

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

POLARIZAČNÍ VIDOVÁ DISPERZE – PMD

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN ŤUPA



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

POLARIZAČNÍ VIDOVÁ DISPERZE – PMD

POLARIZATION MODE DISPERSION – PMD

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN ŤUPA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2011

ZDE VLOŽIT LIST ZADÁNÍ

Z důvodu správného číslování stránek

ZDE VLOŽIT PRVNÍ LIST LICENČNÍ
SMOUVY

Z důvodu správného číslování stránek

ZDE VLOŽIT DRUHÝ LIST LICENČNÍ
SMOUVY

Z důvodu správného číslování stránek

ABSTRAKT

Polarizační vidová disperze – PMD se stává nejvíce limitujícím faktorem pro realizaci vysokorychlostních optických přenosů. Velikost zpoždění světelného impulzu mezi polarizačními rovinami je ovlivněna spoustou různých faktorů, a proto je třeba přesné měření PMD realizovat ve všech fázích budování a provozu optické trasy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polarizační vidová disperze, ITU-T G.65x, měření PMD, kompenzace PMD, optické vlákno

ABSTRACT

Polarization mode dispersion – PMD becomes the most limiting factors for achieving high-speed optical transmission. The size of the differential group delay between the polarization plane is influenced by many different factors and therefore accurate measurement of PMD should be done in all phases of building and operating optical path.

KEYWORDS

Polarization mode dispersion, ITU-T G.65x, measuring PMD, compensation PMD, optic fiber

ŽUPA, 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.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Polarizační vidová disperze – PMD“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

1	Úvod	14
2	Polarizační vidová disperze – PMD	15
2.1	Definice PMD	15
2.2	Limitní parametry optického vlákna	17
2.2.1	PMD v závislosti na délce optického vlákna	19
2.2.2	PMD v krátkých vláknech	20
2.2.3	PMD v dlouhých vláknech	21
2.3	Vliv PMD na odolnost modulačních formátů	22
2.4	Polarizační stav optického vlny	24
2.4.1	Jonesův vektor polarizace	27
2.4.2	Poincarého koule	30
2.4.3	Koherence světla	33
2.4.4	Anizotropní prostředí	33
3	Metody měření polarizační vidové disperze	34
3.1	Úvod	34
3.2	Metoda skenování vlnové délky (metoda s fixním analyzátozem)	34
3.3	Tradiční interferometrická metoda měření PMD (TINTY)	35
3.3.1	Možná omezení metody TINTY	37
3.4	Obecná interferometrická metoda měření PMD (GINTY)	38
3.5	Metoda P-OTDR	39
3.5.1	Metoda analýzy SOP	40
3.5.2	Metoda analýzy DOP	41
3.5.3	Vyhodnocení měření	43
3.6	Praktické zkušenosti z měření PMD	44
3.6.1	Použití metody GINTY	45
4	Kompenzační techniky pro PMD	47
4.1	Kompenzace PMD jevu	47
4.2	Optická PMD kompenzace	47
4.3	Optoelektronická PMD kompenzace	48
4.4	Elektronická PMD kompenzace	49
5	Doporučení ITU-T pro optické vlákno	50
5.1	Normotvorné orgány	50
5.2	Optická vlákna používaná v telekomunikační technice	50
5.3	Optická vlákna dle standardu G.657	53

6	Expertní měření optické sítě MU Brno	55
6.1	Úvodní informace k expertnímu měření	55
6.2	Měřené parametry optických tras	57
6.2.1	Polarizační vidová disperze PMD	57
6.2.2	Chromatická disperze CD	58
6.3	Použité měřicí přístroje	58
6.3.1	Měřicí přístroj PMD EXFO FTB-5500B	59
6.3.2	Měřicí přístroj CD EXFO FTB-5800	60
6.3.3	Měřicí přístroj CD/PMD EXFO FTB-5700	60
6.4	Trasa Kovoterm – Botanická	61
6.5	Trasa Komenského – Kovoterm	62
6.6	Trasa Botanická – Komenského	63
6.7	Trasa Komenského – Poříčí	65
6.8	Trasa Kounicova Družba – VUT Kounicova	66
6.9	Trasa VUT Kounicova – Kotlářská	68
6.10	Trasa nám. Míru B – Žlutý kopec	69
6.11	Trasa Žlutý kopec – Lipová	70
6.12	Trasa Lipová – Kampus 48	72
6.13	Trasa Lipová – Poříčí	73
6.14	Výsledky expertního měření	74
7	Grafické zpracování naměřených hodnot	76
8	Závěr	101
	Literatura	103
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	105
	Seznam příloh	108
A	CD1 se zdrojovými daty z měřících přístrojů	109
B	CD2 s PDF listy z měření + topologie měřených tras	110
C	Technická specifikace měřících přístrojů	111
C.1	DataSheet CD/PMD FTB-5700	111
C.2	DataSheet CD EXFO FTB-5800	111
C.3	DataSheet PMD EXFO FTB-5500B	111

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Model polarizačních rovin	15
2.2	Zpoždění DGD světelného impulzu mezi rychlou a pomalou osou . . .	16
2.3	Maximální akceptovatelné impulzové zpoždění	18
2.4	Maximální vzdálenost v závislosti na PMD koeficientu a přenosové rychlosti	18
2.5	Maxwellian distribuční funkce	19
2.6	Prostorový vývoj polarizace	20
2.7	Velikost PMD v závislosti na délce kabelu	21
2.8	Rozdíl mezi šířkou elektrického a optického pásma	23
2.9	Závislost power penalty na DGD pro různé druhy modulací	23
2.10	Závislost BER na SNR	24
2.11	Diagramy oka pro různé modulační formáty	25
2.12	Přehled všech druhů modulace	26
2.13	Lineárně polarizované světlo	27
2.14	Kruhově polarizované světlo	28
2.15	Elipticky polarizované světlo	28
2.16	Poincarého koule	31
2.17	Polarizační stavy vlny v Poincarého kouli	32
3.1	Metoda skenování vlnové délky	35
3.2	Schematické uspořádání interferometrické metody TINTY	36
3.3	Příklad náměru PMD optického vlákna měřeného interferometrickou metodou	36
3.4	Schematické uspořádání nové interferometrické metody GINTY . . .	38
3.5	Blokové schéma analýzy SOP	40
3.6	Blokové schéma analýzy DOP	42
4.1	Jednoduchá architektura optického PMD kompenzátoru	48
4.2	Typická architektura optoelektronického PMD kompenzátoru	48
4.3	Blokový diagram optického přijímače, který obsahuje elektrický PMD kompenzátor	49
6.1	Platforma EXFO FTB-500	59
6.2	Platforma EXFO FTB-200	60
7.1	Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Kovoterm – Botanická . .	76
7.2	Průběh CD v závislosti na vlnové délce o pro vlákno č.024 trasy Kovoterm – Botanická	76
7.3	Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Kovoterm – Botanická .	77
7.4	Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Kovoterm – Botanická	77

7.5	Výsledný interferogram pro vlákno č.024 trasy Kovoterm – Botanická	78
7.6	Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Komenského – Kovoterm	78
7.7	Průběh CD v závislosti na vlnové délce o pro vlákno č.031 trasy Komenského – Kovoterm	79
7.8	Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Komenského – Kovoterm	79
7.9	Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Komenského – Kovoterm	80
7.10	Výsledný interferogram pro vlákno č.031 trasy Komenského – Kovoterm	80
7.11	Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Botanická – Komenského	81
7.12	Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.030 trasy Botanická – Komenského	81
7.13	Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Botanická – Komenského	82
7.14	Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Botanická – Komenského	82
7.15	Výsledný interferogram pro vlákno č.030 trasy Botanická – Komenského	83
7.16	Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Komenského – Poříčí	83
7.17	Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.010 trasy Komenského – Poříčí	84
7.18	Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Komenského – Poříčí	84
7.19	Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Komenského – Poříčí	85
7.20	Výsledný interferogram pro vlákno č.010 trasy Komenského – Poříčí	85
7.21	Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Kounicova Družba – VUT Kounicova	86
7.22	Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.005 trasy Kounicova Družba – VUT Kounicova	86
7.23	Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Kounicova Družba – VUT Kounicova	87
7.24	Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Kounicova Družba – VUT Kounicova	87
7.25	Výsledný interferogram pro vlákno č.005 trasy Kounicova Družba – VUT Kounicova	88
7.26	Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu VUT Kounicova – Kotlářská	88
7.27	Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.007 trasy VUT Kounicova – Kotlářská	89
7.28	Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu VUT Kounicova – Kotlářská	89
7.29	Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu VUT Kounicova – Kotlářská	90

7.30	Výsledný interferogram pro vlákno č.007 trasy VUT Kounicova – Kotlářská	90
7.31	Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu nám. Míru B – Žlutý kopec	91
7.32	Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.001 trasy nám. Míru B – Žlutý kopec	91
7.33	Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu nám. Míru B – Žlutý kopec	92
7.34	Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu nám. Míru B – Žlutý kopec	92
7.35	Výsledný interferogram pro vlákno č.001 trasy nám. Míru B – Žlutý kopec	93
7.36	Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Žlutý kopec – Lipová . .	93
7.37	Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.013 trasy Žlutý kopec – Lipová	94
7.38	Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Žlutý kopec – Lipová .	94
7.39	Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Žlutý kopec – Lipová	95
7.40	Výsledný interferogram pro vlákno č.013 trasy Žlutý kopec – Lipová .	95
7.41	Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Lipová – Kampus 48 . . .	96
7.42	Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.027 trasy Lipová – Kampus 48	96
7.43	Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Lipová – Kampus 48 . .	97
7.44	Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Lipová – Kampus 48	97
7.45	Výsledný interferogram pro vlákno č.027 trasy Lipová – Kampus 48 .	98
7.46	Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Lipová – Poříčí	98
7.47	Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.003 trasy Lipová – Poříčí	99
7.48	Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Lipová – Poříčí	99
7.49	Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Lipová – Poříčí	100
7.50	Výsledný interferogram pro vlákno č.003 trasy Lipová – Poříčí	100

SEZNAM TABULEK

2.1	Limitní hodnoty Polarizační vidové disperze	17
5.1	Základní přenosové parametry	54
5.2	Dovolené makro-ohybové ztráty	54
5.3	Typy vláken méně citlivých na ohyb	54
6.1	Seznam kabelových tras pro expertní měření	56
6.2	Limitní hodnoty CD trasy Kovoterm – Botanická	61
6.3	Limitní hodnoty PMD trasy Kovoterm – Botanická	61
6.4	Limitní hodnoty CD trasy Komenského – Kovoterm	62
6.5	Limitní hodnoty PMD trasy Komenského – Kovoterm	63
6.6	Limitní hodnoty CD trasy Botanická – Komenského	64
6.7	Limitní hodnoty PMD trasy Botanická – Komenského	64
6.8	Limitní hodnoty CD trasy Komenského – Poříčí	65
6.9	Limitní hodnoty PMD trasy Komenského – Poříčí	66
6.10	Limitní hodnoty CD trasy Kounicova Družba – VUT Kounicova . . .	67
6.11	Limitní hodnoty PMD trasy Kounicova Družba – VUT Kounicova . .	67
6.12	Limitní hodnoty CD trasy VUT Kounicova – Kotlářská	68
6.13	Limitní hodnoty PMD trasy VUT Kounicova – Kotlářská	68
6.14	Limitní hodnoty CD trasy nám. Míru B – Žlutý kopec	69
6.15	Limitní hodnoty PMD trasy nám. Míru B – Žlutý kopec	70
6.16	Limitní hodnoty CD trasy Žlutý kopec – Lipová	71
6.17	Limitní hodnoty PMD trasy Žlutý kopec – Lipová	71
6.18	Limitní hodnoty CD trasy Lipová – Kampus 48	72
6.19	Limitní hodnoty PMD trasy Lipová – Kampus 48	72
6.20	Limitní hodnoty CD trasy Lipová – Poříčí	73
6.21	Limitní hodnoty PMD trasy Lipová – Poříčí	74

1 ÚVOD

Polarizační vidová disperze – PMD patří v současné době k nejvíce limitujícímu parametru při vysokorychlostních optických přenosech. Tato diplomová práce si klade za hlavní cíl detailní seznámení s problematikou PMD.

Jedná se o druh zkreslení jednotlivého impulsu procházejícího optickým vláknem. Vzniká kvůli rozdílné délce trasy obou polarizačních rovin při průchodu optickým vláknem. PMD se udává v ps/km u polarizovaných vláken. U běžných jednovidových vláken se udává v ps/ $\sqrt{\text{km}}$, neboť neroste lineárně se vzdáleností.

V úvodní části této práce se věnuji teoretickému rozboru polarizační vidové disperze. Obsahuje definici podstaty problému, matematický popis jevu, polarizační stavy elektromagnetické vlny a základní vlastnosti PMD např. faktory ovlivňující její velikost, limitující parametry optického vlákna či srovnání velikosti PMD pro různé modulační formáty.

Druhou kapitolu jsem zaměřil na metody a techniky pro měření PMD. Z podstaty PMD, která má náhodný charakter, vyplývá nutnost tento jev měřit ve všech etapách života vlákna a tato měření se dnes již staly i standardní součástí přijímacích měření vysokorychlostních optických tras. Jednotlivé měřicí metody uvedené v této práci obsahují blokové schéma zapojení měřících zařízení, popis výhod/nevýhod metody a možnosti praktického využití metody v závislosti na druhu měření nebo velikosti měřící veličiny.

Další kapitola obsahuje krátký přehled o možnostech kompenzace PMD jevu. Náhodný charakter tohoto fenoménu neumožňuje kompletní anulování jevu avšak určitou korekci či stabilizaci lze realizovat.

V této publikaci lze nalézt definici a popis standardů ITU-T ošetřující problematiku optických přenosových tras v praxi. Základní parametry optických vláken jsou standardizovány hlavně v ITU-T řady *G.65x*. Tyto standardy jsou všeobecně respektovány jako záruka nejhorších možných podmínek pro práci optických rozhraní.

Praktická část diplomové práce vychází z naměřených podkladů z expertního měření optické sítě MU Brno. Konkrétně jsem testoval měřená vlákna z hlediska sledování tří základních parametrů PMD, CD a koeficientu PMD za pomoci různých měřících přístrojů a různých metod měření. V závěru jsem provedl statistické zpracování naměřených hodnot a srovnání jednotlivých měřících technik.

2 POLARIZAČNÍ VIDOVÁ DISPERZE – PMD

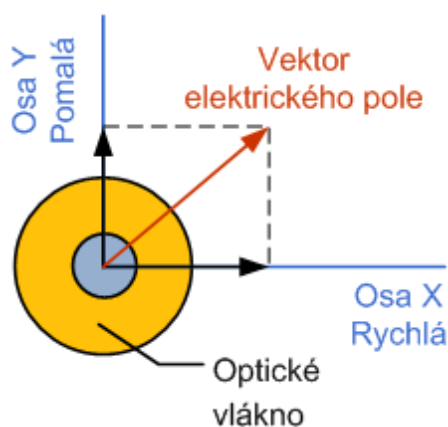
Důležitým jevem v optické technice je polarizační vidová disperze, která je způsobena anizotropními vlastnostmi optického vlákna. Index lomu není v celém průřezu stejný, ale díky některým jevům je funkcí okolních parametrů. Například tlak, tah, teplota atd. Jednotlivé složky světla se šíří různou rychlostí a tak vzniká polarizační vidová disperze, která se zkráceně označuje PMD.

Velikost PMD je náhodná veličina, která je proměnná v čase. Při provozu vysokých přenosových rychlostí na optických trasách představuje jeden z hlavních problémů optického vlákna a stává se zásadním limitujícím faktorem pro přenos dat. Polarizační vidová disperze je hlavním problémem vysokorychlostních optovláknových přenosů.

2.1 Definice PMD

Světelný signál, který je navázán jednovidovým optickým vláknem je šířen ve dvou navzájem kolmých polarizačních rovinách ¹.

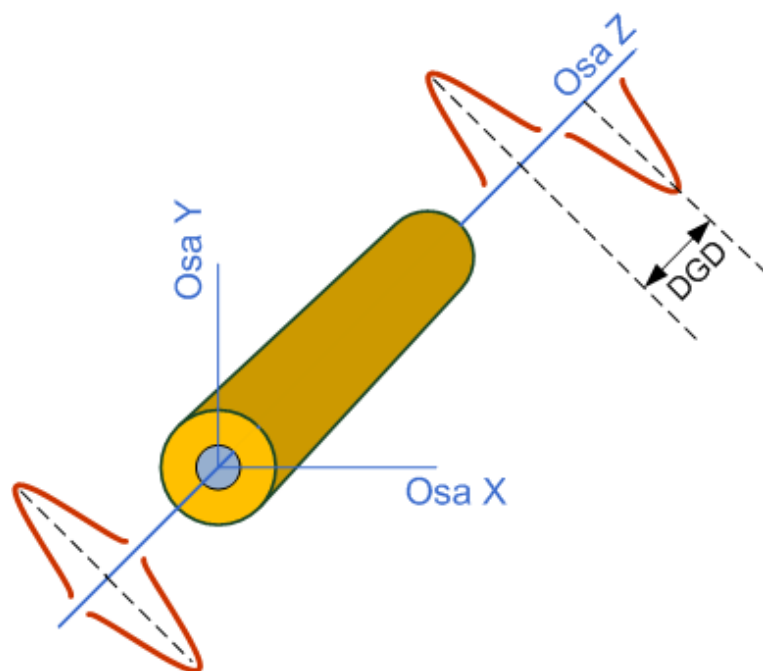
Pokud vezmeme osu z za směr šíření vlnění potom roviny lze označit jako horizontální ve směru x či vertikální ve směru y neboli pomalý a rychlý směr osy. Popsaný model os se označuje jako PSP (*Principal States of Polarization*). Pokud tyto dvě složky sloučíme, dostaneme požadovaný vektor elektrického resp. magnetického pole. Polarizační vidy na konci trasy mají mezi sebou časové zpoždění $\Delta\tau$ a proto dochází k jejich roztahování a omezení maximální přenosové rychlosti. Polarizační vidová disperze, je spektrální střední hodnotou DGD.



Obr. 2.1: Model polarizačních rovin

U ideálního optického vlákna, které je zcela homogenní a dokonale kruhové po celé své délce, podmínky šíření signálu budou pro oba vidy v obou rovinách stejné. Bohužel technologie výroby optických vláken v současné době neumožňuje výrobu ideálního vlákna. Optická vlákna používaná v praxi nejsou zcela homogenní a dokonale kruhové říkáme, že ve vlákně je přítomen dvojlom. Vlivem dvojlomu se světelné záření šíří v obou polarizačních vidích s různou rychlostí a mezi vidy dochází k časovému zpoždění. Velikost

¹šíření signálu prostřednictvím dvou polarizačních vidů



Obr. 2.2: Zpoždění DGD světelného impulsu mezi rychlou a pomalou osou

zpoždění mezi rychlou a pomalou polarizační rovinou také závisí na vlnové délce. Velikost parametru DGD se mění velmi pozvolně v časové oblasti, ale jeho změna v závislosti na vlnové délce je velmi rychlá.

Celková hodnota PMD vlákna optické trasy je vyjádřena jednotkou ps. Jelikož impuls nesoucí informaci je tvořen oběma polarizačními vidy, dochází tím k jeho roztahování. Časové rozšíření impulsu vede ke snižování výkonové špičky signálu, čímž se zhoršuje SNR – odstup signálu od šumu a může dojít i k roztažení impulsu až do sousedních bitových mezer – mezisymbolová interference. Oba tyto mechanismy zvyšují chybovost a vedou k omezování maximální přenosové rychlosti.

