vláknech. Na obr. 2.3 lze vidět, že jsou tyto vidy rozloženy do dvou os, které jsou na sebe vzájemně kolmé.



Obrázek 2.3: Základní polarizační módy [1]

Ideální jednovidové vlákno je perfektně kruhově symetrické a z toho důvodu se oba polarizační vidy šíří stejnou rychlostí. V praxi je tomu však jinak a z řady důvodů vzniká ve vlákne dvojlom a jednotlivé vidy se šíří různými rychlostmi. Tyto vlivy se dají dělit na vnitřní a vnější. Mezi vnitřní patří stálé změny v geometrii vlákna, často způsobené nepřesnostmi při výrobě. Vnější poté zahrnují externí vlivy vzniklé především při instalaci vlákna.

Vlivem dvojlomu vzniká rozdíl mezi konstantami šíření $\beta_x = \frac{\omega n_x}{c}$ a $\beta_y = \frac{\omega n_y}{c}$ v jednotlivých osách. Výsledný rozdíl lze popsat jako

$$\Delta\beta = (\beta_x - \beta_y) = \frac{\omega}{c} \Delta n_{eff}, \quad (2.9)$$

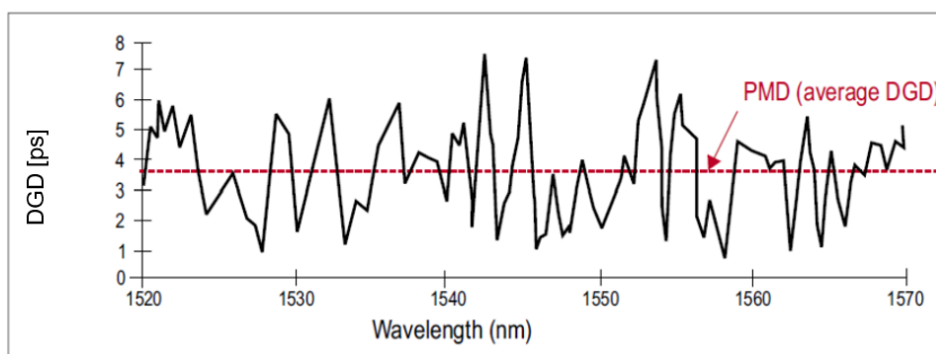
kde Δn_{eff} označuje rozdíl efektivních indexů lomu obou os.

Pro vlákno délky L je poté možné spočítat relativní skupinové zpoždění mezi oběma vidy jako

$$\Delta\tau_g = \frac{(n_x - n_y)}{c} L = \frac{L \Delta n_{eff}}{c}. \quad (2.10)$$

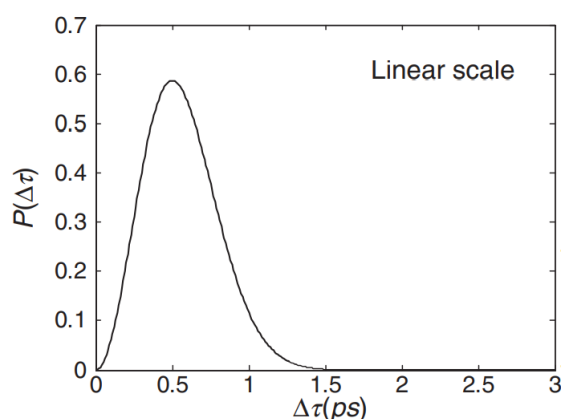
Toto zpoždění se často nazývá diferenciální skupinové zpoždění (DGD).[1]

Diferenciální skupinové zpoždění závisí na teplotě [2] a vlnové délce[3].



Obrázek 2.4: Závislost DGD na vlnové délce [4]

Jak je již naznačeno na obr. 2.4 tak PMD dostaneme jako průměr DGD přes celé spektrum. Rozložení DGD ve spektru odpovídá Maxwellovu rozložení na obr. 2.5.



Obrázek 2.5: Maxwellovo rozložení DGD [1]

2.3 Vliv PMD na přenosové vlastnosti

Polarizační vidová disperze má podobně jako ostatní disperze za následek rozšiřování pulzů postupujících vláknem. Výsledkem tohoto rozšiřování je zkreslení přenášené informace a zvýšení parametru bitové chybovosti (bit-error-rate, BER), čímž se ve výsledku také zkracuje maximální přípustná délka trasy pro dané přenosové rychlosti. Hodnoty PMD je možné snížit zlepšením kvality při výrobě či použitím kompenzačních prvků PMD. PMD je také problematictější pro starší vlákna (G.652) nežli pro ty novější (G.652, G.653 a G.655).

Pokud je známa maximální hodnota PMD, je možné vypočítat maximální přípustnou vzdálenost jako

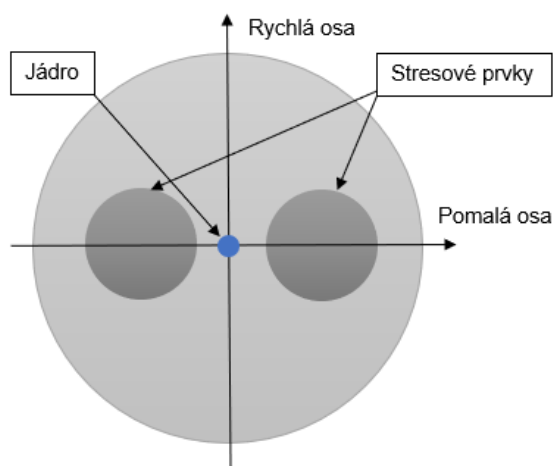
$$L = \frac{\Delta\tau^2}{\Delta\tau_{max}^2}, \quad (2.11)$$

kde $\Delta\tau^2$ je maximální hodnota polarizační vidové disperze a $\Delta\tau_{max}$ je koeficient maximální polarizační vidové disperze.

Náhodný charakter PMD je vzat do úvahy při definici maximální přípustné PMD jako 10% bitové délky, s útlumem menším jak 1 dB na vlnové délce 1550 nm a použitím kódování NRZ. Pro příklad přenosové rychlosti 10 GB/s, kterému odpovídá bitová délka 100 ps, vychází maximální přípustná PMD 10 ps. V praxi jsou některé systémy schopné přijmout PMD v hodnotách 13-14 ps v závislosti na použitém kódování. Tyto limity na maximální PMD jsou poté použity k určení maximální přípustné délky. Pro tyto účely se poté používá koeficient PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$], který je funkcí délky. [4]

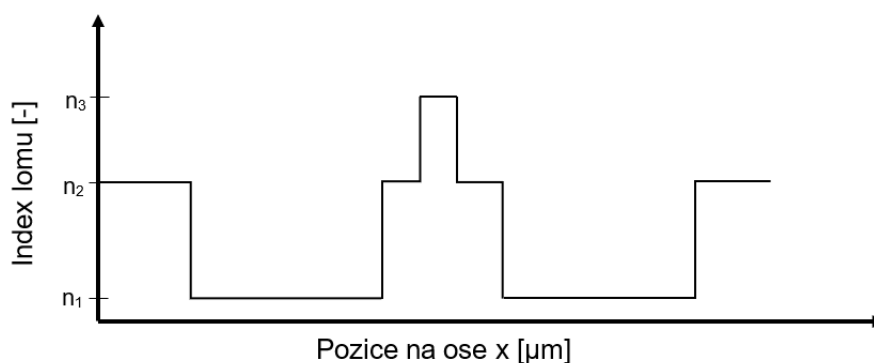
2.4 Polarizaci zachovávající vlákna

Podobně jako polarizační kontroléry, které cíleně vyvíjejí tlak na vlákno v určité ose, existují polarizaci zachovávající vlákna. Nejčastěji používanou strukturu tzv. panda lze vidět na obr. 2.6 [5].



Obrázek 2.6: Profil PM vlákna "panda"

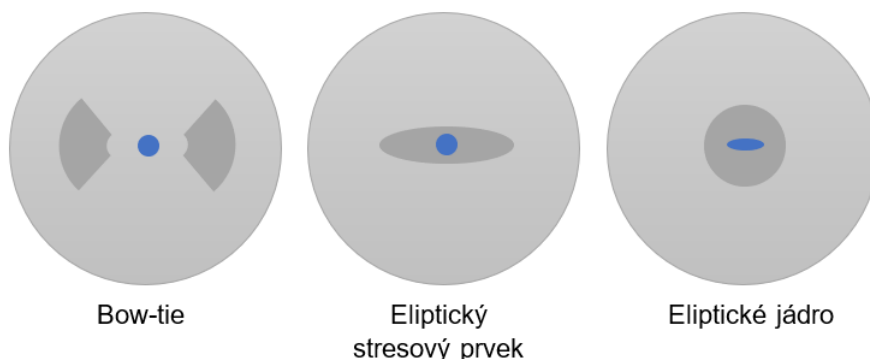
Tmavou barvu představují dva stresové prvky podél jádra, které cíleně vyvíjejí tlak v jedné ose podél celého vlákna. Tímto se zamezí náhodným změnám polarizačního stavu a oba polarizační vidy se drží právě v této tzv. rychlé a pomalé ose. Na obr. 2.7 je poté znázorněn profil indexu lomu podél pomalé osy x . Stále zde platí podmínka totálního odrazu $n_3 > n_2 \geq n_1$, kde n_3 je index lomu jádra, n_2 index lomu pláště a n_1 index lomu stresových prvků. Průměr jádra vlákna "panda" je v našem případě $10,5 \mu\text{m}$ a průměr pláště je $125 \mu\text{m}$.



Obrázek 2.7: Profil indexu lomu podél pomalé osy

Mezi další méně používané typy PM vláken patří "bow-tie" (motýlek), vlákna

s eliptickými stresovými prvky či vlákna s eliptickým jádrem. Všechny tyto typy lze vidět na obr. 2.8.



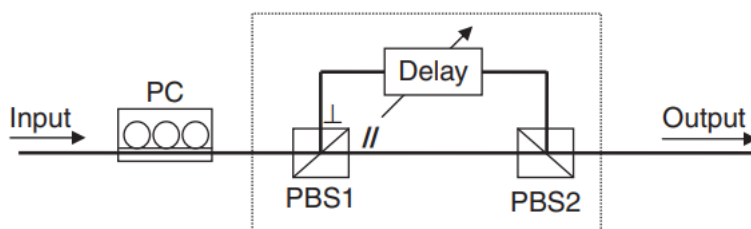
Obrázek 2.8: Další typy PM vláken

2.5 PMD emulátory a PMD zdroje

Při charakterizaci systému a ověřovacích testech je třeba vzít v úvahu účinek PMD, aby bylo možné vyhodnotit rezervu systému. Je důležité zajistit, aby přenosové prostředí bylo schopné tolerovat úroveň PMD optického systému, na kterém bude zařízení nasazeno. To vyžaduje zdroj pro generování známého množství PMD, buď konstantního nebo statistického, pro simulaci PMD charakteristik systému.

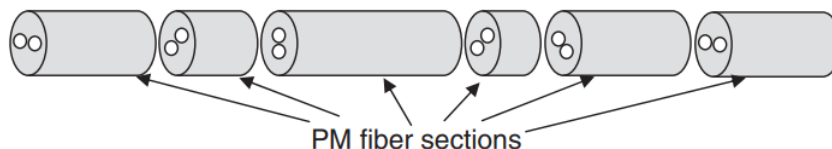
Obecně je zdroj PMD označován jako zdroj, který generuje pevnou hodnotu DGD, zatímco emulátor PMD je zařízení, které generuje časově se měnící DGD pro emulaci praktických charakteristik PMD ve vláknových systémech. Zdroje PMD se obvykle používají k testování deterministického dopadu PMD na systémy nebo subsystémy, protože přidaná úroveň PMD ze zdroje je přesně známa. Na druhé straně se emulátor PMD často používá k testování statistické povahy systémů, jako je výpadek BER vyvolaný PMD a účinnost PMD kompenzátorů v přijímačích [6],[7].

Nejjednoduššího zdroje PMD na obr. 2.9 jsou realizovatelné za pomoci dvou polarizačních rozdělovačů paprsků. Vstupní optický signál je nejprve rozdělen na horizontální a vertikální polarizační složky. Poté jeden z nich prochází nastavitelnou zpožďovací linkou před tím, než se znovu spojí s druhou složkou. Diferenciální skupinové zpoždění zdroje PMD lze poté nastavit časovým zpožděním nastavitelné zpožďovací linky. Pro správné použití tohoto typu zdroje PMD musí být vstupní optický signál lineárně polarizován. [1]



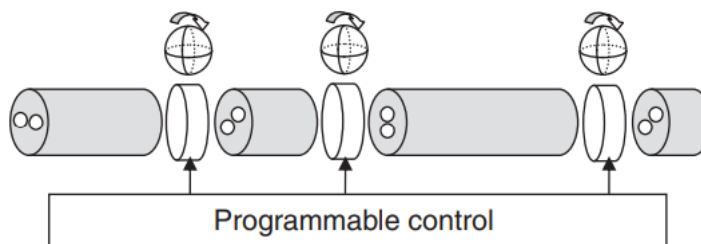
Obrázek 2.9: Jednoduchý zdroj PMD [1]

Jedním jednoduchým způsobem, jak vyrobit emulátor PMD pro všechny řády, je spojit mnoho sekcí vláken zachovávajících polarizaci (PMF) dohromady s náhodnými délkami a orientacemi, jak je znázorněno na obr.2.10. To přesně simuluje efekt šíření v praktické vláknové síti. Protože jsou však tyto sekce vláken trvale spojeny dohromady, emulátor PMD již není nastavitelný, s výjimkou řízení vlivem prostředí, jako je teplota, mechanické namáhání nebo rozmitáním vlnové délky optického signálu. Měřením přes dlouhé časové intervaly v nekontrolovaném prostředí nebo vzorkováním přes široké spektrum vlnových délek lze získat Maxwellovu distribuci PMD.[1]



Obrázek 2.10: Jednoduchý emulátor PMD [1]

Z hlediska systémového měření je však pro přenosový kanál s pevnou vlnovou délkou signálu žádoucí urychlit test PMD pomocí emulátoru s odpovídajícím dynamickým řízením tak, aby DGD rychle konvergovalo k očekávanému Maxwellovu rozdělení. Tohoto lze dosáhnout přidáním polarizačních kontrolérů mezi každý pár dvojlomných sekcí, jak je znázorněno na obr. 2.11. [1]



Obrázek 2.11: Jednoduchý emulátor PMD s polarizačními kontroléry [1]

V řadě dalších realizací se používají místo PM vláken dvojlomné hranoly [8],[9] či půlvlnné destičky místo polarizačních kontrolérů [9],[10].