PMD je parametr závislý na celé řadě různých faktorů. Příčinou PMD je zejména podélná kruhová nesymetričnost vlákna a materiálová nehomogenita. Velikost parametru PMD ovlivňuje nejen samotná výroba vlákna, ale i výroba kabelu a další vlivy způsobující jakékoliv deformace, ohyby a mechanické pnutí či poškození vlákna. Další faktor ovlivňující velikost parametru PMD je kvalita montáže trasy a vlivy okolního prostředí, zejména teplotní změny při sezónním zahříváním a ochlazováním optického vlákna. Vlastní asymetrie vlákna je poměrně konstantní, zatímco mechanické namáhání se může lišit podél celé trasy. Mechanické namáhání na optické vlákno může pocházet z různých zdrojů. Tyto faktory ovlivňují velikost PMD značně náhodným způsobem což velmi ztěžuje způsoby kompenzace jejího vlivu.

K PMD jevu je nutné přistupovat jako k náhodnému jehož hodnotu pro danou optickou trasu není možné stanovit s dostatečnou přesností výpočtem. Parametr

Tab. 2.1: Limitní hodnoty Polarizační vidové disperze

Přenosová rychlost [Gb/s]	0,155	0,622	2,500	10,00	40,00
SDH	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64	STM-256
Trvání 1 bitu [ps]	6430,00	1610,00	401,88	100,47	25,12
Limit PMD [ps]	640,00	160,00	40,00	10,00	2,50
Max. DGD [ps]	643,00	161,00	40,10	10,00	2,51
$PMD_{coef.}$ na 400 km [ps/ $\sqrt{\text{km}}$]	< 32,00	< 8,00	< 2,00	< 0,50	< 0,125

DGD je základním měřítkem PMD a je měřen v piko sekundách [ps]. Míra neurčitosti PMD telekomunikačních optických vláken je vyjádřena v jejich PMD koeficientu. Dnes mají vlákna v kabelu hodnotu PMD zpravidla garantovanu na hodnotu $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.

2.2 Limitní parametry optického vlákna

Spektrální střední hodnota DGD způsobuje rozšíření přenášeného pulzu podél celého vlákna, který se deformuje a dochází ke zvýšení chybovosti BER optického systému. Následkem je omezení přenosové vzdálenosti pro danou bitovou chybovost.

Jestliže známe maximální zpoždění PMD potom maximální povolenou délku vlákna můžeme odvodit ze vztahu:

$$L = \Delta\tau^2 / \Delta\tau_{cmax}^2 \quad (2.1)$$

Statistický charakter PMD je definován u stavu, kde maximální přijatelné PMD zpoždění je 10% bitové délky T_B , power penalty ² není větší jak 1 dB, vlnová délka je 1550 nm a druh kódovacího formátu je bez návratu k nule NRZ [14].

Pro přenosovou rychlost 10 Gb/s je bitová délka 100 ps. Z těchto informací lze určit a následně vypočítat teoretické maximální PMD zpoždění s využitím vzorce $\Delta\tau = 0,1 \cdot 100 = 10$ [ps].

V praxi některé systémy mohou akceptovat velikost PMD zpoždění v rozsahu 13 – 14 ps což také záleží na použitém typu modulace signálu.

Limitní hodnoty PMD podle standardu ITU-T G.697 ukazuje tabulka 2.1 [3].

tyto PMD hodnoty jsou použity pro určení maximální povolené délky vlákna.

²snižující se SNR má za následek uzavírání diagramu oka a přijímač není schopen správně vyhodnotit stavové hodnoty přenášeného signálu a tuto hodnotu poklesu diagramu oka nazýváme *Power penalty*

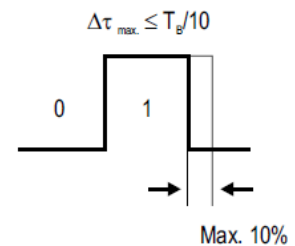
Obrázek 2.4 zobrazuje graf pro typický přenosový systém, kde je vynesena závislost mezi maximální PMD koeficientem a vzdáleností pro danou přenosovou rychlost. Pro graf platí následující předpoklad [14]:

- rozdělení pravděpodobnosti distribuční funkce Maxwellian
- kódování NRZ
- vlnová délka 1550 nm
- maximální power penalty je povolen na hodnotu 1 dB
- chybovost BER je typicky 10^{-9} a 10^{-12}

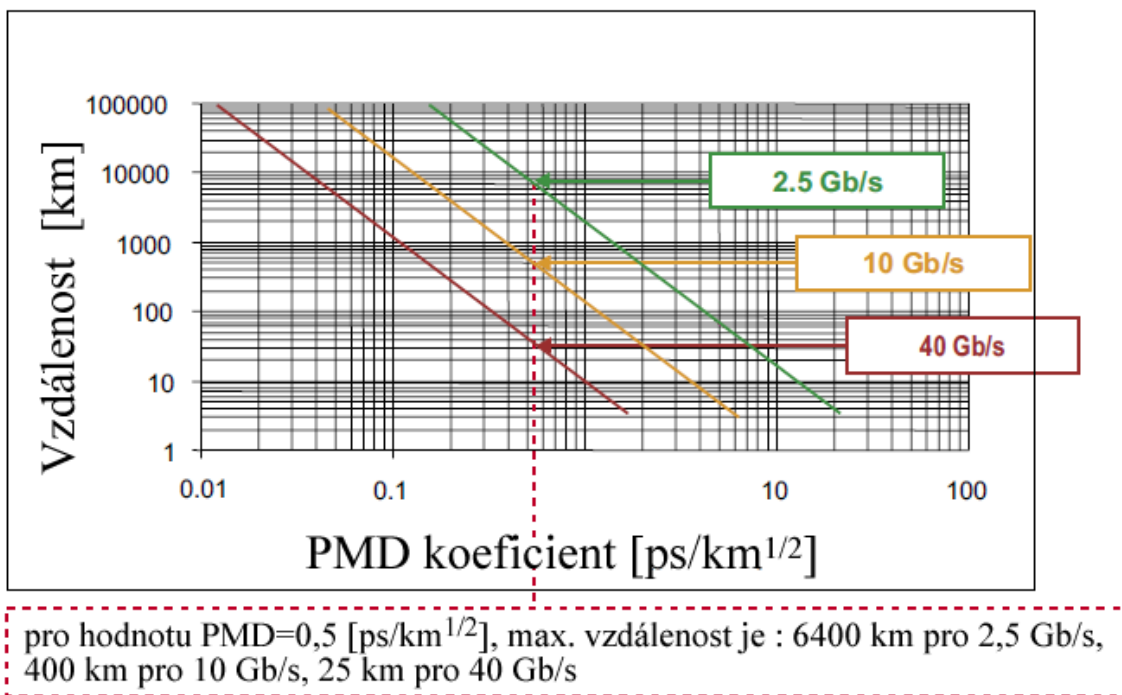
Může být použita následující rovnice:

$$L = \frac{10^4}{(B \cdot \text{PMD})^2} \quad (2.2)$$

Kde: L – vzdálenost, B – přenosová rychlost [Gb/s] a PMD – PMD koeficient



Obr. 2.3: Maximální akceptovatelné impulzové zpoždění



Obr. 2.4: Maximální vzdálenost v závislosti na PMD koeficientu a přenosové rychlosti

PMD závisí na náhodných deformacích optického vlákna a nemůže být charakterizována přímo okamžitou DGD hodnotou, protože se nejedná o opakovatelnou hodnotu. DGD hodnota kolísá náhodně kolem střední hodnoty popsané Maxwellian křivkou. Přípustný měřený parametr označený PMD zpoždění je spektrální střední hodnota DGD při určité vlnové délce.

Spektrální střední hodnota je efektivní hodnota DGD z hustoty pravděpodobnosti v celkové optické trase.

PMD-vektor lze rozložit do tří ortogonálních vektorů podél os Poincareho sféry, každý z nich se může nezávisle a náhodně měnit a lze jej popsat gausovou křivkou. Dopad na telekomunikační systém může být predikován distribuční funkcí DGD ($\Delta\tau$). Parametr DGD je následkem Maxwellian distribuční funkce dané rovnicí 2.3 a zobrazené na obrázku 2.5.

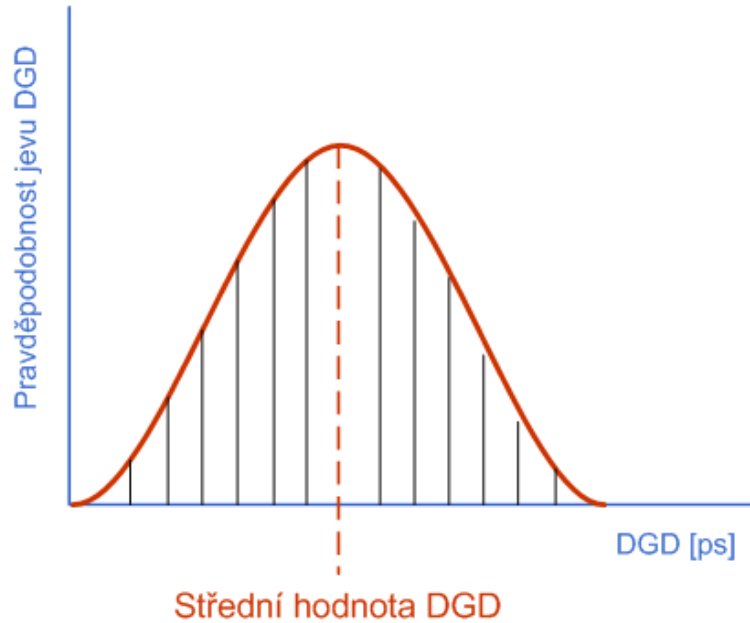
$$p(\Delta\tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta\tau^2}{\sigma^3} e^{\left(\frac{-\Delta\tau^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2.3)$$

pro $0 < \Delta\tau < +\infty$, kde $\Delta\tau$ je DGD σ^2 je odchylka

Pravděpodobnostní hustotu funkce pro $\Delta\tau_\omega$ lze derivovat:

$$p(\Delta\tau_\omega) = \frac{2}{\langle\Delta\tau\rangle^2} \sec h^2\left(\frac{4 \cdot \Delta\tau_\omega}{\langle\Delta\tau\rangle^2}\right) \quad (2.4)$$

, kde $\langle\Delta\tau\rangle$ je střední hodnota DGD



Obr. 2.5: Maxwellian distribuční funkce

2.2.1 PMD v závislosti na délce optického vlákna

Vlákna, která mají střední výkonovou hodnotu v jednom ortogonálním polarizačním vidu v rámci $1/e^2$ výkonového počátečního stavu vidu jsou nazývány jako vazební délka nebo také korelační délka L_C . Tento statistický parametr je závislý na vlnové

délce, mechanickému namáhání podél vlákna a teplotě. Typická hodnota vazební délky je v rozsahu od 10 m až téměř do kilometru [10].

2.2.2 PMD v krátkých vláknech

Pokud délka vlákna je daleko menší než korelační délka L_C potom je vlákno označováno jako krátké vlákno. Na krátkých vzdálenostech je PMD přibližně lineární a lze jej vyjádřit:

$$\text{PMD} = \frac{\Delta\tau}{L} \quad (2.5)$$

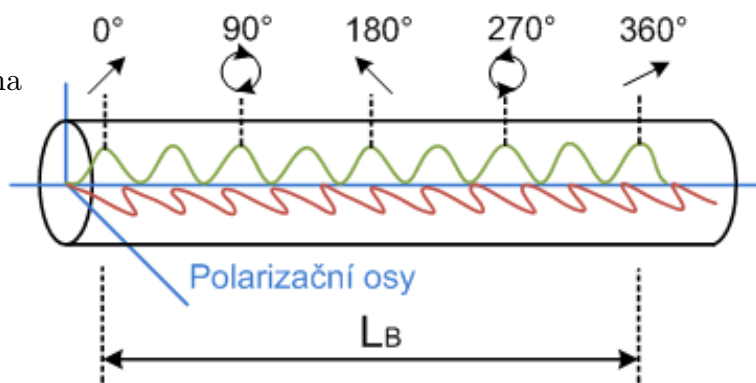
U krátkých vláken může být dvojlom považován za stále stejný a vidová vazba se neprojevuje ³. Dvojlom v krátkých vláknech může být vyjádřen jako rozdíl mezi činiteli šíření mezi pomalou a rychlou osou.

$$\Delta\beta = \frac{\omega \cdot n_s}{c} - \frac{\omega \cdot n_f}{c} = \frac{\omega \cdot \Delta n}{c} \quad (2.6)$$

, kde ω je úhlový optický kmitočet, c je rychlost světla, a $\Delta n = n_s - n_f$ je efektivní rozdíl indexu odrazu mezi pomalou a rychlou osou.

V krátkých vláknech se vstupní polarizační poloha mění v kruhový tvar v důsledku šíření světelného paprsku vlákem např. z lineárního do eliptického a poté do kruhového tvaru a zpět přes eliptický k lineárnímu stavu jak ukazuje obrázek 2.6.

Vzdálenost L_B je definována jako vzdálenost šíření, kde dochází k 2π fázovému rozdílu mezi dvěma vidy nebo ekvivalentní polarizační poloze během prostorového cyklu a je daný $L_B = \lambda/\Delta n$, kde λ je vlnová délka, Δn je rozdíl indexu lomu. Jedná se o standardní typ telekomunikačního vlákna a jeho velikost je kolem 10 m.



Obr. 2.6: Prostorový vývoj polarizace

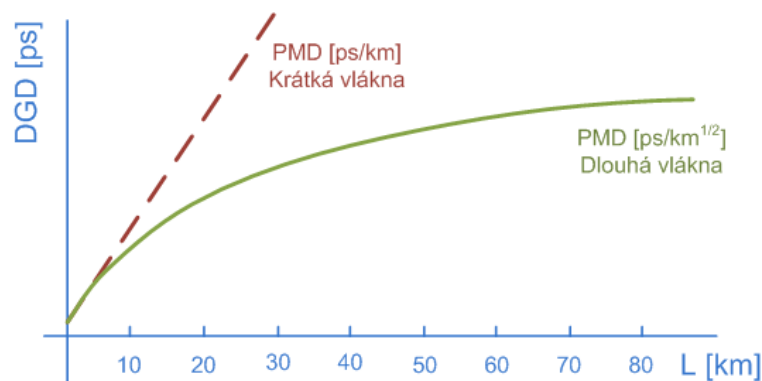
Vzhledem k absenci vidové vazby u krátkých vláken, DGD roste lineárně s délkou vlákna. Zpoždění lze odvodit derivací z rozdílu konstant šíření.

³absence vidové vazby

$$\frac{\Delta\tau}{L} = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\Delta n \cdot \omega}{c} \right) = \left(\frac{\Delta n}{c} \right) + \left(\frac{\omega}{c} \right) \frac{d}{d\omega} (\Delta n) \quad (2.7)$$

2.2.3 PMD v dlouhých vláknech

Vlákna jejichž délka je daleko větší než korelační délka L_C jsou označena jako dlouhá vlákna. U dlouhých vláken dvojlom již není jednotný v důsledku náhodné přítomnosti deformace vlákna či vidové vazbě. Dlouhá vlákna mohou být modelována jako zřetězení několika sekcí jehož osy a velikost dvojlomu se mění náhodným způsobem [10].



Obr. 2.7: Velikost PMD v závislosti na délce kabelu

Model pro dlouhá vlákna lze zobrazit jako koncentraci úseků s různou hodnotou dvojlomu jejichž změna je náhodná podél celého optického vlákna.

Velikost dílčího dvojlomu z každého úseku může doplnit nebo naopak být odečten z celkové hodnoty dvojlomu a tak DGD se nezvětšuje lineárně s délkou vlákna jako u krátkých vláken. Místo toho se DGD akumuluje jako tří dimenzionální náhodná veličina a v průměru se zvyšuje s druhou mocninou vzdálenosti.

$$\text{PMD} = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad (2.8)$$

Velikost DGD se liší dle prostředí vlákna, pro analýzu PMD v dlouhých vláknech je přijat statistický postup. Přenosové systémy jsou obecně budovány z dlouhých vedení a tak PMD vlákna jsou často popsána pomocí PMD koeficientu ($\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$). Vlákna vyrobená dnes mají průměrný PMD koeficient menší než $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ naopak vlákna instalovaná v 90-tých letech mohou vykazovat hodnotu PMD koeficientu vyšší než $0,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.

2.3 Vliv PMD na odolnost modulačních formátů

Přenosovou rychlost lze definovat, jako počet znaků, symbolů, značek přenesených za jednu vteřinu. Pro telekomunikační systémy se ujal označení v bitech za vteřinu, značí se jako bps. V praxi se občas také používá k označení přenosové rychlosti byte za sekundu. Tyto dva způsoby označování přenosové rychlosti jsou totožné a bez problémů se dají mezi sebou převádět dle poměru 1 byte = 8 bitů. Označování v bitech za vteřinu v číslicové technice ilustruje počet impulsů, které daný systém stihne přenést.

Nejpoužívanější linkové kódy jsou s návratem k nule RZ a bez návratu k nule NRZ. Pro kódy RZ je přenosová rychlost rovna maximálnímu kmitočtu na vedení. Na rozdíl kódy NRZ mají přenosovou rychlost poloviční než je maximální možná frekvence na vedení. Optické komunikace pracují s kódováním RZ, proto se dá přenosová rychlost popsat přímo šířkou pásma. NRZ se nepoužívá, protože komunikace potřebuje bezpečně rozlišit hranice impulzu, které přenášejí informaci a také vyšší kmitočty umožňují přesnější synchronizaci zařízení.

Pro elektrické obvody platí, že šířka pásma je tak velká kde pokles napětí je menší než 3 dB. U optických komunikací to platí také, ale protože jsme ve výkonové oblasti, tak 3 dB jsou polovina signálu jak ukazuje rovnice 2.10 a obrázek 2.8.

$$-3 \text{ dB} = 20 \cdot \log(U_x) \quad (2.9)$$

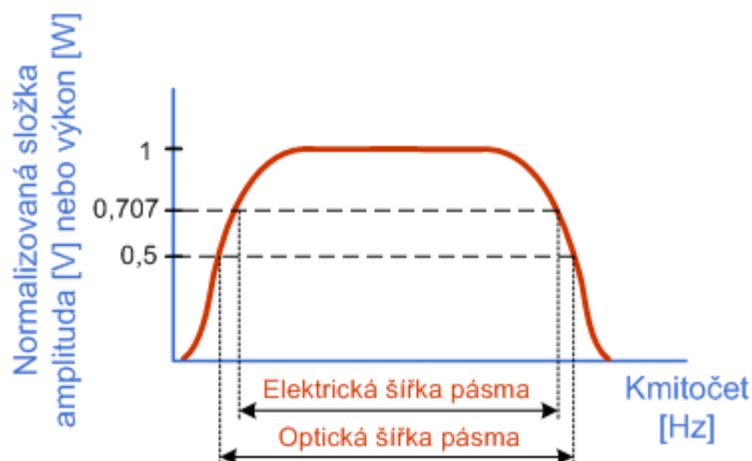
kde U_x je poměr výstupního napětí ku vstupnímu a $U_x = 0,7079458$ V. Oproti tomu pro optické komunikace je šířka pásma daná rovnicí 2.10.

$$-3 \text{ dB} = 20 \cdot \log(P_x) \quad (2.10)$$

kde P_x je poměr výstupního výkonu ku vstupnímu a $P_x = 0,5011872$ W. Rozdílné šířky pásma dokumentuje obrázek 2.8.

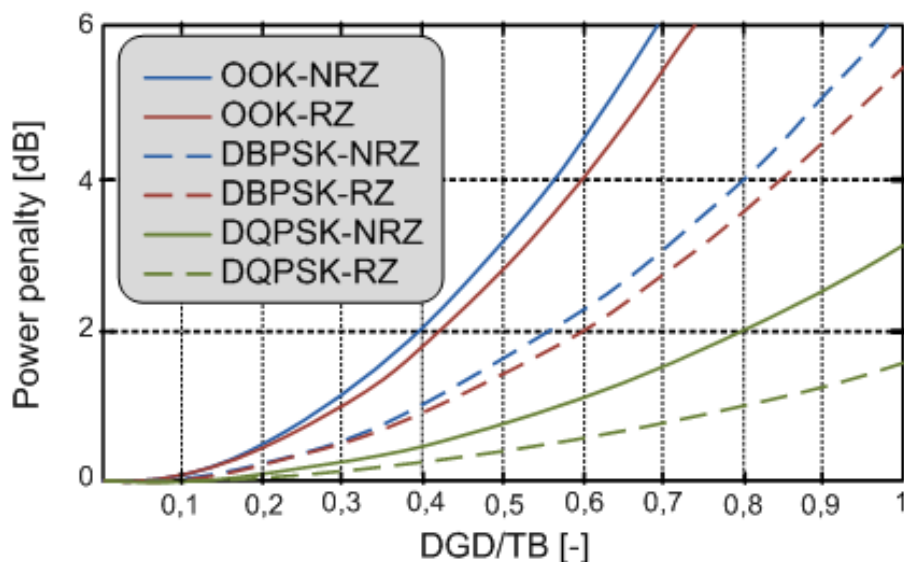
Polarizační vidová disperze má velký vliv na rozšíření a deformaci přenášeného pulzu, míra tohoto vlivu je odlišná pro aktuálně použitý modulační formát. Základní modulační formát pro optické sdělovací systémy je amplitudová modulace ASK, známá také jako modulace OOK. Dalšími typy modulačních formátů je diferenční dvoustavová fázová modulace DBPSK nebo kvadrurní diferenční fázová modulace DQPSK. Všechny tyto druhy modulace mohou být bez návratu k nule NRZ nebo s návratem k nule RZ.

K vyhodnocení vlivu polarizační vidové disperze na chybovost optického kanálu se používá diagram oka. S diagramem oka souvisí bitová chybovost kanálu BER a odstup signálu od šumu SNR [2].



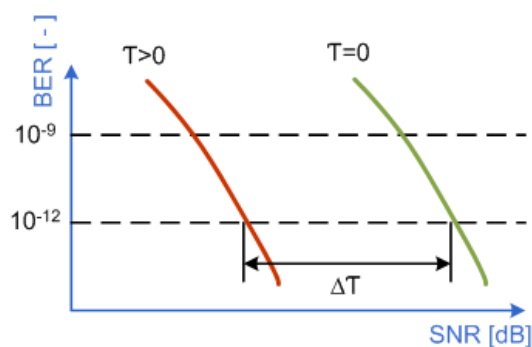
Obr. 2.8: Rozdíl mezi šířkou elektrického a optického pásma

Bitová chybovost kanálu BER závisí na přenosové rychlosti a je pro každý modulační signál odlišná. Čím více se zvyšuje SNR, tím menší bude BER a vzniká lepší přenos po optickém kanále. Vlivem rostoucího DGD klesá hodnota SNR, diagram oka se uzavírá a přijímač není schopen správně vyhodnotit stavové hodnoty přenášeného signálu. Uzavírání diagramu oka vyjadřuje pokles oka v horizontálním i vertikálním směru. Hodnotu poklesu diagramu oka nazýváme *Power penalty*. *Power penalty* není vztažena přímo k hodnotě DGD, ale k poměru hodnoty DGD ku délce bitového intervalu T_B , který nazýváme normované diferenční skupinové zpoždění.



Obr. 2.9: Závislost power penalty na DGD pro různé druhy modulací

V simulaci pro porovnání jednotlivých modulačních druhů je zvolena přenosová rychlost 40 Gb/s a bitová chybovost BER 10^{-12} . Ve všech výpočtech se počítá pouze se zkreslením, které způsobuje polarizační vidová disperze. Nebere se v úvahu zkreslení, které zapříčiní chromatická disperze a útlum. Podle normy ITU-T je hodnota maximálního diferenčního skupinového zpoždění při přenosové rychlosti 40 Gb/s rovna hodnotě 2,5 ps. Jakákoliv hodnota, která přesáhne maximální hodnotu diferenčního skupinového zpoždění z normy ITU-T způsobuje, že neprobíhá přenos a diagram oka se zavírá. Záměrně je zvolena velká vzdálenost optického vlákna 1000 km, aby bylo dosaženo vysokých hodnot diferenčního skupinového zpoždění. Použité optické vlákno je typu *G.652.D*, protože má nízkou hodnotu PMD $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Na obrázku 2.11 vidíme digramy oka jednotlivých modulačních formátů při použití optického vlákna typu *G.652.D* [2].



Obr. 2.10: Závislost BER na SNR

Na obrázku 2.11 je vidět, že modulační formát RZ má lepší toleranci k polarizační vidové disperzi než formát NRZ.

Nejlepší modulace, které mají velkou toleranci k polarizační vidové disperzi jsou RZ-DQPSK a NRZ-DQPSK. Výhodou je, že se dají použít na velké vzdálenosti. Nevýhodou těchto modulací je jejich vysoká cena a složitost realizace. Nejhorší modulace, které mají malou toleranci k polarizační vidové disperzi jsou NRZ-DBPSK a NRZ-OOK. Jejich výhodou je nízká cena a nízká složitost realizace, ale lze je použít pouze na krátké vzdálenosti. Kompromis mezi vzdáleností, cenou a složitostí realizace jsou modulace RZ-DBPSK a RZ-OOK, jak zobrazuje obrázek 2.12 [2].

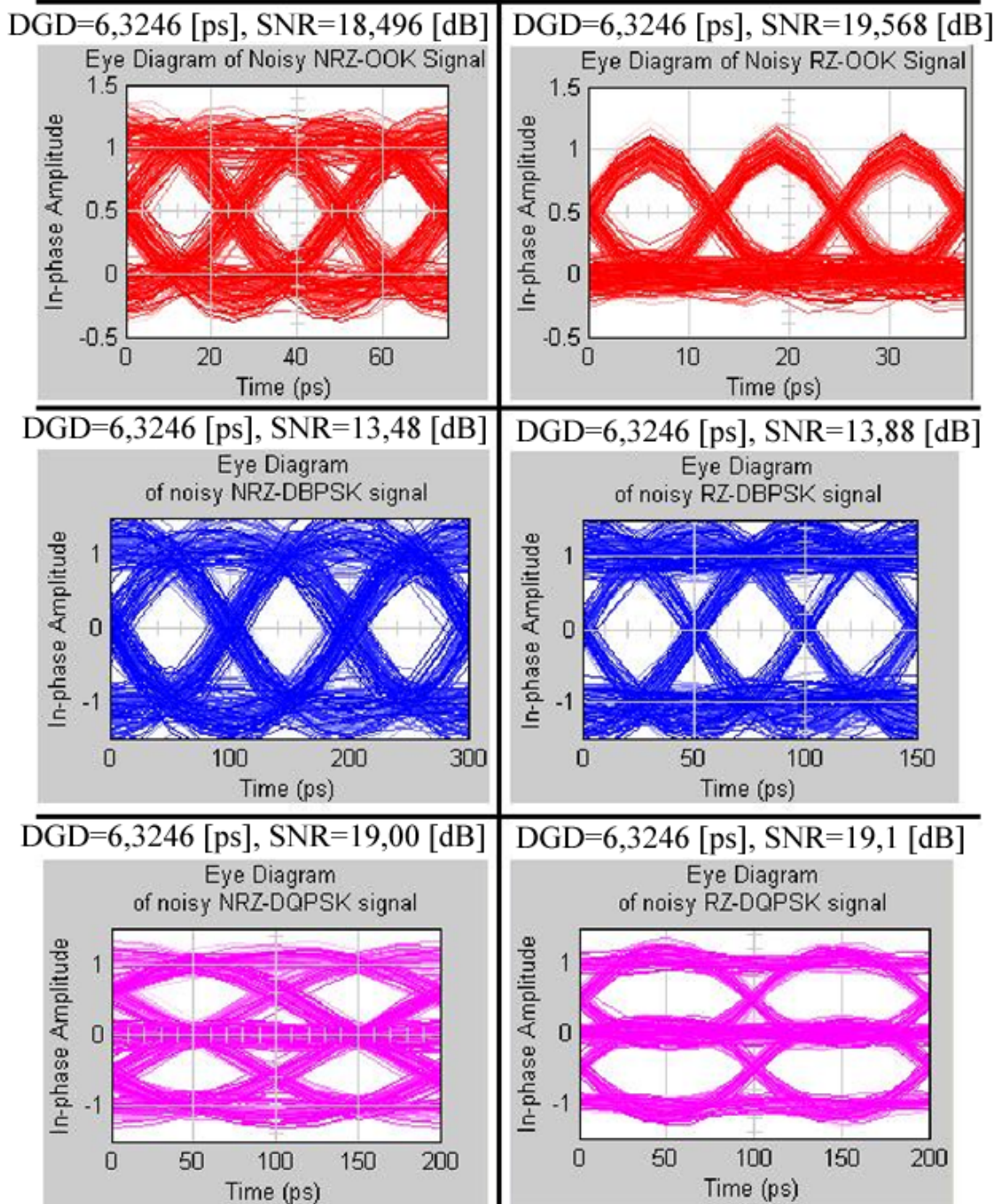
2.4 Polarizační stav optického vlny

Polarizace je definovaný pohyb koncového bodu vektoru elektrického resp. magnetického pole. Rozeznáváme tři druhy polarizace:

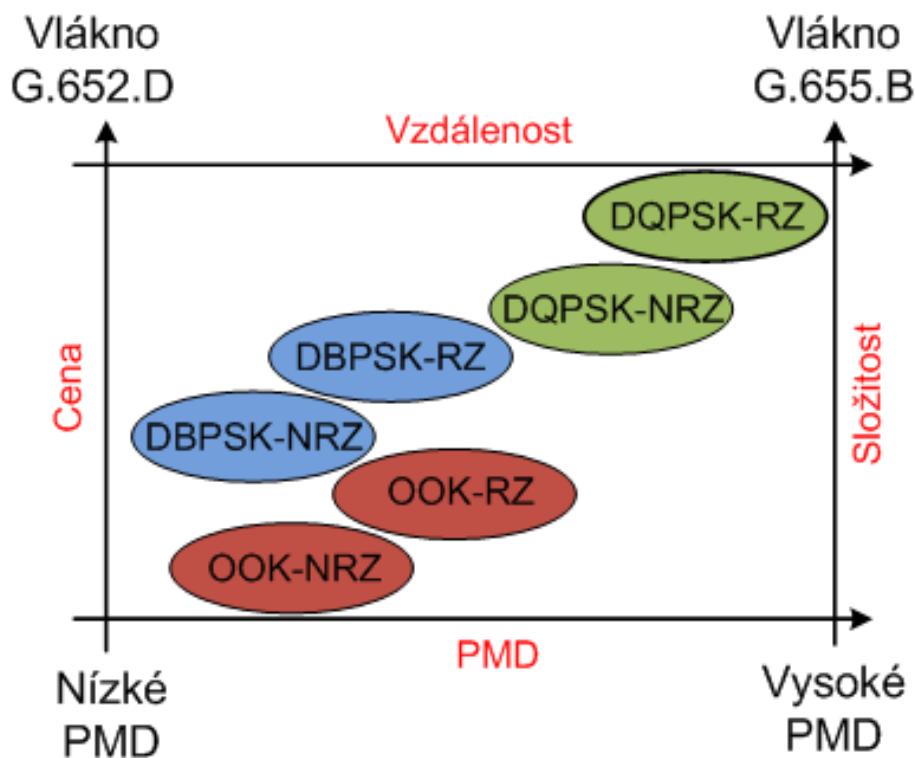
- lineární - koncové body vektoru opisují přímku
- kruhová - koncové body vektorů opisují kružnici
- eliptická - koncové body vektorů opisují elipsu

Mód ve vlákne se působením dvojlomu rozloží na dvě složky. Každé polarizované světlo lze rozložit v souřadném systému na část, které je pouze ve směru x a část která je pouze ve směru y , pokud vezmeme osu z za směr šíření vlnění. Pokud tyto

G.652.D pro L=1000 [km]



Obr. 2.11: Diagramy oka pro různé modulační formáty



Obr. 2.12: Přehled všech druhů modulace

dvě složky sloučíme, dostaneme požadovaný vektor elektrického resp. magnetického pole.

Matematicky by to vypadalo takto:

$$B = n_x - n_y \quad (2.11)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) \quad (2.12)$$

a jestliže

$$n_x > n_y \quad (2.13)$$

Kde: y ... rychlá osa

x ... pomalá osa

Index lomu není v celém průřezu vlákna stejný, ale díky některým jevům je funkcí okolních parametrů (např. tlak, tah, teplota). Jednotlivé složky světla se šíří různou rychlostí a tak vzniká polarizační vidová disperze, která se označuje jako PMD.

$$\Delta t_{PMD} = D_{PMD} \cdot \sqrt{L} \quad (2.14)$$

Odmocnina délky je tam z důvodu, že PMD je jev nahodilý a nelze v něm vypořádat žádnou závislost na čemkoliv, protože nelze zaručit naprosto stejné podmínky na celé trase. Ze statistiky pak vyplývá, že u nahodilých jevů není závislost na délce lineární, ale vystihuje ji právě odmocnina.

PMD se nejvíce projevuje při vysokých přenosových rychlostech, kdy se musí pracovat s vlnovou délkou λ blízko pracovní vlnové délce vlákna λ_0 .

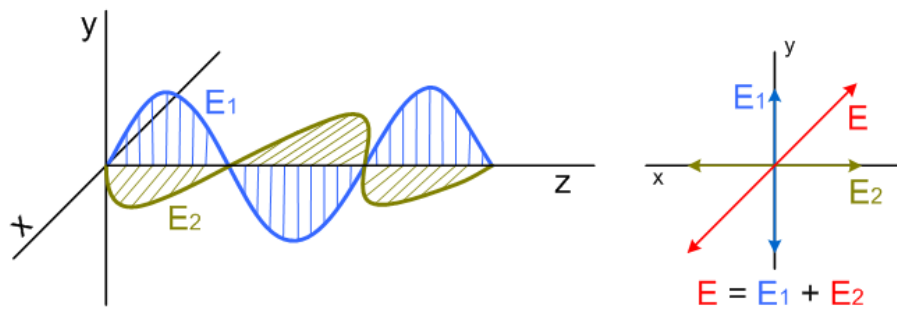
Klasické vlákno si nezachovává disperzi a dochází u něj k přelévání energie z jednoho polarizačního stavu do druhého. O tom jak je vlákno schopno si zachovat polarizační stav nás informuje extinční poměr ER.

$$ER \text{ (dB)} = -10 \cdot \log \frac{P_{\perp}}{P_{\Delta}} \quad (2.15)$$

Potom polarizační přeslech se definuje jako $-ER \text{ (dB)}$. Praktický důsledek této rovnice je ten, že čím je větší dvojlom, tím větší je schopnost vlákna si zachovávat polarizační stav.

2.4.1 Jonesův vektor polarizace

Pokud orientace elektrického pole není náhodná, jedná se o světlo polarizované. Typ polarizace záření je určen plochou, kterou v prostoru vytvoří směry vektoru elektrické intenzity \mathbf{E} podél libovolného paprsku vlny. Je-li touto plochou v prostoru rovina, hovoříme o lineární polarizaci vlnění což je nejjednodušším typem polarizace a vektor elektrické intenzity kmitá v jednom směru ⁴.



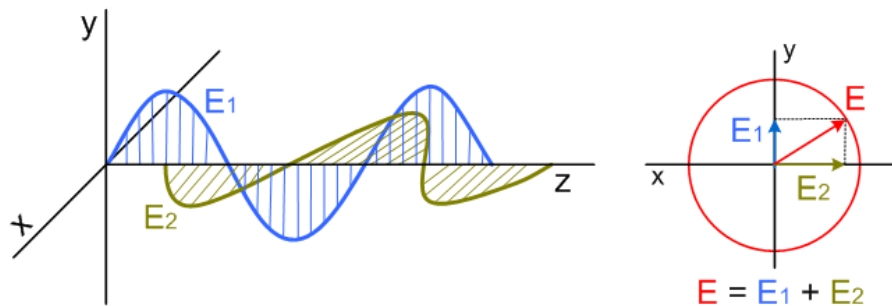
Obr. 2.13: Lineárně polarizované světlo

Pokud se složí dvě lineárně polarizované vlny o stejné amplitudě \vec{E} , které jsou ve fázi, dostaneme zase lineárně polarizované světlo.

Jde-li o pravidelnou šroubovici, má popisovaná vlna rotační polarizaci.

Pokud se složí dvě vlny se stejnou amplitudou, které jsou ve fázi posunuté o $\pi/2$ dostaneme kruhově polarizované světlo.

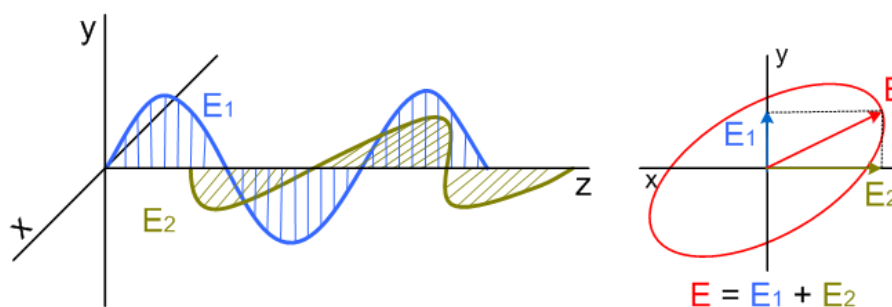
⁴nemusí to být směr osy y



Obr. 2.14: Kruhově polarizované světlo

Pokud jsou vlny posunuté jinak než o $\pi/2$, nebo nemají stejné amplitudy, bude výsledná vlna elipticky polarizovaná.

Lineárně polarizovanou vlnu můžeme získat i složením dvou kruhově polarizovaných vln o stejné amplitudě, jestliže jedna polarizace je pravotočivá a druhá levotočivá. Stejně tak elipticky polarizovanou vlnu můžeme dostat superpozicí dvou kruhově polarizovaných vln ⁵ o různých amplitudách.



Obr. 2.15: Elipticky polarizované světlo

Lineárně polarizované vlnění s libovolnou polohou polarizační roviny lze vždy rozložit do dvou složek stejného kmitočtu, lineárně polarizovaných ve vztažných směrech.