Kapitola 3

Metody měření PMD

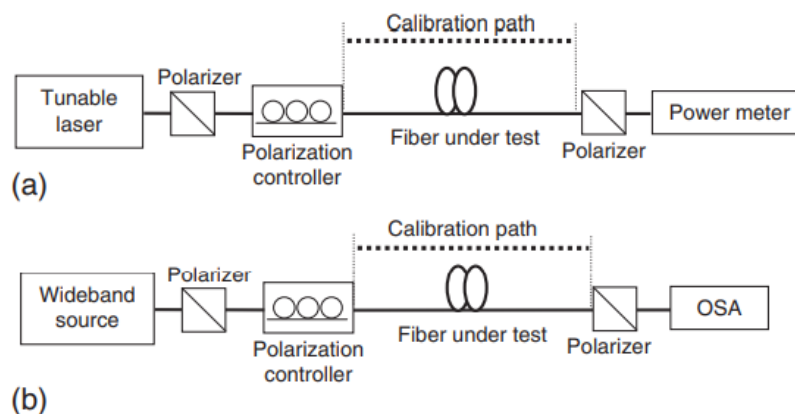
Jak je popsáno v testovacích a měřicích standardech IEC-60793-1-48 a ITU-T G650.2, existují různé způsoby měření PMD v terénu. V této kapitole budou představeny čtyři z nich. Existují i jiné metody, které se však věnují produkčnímu/laboratornímu testování.[11]

3.1 Metoda fixního analyzátoru

Metoda fixního analyzátoru nabízí zjednodušený přístup k měření polarizace. Někdy se této metodě říká skenování vlnové délky. Na obr. 3.1 lze vidět dvě ekvivalentní zapojení pro tuto metodu. Obr. 3.1a) používá jako optický zdroj laditelný laser, zatímco na straně přijímače je pevný polarizátor následován měřičem optického výkonu. Změnou frekvence laditelného laseru se změní stav polarizace signálu na výstupu vlákna a polarizátor převede tuto změnu SOP signálu na změnu optického výkonu, kterou pak detekuje měřič výkonu.

Schéma na obr 3.1b) používá širokopásmový zdroj, který poskytuje signál se širokým spektrem vlnových délek. Kvůli dvojlomu ve vláknu budou různé složky frekvence signálu vykazovat různé stavy polarizace na výstupu vlákna a polarizátor převádí tuto frekvenčně závislou polarizační rotaci na frekvenčně závislou spektrální hustotu optického výkonu, kterou lze přesně měřit analyzátozem optického spektra.[12]

V obou implementacích je použit polarizátor bezprostředně za zdrojem, aby se zajistilo, že má zdroj pevný stav polarizace. Polarizační kontrolér umožňuje změnu stavu polarizace optického signálu, který je vyzařován do vlákna.

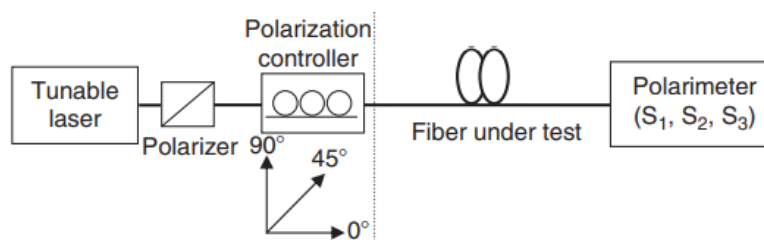


Obrázek 3.1: Schéma metody fixního analyzátoru s a) laditelným laserem a měřičem výkonu b) širokopásmovým zdrojem a spektroskopem [1]

3.2 Metoda Jonesovy matice (JME)

Metoda Jonesovy matice je komplexní technika měření PMD, jejíž schéma je naznačeno na obr.3.2. Sekvence vstupního SOP optického signálu je postupně nastavována v úhlech 0° , 45° a 90° a na výstupu vlákna se systematicky měří Stokesovy parametry [13],[14].

Obecně se Jonesova matice široce používá k popisu stavu polarizace světelného vlnového signálu nebo přenosové matice pasivního optického prostředí. Například příčné elektrické pole polarizovaného světla může být reprezentováno dvouprvkovým komplexním vektorem v kartézském souřadnicovém systému. Tyto dva vektory určují velikost a fázi složek x a y elektrického pole v konkrétním bodě prostoru [15].

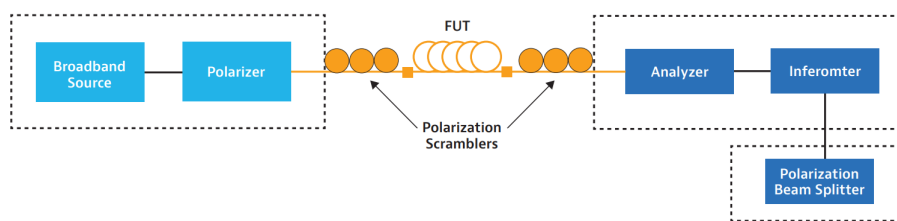


Obrázek 3.2: Schéma pro měření Stokesových parametrů [1]

V případě PMD emulátoru z PM vláken se dá výsledná hodnota PMD spočítat jako velikost polarizačního vektoru vstupujícího do vlákna, který je násoben Jonesovou maticí celé trasy. Matice celé trasy se získá rekurzivním násobením Jonesových matic jednotlivých sekcí [16],[17],[18].

3.3 Interferometrická metoda TINTY a GINTY

Pro měření vlastností realizovaného PMD emulátoru a jeho částí byla zvolena zobecněná interferometrická metoda (GINTY), která se liší od té tradiční (TINTY) zakomponováním rozbočovače paprsků a polarizačních kontrolérů. Tato metoda, jak lze vidět na obr. 3.3, potřebuje širokopásmový polarizovaný zdroj záření, interferometr (Michelsonův či Mach-Zehnderův) s rozbočovačem paprsků a dva polarizační kontroléry.



Obrázek 3.3: Konfigurace metody GINTY [4]

Pro vláknové spoje je výstupem interferogram s náhodnými fázemi. Střední hodnota DGD je určena ze směrodatné odchylky křivky. Narozdíl od tradiční interferometrické metody (TINTY) je zde možné odstranit autokorelační špičky ve středu interferogramu kvůli rozbočovači paprsků [19],[20]. V tomto projektu byl použit PMD analyzátor FTB5500 na obr.3.4, který pracuje na principu GINTY, a zdroj záření FLS5834A na obr.3.5 v C (1550 ± 10 nm) a L pásmu ($1607,5 \pm 17,5$ nm) od firmy EXFO. Spektrum tohoto zdroje lze vidět na obr. 3.6.

Největší výhodou této metody s použitím polarizačních kontrolérů je zlepšení absolutní nejistoty měření. Nevýhodou je poté nepřímé měření PMD druhého řádu (second-order polarization mode dispersion, SO PMD), která je vypočtena z ostatních dat, a citlivost na polarizaci vstupního záření pokud se nepoužijí polarizační kontroléry. [4]

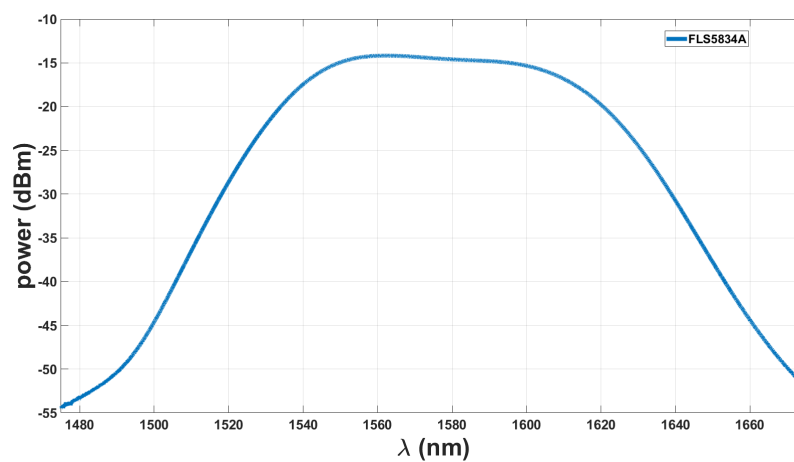
3. Metody měření PMD



Obrázek 3.4: PMD analyzátor FTB5500



Obrázek 3.5: Zdroj záření pro PMD analyzátor FLS5834A



Obrázek 3.6: Spektrum zdroje záření FLS5834A

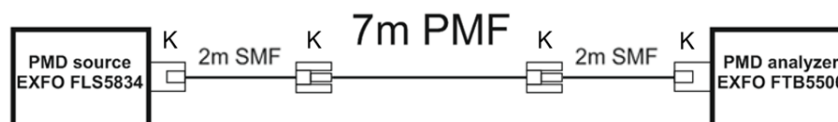
Kapitola 4

Realizace PMD emulátoru

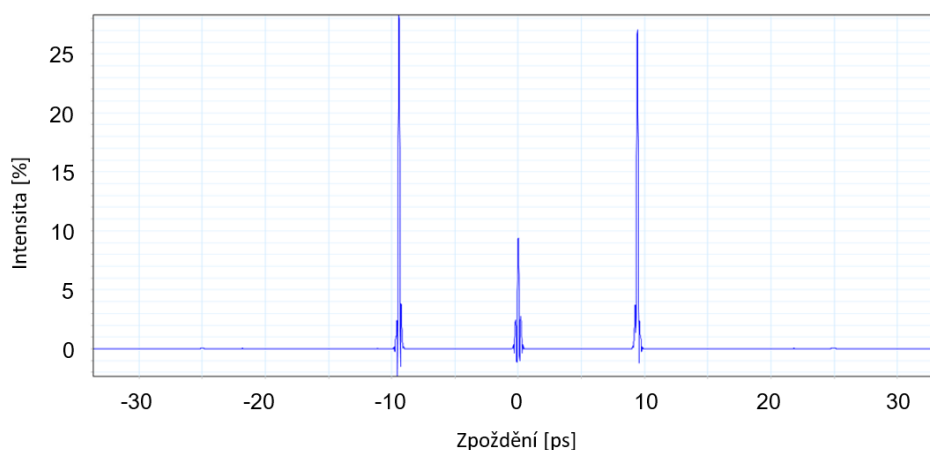
Pro realizaci emulátoru PMD bylo rozhodnuto použít několik úseků PM vláken, v rozmezí délek 5, 7 a 10 metrů, které byly propojeny polarizačními kontroléry jako je uvedeno v [1] a [21]. Jednotlivé úseky vláken byly poté postupně rozděleny do sekcí náhodné délky a svařeny s úhlem 45° mezi osami PM vlákna. Použitá PM vlákna byla typu panda od výrobce SQS Vláknová optika s konektory FC/APC8 S.

4.1 Samostatné PM vlákno dlouhé 7 m

V prvním kroku byl změřen samostatný úsek polarizaci zachovávajícího vlákna na obr. 4.1 pro seznámení se s analyzátelem PMD a získání interferogramu základního prvku emulátoru na obr. 4.2. Pro propojení měřených úseků se zdrojem a PMD analyzátelem byly vždy použity dva 2metrové úseky jednovlákenných vláken (SMF). Všechny vlákna byly spojeny konektory typu FC/APC značenými "K" ve schématech tras.



Obrázek 4.1: Konfigurace trasy 7metrového PM vlákna



Obrázek 4.2: Interferogram trasy 7metrového PM vlákna

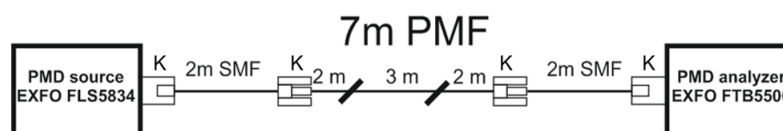
Na interferogramu lze vidět dvě vedlejší špičky (± 10 ns) znázorňující přítomnost jedné mezividové vazby typické pro polarizaci zachovávající vlákno. Z analyzátoru lze také získat řadu parametrů v podobě tabulky na obr. 4.3,

Results		Test Parameters		Test Settings	
PMD value	11,2060 ps	From	1528,23 nm	Fiber length	25 m
PMD coefficient	70,8730 ps/km ^{1/2}	To	1628,53 nm	Used for stat	Yes
PMD value, 2nd order	55,5459 ps/nm	Fiber type	Telecom		
PMD coefficient, 2nd order	2221,8376 ps/nm*km				
Gaussian compliance	0,717				

Obrázek 4.3: Výsledky 7 m PM vlákna

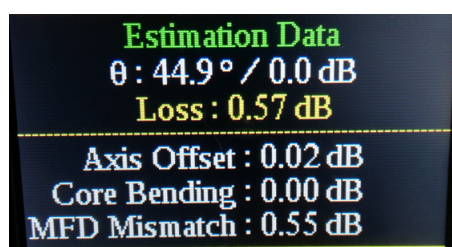
4.2 PM vlákno dlouhé 7 m se dvěma svary

V dalším kroku bylo vlákno rozděleno do tří částí v konfiguraci z obr. 4.4 a tyto části byly svařeny po úhlem 45° viz obr. 4.5. Na obr. 4.6 lze vidět detail jednoho z provedených svarů, na kterém lze zřetelně vidět rozdíl indexů lomu v příčné ose na obou svařených koncích kvůli odlišným úhlům pohledu na strukturu z obr. 2.6.