Lze pro amplitudu \vec{E} elektromagnetické vlny lineárně polarizované v obecném směru psát:

$$\begin{aligned}
 \vec{E}_0 &= \vec{x} + E_{0y}^* \vec{y} \\
 E_{0x}^* &= |E_{0x}^*| \exp(j\varphi_{0x}) \\
 E_{0y}^* &= |E_{0y}^*| \exp(j\varphi_{0y}) \\
 \varphi_{0x} &= \varphi_{0y}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

⁵levotočivé a pravotočivé

Normováním složek \vec{E}_{0x}^* a \vec{E}_{0y}^* například k hodnotě $C = \vec{E}_{0x}^*$ a jejich uspořádáním do sloupcového vektoru získáme tzv. Jonesův vektor polarizace:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} E_{0x}^*/C \\ E_{0y}^*/C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ (E_{0x}^*/E_{0y}^*) \exp[j(\varphi_{0y} - \varphi_{0x})] \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Jonesův vektor vlny lineárně polarizované směru osy x má tvar 2.18, Jonesův vektor tvoří význačnou matematickou pomůcku při analýze komplikovaných polarizačních jevů.

$$\mathbf{J}_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Užitečnost popisu polarizačních jevů Jonesovým vektorem ilustrujme na příkladu, kdy vektor elektrické intenzity elektromagnetické vlny mění svůj směr v prostoru [18]. Jednou z eventualit tohoto případu je rotační polarizace vlny. Zde koncový bod vektoru \vec{E} opisuje v prostoru šroubovici s kolmým průmětem obecného tvaru. Speciálním typem rotační polarizace je polarizace kruhová, kdy průmět – šroubovice ve směru pohybu vlny je kružnice. Takovou vlnu, jak lze vidět na obrázku 2.14, lze sestavit ze dvou vzájemně kolmo lineárně polarizovaných vln shodného kmitočtu, se stejnými amplitudami elektrických složek intenzity, navzájem fázově posunutých o úhel $\pi/2$. Jonesův vektor pravotočivé kruhově polarizované vlny má tvar:

$$\mathbf{J}_k = \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Kompozici kruhově polarizované vlny ze dvou lineárně polarizovaných vln potvrzuje i vektorová identita:

$$J_k = J_x + J_y \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -j \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Nestejnou velikostí amplitud složek E_{0x} a E_{0y} nebo jejich jiným fázovým posuvem lze sestavit vlnu, jejíž vektor intenzity bude v prostoru opisovat šroubovici s eliptickým průřezem, tzv. elipticky polarizovanou vlnu. Z geometrické představy i z matematického formalismu vytvořeného zavedením Jonesova vektoru je možno vyvodit tvrzení duální k vektoru 2.20 pravící, že lineárně polarizovanou vlnu lze sestavit superpozicí dvou odpovídajících kruhově polarizovaných vln s vzájemně opačným smyslem rotace [18]:

$$J_x = J_{k+} + J_{k-} \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ +j \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

2.4.2 Poincarého koule

Pro kompletní zápis částečně polarizovaného záření se využívají Stokesovy parametry. Pro Stokesovy parametry rovinné monochromatické úplně polarizované vlny platí následující vztahy:

$$\begin{aligned} s_0 &= (E_{0x})^2 + (E_{0y})^2 \\ s_1 &= (E_{0x})^2 - (E_{0y})^2 = s_0 \cos 2\chi \cos 2\psi \\ s_2 &= 2(E_{0x})E_{0y} \cos \delta = s_0 \cos 2\chi \cos 2\psi \\ s_3 &= 2(E_{0x})E_{0y} \sin \delta = s_0 \sin 2\chi \end{aligned} \quad (2.24)$$

kde $s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$. Parametr s_0 odpovídá intenzitě záření a parametry s_1, s_2, s_3 jsou vázány s úhlem ψ ($0 \leq \psi < \pi$), který udává orientaci polarizační elipsy a úhlem χ ($-\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4$) charakterizujícím elipticitu polarizační elipsy. Stokesovy parametry vyjádřené ve formě vektoru $\vec{S} = (s_1, s_2, s_3)$ určují polarizační stav a vizualizují ho na Poincarého sféře.

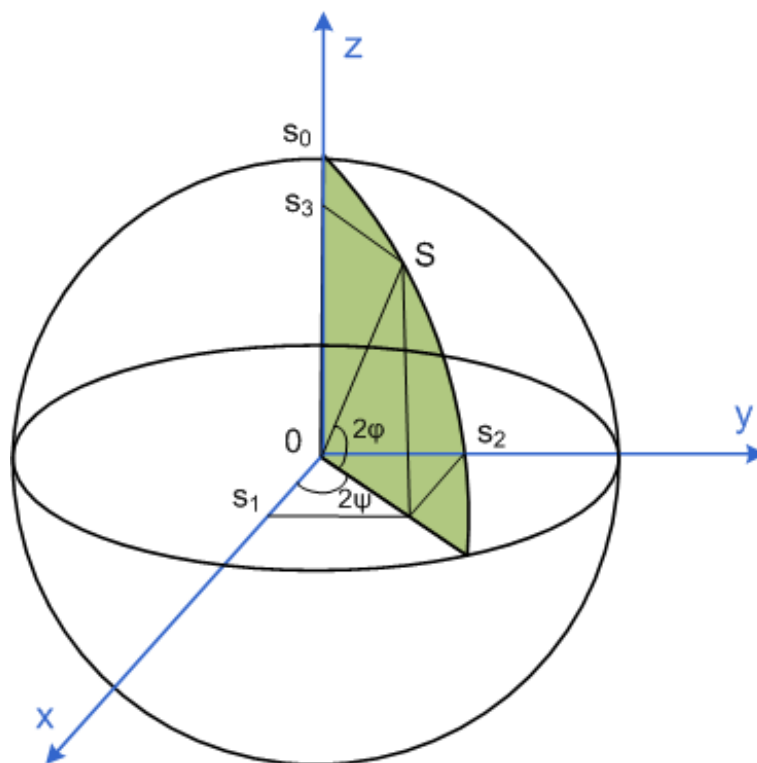
Prostřednictvím Stokesových parametrů a Poincarého koule můžeme snadno stanovit charakter polarizace a stupeň polarizace DOP. Můžeme definovat stupně polarizace vlny pomocí Stokesových parametrů.

$$\begin{aligned} \text{DOP} &= \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0} \\ \text{DOLP} &= \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0} \\ \text{DOCP} &= \left| \frac{s_3}{s_0} \right| \end{aligned} \quad (2.25)$$

Stupeň polarizace nabývá hodnot od nuly do jedné. Pokud je $\text{DOP} = 0$, jedná se o zcela nepolarizované záření, pokud je $\text{DOP} = 1$, jedná se o záření úplně polarizované.

Z prostorového vyjádření obrázku 2.16 lze velmi snadno určit charakter i stupeň polarizace. Pokud bod $S = [s_1; s_2; s_3]$ leží na plášti Poincarého koule, pak se jedná o úplně polarizovanou vlnu, tj. velikost intenzity nepolarizované části IN je nulová a $\text{DOP} = 1$. V případě, že se nejedná o úplně polarizovanou vlnu, leží bod S uvnitř koule.

Nyní se budeme zabývat stavem polarizace vlny. Pokud bod S je v rovině x y, tj. $s_3 = 0$, jedná se o lineárně polarizovanou vlnu, naopak pokud bod S je na ose z, jedná se o čistě kruhově polarizovanou vlnu. V horní polokouli $z > 0$ je pravotočivá



Obr. 2.16: Poincarého koule

polarizace, v dolní polokouli je levotočivá polarizace. Na obrázku 2.17 jsou uvedeny některé příklady polarizačních stavů a jejich zobrazení v Poincarého kouli.

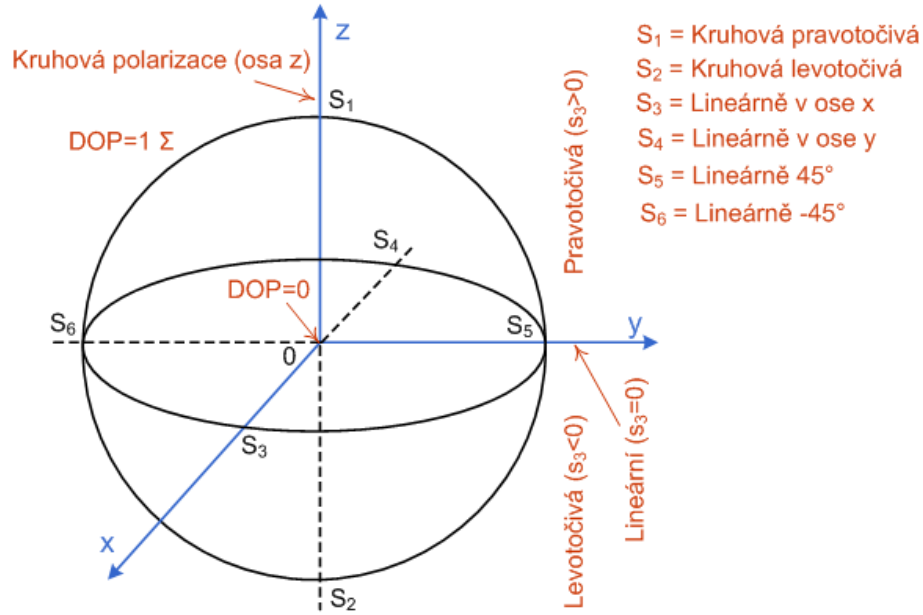
Pro popis prostředí polarizačních vlastností prostředí (i odrazu od prostředí) slouží Muellerova matice \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Mezi výstupním \bar{S} a vstupním S Stokesovým vektorem platí:

$$\bar{S} = M \cdot S \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{s}_0 \\ \bar{s}_1 \\ \bar{s}_2 \\ \bar{s}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$



Obr. 2.17: Polarizační stavy vlny v Poincarého kouli

Na rovnici 2.24 se lze dívat jako na jednoduchou geometrickou reprezentaci polarizačních stavů zadaných v kartézských souřadnicích parametry s_1, s_2 a s_3 na Poincarého sféře o poloměru s_0 . Poincarého sféra tedy obsahuje všechny polarizační stavy. Lineární polarizace nalezneme na rovníku, kruhové na pólech a úplně nepolarizované záření je v jejím středu. V reálném experimentu, kdy se polarizační stav mění s časem, je vizualizace na Poincarého sféře velkou výhodou. Vztahy mezi optickými veličinami a Stokesovými parametry jsou následující:

$$\begin{aligned}
 I &= s_0 && \text{optická intenzita} \\
 P &= \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}/s_0 && \text{stupeň polarizace} \\
 \psi &= \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{s_2}{s_1}\right) && \text{azimut} \\
 \chi &= \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{s_3}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}\right) && \text{elipticita} \\
 E_{0y}/E_{0x} &= \sqrt{\frac{s_0 - s_1}{s_0 + s_1}} && \text{poměr amplitud}
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Změnu polarizačního stavu lze jednoduše provést pomocí fázové destičky, která mění fázový rozdíl δ mezi jednotlivými komponentami vektoru intenzity elektrického pole \vec{E} . Fázové zpoždění je dáno výrazem $\epsilon = (n_1 - n_2)d$, kde $n_1 - n_2$ je rozdíl indexů lomu které cítí složky x a y vektoru intenzity elektrického pole \vec{E} , k je vlnové číslo a d je tloušťka fázové destičky. Zde je si třeba uvědomit, že rozdíl indexů lomu a vlnové číslo jsou závislé na vlnové délce procházejícího záření. Speciální případ nastane pro $\epsilon = \pi/2$, kdy fázová destička mění lineárně polarizované záření na kruhově polarizované a naopak. Fázové destičky s touto vlastností se říká čtvrt vlnová. Druhý speciální případ nastane pro $\epsilon = \pi$. Jedná se o půl vlnovou fázovou

destičku, která mění pravotočivou polarizaci na levotočivou a naopak.

2.4.3 Koherence světla

Záření nazveme časově koherentním, pokud pro zvolený časový interval Δt naměříme kdekoli a kdykoli stejný fázový posuv $\Delta\varphi$.

Záření je prostorově koherentní, pokud pro zvolenou vzdálenost Δl naměříme kdekoli a kdykoli stejný fázový posuv $\Delta\varphi$.

2.4.4 Anizotropní prostředí

Prostředí, jehož vliv na procházející elektromagnetickou vlnu se obecně liší v závislosti na směru šíření a na polarizaci záření, se nazývá opticky anizotropní. Dielektrickou permitivitu a magnetickou permeabilitu takového prostředí je nutno považovat za tensorové veličiny, neboť zde zpravidla při vyvolání elektrického či magnetického pole vznikají prostorové odchylky směru vektorů indukce \vec{D} a \vec{B} od intenzit \vec{E} a \vec{H} , což má za následek vznik jistých zvláštností při průchodu rovinné elektromagnetické vlny [18].

3 METODY MĚŘENÍ POLARIZAČNÍ VIDOVÉ DISPERZE

3.1 Úvod

Jedním z nejzávažnějších problémů při provozu vysokorychlostního systému na optických kabelových trasách, je vliv polarizační vidové disperze. PMD vzniká v důsledku přítomnosti dvojlomu ve vláknu, což znamená, že je odlišná rychlost šíření ve dvou tzv. polarizačních rovinách (videch), jimiž se každý signál ve vláknu šíří.

Zpoždění vzniklé mezi oběma vidy vede k časovému roztahování přenášených impulsů, a tím k omezování maximální přenosové rychlosti spoje. Toto zpoždění může být z valné části způsobeno i třeba jen jedním kabelovým úsekem, který tudíž zamezuje danému použití celé trasy.

PMD parametr je v ohnisku zájmu prakticky každého, kdo se v této oblasti pohybuje – od výrobců optických vláken a kabelů přes instalační firmy až po provozovatele optických tras a výrobce měřicí techniky.

Z vlastností PMD vyplývá nutnost tento jev měřit ve všech etapách života vlákna a tato měření se dnes již staly i standardní součástí přijímacích měření vysokorychlostních optických tras.

Měření PMD vlákna se provádí od výroby, přes kabelování, závěrečné měření při uvedení instalované kabelové trasy do provozu až po údržbová měření. Pokud se ukáže, že dané optické vlákno trasy vykazuje zpoždění PMD větší než je schopen tolerovat přenosový systém, nelze takový systém použít. Toto riziko je vyšší zejména u starších tras postavených v 90-tých letech a tento problém je nutné často řešit v případě, že chceme na stávající starší optické trase instalovat systém s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s.

V textu níže jsou popsány jednotlivé metody pro měření a detekci polarizační vidové disperze.

3.2 Metoda skenování vlnové délky (metoda s fixním analyzátozem)

Základem této metody je měření optického výkonu procházejícího měřenou trasou v závislosti na vlnové délce. Měřicí sestava je zobrazena na obrázku 3.1. Jako zdroj záření je možné použít širokospektrální LED diodu nebo laditelný laser. Za zdrojem následuje polarizátor. Na detekční straně měřicího systému je nutné dle užitého

zdroje použít detekční prvek tak, aby bylo možné provádět měření výkonu v závislosti na vlnové délce. Tzn. pro širokospektrální zdroj je to optický spektrální analyzátor OSA, pro laditelný laser postačuje měřidlo výkonu.



Obr. 3.1: Metoda skenování vlnové délky

Tato metoda vyžaduje měření ve dvou krocích. Nejprve je měření provedeno tak, jak je znázorněno na obrázku 3.1, se zařazeným polarizátorem také před detekční soustavou. Takto získáme spektrální závislost složky výkonu o určité polarizaci (dané polarizátorem) $P(I)$. Poté odstraníme polarizátor před přijímačem a změříme referenční hodnotu – spektrální závislost celkového výkonu $P_{tot}(I)$. Z poměru obou naměřených spektrálních průběhů $P(I)/P_{tot}(I)$ vyplývá spektrální závislost změny polarizace výstupního záření a z toho lze výpočtem stanovit hodnotu PMD dané optické trasy. Většinou se ke stanovení PMD používá rychlá Fourierova transformace (FFT), která umožňuje naměřené spektrální výsledky převést přímo do časové oblasti.

Metoda skenování vlnové délky je časově náročnější, jelikož je třeba provádět dva měřicí kroky a je náchylnější na vibrace vlákna.

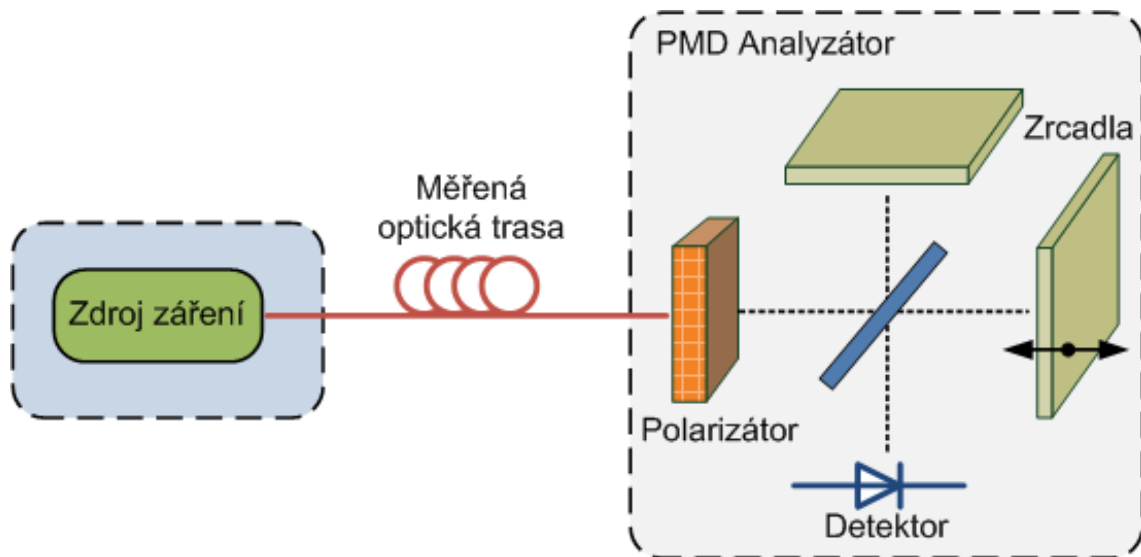
3.3 Tradiční interferometrická metoda měření PMD (TINTY)

Nejpoužívanější metodou měření PMD optických kabelových tras je metoda interferometrická (užívá se pro ni obecně zkratka INTY). Je tomu tak pro její rychlost měření, relativní jednoduchost a vhodnost pro použití přímo „v terénu“.

Na obrázku 3.2 je uvedeno základní schematické uspořádání tradiční varianty této metody, pro kterou se dnes začíná užívat zkratka TINTY (*Traditional analysis INTY*). Metoda je založena na interferenci nízkokoherentního optického záření [9]. Používá se širokospektrální zdroj záření ¹, většinou LED dioda. Polarizované výstupní záření zdroje ² je navázáno do vlákna trasy, na jejímž druhém konci je PMD analyzátor. Jeho jádrem je interferometr, nejčastěji Michelsonův, který je uvedený

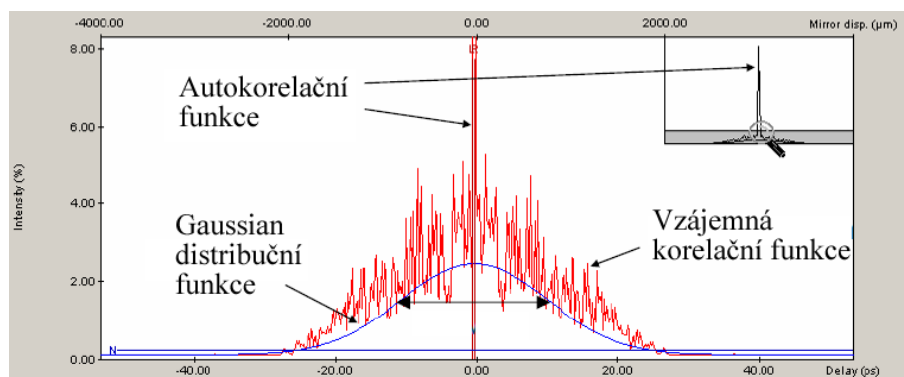
¹nízkokoherentní zdroj

²po průchodu polarizátorem P



Obr. 3.2: Schematické uspořádání interferometrické metody TINTY

na obr. 3.2. V něm je polarizované optické záření rozděleno do dvou ramen, jedno je zakončené pevným a druhé pohyblivým zrcadlem. Záření se od obou zrcadel odráží zpět a na detektoru pak nastává interference signálů z obou ramen. Posunem pohyblivého zrcadla se mění vzájemný časový posun mezi signály obou ramen, čímž se získává interferogram, z něhož je stanovováno zpoždění vlivem PMD. Díky tomu, že je k měření užíván širokospektrální zdroj záření, je jeho výsledkem přímo stanovení samotné PMD trasy, která je definována jako střední hodnota zpoždění — v tomto případě střední hodnota ve spektru.



Obr. 3.3: Příklad naměru PMD optického vlákna měřeného interferometrickou metodou

Na obrázku 3.3 je ukázka výsledného interferogramu pro běžné telekomunikační vlákno. V případě takových vláken se zpoždění PMD u metody TINTY vyhodnocuje z Gaussovy křivky, kterou je interferogram proložen. Zpoždění je úměrné směrodatné

odchylce křivky.

Měření PMD optických tras interferometrickou metodou je v praxi poměrně jednoduché, není třeba stanovovat žádnou referenční hodnotu a měření samotné je velmi rychlé³, čímž nedochází k ovlivňování výsledku případnými vibracemi vlákna. Z těchto důvodů je tato metoda pro měření optických tras nejpoužívanější.