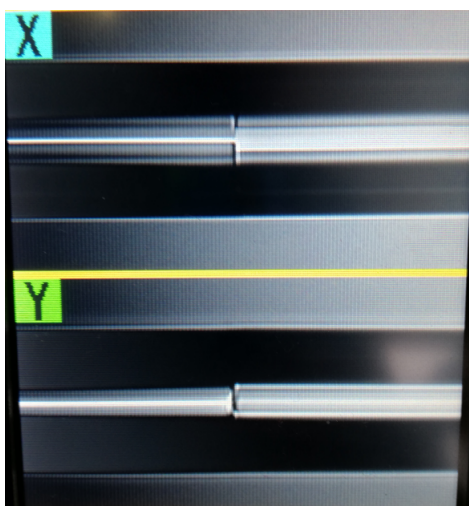


Obrázek 4.4: Konfigurace trasy 7metrového PM vlákna se dvěma svary

Před svařováním a po každém svaru byl výkon měřen pomocí wattmetru. S předpokladem daleko složitější trasy výsledného emulátoru byla snaha zamezit

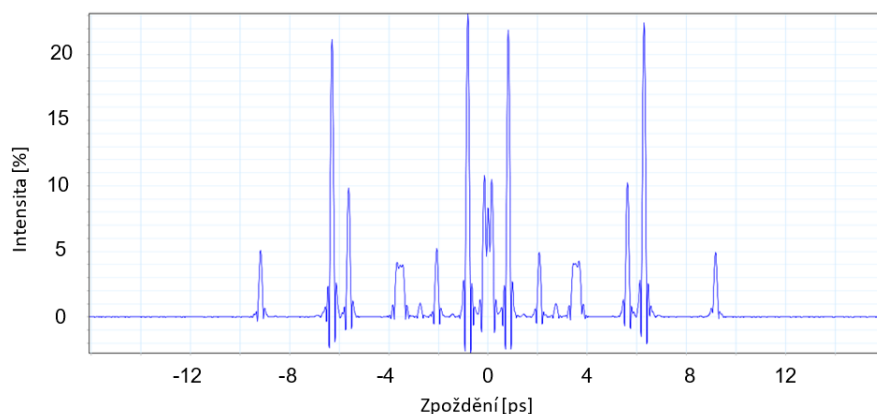


Obrázek 4.5: Odhad úhlu svaru a jeho útlumu



Obrázek 4.6: Detail jednoho z provedených svarů

vytváření zbytečně velkých útlumů. Výsledné útlumy svarů byly v rozmezí několika setin dB a na útlum předpokládaný svářičkou na obr. 4.5, pokud wattmetr ukazoval značný útlum tak byl proces svaru opakován.



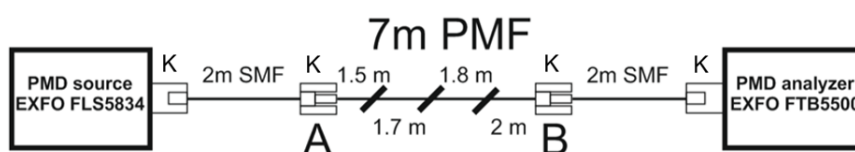
Obrázek 4.7: Interferogram trasy 7metrového PM vlákna se dvěma svari

Na obr. 4.7 lze již vidět značně komplexnější interferogram po přidání pouze dvou svarů. Také zde lze vidět, že počet úseků PM vlákna (v tomto případě tři) již přímo neodpovídá počtu špiček v interferogramu. Toto je

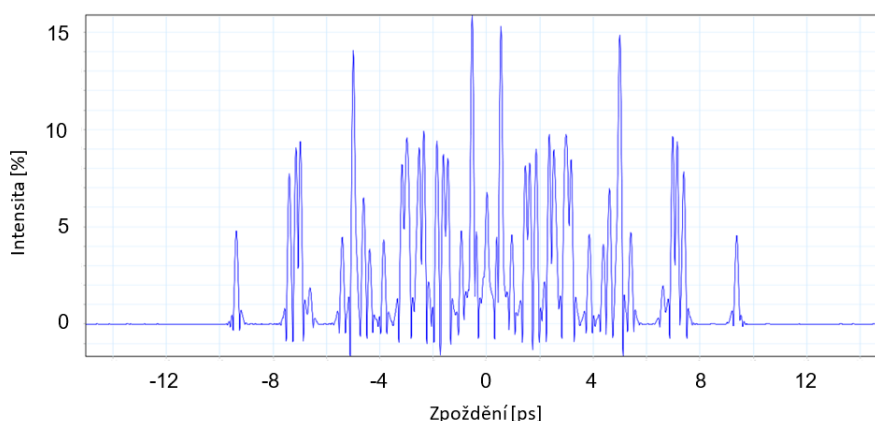
zapříčiněno právě úhlem 45° mezi osami polarizací jednotlivých úseků.

4.3 PM vlákno dlouhé 7 m se třemi svary

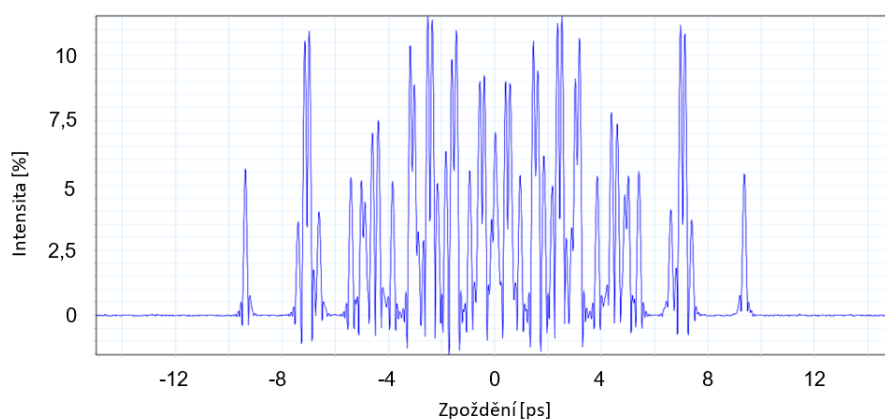
Další 7 metrů dlouhé PM vlákno bylo svařeno ve třech místech podle obr. 4.8. V tomto případě bylo vlákno navíc změřeno metodou GINTY ve směru A-B na obr. 4.9 tak i ve směru B-A na obr. 4.10. Zde je patrné, že poloha špiček se nemění pouze jejich velikost. Hlavní příčinou změny velikosti byla manipulace a ohyby především na 2 metrech předřadného SMF vlákna, které způsobily náhodné změny polarizace, při které záření vcházelo do úseku PM vlákna.



Obrázek 4.8: Konfigurace trasy 7metrového PM vlákna se třemi svary



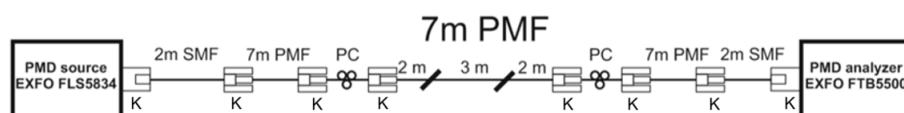
Obrázek 4.9: Interferogram trasy 7metrového PM vlákna se třemi svary ve směru A-B



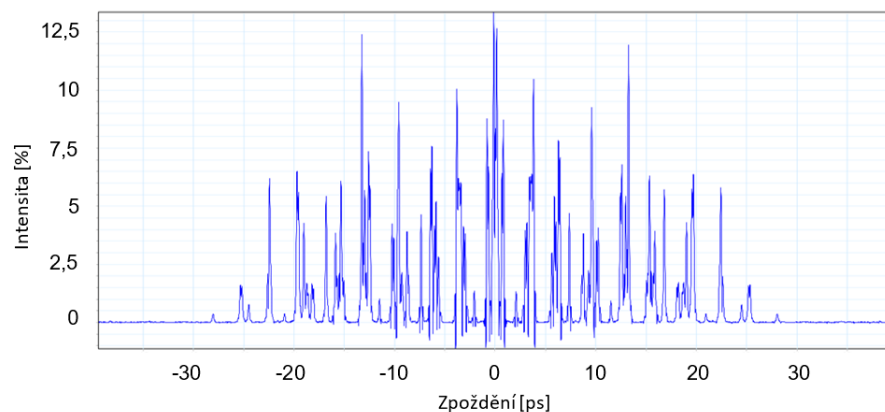
Obrázek 4.10: Interferogram trasy 7metrového PM vlákna se třemi svary ve směru B-A

4.4 Tři 7 m dlouhé PM vlákna za sebou

Další testovaná trasa na obr. 4.11 se stávala ze 7 metrů dlouhého PM vlákna z předchozího bodu, na konce kterého byly umístěny dva polarizační kontroléry (PC) a další dva 7 metrové úseky PM vláken bez svarů.



Obrázek 4.11: Konfigurace trasy dvou 7metrových PMF a jednoho 7metrového PMF se třemi svary propojených polarizačními kontroléry

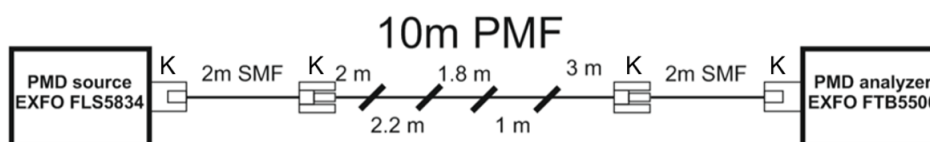


Obrázek 4.12: Interferogram trasy dvou 7metrových PMF a jednoho 7metrového PMF se třemi svary propojených polarizačními kontroléry

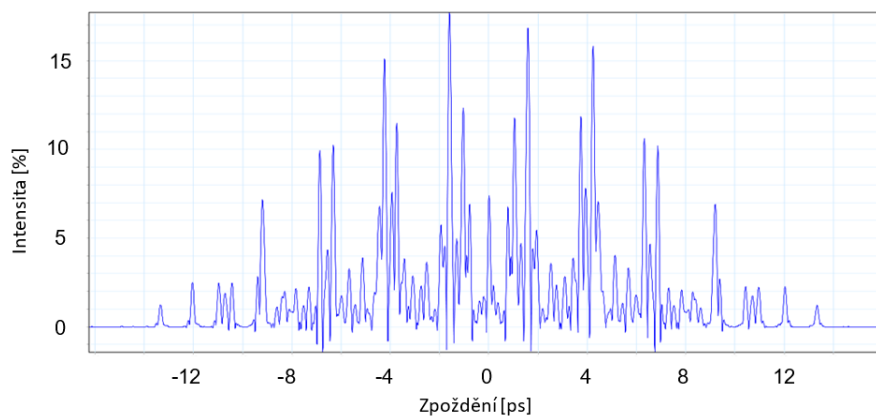
Zde se dalo stejně jako u předchozí trasy měnit velikost špiček interferogramu na obr. 4.12, avšak kontrolovaně pomocí polarizačních kontrolérů.

4.5 PM vlákno dlouhé 10 metrů se čtyřmi svary

PM vlákno dlouhé 10 metrů se čtyřmi svary na obr. 4.13 odpovídalo předpokladům. Delší úsek PM vlákna znamená vzdálenější špičky (větší hodnoty disperze) na interferogramu z obr. 4.14 a větší počet svarů vykazuje zvýšení počtu špiček (kombinace jednotlivých mezividových vazeb).



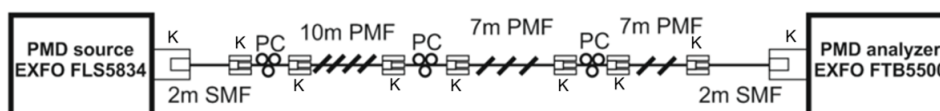
Obrázek 4.13: Konfigurace trasy 10metrového PM vlákna se čtyřmi svary



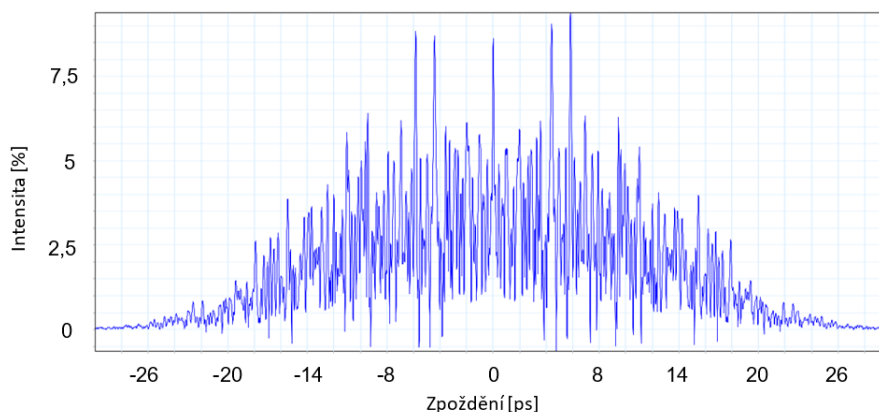
Obrázek 4.14: Interferogram trasy 10metrového PM vlákna se čtyřmi svary

4.6 Kaskáda tří úseků PM vláken se svary

První kaskáda úseků PM vláken se svary na obr. 4.15 se skládala z 10, 7 a 7 metrových úseků zmíněných v předchozích bodech. Je vidět, že výsledný interferogram na obr. 4.16 má velkou hustotu špiček a také začíná být zjevný Gaussův charakter celého interferogramu, jež je jedním z parametrů získaný z analyzátoru PMD.



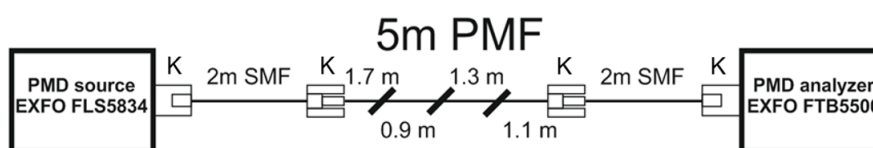
Obrázek 4.15: Konfigurace trasy tří úseků PM vláken se svary propojených polarizačními kontroléry



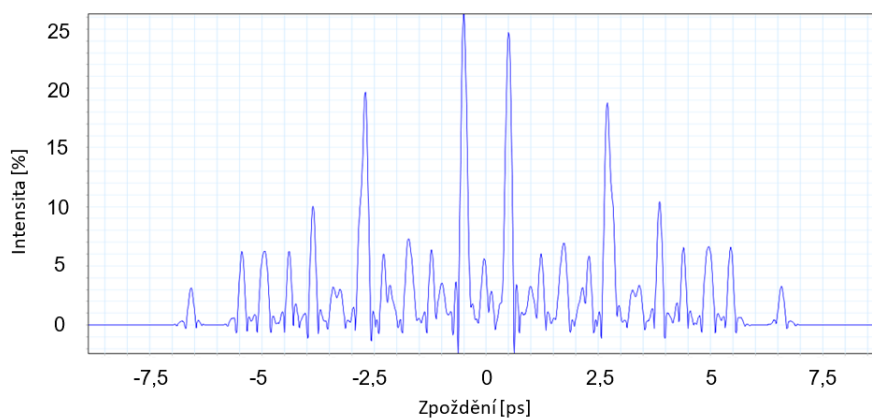
Obrázek 4.16: Interferogram trasy tří úseků PM vláken se svary propojených polarizačními kontroléry

4.7 PM vlákno dlouhé 5 metrů se třemi svary

Přesto, že se podařilo získat již velice komplexní interferogram, bylo rozhodnuto přidat několik dalších úseků. Jedním z těchto úseků je 5 metrů dlouhé PM vlákno se třemi svary na obr. 4.17. Na interferogramu této trasy z obr. 4.18 je zajímavý relativně hladší charakter špiček v porovnání například s úsekem 7 metrů se stejným počtem svarů. Tato skutečnost může být zapříčiněna relativně velkým rozdílem mezi délkami jednotlivých svařených sekcí.



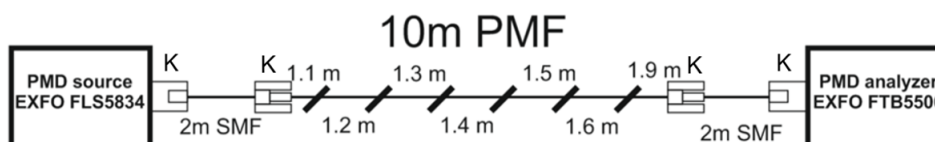
Obrázek 4.17: Konfigurace trasy 5metrového PM vlákna se třemi svary



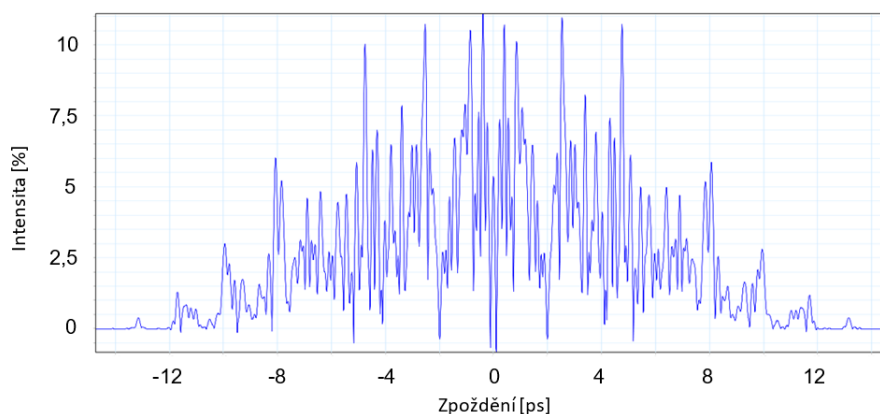
Obrázek 4.18: Interferogram trasy 5metrového PM vlákna se třemi svary

4.8 PM vlákno dlouhé 10 metrů se šesti svary

Na dalším 10metrovém PM vláknu na obr. 4.19 bylo celkem šest svarů. Interferogram tohoto úseku na obr. 4.20 je zajímavý svým charakterem, který je relativně podobný charakteru interferogramu celé kaskády zmíněné v kapitole 4.6.



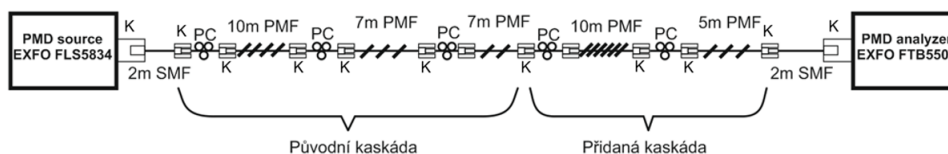
Obrázek 4.19: Konfigurace trasy 10metrového PM vlákna s šesti svary



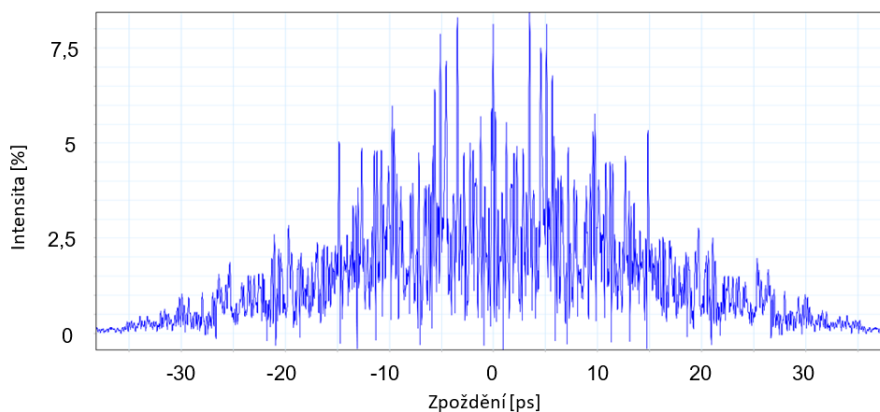
Obrázek 4.20: Interferogram trasy 10metrového PM vlákna s šesti svary

4.9 Druhá kaskáda ze všech předchozích sekcí

Výsledná kaskáda tohoto projektu na obr. 4.21 se stává z první již zmíněné, ke které byly připojeny úseky 10 a 5 metrů. Každý úsek PM vlákna byl opět propojen polarizačními kontroléry, pomocí kterých bylo možné do jisté míry měnit výsledný interferogram na obr. 4.22. Celková trasa měřila již 53 metrů a měla útlum 1,4 dB bez polarizačních kontrolérů.



Obrázek 4.21: Konfigurace trasy ze všech úseků PM vláken se svary propojených polarizačními kontroléry



Obrázek 4.22: Interferogram trasy ze všech úseků PM vláken se svary propojených polarizačními kontroléry

PMD

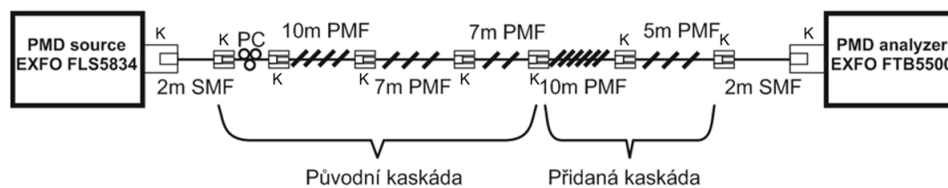
Results		Test Parameters		Test Settings	
PMD value	12,7316 ps	From	1528,23 nm	Fiber length	53 m
PMD coefficient	55,3023 ps/km ^{1/2}	To	1628,53 nm	Used for stat	Yes
PMD value, 2nd order	72,0550 ps/nm	Fiber type	Telecom		
PMD coefficient, 2nd order	1359,5275 ps/nm*km				
Gaussian compliance	0,989				

Obrázek 4.23: Výsledky PMD analyzátoru

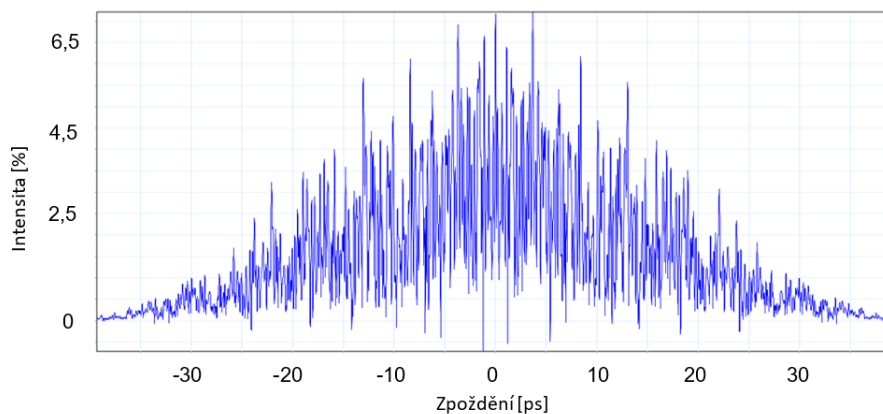
Z tabulky výsledků na obr. 4.23 je vidět, že celková trasa vykazovala PMD v hodnotách okolo 13 ps, jež byla hodnota mírně (v řádech desetin ps) ovlivnitelná polarizačními kontroléry.

4.10 Druhá kaskáda bez použití PC

Stejná kaskáda byla zapojena i bez polarizačních kontrolérů podle obr. 4.24 pro získání odhadu jejich vlivu na výsledný interferogram. Až na laditelnost výsledného interferogramu na obr. 4.25 je rozdíl nevýrazný a vliv polarizačních kontrolérů se pravděpodobně projeví až v dlouhodobých měřeních.



Obrázek 4.24: Konfigurace trasy ze všech úseků PM vláken se svary bez použití polarizačních kontrolérů



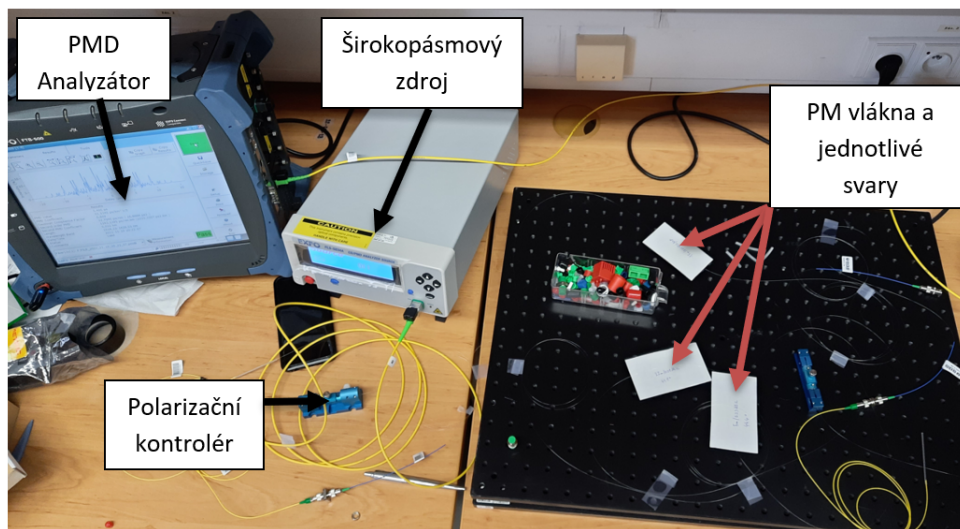
Obrázek 4.25: Interferogram trasy ze všech úseků PM vláken se svary bez použití polarizačních kontrolérů

Kapitola 5

Měření charakteristik PMD emulátoru

5.1 Časová a teplotní závislost PMD

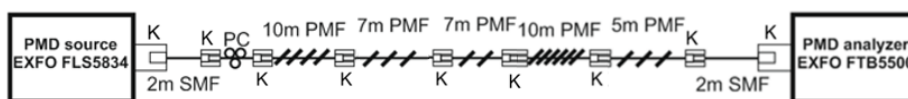
V další fázi byly provedeny série krátkodobých měření v rozsahu několika minut až hodin a dlouhodobějších měření v rozsahu několika dní pro zjištění časové a teplotní závislosti PMD. Na obr. 5.1 lze vidět ukázkou zapojení jednoho z měření.



Obrázek 5.1: Ukázkou zapojení měření

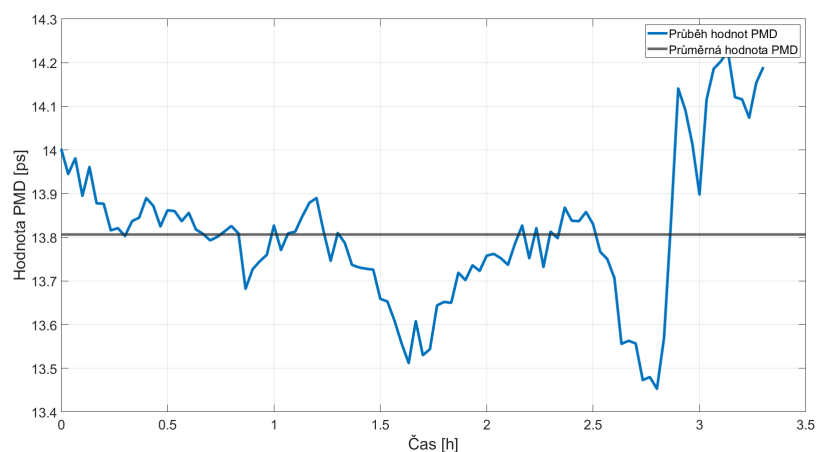
Jako první byla změřena celá trasa na obr. 5.2 po dobu tří hodin. Měření započalo 8.3.2022 v 11:10:31. Měření se stávalo ze sta náměrů, jejichž počet

byl limitován PMD analyzátorem, s rozestupem dvou minut.

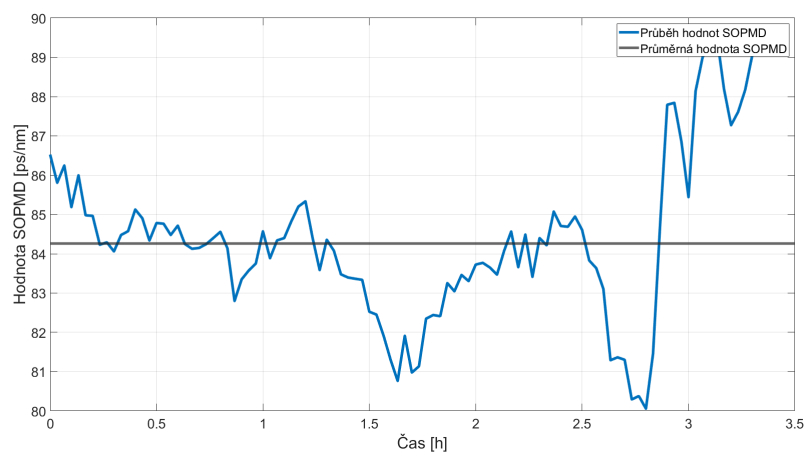


Obrázek 5.2: Schéma měřené trasy pěti úseků PM vláken se svařými spoji

Ze získaných výsledků byla vytvořena závislost hodnot PMD a druhého řádu PMD na obr. 5.3 a 5.4.