3.3.1 Možná omezení metody TINTY

Interferogram získaný tradiční interferometrickou metodou se skládá vlastně ze dvou složek, jak je naznačeno na obrázku 3.3. Jednou složkou výsledku je vzájemná korelační funkce dvou na sebe kolmých polarizačních rovin či vidů [9]. Ty jsou oproti sobě vlivem PMD časově posunuté a právě z jejich vzájemné korelace jsme schopni PMD stanovit. V případě telekomunikačních vláken, které se vyznačují tzv. silnou vazbou mezi polarizačními vidy, je tato jejich vzájemná korelace tvořena spoustou do značné míry náhodně rozestých drobných špiček, vzniklých díky této vazbě. Druhou složkou, která je v interferogramu obsažena, je autokorelační funkce vlastního měřicího signálu, která závisí na tvaru jeho spektra. Výsledek tvoří tedy složka ukazující vliv zpoždění PMD trasy na signál a složka ovlivněná pouze samotným měřicím signálem resp. jeho spektrem.

Jak bylo uvedeno, PMD je třeba vyhodnocovat ze vzájemné korelace polarizačních vidů⁴. To, že je ve výsledném interferogramu přítomna také autokorelace vlastního měřicího signálu, způsobuje některá omezení TINTY metody. Velká autokorelační špička totiž svou přítomností a tvarem může výsledek měření ovlivnit. Šířka a tvar této špičky, které jsou dány tvarem spektra měřicího signálu, jsou určeny použitým zdrojem záření a dále případnými spektrálně závislými prvky optické trasy, jako jsou vláknové zesilovače EDFA, add-drop multiplexory OADM apod. Aby byla autokorelační špička co nejužší a hladká a co nejméně ovlivňovala vyhodnocení měření, je u této metody základní podmínkou použití zdroje záření se spektrálním průběhem blížícím se co nejvíce Gaussově křivce.

Druhou podmínkou je, aby ani měřená trasa tvar spektra měřicího signálu významně neovlivňovala. Tato metoda proto není vhodná pro měření tras s výše uvedenými spektrálně závislými prvky. U dlouhé trasy obsahující EDFA zesilovače je tudíž nutné měřit každý zesilovací úsek zvlášť a celkovou hodnotu PMD trasy počítat.

Přítomnost autokorelační špičky ve výsledném interferogramu dále snižuje přesnost měření, což se nejvíce projevuje při měření nízkých hodnot PMD (1 ps), jehož chyba či nejistota může být proto až desítky procent⁵. Z důvodu přítomnosti au-

³většinou několik sekund na změření jednoho vlákna

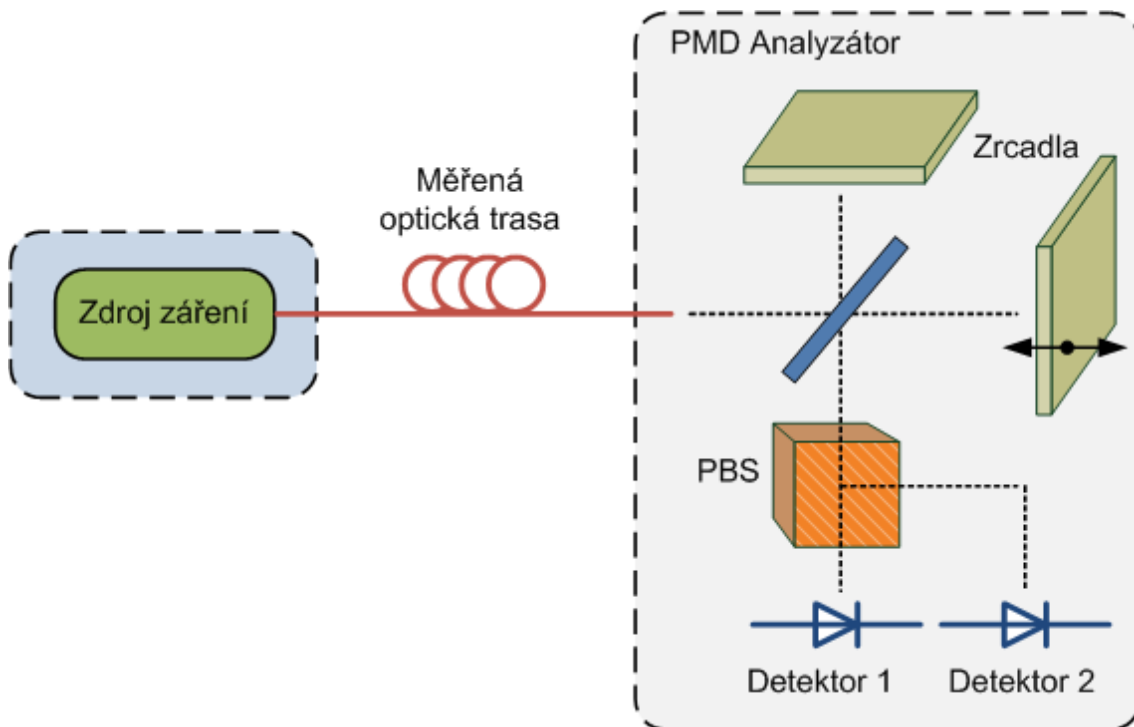
⁴v angličtině se používá výraz cross-correlation

⁵měření hodnot 0,1 ps už touto metodou provádět nelze

tokokorelace nelze také vyhodnocovat PMD z interferogramu přímo, ale je třeba jej prokládat zmíněnou Gaussovou křivkou. I toto proložení se projevuje ve snížené přesnosti měření, neboť proložení Gaussovou křivkou zcela exaktně odpovídá pouze trase s nekonečnou mezividovou vazbou, k čemuž se samozřejmě telekomunikační vlákna reálných optických tras mohou jen více či méně blížit.

3.4 Obecná interferometrická metoda měření PMD (GINTY)

Omezení tradiční interferometrické metody měření PMD (TINTY) popsané v minulé kapitole plynou z přítomnosti autokorelace vlastního měřicího signálu ve výsledném interferogramu, z něhož se PMD vyhodnocuje. Nové zdokonalení metody spočívá tedy právě v potlačení vlivu autokorelační špičky [9].



Obr. 3.4: Schematické uspořádání nové interferometrické metody GINTY

Na obrázku 3.4 je uvedeno schematické uspořádání nové metody, která je označována jako obecná interferometrická metoda GINTY ⁶.

Základní změna oproti tradiční metodě spočívá v tom, že výsledný signál obsahující optické záření z obou ramen interferometru je nově rozdělen polarizačním děličem PBS na dvě vzájemně kolmo polarizované složky, které dopadají každá na

⁶General analysis INTY

zvláštní detektor. Na každém z obou detektorů dochází k interferenci a oba tyto interferenční obrazce obsahují opět obě korelační složky. Matematickými operacemi mezi oběma interferogramy lze ale obě složky od sebe oddělit ⁷.

Metoda GINTY umožňuje tedy autokorelační špičku z výsledného interferogramu odstranit, a tudíž provádět vyhodnocení PMD na samotné vzájemné korelační funkci. Tím odpadá i nutnost prokládat výsledný interferogram Gaussovou křivkou a hodnota PMD se vyhodnocuje přímo z bodů interferogramu ⁸.

K výpočtu hodnoty PMD nutno dodat, že autokorelace měřicího signálu se částečně uplatňuje také v samotné vzájemné korelační funkci. Zvláště k tomu dochází při měření velmi nízkých hodnot PMD, kdy jsou signály z obou navzájem kolmých polarizačních vidů prakticky shodné, a vzájemná korelace je tedy vlastně téměř autokorelací. Jelikož u GINTY metody známe však i samotnou autokorelační funkci („součet“ interferogramů na obou detektorech), je možné i tento vliv autokorelace potlačit. Výpočet hodnoty zpoždění PMD se proto „koriguje“ tím, že se od hodnoty RMS vypočítané ze vzájemné korelace odečte hodnota RMS spočtená z autokorelace.

3.5 Metoda P-OTDR

S P-OTDR je možné stanovit, které úseky kabelové trasy mají pro dané vlákno zvýšenou hodnotu PMD koeficientu. Jelikož jeden několikakilometrový úsek s vysokým PMD nám může znemožnit nasazení vysokorychlostního systému i na dlouhé páteřní trase, je tato informace velmi cenná. Díky ní můžeme například provést výměnu kritického kabelového úseku, udělat v tomto místě trasy jiný výběr vláken pro vysokorychlostní přenos nebo toto místo v síti obejít [8].

Metoda POTDR je založena na využití principu klasické metody měření zpětného rozptylu OTDR. Do optické trasy se vyšle měřicí signál ve formě sledu impulsů a ze zpětně rozptýleného záření ⁹ se vyčte informace o velikosti parametru PMD jednotlivých míst ve vláknu. Nejedná se o přímé měření PMD, pro vyjádření závislosti PMD vlákna na délce trasy lze použít vztah

$$\text{PMD} \approx \beta \sqrt{L \cdot h} \quad (3.1)$$

kde β symbolizuje velikost dvojlomu ve vláknu (ps/km), tzn. odlišnost rychlostí šíření výše zmíněných dvou polarizačních vidů, L je délka vlákna a h udává vazební délku charakterizující vazbu mezi polarizačními vidy. Vazební délka h udává délku

⁷„odečtením“ interferogramů se získá samotná vzájemná korelace, zatímco jejich „sečtením“ lze obdržet čistou autokorelaci

⁸výpočet střední kvadratické hodnoty RMS

⁹vlivem Rayleighova zpětného rozptylu

vlákna, na které dojde k výrazné změně osy (tvaru) dvojlomu ve vláknu, a tím k výrazné výměně energie mezi polarizačními vidy.

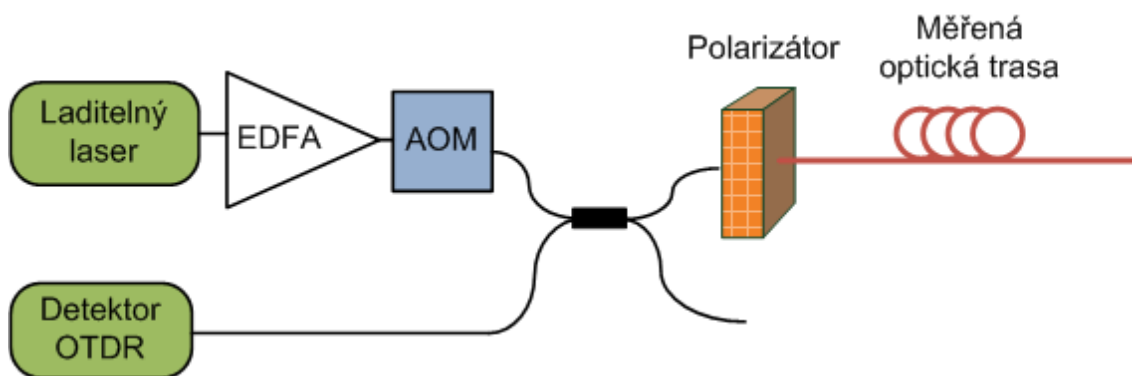
PMD roste s velikostí dvojlomu ve vláknu, délkou vlákna a s velikostí vazební délky. Čím bude delší vazební délka a tudíž menší výměna energie mezi oběma vidy šířícími se odlišnou rychlostí, tím více se bude odlišnost rychlostí obou polarizačních vidů uplatňovat. Při každém měření OTDR získáváme délkové informace o vláknu.

Pro podélnou analýzu PMD potřebujeme vyčíst informace, ze zpětně rozptýleného záření z vlákna, o jeho lokálním dvojlomu a vazební délce.

Existují dvě základní metody POTDR. Při obou posíláme do vlákna krátké intenzivní impulsy polarizovaného optického záření, přičemž obě metody se liší tím, jak zmíněné parametry ze zpětně rozptýleného záření zjišťujeme.

3.5.1 Metoda analýzy SOP

Jelikož vlivem dvojlomu a také působením mezividové vazby dochází ke změně polarizace procházejícího signálu, nabízí se možnost sledovat tuto změnu na zpětně rozptýleném záření z vlákna trasy — t.j. sledovat změnu stavu polarizace SOP [8]. Rychlost změny SOP je úměrná velikosti dvojlomu ve vláknu b a „charakter“ změny je závislý na mezividové vazbě resp. vazební délce h . Při zobrazení SOP na Poincarého kouli se jedná o rychlost rotace SOP (vliv b) a změnu osy rotace (vliv h). Pokud budeme provádět měření na různých vlnových délkách, můžeme vyhodnotit ze spektrální závislosti změn SOP pro jednotlivá místa v trase velikost PMD. Ukázka blokového schématu metody je na obrázku 3.5.



Obr. 3.5: Blokové schéma analýzy SOP

Záření laditelného laseru s malou spektrální šířkou je zesilováno vláknovým zesilovačem EDFA, modulováno akusto-optickým modulátorem AOM, čímž vzniknou měřicí impulsy, které jsou po průchodu polarizátorem vyslány do měřené trasy. Zpětně rozptýlené záření přichází po opětovném průchodu polarizátorem na detektor

OTDR. Měříme spektrální závislost výkonu záření zpětně rozptýleného z jednotlivých částí trasy, a jelikož je zařazen polarizátor, zjišťujeme tím spektrální závislost změn SOP v jednotlivých místech trasy.

Tato metoda naráží na několik obtíží, které se zrcadlí již v uvedeném blokovém uspořádání. Základním problémem je to, že délka i nejkratších impulsů užívaných při OTDR měřeních (desítky ns) je pro měření vláken se silnějším dvojlomem příliš dlouhá na to, aby nedošlo v rámci impulsu k tzv. depolarizaci. Impuls šířící se vláknem zabírá totiž jeho určitou délku, u zmíněných velmi krátkých impulsů to jsou jednotky metrů. Například čelo impulsu už bylo tedy v každém okamžiku vystaveno působení dvojlomu vlákna o několik metrů delšího než těl. Pokud se bude jednat o vlákno s vyšší hodnotou PMD ¹⁰, bude na čele impulsu jiný SOP než např. v tělu a impuls jako takový bude depolarizován – t.j. nebude mít celý stejnou polarizaci (stejný SOP). U záření zpětně rozptýleného z depolarizovaného impulsu se tak ztrácí možnost jeho SOP sledovat.

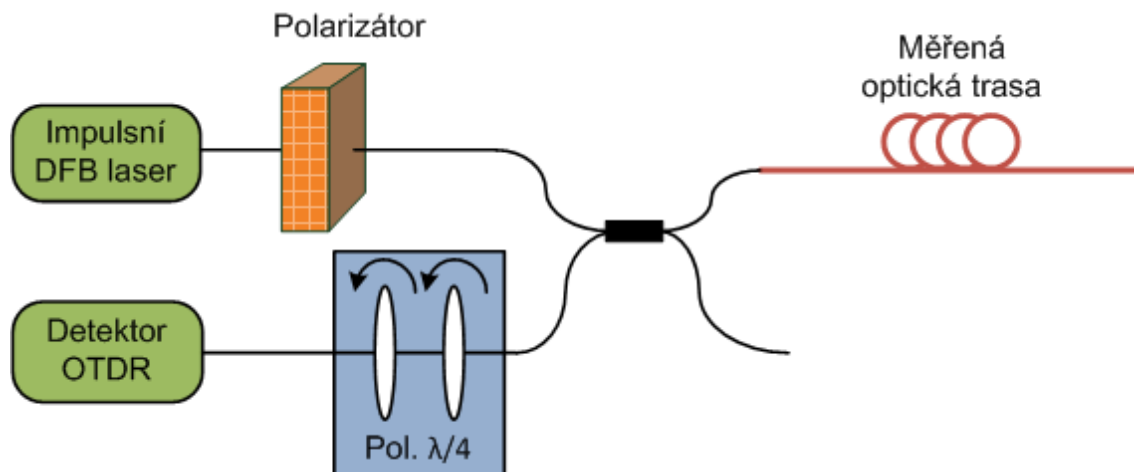
U této metody je tedy třeba užívat enormně krátké impulsy, což vede ke snížení dynamického rozsahu měření, a tudíž k omezení délky měřených tras. Proto je nutné měřicí signál zesilovat např. vláknovým zesilovačem (EDFA ve schématu). Avšak ani tak není tato metoda vhodná pro měřidlo určené k hledání úseků se zvýšeným PMD na delších optických kabelových trasách. Byla by použitelná nejspíše pouze pro měření velmi krátkých tras (jednotky km) s poměrně nízkou hodnotou PMD ($< cca 0.7 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$).

3.5.2 Metoda analýzy DOP

Druhá metoda je založena na sledování stupně polarizace DOP. Pro impuls celý shodně polarizovaný $DOP = 1$, pro zcela depolarizovaný $DOP = 0$, pro záření zpětně rozptýlené ze zcela depolarizovaného impulsu se hodnota DOP blíží cca 1/3. Tím, že vyhodnocujeme DOP, se vlastně zásadní problém první metody stává zde nástrojem vyhodnocení. Přestože tato druhá metoda je méně exaktní než sledování přímo SOP, jsme při jejím užití skutečně schopni měřit i na delších optických trasách a lokalizovat úseky se zvýšenou hodnotou PMD [8]. Blokové schéma metody je uvedeno na obrázku 3.6.

Jako zdroj záření je užit velmi úzkospektrální DFB laser. Je to z toho důvodu, aby nedošlo k depolarizaci signálu ve vlákně vlivem toho, že by se šířil prostřednictvím mnoha vlnových délek. Dvojlom vlákna by v tomto případě způsoboval pro různé vlnové délky různé změny stavu polarizace SOP, a tím depolarizaci signálu. Tento druhý mechanismus depolarizace je třeba potlačit úzkospektrálním zdrojem záření. Polarizované výstupní záření z DFB laseru je navázáno do měřeného vlákna. Pro

¹⁰se silnějším dvojlomem, který mění resp. stáčí stav polarizace SOP



Obr. 3.6: Blokové schéma analýzy DOP

zpětně rozptýlené záření z jednotlivých míst vlákna trasy se analyzuje DOP pomocí polarimetru a detektoru OTDR.

Silný dvojlom ve vláknu β způsobuje rychlé stáčení stavu polarizace, což vede k depolarizaci záření v rámci měřicího impulsu a tedy ke snižování jeho stupně polarizace DOP.

Slabý dvojlom vlákna bude mít tak za následek vysoký měřený DOP a naopak. Situace je ale složitější, neboť DOP bude záviset ještě na mezividové vazbě resp. vazební délce h . Situaci můžeme zjednodušeně rozdělit na tři eventuality:

1. vlákna se slabým dvojlomem (malé β) – DOP bude tudíž vysoký (až k 1) bez ohledu na mezividovou vazbu; v praxi se jedná o vlákna s velmi nízkou hodnotou PMD.
2. vlákna se silným dvojlomem a silnou mezividovou vazbou (velké β a krátká vazební délka h) – DOP bude malý vlivem silného dvojlomu ¹¹ a bude se velice rychle měnit vlivem silné mezividové vazby; v praxi se jedná o vlákna se střední hodnotou PMD.
3. vlákna se silným dvojlomem a slabou mezividovou vazbou (velké β a dlouhá vazební délka h) – zde bude záviset kromě b a h také na vzájemné poloze SOP záření a tvaru dvojlomu ve vláknu; DOP může kolísat mezi nízkými i vysokými hodnotami, ale bude se jen pomalu měnit; v praxi se jedná o vlákna s vysokou hodnotou PMD.

Důležité bude tedy sledovat nejen samotnou hodnotu DOP, ale též rychlost změny DOP.