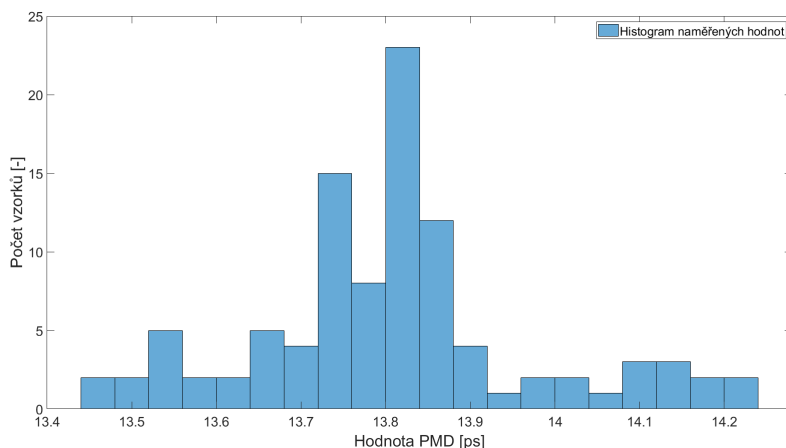


Obrázek 5.3: Průběh hodnot PMD za 3 hodiny



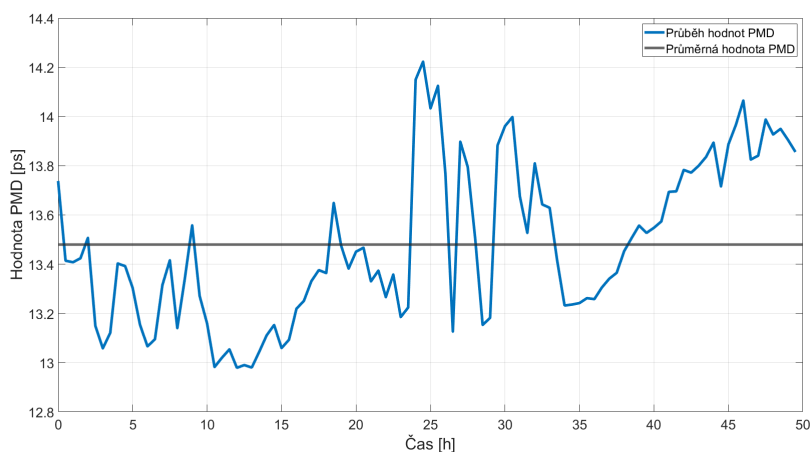
Obrázek 5.4: Průběh hodnot SO PMD za 3 hodiny

Z grafů 5.3 a 5.4 je viditelné, že závislost PMD a SO PMD na teplotě je stejná. Průměrná hodnota PMD byla 13,8 ps a rozsah hodnot (0,77 ps) na obr. 5.5 nebyl příliš velký.



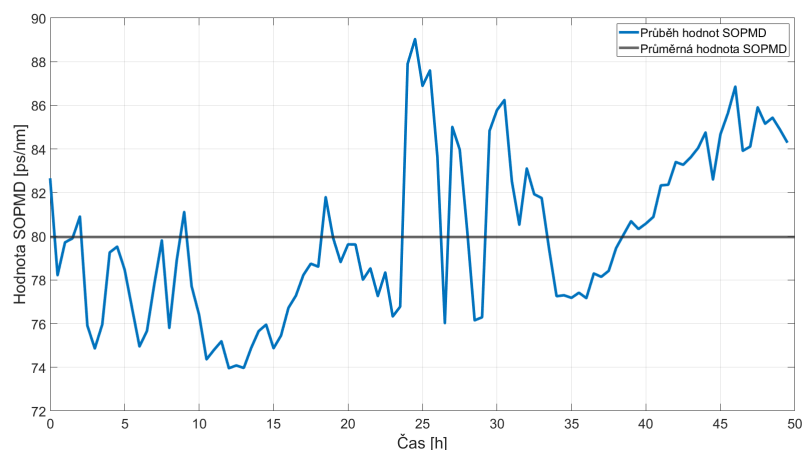
Obrázek 5.5: Rozložení hodnot PMD

Stejná trasa jako je na obr. 5.2 byla změřena i po delší dobu 48 hodin. Toto měření započalo 23.2.2022 v 11:33:40. Opět bylo získáno 100 náměrů, tentokrát však s rozstupem 30 minut. Průběhy hodnot PMD a SO PMD lze vidět na obr. 5.6 a 5.7.

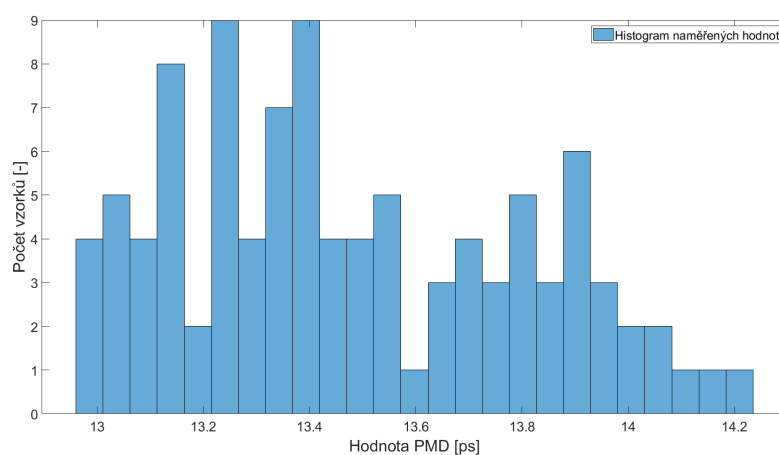


Obrázek 5.6: Průběh hodnot PMD za 48 hodin

Z porovnání hodnot PMD a SO PMD lze opět vidět, že mají stejnou teplotní závislost. Oproti 3 hodinovému měření lze pozorovat malý vzrůst rozsahu hodnot PMD (1,24 ps) na obr. 5.8, zapříčiněný delším časem měření a větším rozsahem teplot.

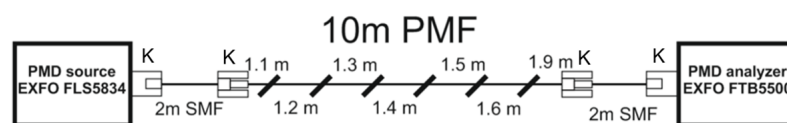


Obrázek 5.7: Průběh hodnot SO PMD za 48 hodin

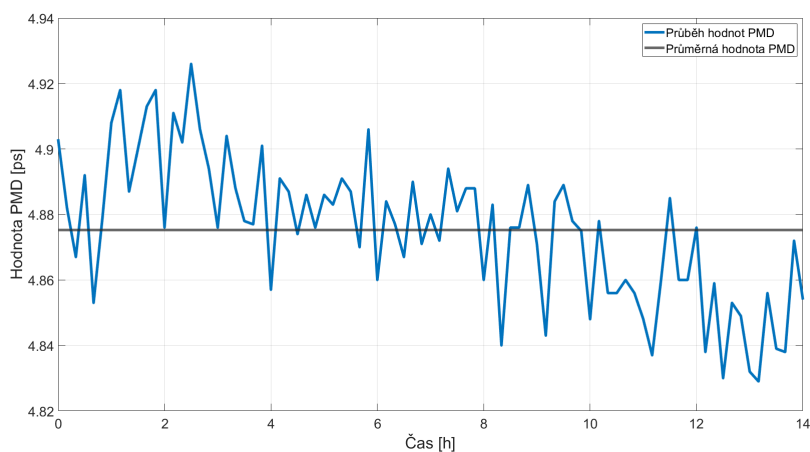


Obrázek 5.8: Rozložení hodnot PMD

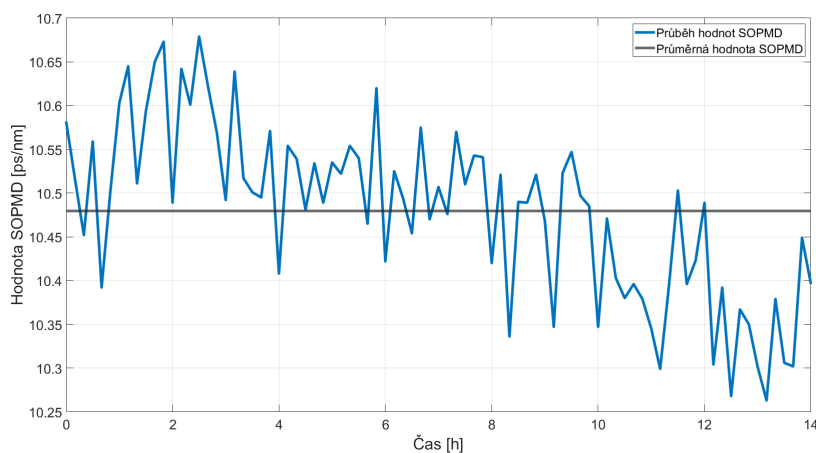
Další měření proběhlo na trase na obr. 5.9 stávající se pouze z jednoho 10metrového úseku PM vlákna s šesti svary po dobu 14 hodin. Začátek měření byl 16.3.2022 v 16:32. Výsledný průběh hodnot PMD a SOPMD lze vidět na obr. 5.10 a 5.11.



Obrázek 5.9: Schéma měřené trasy 10metrového PM vlákna s šesti svary

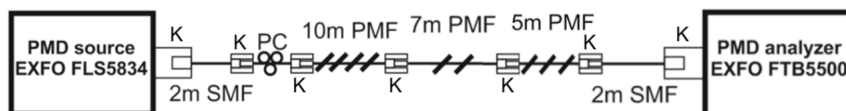


Obrázek 5.10: Průběh hodnot PMD za 17 hodin



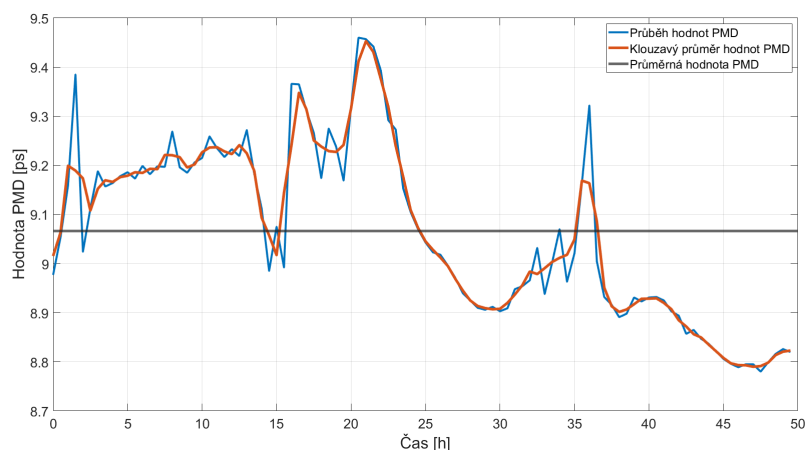
Obrázek 5.11: Průběh hodnot SO PMD za 17 hodin

Následně bylo provedeno měření na trase na obr. 5.12 skládající se ze tří úseků PM vláken po dobu necelých tří dnů. Měření začalo 28.3.2022 v 16:27. Průběh hodnot PMD z tohoto měření lze pozorovat na obr. 5.13.



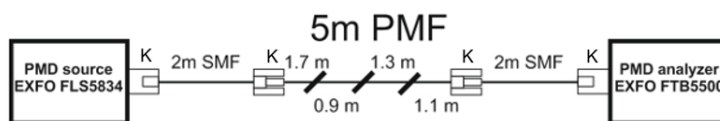
Obrázek 5.12: Schéma měřené trasy tří úseků PM vláken se svary

Z průběhu hodnot PMD je patrný trend, který po porovnání s průběhy denních teplot v dobách tohoto měření ukazuje velkou podobnost.

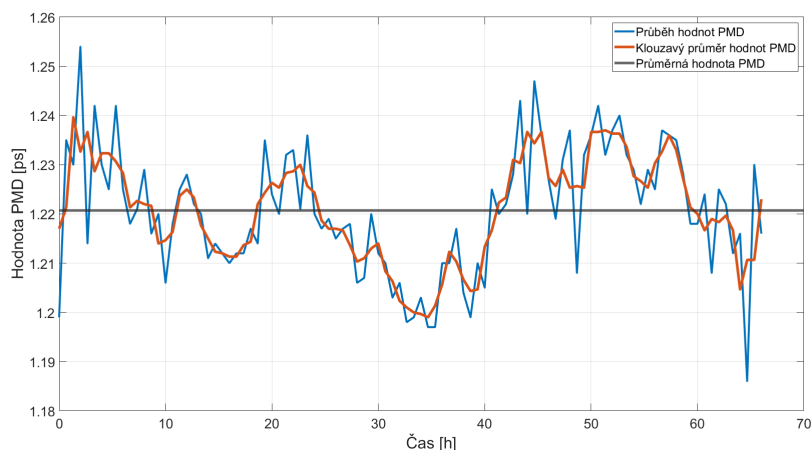


Obrázek 5.13: Průběh hodnot PMD za tři dny

Další třídenní měření bylo provedeno na trase na obr. 5.14 s rozdílem, že ke stávajícím třem 45° svarům bylo přidáno sedm náhodných svarů s náhodnými úhly mezi polarizačními osami. Celá trasa byla navíc pevně zafixována na optickém stole jak je vidět na obr. 5.15. Toto měření proběhlo 8.4.2022 v 16:03:47.

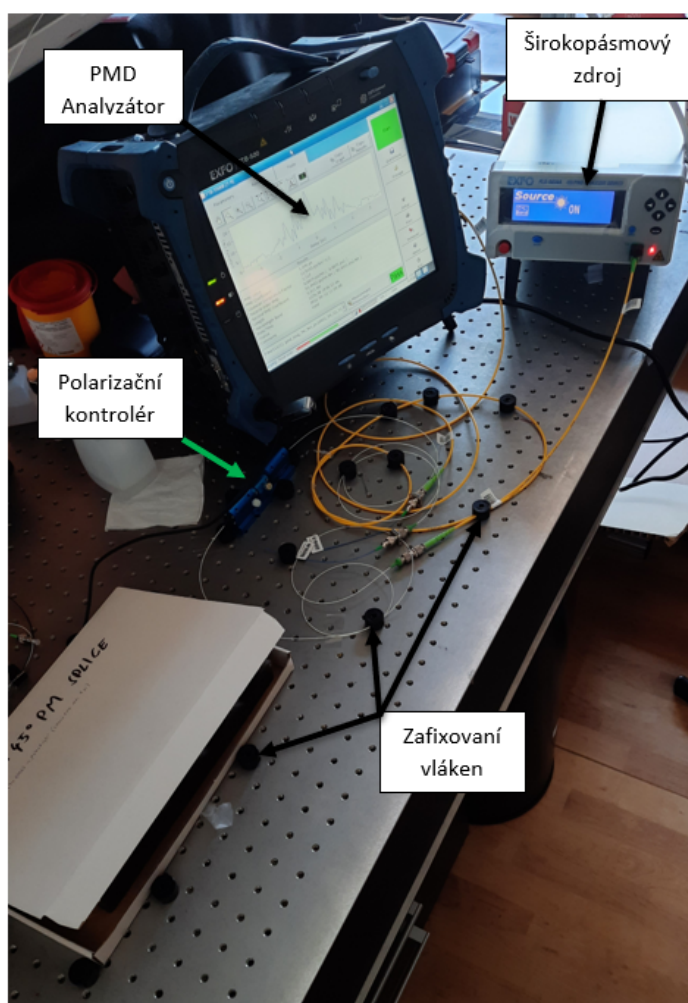


Obrázek 5.14: Schéma měřené trasy 5metrového PM vlákna se třemi svary



Obrázek 5.16: Průběh hodnot PMD za tři dny

Podobně jako v předchozím případě vychází značná podobnost mezi průběhem hodnot PMD a změnami denních teplot v těchto dnech.

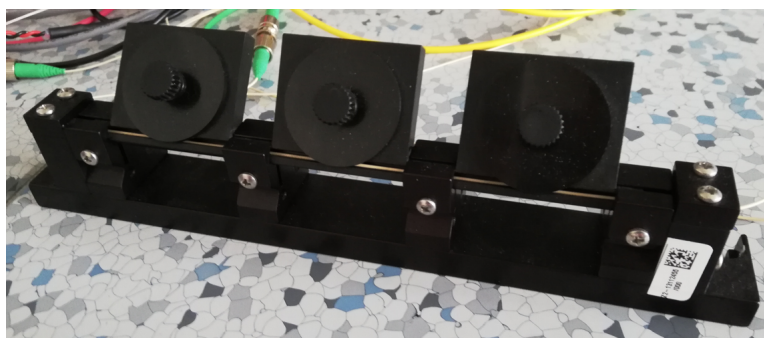


Obrázek 5.15: Ukázka zapojení měření

5.2 Vliv polarizačních kontrolérů mezi sekcemi PM vláken

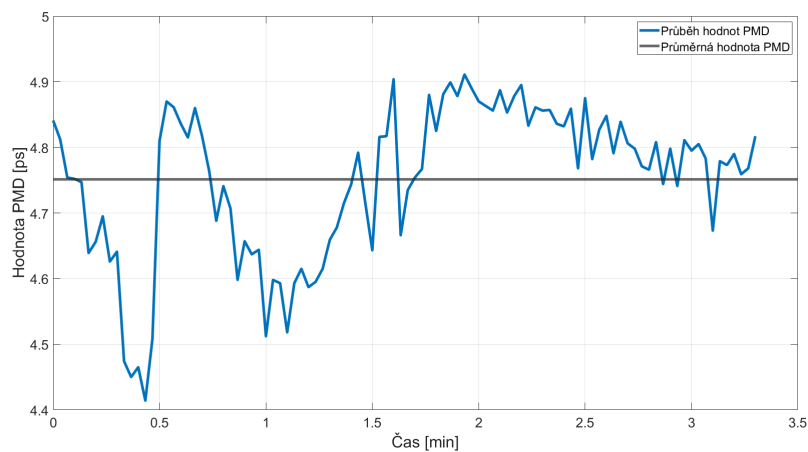
V další sekci měření byl pozorován vliv polarizačních kontrolérů na výsledné hodnoty PMD. Nastavení stavu polarizačních kontrolérů probíhalo ručně, jelikož byly k dispozici pouze manuální mechanické polarizační kontroléry. Polarizační kontroléry na obr. 5.1 a 5.15 neumožňují rychlou změnu stavu polarizace a pro účely tohoto měření byl vybrán pádlový polarizační kontrolér FPC032 of firmy Thorlabs na obr. 5.17.

V prvním kroku pro zjištění vlivu polarizačního kontroléru byl kontrolér zapojen před PM vlákno délky 10 metrů s 6 svary. Během měření bylo opět získáno 100 náměrů, jejichž průběh lze vidět na obr. 5.18 a 5.19. Během

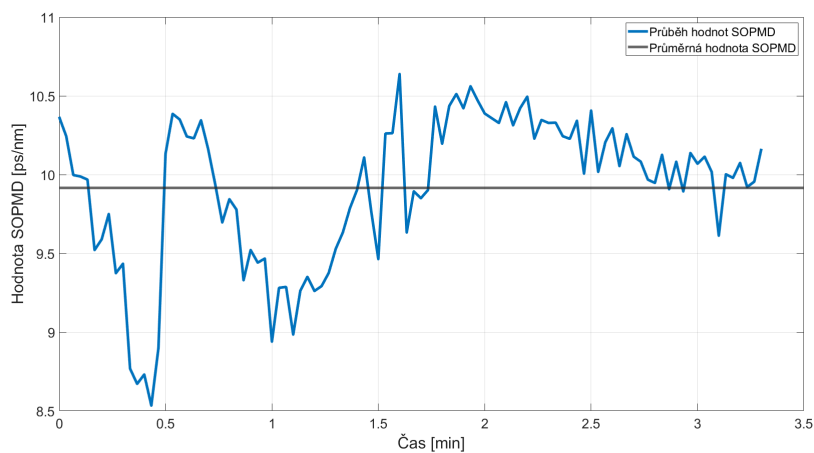


Obrázek 5.17: Pádlový polarizační kontrolér

prvních 50 náměrů bylo ručně s jemným krokem pohybováno první smyčkou kontroléru v rozmezí 180° z a do vodorovné polohy pádla. V druhé polovině náměrů zůstaly všechny smyčky ve svislé poloze.

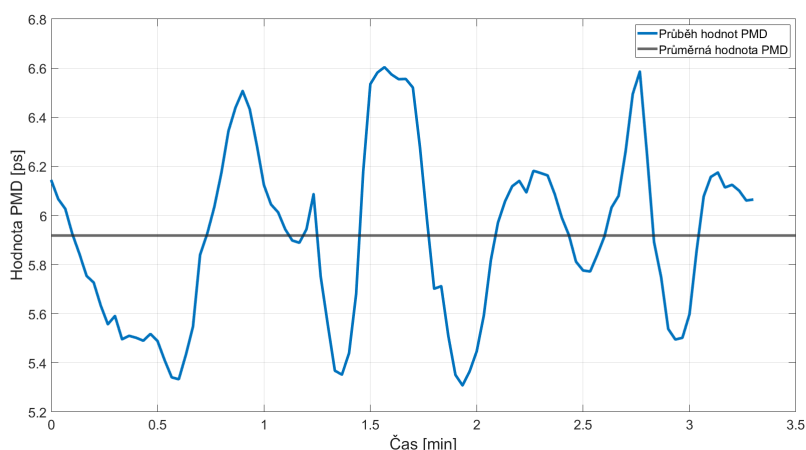


Obrázek 5.18: Průběh hodnot PMD

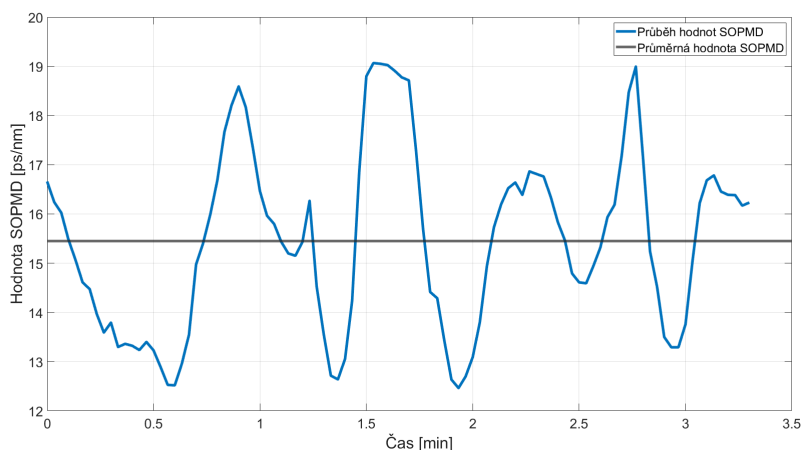


Obrázek 5.19: Průběh hodnot SO PMD

V druhém kroku byl ten samý polarizační kontrolér použit pro propojení 5 metrů dlouhého PM vlákna se třemi svary a 10 metrového s šesti svary. V tomto případě bylo během 100 náměrů ručně s jemným krokem pohybováno postupně všemi třemi pádly kontroléru v rozmezí 180° . Průběh hodnot PMD a SO PMD z tohoto měření lze vidět na obr. 5.20 a 5.21. Z průběhů hodnot SO PMD na obr. 5.19 a 5.21 je patrné, že mají stále stejný průběh jako hodnoty PMD i se změnou stavu polarizace před i mezi sekcemi vláken pomocí polarizačních kontrolérů.

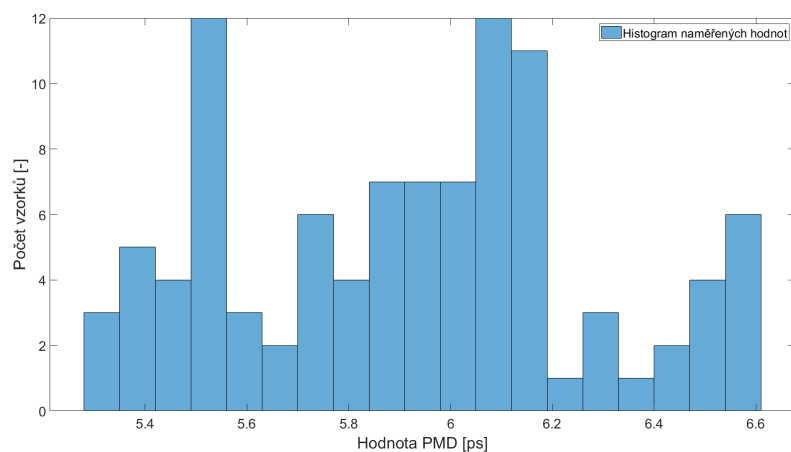


Obrázek 5.20: Průběh hodnot PMD



Obrázek 5.21: Průběh hodnot SO PMD

Na obr. 5.22 lze vidět histogram hodnot PMD z tohoto měření. Rozsah hodnot s použitím polarizačního kontroléru činil 1,3 ps s průměrnou hodnotou 5,91 ps. Relativní rozsah hodnot PMD je v tomto případě lepší než v případě dlouhodobých měření s proměnnou teplotou na obr. 5.5 a 5.8.



Obrázek 5.22: Rozložení hodnot PMD

5.3 Měření a porovnání vlastností s emulátorem PE4200

V další části byla provedena řada měření na PMD emulátoru PE4200 od firmy FIBERPRO na obr. 5.23. Hodnota PMD je nastavitelná pomocí osmi rotátorů.

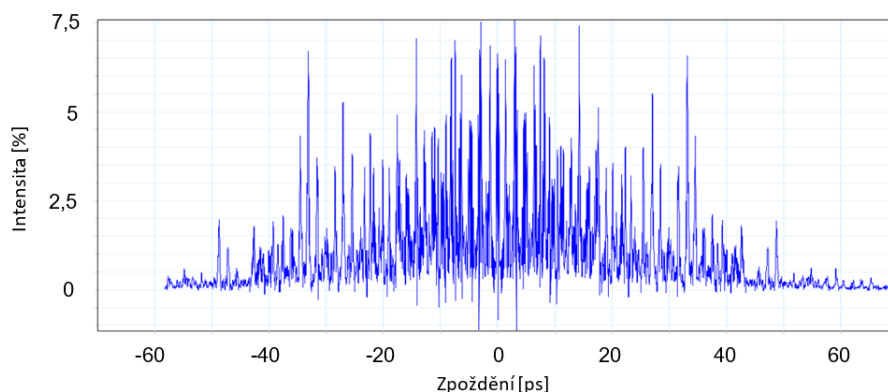
Tabulka 5.1: Specifikace emulátoru PE4200

Funkce	Laditelná generace 1. a 2. řádu PMD
	Náhodná generace PMD (Maxwellovo rozložení)
Standardní rozsah DGD	0 - 100 ps
Vložný útlum	<2,0 Db
Průměrná PMD	38 ps
Rozsah SO PMD	0 - 2500 ps ²

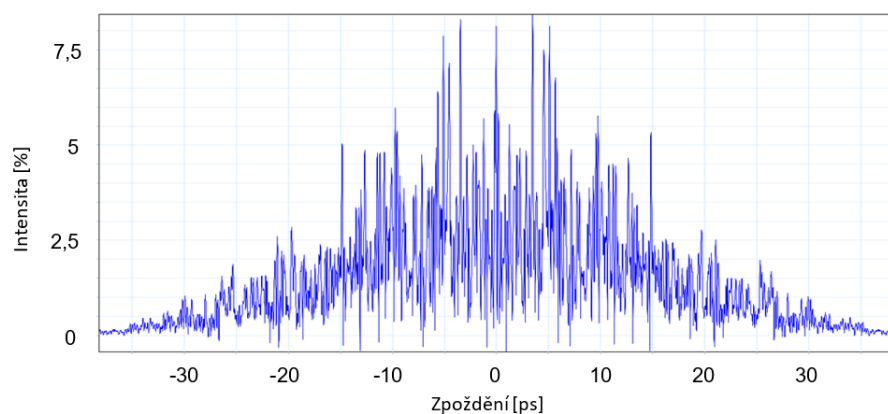


Obrázek 5.23: PMD emulátor PE4200

Jako první byl získán interferogram na obr. 5.24, jež má podobný charakter jako interferogram celé trasy na obr. 4.25. Výsledná hodnota PMD byla 23,3 ps, což lze vidět na obr. 5.26.