¹¹u zpětně rozptýleného signálu se bude blížit 1/3

3.5.3 Vyhodnocení měření

Vyhodnocení měření se provádí ze sledování DOP záření zpětně rozptýleného z měřicího impulsu ve vláknu trasy [8]. Jelikož rychlost změny DOP může být značná, pro stanovení samotné hodnoty DOP je vhodné sledovat jeho „střední hodnotu“ stanovenou např. z několika desítek vzorků. Měřicí přístroj provádí dále každé měření pro dva stavy vstupní polarizace ¹². Získávají se tím dvoje výsledky měření: DOP a DOP_c (complementary), z nichž se výpočtem stanovuje parametr nazvaný $DOP_{geo} = \sqrt{DOP^2 + DOP_c^2}$, který dobře vypovídá o samotné hodnotě DOP záření rozptýleného z daného úseku vlákna trasy. Pro sledování rychlosti změny DOP užívá přístroj parametr hDOP, který zjednodušeně znamená délku vlákna, na níž se DOP výrazně změní — čím rychlejší budou změny DOP, tím menší bude hDOP.

Z analýzy DOP jednotlivých úseků vlákna trasy lze vyhodnotit, že:

- na úsecích s vysokou hodnotou DOP_{geo} bude mít PMD hodnotu nízkou z důvodu malého dvojlomu vlákna;
- na úsecích s nízkou či proměnlivou hodnotou DOP_{geo} , a tedy možným vyšším dvojlomem vlákna, a s:
 - malým hDOP bude hodnota PMD nízká, neboť ve vláknu je silná mezividová vazba
 - středním hDOP bude hodnota PMD střední
 - velkým hDOP bude hodnota PMD vysoká, neboť ve vláknu je mezividová vazba slabá

Uváděné „hodnoty“ PMD – nízká, střední a vysoká – jsou určeny limitními mezemi nastavenými v přístroji (pro hDOP a DOP_{geo}) a vycházejí z dlouhodobé analýzy tisíců náměrů výrobcem přístroje. Výsledkem měření nejsou exaktní hodnoty PMD jednotlivých míst trasy, ale spíše její relativní zmapování z hlediska PMD ukazující na možná problematická místa. Toto měření nenahrazuje měření celkové absolutní hodnoty zpoždění PMD trasy (např. interferometrickou metodou), ale doplňuje jej. Teprve, když např. interferometrickou metodou změříme, že daná trasa má příliš vysokou hodnotu zpoždění PMD, má význam, pokusit se pomocí POTDR zdroj této vysoké hodnoty lokalizovat.

Z měření zároveň získáváme také POTDR reflektogram ¹³, kde lze sledovat jednotlivé kabelové úseky a místa trasy.

Měřit je možné trasy dlouhé mnoho desítek kilometrů, přičemž délková rozlišovací schopnost se pohybuje řádově ve stovkách metrů. Nižší rozlišovací schopnost oproti klasickým reflektometrům nepředstavuje z hlediska PMD významný problém, jelikož

¹²polarizátor za DFB laserem v obr. 3.6

¹³reflektogram je změřen polarizovaně, a proto může vykazovat odlišnosti oproti klasickým OTDR reflektogramům a nelze jimi nahradit tradiční OTDR měření optických tras

PMD není bodová záležitost.

3.6 Praktické zkušenosti z měření PMD

Měření polarizační vidové disperze se již standardně provádí vedle měření útlumu a útlumu odrazu. Z praktických zkušeností s měřením PMD na rozmanitých kabelových trasách a s různými typy kabelu ¹⁴ lze vyvodit některé obecné poznatky.

- Stanovit směrodatnou hodnotu PMD zpoždění trasy z koeficientu PMD vlákna kabelu z katalogových hodnot nelze. Dokonce v konfrontaci s výsledky bychom takový výpočet nenazvali ani odhadem této hodnoty. To ovšem neznamená, že udávaný koeficient PMD vlákna v kabelu není důležitý údaj. Jeho nízká hodnota je nutným předpokladem pro stavbu vysokorychlostních tras a u dnes vyráběných kvalitních vláken je samozřejmostí. Je to však jen jeden z mnoha faktorů působících na výslednou hodnotu PMD na trase a exaktně vyjádřit vliv oněch dalších faktorů je nemožné.
- Hodnota PMD vláken trasy je výsledkem mnoha vlivů počínaje výrobou vlákna přes kabelování až po výstavbu trasy atd. Důsledkem toho je, že hodnoty PMD se mohou lišit pro vlákna od různých výrobců, z různých dodávek, ale i pro vlákna ze stejného kabelu dokonce z jedné trubičky ¹⁵.
- V případě kabelu páskové struktury tzv. ribbonu, kde spleená vlákna mohou být mechanicky více namáhána je situace ještě složitější a hodnotu PMD je nutné kontrolovat zvláště u krajních vláken pásku, která jsou nejvíce namáhána.
- Nejistily se obecné rozdíly mezi hodnotami PMD u kabelu úložných a závěsných.
- U starších vláken je riziko zvýšené hodnoty PMD výrazně vyšší.
- Z měření nevyplývá závislost PMD na jiném přenosovém parametru — např. útlumu. To platí pro hodnoty útlumu na 1310 nm i 1550 nm a dokonce i pro poměr útlumu $A(1550) / A(1310)$ vypovídající o mechanických deformacích a ohybech vlákna. Ohyby vlákna PMD ovšem nepochybně ovlivňují, je ovšem obtížné tento vliv obecně vyjádřit.
- Z laboratorního měření vyplývá, že bodový ohyb má vzhledem ke svému dopadu na útlum vlákna vliv poměrně malý. Abychom vytvořili bodovým ohybem či deformací zpoždění PMD alespoň okolo 0,5 ps, je třeba vlákno namáhat tak, že jeho útlum na 1550 nm se zvýší o více než 10 dB, což představuje zpravidla daleko závažnější problém než zvýšení PMD. Problematictější mohou

¹⁴závěsné, kombinovaná zemnicí lana, uložené v zemi

¹⁵i pro vlákna z kabelu dosud na bubnech

být však i daleko slabší deformace vlákna, které se ale vyskytují na dlouhých vzdálenostech, přičemž tento vliv se dá jen velmi obtížně odhadnout.

- PMD vláken se výrazně neliší na 1310 nm a 1550 nm

3.6.1 Použití metody GINTY

Při použití interferometrické metody GINTY odpadají výše uvedená omezení tradiční metody. Nejenže už není třeba pečlivě dodržovat tvar spektra zdroje záření, ale je možné měřit i trasy se spektrální citlivými prvky.

S touto metodou je např. možné měřit trasy obsahující i mnoho desítek EDFA zesilovačů a není nutné měřit každý zesilovací úsek zvlášť. Má to i tu výhodu, že takto naměřená celková hodnota PMD trasy bude přesnější, neboť se vyhneme nutnosti ji počítat z hodnot naměřených na každém zesilovacím úseku. Změřená hodnota bude zkrátka přímo tou hodnotou, kterou bude na trase „vnímat“ i přenosový systém.

Tím, že je nová metoda nezávislá na tvaru spektra signálu, umožňuje také měření PMD samotných spektrálně závislých pasivních součástek. Je možné provádět měření dokonce i na úzkospektrálních součástkách ¹⁶.

Interferometrická metoda měří v principu PMD jako střední hodnotu v dostatečně širokém spektru. To je ale v tomto případě u GINTY metody možné nahradit časovým průměrováním více náměrů. Obecně neklade GINTY vůbec žádné nároky na tvar spektra ani na jeho šířku. Další výhody GINTY oproti tradiční metodě jsou v tom, že je možné měřit i velmi nízké hodnoty PMD (skutečně až k 0 ps) a celkově se s ní dosahuje výrazně vyšší přesnosti měření ¹⁷.

Z popsané obecné interferometrické metody se díky těmto výhodám stává nejuni-verzálnější metoda měření PMD, která je navíc velice rychlá (což je klasická výhoda interferometrické metody), a tudíž nejvhodnější pro měření v terénu. Její použití je vhodné jak pro výrobce k měření optických vláken a kabelu nebo pasivních součástek vláknové optiky, tak také pro měření zemních či nadzemních optických kabelových tras, které mohou obsahovat i vláknové zesilovače či další spektrální závislé prvky.

K praktickým měřením metodou GINTY je možné použít měřicí přístroj od firmy EXFO s typovým označením FTB-5500B. Měření lze provádět na samostatných optických vláknech i na kompletních trasách včetně takových, které obsahují vláknové zesilovače EDFA. Detailnější seznámení s tímto měřicím přístrojem a jeho vlastnostmi lze nalézt dále v této publikaci.

Obecně se dá říci, že pokud se měří s vhodným zdrojem záření (široké Gaussovské spektrum) na trase s běžným telekomunikačním vláknem (t.j. s velmi silnou

¹⁶např. filtry s propustným pásmem o šířce jednotek nm

¹⁷na nízkých hodnotách měří až s několikanásobně nižší nejistotou

mezividovou vazbou bez dvojlomných anomálií), která neobsahuje prvky ovlivňující spektrum měřícího signálu ¹⁸, jsou výsledky měření GINTY i TINTY velmi podobné, pokud neměříme nízké hodnoty PMD (zvláště pod 0,1 ps). Nesplnění některého z uvedených kritérií vede ovšem v případě TINTY k odchylkám od správné hodnoty PMD resp. od hodnoty měřené metodou GINTY. Záleží pak na konkrétním případě, jak velká bude odchylka hodnot měřených TINTY a zda-li ještě vůbec bude tato metoda pro měření použitelná.

Obecná interferometrická metoda měření PMD (GINTY) se v současné době již dostává do praxe. Možnostmi, které nabízí oproti tradiční interferometrické metodě, se z ní stává nejuniverzálnější metoda měření PMD a pro svou rychlost vůbec nejvhodnější pro měření optických kabelových tras v terénu. Nová metoda se postupně zakotvuje v mezinárodních technických doporučeních a jsou již dokonce komerčně nabízeny první měřící přístroje, které ji využívají [9].

¹⁸EDFA, OADM, filtry apod.

4 KOMPENZAČNÍ TECHNIKY PRO PMD

4.1 Kompenzace PMD jevu

Tato část obsahuje krátký přehled o možnostech kompenzace PMD jevu. Náhodný charakter PMD parametru neumožňuje kompletní anulování tohoto jevu avšak určitou korekci PMD efektu lze realizovat. Kódování FEC (*Forward error correction*) a redundance vlnových délek ve WDM sítích jsou často navrhované možnosti pro zmírnění efektu PMD. Nicméně kompenzace PMD parametru je často vyžadována řešit nezávisle nebo ve spolupráci se záložními systémy.

Základní kompenzační techniky lze rozčlenit do kategorií dle použitých komponentů a jejich technických oblastí:

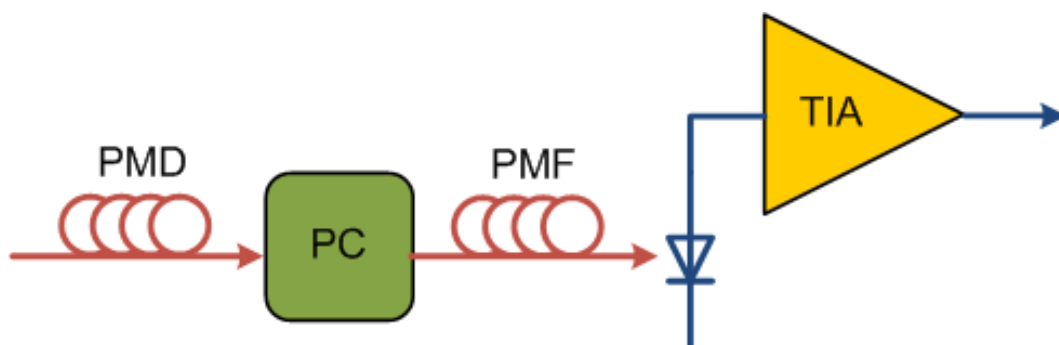
- Optická PMD kompenzace
- Optoelektronická PMD kompenzace
- Elektrická PMD kompenzace

4.2 Optická PMD kompenzace

Jedna z běžných optických PMD kompenzátorů vyžaduje polarizační kontrolér PC (*polarization controller*) a úsek vlákna s identickou polarizací PMF (*polarization-maintaining fiber*), jak je ukázáno na obrázku 4.1. Polarizační kontrolér PC využívá vyrovnání polarizačního stavu světelného signálu s PSP (*Principal states of polarization*) stavem v PMF kabelu. PMF je vlákno, které je úmyslně vyrobeno s velkým, ale kontrolovaným dvojlomem a proto může být použito ke generování přesné velikosti DGD zpoždění. V tomto případě, výkon v rychlé SOP může být zpožděním rovnající se DGD v PMF následkem čehož je zmenšení celkového DGD zpoždění. Komplikovanější kompenzátoři mohou být vyrobeny pomocí náhradní fixní délky PMF vlákna s proměnným zpožděním což umožní zrušení libovolného množství DGD nebo použitím vícenásobných PC-PMF systémů. Tyto systémy zvýší stupeň volnosti DOF (*degree of freedom*) a z toho důvodu přesnosti a správnosti kompenzace [16].

Navzdory zřejmým výhodám v kompenzaci optickým fenoménem s optickým kompenzátořem, optická kompenzace má několik nevýhod.

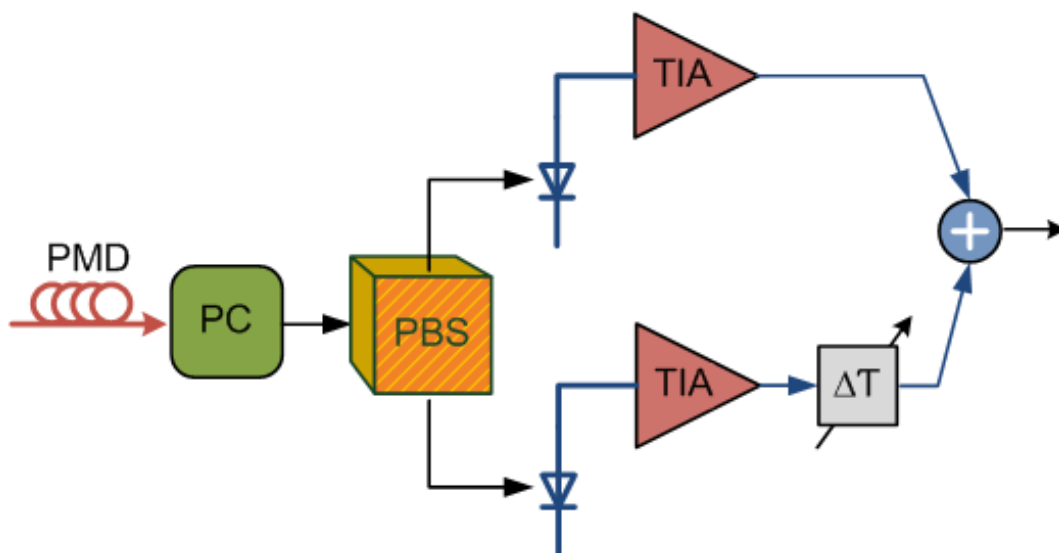
- optické schéma vyžaduje drahé a relativně objemné optické komponenty
- kompenzátor musí být přizpůsobivý a musí reagovat na dynamickou povahu PMD
- přizpůsobivost není jednoduše dosažitelná v optickém oboru, protože optické komponenty relativně postrádají ohebnost a flexibilitu.



Obr. 4.1: Jednoduchá architektura optického PMD kompenzátoru

4.3 Optoelektronická PMD kompenzace

Další možností kompenzace PMD je využití systémů, které zahrnují oba obory jak optickou tak elektrickou. Typický systém obsahuje dělič přijímaného světelného signálu do jeho dvou polarizačních modelů pomocí polarizačního kontroleru PC a polarizační paprsek je rozdělen v PBS (*polarization beam splitter*). Výsledné světelné signály jsou poté převedeny na elektrické signály pomocí dvou separátních TIA (*photodiode-transimpedance amplifier*) zesilovačů. Elektrický signál odpovídající světlu v rychlé SOP je poté zpožděno interním porovnávačem DGD zpoždění. Konečně, oba signály jsou znovu smíseny do formy přijímaného signálu bez vlivu PMD efektu. Tento koncept je ilustrován na obrázku 4.2 [16].



Obr. 4.2: Typická architektura optoelektronického PMD kompenzátoru

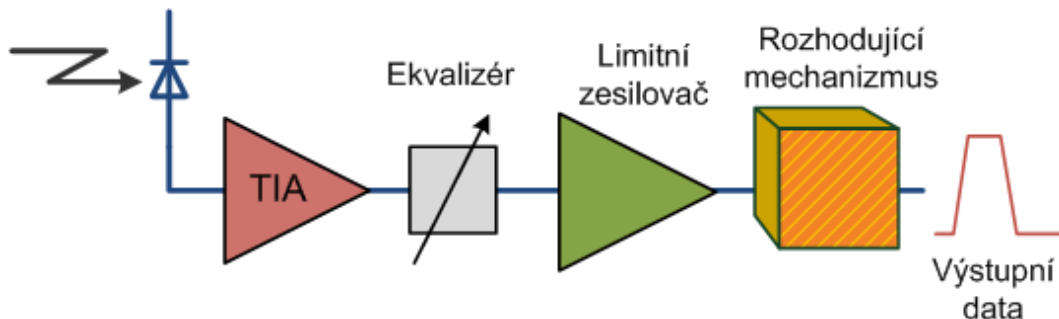
Hlavní výhodou optoelektronické kompenzace je že některý kompenzační hardware lze přesunout z optické do elektrické oblasti pro zvýšení úrovně integrace.

Nicméně, optoelektronické kompenzační systémy stále vyžadují extra optické komponenty jako polarizační kontroler PC a dělič PBS. Také, závěrečné sčítání obou signálů představuje významný cenový výdaj.

4.4 Elektronická PMD kompenzace

Elektronická PMD kompenzace je provedena pomocí ekvalizace přijímaného signálu po jeho konvertování ze světelné do elektrické formy pomocí fotodiody a TIA (*photodiode-transimpedance amplifier*) zesilovače. Blokové schéma systému elektrického přijímače s ekvalizérem je zobrazen na obrázku 4.3.

Elektrický ekvalizér je velmi oblíbeným řešením, protože nabízí vysoký stupeň integrace což má za následek nižší cenu ve srovnání s optickým a optoelektronickým řešením. Vysoká úroveň integrace je zejména důležitá ve WDM systémech v kterých PMD kompenzace je potřebná pro každý kanál. Důležitým parametrem k redukcí PMD je přizpůsobivost systému což je poměrně jednoduché implementovat elektronicky pomocí adaptibilního algoritmu např. je možno využít LMS (*least mean square*) algoritmus. Výsledkem výše uvedených důvodů je, že elektrická kompenzace patří mezi favority v kompenzaci PMD pokud je to možné v rámci hranic IC technologie [16].