Obrázek 5.24: Interferogram emulátoru PE4200



Obrázek 5.25: Interferogram celkové trasy PM vláken

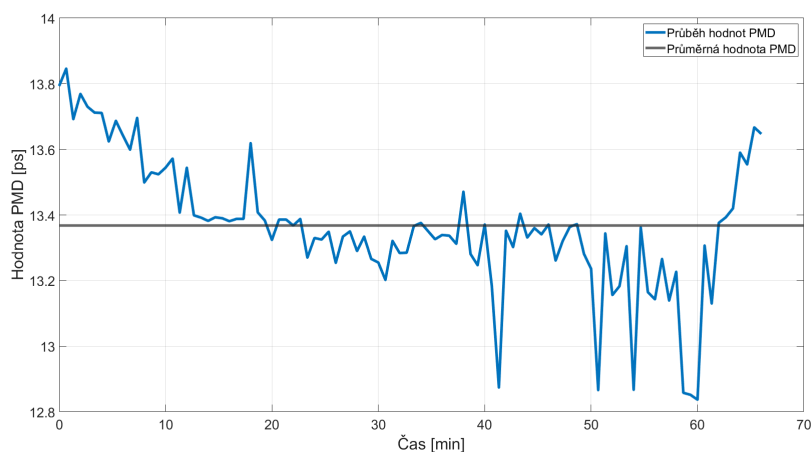
Z porovnání interferogramů na obr. 5.24 a 5.25 emulátoru PE4200 a celkové trasy emulátoru z PM vláken z obr. 4.21 lze vidět, že jsou již velice podobné. Hlavním rozdílem je rozsah hodnot, do kterých interferogram zasahuje. Tento rozdíl je spojen s maximální dosažitelnou hodnotou PMD emulátoru a je možné tuto hodnotu navýšit přidáním dalších sekcí PM vláken.

PMD

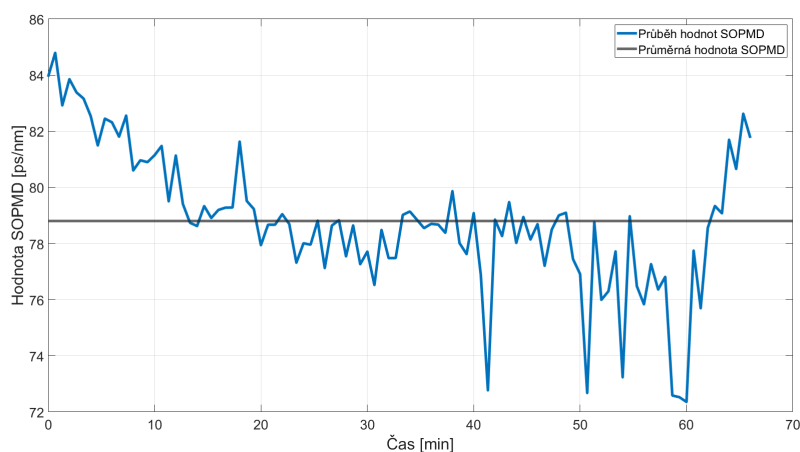
Results		Test Parameters		Test Settings	
PMD value	23,3116 ps	From	1528,23 nm	Fiber length	19 m
PMD coefficient	169,1199 ps/km ^{1/2}	To	1628,53 nm	Used for stat	Yes
PMD value, 2nd order	239,7823 ps/nm	Fiber type	Telecom		
PMD coefficient, 2nd order	12620,1237 ps/nm ² km				
Gaussian compliance	0,952				

Obrázek 5.26: Výsledky emulátoru PE4200

Dále bylo provedeno hodinové měření emulátoru v konfiguraci rotátorů, která dávala hodnotu PMD podobnou hodnotě PMD kaskády z obr. 4.24. Měření se skládalo ze 100 náměrů po 40 sekundách a výsledný průběh hodnot PMD a SO PMD lze pozorovat na obr. 5.27 a 5.28.



Obrázek 5.27: Průběh hodnot PMD



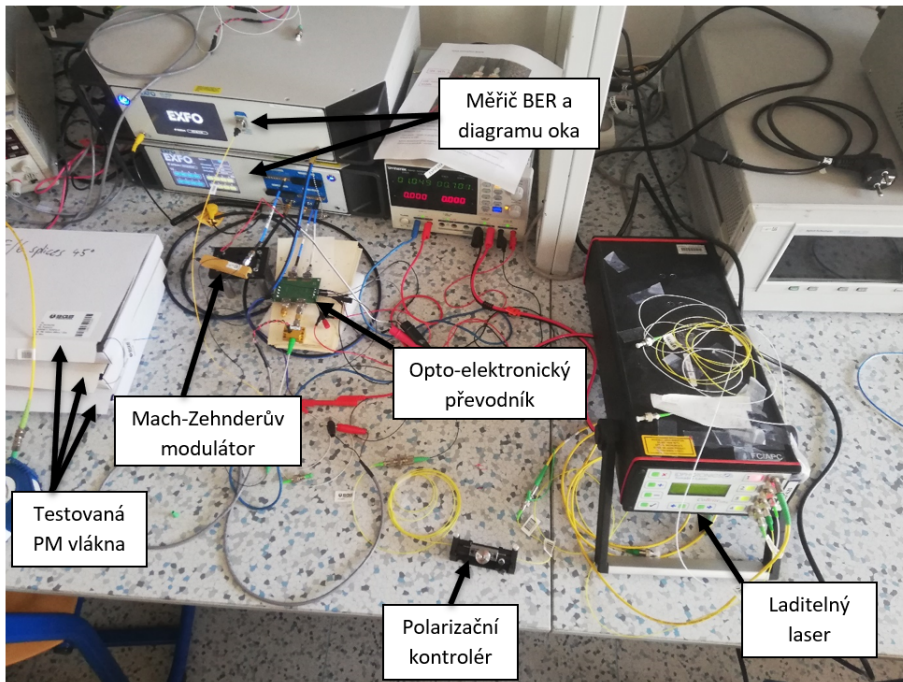
Obrázek 5.28: Průběh hodnot SO PMD

Z obr. 5.27 a 5.28 lze vidět stejný průběh hodnot PMD a SO PMD v závislosti na času a teplotě stejně jako u měření PM vláken.

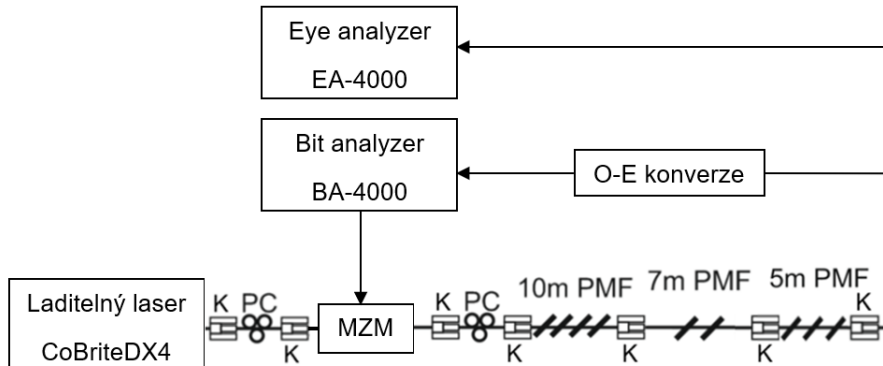
5.4 Vliv PMD na BER systému 25 GBd NRZ

V této části byl změřen vliv PMD na bit-error-rate 25 GBd systému s non-return-to-zero kódováním na obr. 5.29. Trasa, která byla zdrojem disperze

pro tento systém, se skládala ze tří úseků PM vláken, 10metrového s šesti svary, 7metrového se dvěma svary a 5metrového se třemi svary.



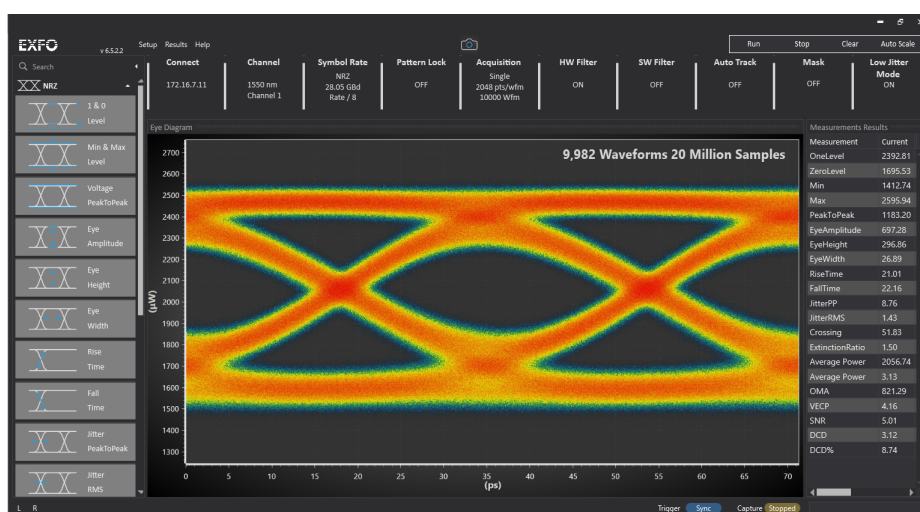
Obrázek 5.29: Ukázka zapojení měření



Obrázek 5.30: Schéma zapojení měření BER a diagramu oka

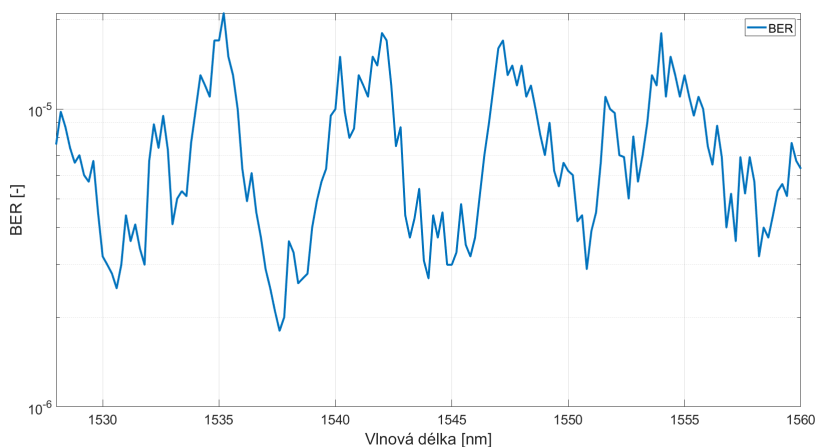
Použitý laser, CoBriteDX4 od IDPhotonics, byl laditelný ve vlnových délkách od 1530 do 1565 nm. V tomto rozsahu bylo získáno několik hodnot BER pomocí bit analyzery BA-4000 of firmy EXFO, jejichž průběh je na obr. 5.31. Charakter tohoto průběhu je podobný obr. 2.4 a měl by být přímo úměrný závislosti DGD na vlnové délce.

Dále byl pro porovnání na vlnových délkách 1535 a 1550 nm, pro které vycházely značně odlišné hodnoty BER, změřen i diagram oka na obr. 5.32 a 5.33 pomocí eye analyzery EA-4000 taktěž od firmy EXFO. Oko na diagramu

Obrázek 5.33: Diagram oka na 1550 nm s $BER = 2,8 \cdot 10^{-7}$

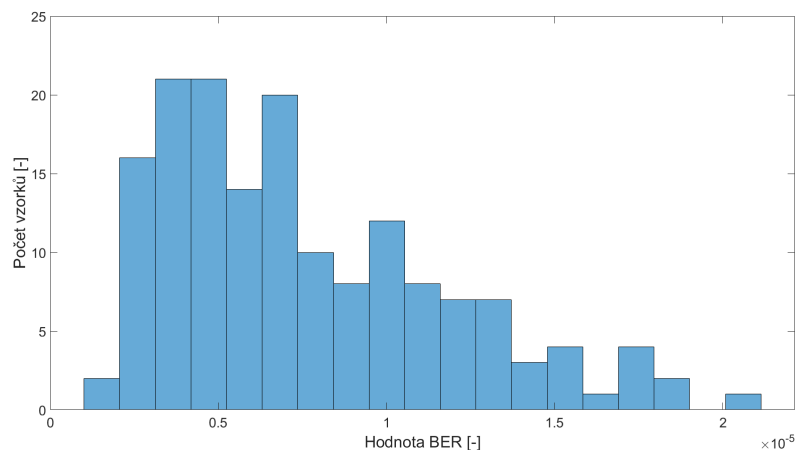
5.5 Vliv PMD na BER systému 28,9 GBd PAM4

Měření vlivu PMD na bit-error-rate bylo opakováno na systému s přenosovou rychlostí 28,9 GBd s modulací PAM4. Měření bylo zopakováno především pro získání jemnějšího rozlišení v závislosti vlnové délky na BER. Zapojení měření zůstalo stejné až na změnu 7metrového PM vlákna, na které bylo přidáno dalších sedm svarů s náhodnými úhly svaření. Výsledná závislost BER na vlnové délce s krokem 0,2 nm lze vidět na obr. 5.34. Menší rozsah hodnot BER je zapříčiněn jak změnou modulace tak přidáním svarů na 7metrový úsek PM vlákna. Přidáním svarů na PM vlákno není možné získat větší hodnotu PMD než je u nemodifikovaného PM vlákna.



Obrázek 5.34: Závislost BER na vlnové délce

Větší množství hodnot nám také umožnilo získat rozložení na obr. 5.35. Zde je již vidět přiblížení Maxwellovu rozložení popsané v sekci 2.2 na obr. 2.5.

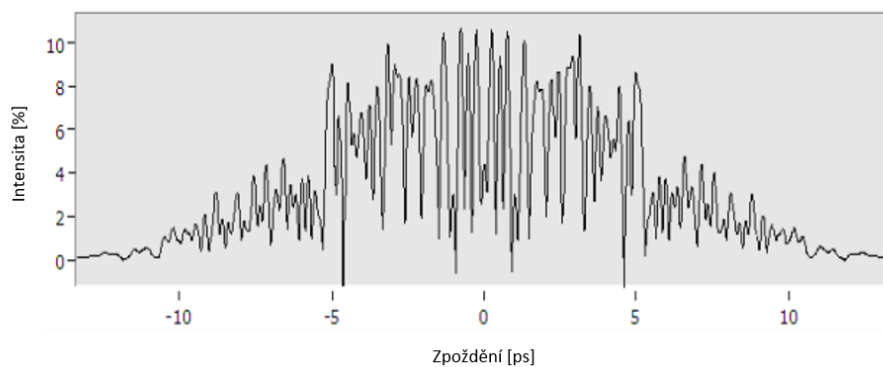


Obrázek 5.35: Rozložení hodnot BER

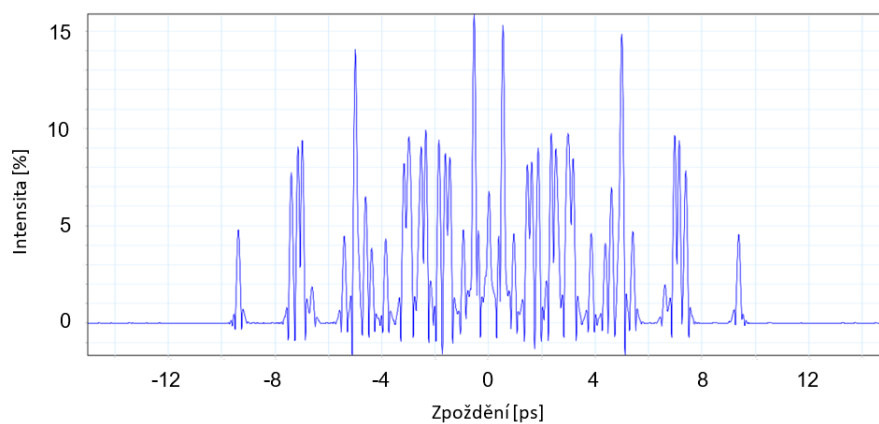
5.6 Porovnání PMD emulátoru s reálnou trasou

Hlavním faktorem při porovnávání vlastností tras z hlediska polarizační vidové disperze jsou jejich interferogramy, které ukazují přítomnost a charakter celé řady dvojlomů ve vlákně. Na obr. 5.36 je interferogram trasy telekomunikačního vlákna délky 36 km z roku 2018. Trasa vykazovala hodnotu PMD 4,45 ps a při porovnání s námi vytvořeným 7metrovým úsekem PM vlákna se třemi svary a s podobnou hodnotou PMD 5 ps na obr. 5.37 lze vidět pouze mírná podobnost. PM vlákno totiž obsahuje pouze tři 45° svary a nevytváří tím dostatečné množství dvojlomných subsekcí v trase. Pro lepší emulaci trasy 36 km by se musel zvýšit jak počet svarů tak celková délka PM vlákna, jelikož by se zvýšením počtu svarů snížila maximální hodnota PMD.