Obr. 4.3: Blokový diagram optického přijímače, který obsahuje elektrický PMD kompenzátor

5 DOPORUČENÍ ITU-T PRO OPTICKÉ VLÁKNO

5.1 Normotvorné orgány

Těžiště normotvorných prací v celosvětovém měřítku spočívá na dvou mezinárodních organizacích, a to IEC (*International Electrotechnical Commission*) a ITU (*International Telecommunication Union*), jejichž sídla jsou v Ženevě. Česká republika je členem obou organizací. IEC je orientována na přípravu norem se zaměřením na výrobce elektrotechnických součástek a systémů. Přes 200 technických komisí a subkomisí sdružujících více než 10 000 odborníků po celém světě připravuje technické dokumenty nutné pro přípravu mezinárodních norem. Každý členský stát může delegovat své odborníky do jednotlivých komisí a tím se zúčastňovat tvorby technických norem [11]. Pro tvorbu norem ve vláknové optice je vytvořena technická komise TC 86 Vláknová optika, která pracuje ve třech subkomisích, a to:

- SC 86A ... Vlákná a kabely
- SC 86B ... Optické vláknové propojovací prvky a pasivní součástky
- SC 86C ... Optické vláknové systémy a aktivní součástky

Druhý hlavní normotvorný orgán ITU je multilaterálním orgánem jak vládních organizací, tak i soukromého sektoru pro koordinaci globálních telekomunikačních sítí. Na rozdíl od IEC se zaměřuje především na aplikaci optických vláken pro telekomunikace. Práce je soustředěna do tří sektorů, které vypracovávají technická doporučení, jsou to:

- ITU-R ... sektor radiokomunikace
- ITU-T ... sektor telekomunikační normalizace ITU
- ITU-D ... sektor rozvoje telekomunikací

5.2 Optické vlákna používaná v telekomunikační technice

Základní parametry optických vláken byly postupně standardizovány, např. doporučeními ITU-T řady *G.65x*. Tyto standardy jsou všeobecně respektovány jako záruka nejhorších možných podmínek pro práci optických rozhraní. Zmíněné standardy rozlišují především vlákna pomocí základních geometrických charakteristik na vlákna mnohavidová (použití v přístupových sítích a sítích přenosu dat) a vlákna jednovídná (pro vysokokapacitní dálkové přenosy). U každého typu vlákna jsou stanoveny přenosová okna, pro které je vlákno přednostně určeno. Hlavním rozlišovacím znakem jednotlivých typů vláken je průběh chromatické disperze. Mezinárodní normy

ITU-T týkající se optických kabelů jsou v následujících doporučeních, které jsou periodicky aktualizovány:

G.650 – Definice a měřicí metody pro relevantní parametry jednovidových vláken

G.651 – Charakteristiky optických kabelů s mnohovidovým gradientním vláknem 50/125 mm

G.652 – Charakteristiky optických kabelů s jednovidovým vláknem. Disperzně neposunuté vlákno USF (*Unshifted Fiber*) tzv. standardní nebo konveční jednovidové vlákno určené původně pro přenos ve druhém přenosovém okně. Vyznačuje se přirozeným průběhem koeficientu chromatické disperze s nulou v těsném okolí 1310 nm a zhruba 17 ps/nm.km na vlnové délce 1550 nm. Díky této charakteristice jsou tato vlákna vhodná pro přenosové systémy pracující v oblasti kolem vlnové délky 1310 nm a systémy s přenosovou rychlostí do 10 Gb/s v oblasti vlnové délky 1550 nm, tak i pro systémy s hustým DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplex*) nebo hrubým CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplex*) vlnovým multiplexem v pásmech O (1260-1360nm), C (1530-1565 nm), L (1565-1625 nm) a S (1460-1530 nm). Tato skupina vláken může být dále rozčleněna dle následujících typu:

- Matched Clad (MC) ... vlákno s přizpůsobeným profilem indexem lomu pláště. Tento typ vlákna je vlastně nejčastěji instalovaným vláknem na světě, především díky jednoduchosti výroby.
- Depressed Clad (DC) ... vlákno s vnořeným profilem indexu lomu. Poněkud složitějším profilem indexu lomu je vlákno navrženo tak, aby bylo méně citlivé na ohyby vlákna, než je tomu u vláken typu MC. Přenášená světelná energie je lépe vězněna v jádře vlákna strukturou profilu indexu lomu.
- Vlákno s nulovým ZWP nebo nízkým LWP obsahem hydroxidových iontů (*Zero Water Peak, Low Water Peak*) ... Tento typ MC vláken byl poprvé představen firmou OFS (dříve Lucent Technologies) v roce 1998. Vlákno obsahuje natolik nízký počet hydroxidových iontů, že dovoluje využít vlákna i k přenosům v pásmu E (1360 – 1460 nm), kde standardní vlákna mají zvýšené ztráty, právě absorbcí záření na hydroxidových iontech. Tento typ vláken je od roku 2000 zahrnut pod doporučení ITU-T. *G.652.C*.

G.653 – Charakteristiky jednovidových optických kabelů s vláknem s posunutou disperzní charakteristikou. Jedná se o vlákno, u něhož je celková disperze posunuta tak, aby byl disperzní koeficient nulový v okolí 1510 nm. Vlákno je optimalizováno pro práci ve třetím okně. Disperzně posunuté vlákno DSF (*Dispersion Shifted Fiber*) je komerčně dostupné od roku 1985 a původně bylo navrženo jako optimální vlákno pro vysokorychlostní přenosy v pásmu

1550 nm, kde chromatická disperze těchto vláken je téměř nulová. Vlákno bylo nasazováno hlavně počátkem devadesátých let do podmořských optických tras a do sítí dálkových telekomunikačních operátorů v USA a v Japonsku. Postupně se zvyšováním přenosové kapacity pomocí tzv. hustého vlnového multiplexu DWDM se ukázalo, že disperze blízka nule není nejvhodnější pro tyto vícekanálové aplikace z důvodu nelineárních jevů, jako je čtyřvlnné směšování FWM (*Four Wave Mixing*) a křížová modulace XPM (*Cross Phase Modulation*), které vznikají u těchto přenosů díky vysoké hustotě světelné energie v jádře optického vlákna.

G.654 – Charakteristiky jednovidových optických kabelů s vláknem s minimálním útlumem pro 1550 nm. Je vláknem specializované pro dálkové přenosy bez opakovacích prvků, zejména podmořské trasy. Snížení hodnoty měrného útlumu až na 0,18 dB/km se dosahuje vysokou čistotou materiálu jádra.

G.655 – Charakteristiky jednovidových optických kabelů s vláknem s posunutou nenulovou chromatickou disperzí. Je vláknem navrženým pro přenos ve třetím přenosovém okně a optimalizováno pro aplikace DWDM. Disperzní koeficient je posunut tak, aby neprocházel nulou, ale pohyboval se mezi minimální a maximální hodnotou. Omezení shora sleduje, aby celková disperze byla přijatelná i pro 10 Gbit/s přenosy, omezení zdola přispívá k redukcí čtvrtvlnného směšování. Vlákno s nenulovou chromatickou disperzí NZDF (*Non Zero Dispersion Fiber*) bylo představeno poprvé v roce 1993 firmou OFS (v té době AT&T) pod komerční značkou TrueWave. NZDF vlákna mají hodnotu chromatické disperze v C-pásmu nenulovou. Nenulová hodnota sice omezí dosah spoje, co se týče přenosové šířky pásma nebo přenosové rychlosti, zároveň však vede k výraznému potlačení výše zmíněných nelineárních jevů FWM a XPM u systému s hustým vlnovým multiplexem, kdy se vláknem přenáší v poměrně úzkém pásmu (např. C-pásmo – 35 nm) až několik desítek spektrálních kanálů. NZDF vlákna jsou specifikována v doporučení ITU-T G.655 pro přenosové pásmo C a L a v doporučení ITU-T G.656 pro pásma S, C a L. Komerčně je dostupných v současné době mnoho různých NZDF vláken lišící se jednotlivými přenosovými parametry, které předurčují jednotlivá vlákna pro různé přenosové aplikace, jako např. podmořské trasy, páteřní optické sítě, metropolitní sítě a pod. Dokonce na některých dálkových trasách dochází ke kombinaci několika typů NZDF vláken za účelem dosažení optimální charakteristiky chromatické disperze v souvislosti s nelineárními jevy vznikajícími v optickém vlákně při vysoké hustotě výkonu, jenž vzniká u mnohokanálových opticky zesilovaných systémů.

G.657 – Charakteristiky jednovidových optických kabelů pro přístupové sítě se sníženou citlivostí na ohyb. Jedná se o nový typ vláken, které mají složitější profil

indexu lomu a díky tomu mají výborné vlastnosti z hlediska citlivosti vláken na ohyby. Vlákna spadají pod doporučení ITU-T *G.657* a dlouhodobě se používají u některých dodavatelů pro tzv. patchcordové kabely, kde v rozvaděčích se předpokládá občasná manipulace s patchovacími kabely. Pro tyto kabely je jejich snížená citlivost na ohyby podstatná. S těmito vlákny se počítá i pro aplikace v optických přístupových sítích, kde koncový účastnický kabel bude vystaven mnoha prudkým ohybům. Jako vhodné vlákno můžeme z hlediska spektrální šířky pásma doporučit *Zero Water Peak* vlákno *AllWave FLEX*.

5.3 Optická vlákna dle standardu G.657

Standardizační komise při mezinárodní telekomunikační unii ITU-T vydala koncem roku 2006 novou směrnici pro jednovidová optická vlákna. Tato směrnice nebo spíše doporučení s názvem *Characteristics of a Bending Loss Insensitive Single Mode Optical Fibre and Cable for the Access Network* popisuje základní geometrické, přenosové a mechanické parametry jednovidových optických vláken se sníženou citlivostí na ohyby vlákna v přístupových telekomunikačních sítích. Těsně před oficiálním vydáním je nyní nová verze této specifikace, která reviduje původní verzi s ohledem na vývoj optických vláken a požadavků operátorů na citlivost jednovidových vláken na ohyby.

Doporučení ITU-T nese číslo *G.657* a v připravované verzi obsahuje čtyři specifikace *A1*, *A2*, *B2* a *B3*. Původní verze obsahovala pouze dvě specifikace *A* a *B*.

Optická vlákna podle specifikace A mají geometrické a mechanické parametry totožné s jednovidovými optickými vlákny podle ITU-T *G.652.D* specifikace. Přenosové parametry jsou taktéž totožné s těmito standardními vlákny s jedinou výjimkou tzv. makroohybových ztrát. Tyto ztráty norma definuje ve specifikaci *A1* pro poloměr ohybu 15 a 10 mm na dvou vlnových délkách 1550 a 1625 nm a ve specifikaci *A2* pro poloměr ohybu 15, 10 a 7,5 mm.

Optická vlákna podle specifikace B mají opět geometrické a mechanické parametry totožné s jednovidovými optickými vlákny podle ITU-T *G.652.A* specifikace. Přenosové parametry jsou definované pouze u průměru vidového pole, hraniční vlnové délky, koeficientu útlumu a makroohybových ztrát. Chromatická disperze a polarizační vidová disperze nejsou u této specifikace definovány. Důvodem je, že vlákna jsou nasazována na poměrně krátké vzdálenosti (jednotky až stovky metrů), kde tyto parametry nejsou a snad ani nikdy nebudou kritické a také, že samotná vlákna mohou mít složitější profil indexu lomu, který mění tyto přenosové parametry v porovnání se standardními vlákny. Další rozdíl mezi specifikacemi *A* a *B* je, že dovolené hodnoty ohybových ztrát

jsou nižší u specifikace B3, kde jsou navíc definovány i pro poloměr ohybu 5 mm.

V níže uvedených tabulkách jsou pro snadnou orientaci uvedeny základní parametry optických vláken pro specifikace A a B.

Tab. 5.1: Základní přenosové parametry

Parametr	<i>G.657.A</i>	<i>G.657.B</i>
MFD – 1310 nm	8,6 – 9,5 μm	6,3 – 9,5 μm
Koeficient útlumu	<i>G.657.D</i>	<i>G.657.A</i>
Chromatická disperze	<i>G.657.D</i>	TBD
PMD	<i>G.657.D</i>	TBD

Tab. 5.2: Dovolené makro-ohybové ztráty

Makro-ohybové ztráty	A	B	A	B	A	B
Poloměr	15 mm		10 mm		7,5 mm	
Počet závitů	10	10	1	1	1	1
Max. útlum na 1550 nm [dB]	0,25	0,03	0,75	0,1	NA	0,5
Max. útlum na 1625 nm [dB]	1	0,1	1,5	0,2	NA	1,0

Tab. 5.3: Typy vláken méně citlivých na ohyb

Výrobce vláken	Název vlákna	Specifikace
OFS	<i>AllWaveFLEX</i>	<i>G.657.A</i> a <i>G.657.B</i>
Corning	<i>ClearCurveTM</i>	<i>G.657.B</i>
Sumitomo	<i>PureAccessUltra</i>	<i>G.657.B</i>
Prysmian	<i>CasaLightTM</i>	<i>G.657.A</i>
Fujikura	<i>FutureGuideSR15</i>	<i>G.657.B</i>

Všechny tyto uváděné parametry ohybu vláken platí pro předpokládanou životnost vlákna 20 let s pravděpodobnosti poruchy 10ppm pro uložení vlákna v kazetě a 1ppm pro vedení vláken do kazet. V současné době již několik výrobců nabízí vlákna se sníženou citlivostí na ohyby. V tabulce 5.3 jsou uvedeni tito výrobci a obchodní značky vláken pod kterými jsou uvedeny na trh.

6 EXPERTNÍ MĚŘENÍ OPTICKÉ SÍTĚ MU BRNO

6.1 Úvodní informace k expertnímu měření

V roce 2010 odborní pracovníci firmy PROFiber Networking CZ s.r.o. provedli expertní měření na optické síti MU Brno. Měl jsem možnost být součástí měřící skupiny lidí, která fyzicky měřila jednotlivá optická vlákna. Získal jsem přístup k naměřeným hodnotám a všem podkladům z tohoto měření což jsem použil jako podklady pro praktickou část této diplomové práce.

Společnost PROFiber Networking s.r.o. se sídlem na Slovensku (Trnava) a společnost PROFiber Networking CZ s.r.o. se sídlem v České republice (Praha) poskytuje telekomunikačním provozovatelům a jejich dodavatelům výroby a služby technické podpory v oblasti vláknové optiky, monitorovacích systémů a projekce přístupových sítí. Podrobnější informace lze získat na webových stránkách www.profiber.cz a www.profiber.sk. Společnost PROFiber Networking s.r.o. je autorizovaným obchodním zastoupením a servisním střediskem firmy EXFO Electro Optical Engineering, firmy Furukawa Electric Europe Ltd. a Gentec Electro-Optics. Společnost PROFiber Networking s.r.o. a společnost PROFiber Networking CZ s.r.o. vznikla vyčleněním těchto aktivit ze společnosti Mikrokom s.r.o. Česká a Slovenská republika včetně personálního obsazení.

Cílem expertního měření je posoudit, jak optická síť MU Brno vyhovuje požadavkům moderních přenosů $10/40/100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$. Zároveň je cílem expertního měření poukázat na slabá místa sítě, analyzovat případné nevyhovující úseky a součástí sítě a navrhnout opatření ke zlepšení parametrů, tak aby na síti bylo možné provozovat moderní vysokokapacitní přenosy. Seznam všech měřených optických tras zobrazuje tabulka 6.1.

Protože optická síť vysokých škol v Brně se začala budovat v první polovině 90tých let, budou jejím slabým článkem právě trasy staré 10, 15 a více let. Obecně platí, že parametry starších tras jsou poplatné době, kdy byly vybudovány. Zkušenosti z ostatních sítí v České republice i ve světě jen potvrzují, že při nasazování současných vícekanálových přenosových systémů s přenosovou kapacitou $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ v každém kanálu mají problémy všichni provozovatelé optických sítí i jejich dodavatelé. Je pouze na rozhodnutí a riziku vlastníka sítě jaký přístup zvolí: zda otázku upgrade sítě na $100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ bude řešit koncepčně, nebo zvolí taktiku vyčkávání a řešení „last-minute“ problémů, které při nasazení nových přenosů zcela jistě nastanou. Last-minute taktika odsouvání problémů do budoucna se v tomto případě ukazuje jako finančně náročná alternativa. Rychlé řešení naléhavého problému bývá většinou vykoupeno neplánovanou ztrátou financí a času při výstavbě.

Tab. 6.1: Seznam kabelových tras pro expertní měření

Kabelové trasy k měření	kon A	kon B	Typ SM vlákna	vláken v profilu	volných SM vláken	měřených SM vláken
Kovoterm – Botanická	SC/PC	SC/PC	G.652	76	8	8
Kovoterm – Komenského	SC/PC	SC/PC	G.652	192	162	162
Komenského – Botanická	SC/PC	SC/PC	G.652	288	260	260
Komenského – Poříčí	SC/PC	SC/PC	G.652	192	172	172
Kounicova, Družba – VUT Kounicova	SC/PC	SC/PC	G.652	96	44	44
VUT Kounicova – Kotlářská	SC/PC	SC/PC	G.652	32	6	6
Žlutý kopec – Náměstí Míru B	SC/PC	SC/PC	G.652	48	36	36
Žlutý kopec – Lipová	SC/PC	SC/PC	G.652	48	30	30
Lipová – Kampus	SC/PC	SC/PC	G.652	48	10	10
Lipová – Poříčí	SC/PC	SC/PC	G.652	36	28	28

Při nasazení přenosových systémů 10/40/100 Gbit·s⁻¹ a DWDM/CWDM mohou nastat následující problémy:

- Nevyhovující hodnoty PMD zejména starší vlákna a kabely mají vysokou hodnotu koeficientu PMD. To způsobuje horší podmínky a horší parametry při nasazování moderních přenosových systémů a při poskytování vláken dalším subjektům provozovatelům v budoucnu. Jediným řešením v takové situaci je:
 1. výběr vláken v profilu kabelu
 2. hledání odchozí trasy
 3. výměna kabelu na trase
- Zvýšený měrný útlum na vláknech v oblasti v okolí 1383nm zejména u starších vláken a kabelů ztěžuje nasazování CWDM v pásmu 1330nm až 1450nm. Jediným řešením v takové situaci je:
 1. hledání jiné trasy
 2. výběr vhodného vlákna
 3. výměna kabelu na trase
- Zvýšený měrný útlum na vláknech v oblasti 1625nm lze v případě nadlimitního vložného útlumu celé trasy opravit pouze některým ze způsobů:
 1. výběr vláken v profilu kabelu
 2. hledání odchozí trasy
 3. výměna kabelu na trase
- Pokud zvýšený útlum na vláknech v oblasti 1625 nm je lokálního charakteru ¹, lze jej v případě nadlimitního vložného útlumu celé trasy opravit dle potřeby. Lokalizovat závadu ², makro ohyb odstranit a snížit hodnotu vložného útlumu pod limit přenosového systému. Stejně tak se postupuje i při výměně vadné součástky (svar, konektor atd.) s velkým útlumem.
- Velké odrazy na konektorech snižují kvalitu přenosu a někdy je nutné je vyměnit za kvalitní konektory nejlépe za šikmý styl leštění APC nebo trasy provařit.

6.2 Měřené parametry optických tras

6.2.1 Polarizační vidová disperze PMD

Polarizační vidová disperze PMD je kritickým parametrem přenosu. Pro klasický přenosový systém 10 Gbit·s⁻¹ s modulací NRZ je limit PMD 10 ps, pro 40 Gbit·s⁻¹ s modulací NRZ je limit PMD již pouze 2,5 ps. Při překročení limitu, tzn. pokud vykazuje trasa PMD nad tuto mez, narůstá chybovost systému a snižuje se jeho překlenutelný útlum. Z toho důvodu je nutné znát PMD jednotlivých úseků sítě tak, aby

¹např. ohyb vlákna

²ohnuté vlákno ve spojce, v rozvaděči atd.

celá trasa sestavená z těchto úseků nepřekročila hodnotu limitu PMD. U moderních přenosových systémů se využívá více stavových modulací, např. kvadrurní fázová modulace QPSK, nebo se využívá obou polarizačních stavů – modulace DP (*Dual Polarization*). Tím se zvýší odolnost přenosu proti disperzi. Pro moderní přenosové systémy $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ pak bývá limit PMD 3 až 4 ps.

Při poskytování optických vláken jiným provozovatelům, kteří si sami nasazují přenosový systém, určují a kontrolují hodnotu PMD za celou trasu bývá zvykem garantovat těmto provozovatelům hodnotu koeficientu PMD za měrný úsek trasy (1 km). Tato hodnota je stanovena standardem ITU *G.652D* na $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. V případě některých pronájmů vláken bývá požadována i přísnější hodnota $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.

6.2.2 Chromatická disperze CD

Koeficient chromatické disperze CD $\text{ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ je dobře definován v doporučení ITU *G.652D*. Při použití jiných vláken, což ovšem dosud není případ sítě MU Brno, je nutné řídit se odpovídajícím doporučením (např. ITU *G.656* nebo *G.657*) nebo v některých případech i specifikací výrobce kabelu/vlákna. Koeficient chromatické disperze je třeba měřit a kontrolovat v celém rozsahu vlnových délek, kde bude přenosový systém provozován, tzn. nejčastěji v C+L pásmu.