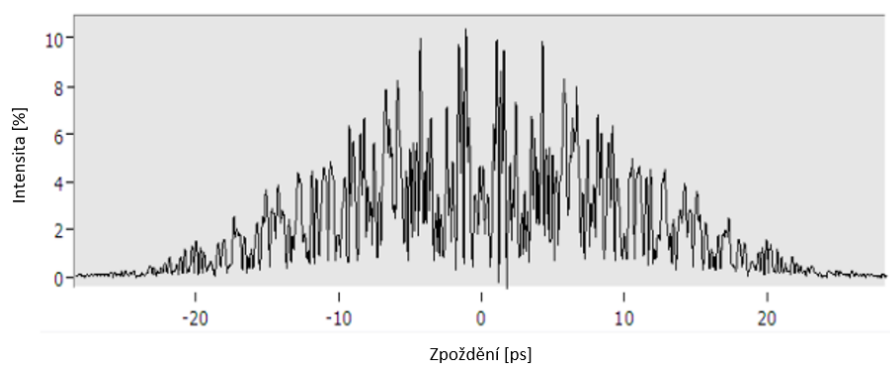
Daleko lepší výsledek z porovnání emulátoru z PM vláken a telekomunikačního vlákna o délce 36 km s hodnotou PMD 9,48 ps nám dává kaskáda tří PM vláken z obr. 4.15 s celkovým počtem svarů 9 a hodnotou PMD 10 ps. Na interferogramech z obr. 5.38 a 5.39 lze vidět podobnost jak v hustotě interferencí s velkého množství dvojlomných sekcí tak v rozsahu zpoždění. Větší počet svařených sekcí s různými délkami poté vede i ke statistickým rozložením bližším Maxwellově distribuci [21].



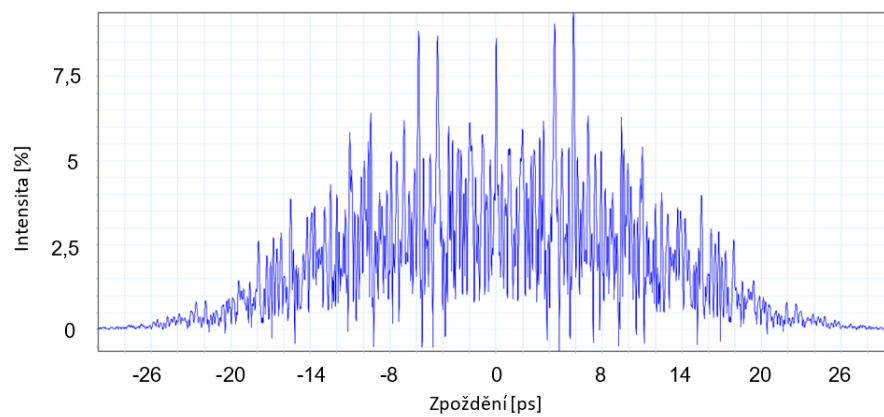
Obrázek 5.36: Interferogram 36 km telekomunikačního vlákna s PMD 4,45 ps



Obrázek 5.37: Interferogram 7 metrů PMF se třemi svary



Obrázek 5.38: Interferogram 36 km telekomunikačního vlákna s PMD 9,48 ps



Obrázek 5.39: Interferogram kaskády tří PM vláken

Kapitola 6

Závěr

V projektu byla představena problematika polarizační vidové disperze a její negativní dopad na vysokorychlostní optické sítě. Byly představeny základní principy polarizační vidové disperze, metody měření polarizační vidové disperze a prvků spojených s PMD jako jsou polarizaci zachovávající vlákna a polarizační kontroléry, které byly využity při realizaci emulátoru.

V praktické části je poté popsán použitý postup pro realizaci emulátoru. Prvně proběhlo pomocí interferometrické metody GINTY měření jednoho polarizaci zachovávajícího vlákna pro seznámení s metodou a výsledky, jež tato metoda nabízí. Dále byly, pro přiblížení reálným trasám, přidávány do trasy další úseky PM vláken a především svary s úhlem 45° mezi polarizačními osami. Každý úsek PM vlákna byl proměřen a byl získán jeho interferogram. Během projektu byla sestavena kaskáda pěti úseků polarizaci zachovávajících vláken s celkovým počtem svarů 18. Tato trasa dlouhá 45 metrů s útlumem 1,4 dB byla proměřena bez i s polarizačními kontroléry mezi sekcemi a výsledné interferogramy nebyly výrazně odlišné. Oba výsledné interferogramy na obr. 4.22 a 4.25 jsou však již velice podobné interferogramům 10 ps PMD emulátoru v [22], emulátoru PE4200 firmy FIBERPRO na obr. 5.23 a reálné trasy telekomunikačního vlákna délky 36 km na obr. 5.38.

Další část je zaměřena na měření charakteristik PMD emulátoru. Jako první byla změřena časová a teplotní závislost PMD jak v rozsahu několika minut až hodin tak i několika dní. Relativní rozsah hodnot PMD byl v případech změny teploty v rozmezí pouze 5,6-9,2% střední hodnoty. Lepší relativní rozsah poskytovalo již první měření v sekci 5.2 zaměřené na zjištění vlivu polarizačních kontrolérů s 10,5% a dále druhé měření s 21,9%. Pomocí

manuálních polarizačních kontrolérů mezi sekcemi PM vláken však nebylo z časových a praktických důvodů možno získat Maxwellovu distribuci. Bylo však dokázáno, že je vlivem polarizačních kontroléru možné emulovat širší rozsah hodnot PMD. Maxwellovo rozložení PMD bylo získáno až při měření vlivu polarizačně vidové disperze na přenosové vlastnosti systému s rychlostí 28,9 GBdps a modulací PAM4. Rozložení na obr. 5.35 bylo získáno z hodnot chybovosti, která je přímo úměrná hodnotě PMD, v rozsahu vlnových délek 1528 až 1560 nm.



Literatura

- [1] HUI, Rongqing a Maurice O'SULLIVAN. *Fiber Optic Measurement Techniques*. 1. Burlington, MA 01803, USA: Elsevier Academic Press, 2009. ISBN 978-0-12-373865-3.
- [2] BOHATA, J., J. JAROS, S. PISARIK, S. ZVANOVEC a M. KOMANEK. *Long-Term Polarization Mode Dispersion Evolution and Accelerated Aging in Old Optical Cables*. IEEE Photonics Technology Letters [online]. 2017, 29(6), 519-522 [cit. 2022-01-06]. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/LPT.2017.2662739
- [3] IBRAGIMOV, E., G. SHTENGEL a S. SUH. *Statistical correlation between first and second-order PMD*. Journal of Lightwave Technology [online]. 20(4), 586-590 [cit. 2022-05-16]. ISSN 07338724. Dostupné z: doi:10.1109/50.996577
- [4] *Testing Polarization Mode Dispersion in the Field* [online]. Scottsdale, US: Viavi Solutions, 2020 [cit. 2022-01-06]. Dostupné z :<https://www.viavisolutions.com/en-us/literature/testing-polarization-mode-dispersion-field-white-papers-books-en.pdf>
- [5] *Polarization-Maintaining Fiber (PM Fiber, PMF)* [online]. Saitama, 356-8502 Japan: FiberLabs, 2018 [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.fiberlabs.com/glossary/polarization-maintaining-fiber/>
- [6] RAJA, M. Yasin Akhtar a Sameer K. ARABASI. *Design and simulations of a dynamic polarization-mode dispersion compensator for long-haul optical networks*. Optics Express [online]. 2003, 11(10) [cit. 2022-05-16]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.11.001166

- [7] YU, Mimura, Ikeda KAZUHIRO, Hatano TATSUYA, Takagi TAKE-SHI, Wako SUGIO a Matsuura HIROSHI. *PMD Compensator and PMD Emulator*. Furukawa Review [online]. 2003, 2003(24), 6 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.furukawa.co.jp/review/fr024/fr24_05.pdf
- [8] YAN, L.-S., Y.Q. SHI, X.S. YAO a A.E. WILLNER. *All-order PMD emulator with tunable statistics*. In: 2003 Digest of LEOS Summer Topical Meeting (Cat. No.03TH8701) [online]. IEEE, 2003, TuB3.2/43-TuB3.2/44 [cit. 2022-05-16]. ISBN 0-7803-7982-9. Dostupné z: doi:10.1109/LEOSST.2003.1224309
- [9] YAN, Lianshan, X. Steve YAO, M. C. HAUER a A. E. WILLNER. *Practical Solutions to Polarization-Mode-Dispersion Emulation and Compensation*. Journal of Lightwave Technology [online]. 2006, 24(11), 3992-4005 [cit. 2022-05-16]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2006.883610
- [10] MUSARA, Vitalis, Winston T. IREETA, Samuel K. FOSUHENE, Lorinda WU a Andrew W.R. LEITCH. *Tuneable polarization mode dispersion emulator: Fixed polarization maintaining fibre sections and rotatable polarization orientations*. Optik [online]. 2012, 123(3), 228-234 [cit. 2022-05-16]. ISSN 00304026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2010.11.035
- [11] WILLIAMS, Paul. *PMD measurement techniques and how to avoid the pitfalls*. Journal of Optical and Fiber Communications Reports [online]. 2004, 1(1), 84-105 [cit. 2022-05-16]. ISSN 1619-8638. Dostupné z: doi:10.1007/s10297-004-0010-4
- [12] MOTUZ, Rastislav, Petr MUNSTER a Miloslav FILKA. *PMD Study Measurement – Fixed Analyzer Method*. Journal of Communications Software and Systems [online]. 2017, 11(4), 199-203 [cit. 2022-05-16]. ISSN 1846-6079. Dostupné z: doi:10.24138/jcomss.v11i4.98
- [13] HEFFNER, B. L., *Automatic measurement of polarization mode dispersion using Jones Matrix Eigenanalysis*. IEEE Ph. Tech. Let. 4, 1066–1069, 1992.
- [14] HEFFNER, B. L., *Accurate, automated measurement of differential group delay dispersion and principal state variation using Jones Matrix Eigenanalysis*. IEEE Ph. Tech. Let. 5, 814–817, 1993.
- [15] JONES, R. C., *A new calculus for the treatment of optical systems I*, Journal of Optics Society of America, Vol. 31, pp. 488–503, 1941.
- [16] FORESTIERI, E. a L. VINCETTI. *Exact evaluation of the Jones matrix of a fiber in the presence of polarization mode dispersion of any order*. Journal of Lightwave Technology [online]. 19(12), 1898-1909 [cit. 2022-05-16]. ISSN 07338724. Dostupné z: doi:10.1109/50.971683

- [17] DJUPJOBACKA, A. *On differential group-delay statistics for polarization-mode dispersion emulators*. Journal of Lightwave Technology [online]. 19(2), 285-290 [cit. 2022-05-16]. ISSN 07338724. Dostupné z: doi:10.1109/50.917907
- [18] LIMA, I.T., R. KHOSRAVANI, P. EBRAHIMI, E. IBRAGIMOV, C.R. MENYUK a A.E. WILLNER. *Comparison of polarization mode dispersion emulators*. Journal of Lightwave Technology [online]. 19(12), 1872-1881 [cit. 2022-05-16]. ISSN 07338724. Dostupné z: doi:10.1109/50.971679
- [19] CYR, N. *Generalized interferometric method for accurate match with DGD measurements and comparison against standard references*. In: Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements, 2004 [online]. IEEE, 2004, 2004, s. 85-90 [cit. 2022-05-16]. ISBN 1-886843-37-6. Dostupné z: doi:10.1109/SOFM.2004.183481
- [20] MUSARA, Vitalis, Winston T. IREETA, Lorinda WU a Andrew W. R. LEITCH. *The General interferometry technique: Interferogram analysis in the presence of a high polarization mode dispersion segment*. In: IEEE Africon '11 [online]. IEEE, 2011, 2011, s. 1-4 [cit. 2022-05-16]. ISBN 978-1-61284-992-8. Dostupné z: doi:10.1109/AFRCON.2011.6071972
- [21] YAN, L.-S., B. ZHANG, X. Steve YAO a A. E. WILLNER. *All-Fiber PMD Emulator with Reduced Number of Polarization Controllers between Sections*. In: OFC/NFOEC 2007 - 2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference [online]. IEEE, 2007, 2007, s. 1-3 [cit. 2022-01-05]. ISBN 1-55752-831-4. Dostupné z: doi:10.1109/OFC.2007.4348834
- [22] PROLA, C.H., J.A. PEREIRA DA SILVA, A.O. DAL FORNO, R. PASSY, J.P. VON DER WEID a N. GISIN. *PMD emulators and signal distortion in 2.48-Gb/s IM-DD lightwave systems*. IEEE Photonics Technology Letters [online]. 1997, 9(6), 842-844 [cit. 2022-01-07]. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/68.585009