Moderní přenosové systémy mají díky novým modulacím a formě elektrické kompenzace zvýšenou odolnost na chromatickou disperzi CD na hodnotu 300 až 400 ps/nm. Pro účely tohoto expertního měření je uvažován limit CD 60 ps/nm, tj. obecný limit přenosu $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ při modulaci signálu NRZ – bez návratu k nule.

Hodnota chromatické disperze za celou trasu lze dobře určit, pokud známe disperze jednotlivých úseků, ze kterých je trasa složena. Limitní hodnota disperze CD za celou trasu není kritická, protože existují poměrně efektivní a cenově dostupné prvky pro kompenzaci chromatické disperze, tak aby po zařazení takového kompenzátoru CD do trasy klesla celková hodnota pod limitní mez. Dobrá kompenzace vyžaduje však v prvním kroku dobrou znalost CD celé trasy, nebo alespoň jejích úseků.

6.3 Použité měřicí přístroje

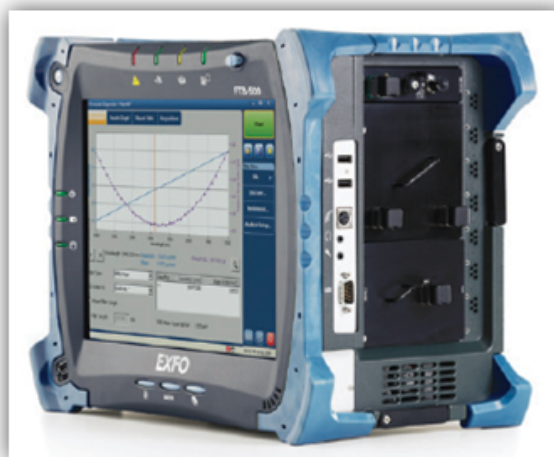
Pro mapování sítě byla použita unikátní souprava v Konfiguraci: Měřicí platformy EXFO FTB-200 a FTB-500 s měřicími moduly OTDR EXFO FTB-7400E (OTDR 1310/1383/1550/1625), kompaktního testeru CD/PMD FTB-5700, analyzátoru CD EXFO FTB-5800, analyzátoru PMD EXFO FTB-5500B, soupravou multifunkčního testeru EXFO FOT-930 MaxTester (OLTS 1310/1490/1550/1625), inspekčním videomikroskopem EXFO FIPT-400 a řadou dalších pomůcek a příslušenství. Kompletní seznam včetně výrobních čísel měřicích přístrojů je možné nalézt v komplet-

ních pdf reportech z měření v příloze této publikace. Všechny přístroje měli v době měření platnou kalibraci.

6.3.1 Měřicí přístroj PMD EXFO FTB-5500B

Měřicí modul EXFO FTB-5500B je tří slotový měřicí modul do platformy EXFO FTB-500, který poskytuje rychlé a přesné měření PMD na optických trasách od středních vzdáleností (metropolitní optické trasy) až po extrémně dlouhé optické transportní trasy. Přístroj je vhodný pro testování podzemních i závěsných kabelů. Měřicí modul je připraven pro testování optických tras s přenosovou kapacitou 10, 40 Gbit · s⁻¹ s výhledem na 100 Gbit · s⁻¹.

EXFO měřicí modul využívá tzv. obecnou interferometrickou metodu měření PMD (GINTY). Tato metoda oproti starší klasické metodě TINTY se vyznačuje potlačením vlivu autokorelační špičky. Tím je dosaženo mnohem přesnějšího měření a je umožněno měření před EDFA zesilovače. Pomocí pokročilé softwarové analýzy je navíc možné zjišťovat PMD druhého řádu a tím přesněji určit kvalitu přenosu u vysokorychlostních systémů.



Obr. 6.1: Platforma EXFO FTB-500

Jako polarizovaný zdroj záření je možné použít zdroj EXFO FTB-5800A, který pracuje i jako modulovaný zdroj záření pro měření chromatické disperze CD. Měřicí jednotku EXFO FTB-500 je tak možné osadit EXFO modulem pro měření CD a modulem pro měření PMD a vytvořit tak výkonnou sestavu pro testování disperzních charakteristik.

Podrobnou technickou specifikaci měřicího přístroje lze nalézt v příloze této diplomové práce.

6.3.2 Měřicí přístroj CD EXFO FTB-5800

Měřicí modul EXFO FTB-5800 je čtyř slotový měřicí modul do platformy EXFO FTB-400, který poskytuje rychlé a přesné měření chromatické disperze na optických trasách od střední vzdáleností (metropolitní optické trasy) až po extrémně dlouhé optické transportní trasy. Měřicí modul je připraven pro testování optických tras s přenosovou kapacitou 10, 40 Gbit · s⁻¹ s výhledem na 100 Gbit · s⁻¹.

Měřicí modul využívá metodu fázového posunu a pro měření je ho tedy nutné doplnit o modulovaný zdroj záření EXFO FLS-5800A. Přístroj umožňuje testování celé optické linky včetně EDFA zesilovačů bez nutnosti rozpojování na jednotlivé sekce a nabízí tak rychlé a bezchybné měření. Testování přes zesilovače je možné díky tomu, že filtrování signálu je realizováno na straně přijímače a mezi zdrojem a přijímačem tak neprobíhá žádná komunikace.

Podrobnou technickou specifikaci měřícího přístroje lze nalézt v příloze této diplomové práce.

6.3.3 Měřicí přístroj CD/PMD EXFO FTB-5700

Měřicí modul EXFO FTB-5700 je dvou slotový měřicí modul kompatibilní pro platformy EXFO FTB-200, EXFO FTB-500, který poskytuje rychlé a přesné měření chromatické a polarizační disperze na optických trasách (metropolitní optické trasy). Měřicí rozsah až do vzdálenosti 140 km.



Obr. 6.2: Platforma EXFO FTB-200

6.4 Trasa Kovoterm – Botanická

Počet měřených vláken všemi měřicími přístroji: 4 (vlákna 024, 050, 061, 093)

strana A:	Kovoterm	strana B:	Botanická
	FTB-5500 (PMD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5800 (CD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5700 (CD/PMD tester)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)

- Měření CD měřicím přístrojem FTB-5800
 - Měření chromatické disperze optického vlákna
 - Metoda fázového posunu v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty CD v pásmu 1550 nm ilustruje obrázek 7.1
 - Průběh chromatické disperze v závislosti na vlnové délce od 1530 nm do 1620 nm pro vlákno č.024 zobrazuje obrázek 7.2

Tab. 6.2: Limitní hodnoty CD trasy Kovoterm – Botanická

vln. délka	délka	max. CD koeficient	limit CD
1550 nm	3,748 km	17 ps/(nm · km)	60 ps/nm

- Měření PMD měřicím přístrojem FTB-5500B
 - Měření polarizační vidové disperze optického vlákna
 - Metoda interferometrická GINTY v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty PMD ilustruje obrázek 7.3
 - Naměřené hodnoty koeficientu PMD ilustruje obrázek 7.4
 - Výsledný interferogram pro vlákno č.024 zobrazuje obrázek 7.5

Tab. 6.3: Limitní hodnoty PMD trasy Kovoterm – Botanická

vln. délka	délka	max. PMD koeficient	limit PMD
1550 nm	3,748 km	0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	2,5 ps

- Měření CD/PMD měřicím přístrojem FTB-5700
 - Komplexní měření polarizační a chromatické vidové disperze optického vlákna
 - Metoda měření CD a PMD z jednoho konce v C+L pásmu

- Obrázky 7.3, 7.1 a 7.4 zobrazují srovnání naměřených hodnot jednotlivými měřicími přístroji v pásmu 1550 nm
- Vyhodnocení měření
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota pod 17ps/(nm·km) na všech vláknech. Limit 17ps/(nm·km) byl kontrolován následovně: $3,748 \times 17 = 63,716$ ps/nm byl splněn na všech vláknech.
 - Porovnáním výsledků s limity CD za celou trasu byla vždy překročena hodnota 60 ps/nm u všech vláken. *Je nutná kompenzace CD před nasazením přenosového systému 40 Gbit · s⁻¹ NRZ.*
 - Porovnáním výsledků s koeficientem PMD 0,2ps/√km byla všechna vlákna v limitu. Limit PMD 2,5 ps byl splněn na všech vláknech.
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca 17ps/(nm·km) na všech vláknech. Hodnota 17 ps/(nm · km) byla mírně překročena na vláknech 024, 062.

6.5 Trasa Komenského – Kovoterm

Počet měřených vláken všemi měřicími přístroji: 17 (vlákna 031, 041, 051, 061, 071, 081, 091, 101, 111, 121, 131, 141, 151, 161, 171, 181, 191)

strana A:	Komenského	strana B:	Kovoterm
	FTB-5500 (PMD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5800 (CD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5700 (CD/PMD tester)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)

- Měření CD měřicím přístrojem FTB-5800
 - Měření chromatické disperze optického vlákna
 - Metoda fázového posunu v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos 40 Gbit · s⁻¹ NRZ
 - Naměřené hodnoty CD ilustruje obrázek 7.6
 - Průběh chromatické disperze v závislosti na vlnové délce od 1530 nm do 1620 nm pro vlákno č.031 zobrazuje obrázek 7.7

Tab. 6.4: Limitní hodnoty CD trasy Komenského – Kovoterm

vln. délka	délka	max. CD koeficient	limit CD
1550 nm	4,103 km	17 ps/(nm · km)	60 ps/nm

- Měření PMD měřícím přístrojem FTB-5500B
 - Měření polarizační vidové disperze optického vlákna
 - Metoda interferometrická GINTY v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty PMD ilustruje obrázek 7.8
 - Naměřené hodnoty koeficientu PMD ilustruje obrázek 7.9
 - Výsledný interferogram pro vlákno č.031 zobrazuje obrázek 7.10

Tab. 6.5: Limitní hodnoty PMD trasy Komenského – Kovoterm

vln. délka	délka	max. PMD koeficient	limit PMD
1550 nm	4,103 km	$0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	2,5 ps

- Měření CD/PMD měřícím přístrojem FTB-5700
 - Komplexní měření polarizační a chromatické vidové disperze optického vlákna
 - Metoda měření CD a PMD z jednoho konce v C+L pásmu
 - Obrázky 7.8, 7.6 a 7.9 zobrazují srovnání naměřených hodnot jednotlivými měřícími přístroji
- Vyhodnocení měření
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ na všech vláknech. Limit $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ byl kontrolován následovně: $4,103 \times 17 = 69,751 \text{ ps}/\text{nm}$ byl splněn na všech vláknech, kromě vláken (061, 071, 081, 131, 141, 191), kde byl zjištěn mírně zvýšený koeficient CD.
 - Porovnáním výsledků s limity CD za celou trasu byla vždy překročena hodnota $60 \text{ ps}/\text{nm}$ u všech vláken. *Je nutná kompenzace CD před nasazením přenosového systému $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ.*
 - Porovnáním výsledků s koeficientem PMD $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ byla všechna vlákna v limitu. Limit PMD 2,5 ps byl splněn na všech vláknech.
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ na všech vláknech. Hodnota $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ byla mírně překročena na vláknech 010 a 012.

6.6 Trasa Botanická – Komenského

Počet měřených vláken všemi měřícími přístroji: 7 (vlákna 030, 041, 049, 060, 070, 080, 090)

- Měření CD měřícím přístrojem FTB-5800

strana A:	Botanická	strana B:	Komenského
	FTB-5500 (PMD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5800 (CD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5700 (CD/PMD tester)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)

- Měření chromatické disperze optického vlákna
- Metoda fázového posunu v C+L pásmu
- Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
- Naměřené hodnoty CD ilustruje obrázku 7.11
- Průběh chromatické disperze v závislosti na vlnové délce od 1530 nm do 1620 nm pro vlákno č.030 zobrazuje obrázek 7.12

Tab. 6.6: Limitní hodnoty CD trasy Botanická – Komenského

vln. délka	délka	max. CD koeficient	limit CD
1550 nm	3,600 km	17 ps/(nm · km)	60 ps/nm

- Měření PMD měřícím přístrojem FTB-5500B
 - Měření polarizační vidové disperze optického vlákna
 - Metoda interferometrická GINTY v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty PMD ilustruje obrázek 7.13
 - Naměřené hodnoty koeficientu PMD ilustruje obrázek 7.14
 - Výsledný interferogram pro vlákno č.030 zobrazuje obrázek 7.15

Tab. 6.7: Limitní hodnoty PMD trasy Botanická – Komenského

vln. délka	délka	max. PMD koeficient	limit PMD
1550 nm	3,600 km	0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	2,5 ps

- Měření CD/PMD měřícím přístrojem FTB-5700
 - Komplexní měření polarizační a chromatické vidové disperze optického vlákna
 - Metoda měření CD a PMD z jednoho konce v C+L pásmu
 - Obrázky 7.13, 7.11 a 7.14 zobrazují srovnání naměřených hodnot jednotlivými měřícími přístroji
- Vyhodnocení měření
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca 17ps/(nm · km) na všech vláknech. Limit 17ps/(nm · km) byl kontrolován následovně:

- 3, $600 \times 17 = 61,2$ ps/nm byl splněn na všech vláknech, kromě vláken (061, 071, 081, 131, 141, 191), kde byl zjištěn mírně zvýšený koeficient CD.
- Porovnáním výsledků s limity CD za celou trasu byla mírně překročena hodnota 60 ps/nm u vlákna 090. *Není nutná kompenzace CD před nasazením přenosového systému 40 Gbit · s⁻¹ NRZ.*
 - Porovnáním výsledků s koeficientem PMD $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ byla všechna vlákna v limitu. Limit PMD 2,5 ps byl splněn na všech vláknech.
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca 17 ps/(nm · km) na všech vláknech.

6.7 Trasa Komenského – Poříčí

Počet měřených vláken všemi měřicími přístroji: 17 (vlákna 010, 020, 030, 040, 050, 060, 070, 080, 090, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170)

strana A:	Komenského	strana B:	Poříčí
	FTB-5500 (PMD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5800 (CD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5700 (CD/PMD tester)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)

- Měření CD měřicím přístrojem FTB-5800
 - Měření chromatické disperze optického vlákna
 - Metoda fázového posunu v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos 40 Gbit · s⁻¹ NRZ
 - Naměřené hodnoty CD ilustruje obrázek 7.16
 - Průběh chromatické disperze v závislosti na vlnové délce od 1530 nm do 1620 nm pro vlákno č.010 zobrazuje obrázek 7.17

Tab. 6.8: Limitní hodnoty CD trasy Komenského – Poříčí

vln. délka	délka	max CD koeficient	limit CD
1550 nm	2,898 km	17 ps/(nm · km)	60 ps/nm

- Měření PMD měřicím přístrojem FTB-5500B
 - Měření polarizační vidové disperze optického vlákna
 - Metoda interferometrická GINTY v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos 40 Gbit · s⁻¹ NRZ
 - Naměřené hodnoty PMD ilustruje obrázek 7.18

- Naměřené hodnoty koeficientu PMD ilustruje obrázek 7.19
- Výsledný interferogram pro vlákno č.010 zobrazuje obrázek 7.20

Tab. 6.9: Limitní hodnoty PMD trasy Komenského – Poříčí

vln. délka	délka	max PMD koeficient	limit PMD
1550 nm	2,898 km	0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	2,5 ps

- Měření CD/PMD měřícím přístrojem FTB-5700
 - Komplexní měření polarizační a chromatické vidové disperze optického vlákna
 - Metoda měření CD a PMD z jednoho konce v C+L pásmu
 - Obrázky 7.18, 7.16 a 7.19 zobrazují srovnání naměřených hodnot jednotlivými měřícími přístroji
- Vyhodnocení měření
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca 17ps/(nm·km) na všech vláknech. Limit 17ps/(nm·km) byl kontrolován následovně: $2,898 \times 17 = 49,27$ ps/nm byl splněn na všech vláknech.
 - Porovnáním výsledků s limity CD za celou trasu byla vždy splněna hodnota 60 ps/nm u všech vláken. *Není nutná kompenzace CD před nasazením přenosového systému 40 Gbit · s⁻¹ NRZ.*
 - Porovnáním výsledků s koeficientem PMD 0,2ps/ $\sqrt{\text{km}}$ byla všechna vlákna v limitu. Limit PMD 2,5 ps byl splněn na všech vláknech.

6.8 Trasa Kounicova Družba – VUT Kounicova

Počet měřených vláken všemi měřícími přístroji: 5 (vlákna 005, 015, 025, 035, 045)

strana A:	VUT Kounicova	strana B:	Kounicova Družba
	FTB-5500 (PMD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5800 (CD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5700 (CD/PMD tester)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)

- Měření CD měřícím přístrojem FTB-5800
 - Měření chromatické disperze optického vlákna
 - Metoda fázového posunu v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos 40 Gbit · s⁻¹ NRZ
 - Naměřené hodnoty CD ilustruje obrázek 7.21

- Průběh chromatické disperze v závislosti na vlnové délce od 1530 nm do 1620 nm pro vlákno č.005 zobrazuje obrázek 7.22

Tab. 6.10: Limitní hodnoty CD trasy Kounicova Družba – VUT Kounicova

vln. délka	délka	max CD koeficient	limit CD
1550 nm	0,562 km	17 ps/(nm · km)	60 ps/nm

- Měření PMD měřícím přístrojem FTB-5500B
 - Měření polarizační vidové disperze optického vlákna
 - Metoda interferometrická GINTY v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty PMD ilustruje obrázek 7.23
 - Naměřené hodnoty koeficientu PMD ilustruje obrázek 7.24
 - Výsledný interferogram pro vlákno č.005 zobrazuje obrázek 7.25

Tab. 6.11: Limitní hodnoty PMD trasy Kounicova Družba – VUT Kounicova

vln. délka	délka	max PMD koeficient	limit PMD
1550 nm	0,562 km	$0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	2,5 ps

- Měření CD/PMD měřícím přístrojem FTB-5700
 - Komplexní měření polarizační a chromatické vidové disperze optického vlákna
 - Metoda měření CD a PMD z jednoho konce v C+L pásmu
 - Obrázky 7.23, 7.21 a 7.24 zobrazují srovnání naměřených hodnot jednotlivými měřícími přístroji
- Vyhodnocení měření
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ na všech vláknech. Limit $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ byl kontrolován následovně: $0,562 \times 17 = 9,56 \text{ ps}/\text{nm}$ byl mírně překročen na vláknech 005, 015, 025, 045.
 - Porovnáním výsledků s limity CD za celou trasu byla vždy splněna hodnota $60 \text{ ps}/\text{nm}$ u všech vláken. *Není nutná kompenzace CD před nasazením přenosového systému $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ.*
 - Porovnáním výsledků s koeficientem PMD $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ byla všechna vlákna v limitu. Limit PMD $2,5 \text{ ps}$ byl splněn na všech vláknech.

6.9 Trasa VUT Kounicova – Kotlářská

Počet měřených vláken všemi měřicími přístroji: 1 (vlákno 007)

strana A:	VUT Kounicova	strana B:	Kounicova Družba
	FTB-5500 (PMD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5800 (CD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5700 (CD/PMD tester)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)

- Měření CD měřicím přístrojem FTB-5800
 - Měření chromatické disperze optického vlákna
 - Metoda fázového posunu v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty CD ilustruje obrázek 7.26
 - Průběh chromatické disperze v závislosti na vlnové délce od 1530 nm do 1620 nm pro vlákno č.007 zobrazuje obrázek 7.27

Tab. 6.12: Limitní hodnoty CD trasy VUT Kounicova – Kotlářská

vln. délka	délka	max. CD koeficient	limit CD
1550 nm	1,457 km	17 ps/(nm · km)	60 ps/nm

- Měření PMD měřicím přístrojem FTB-5500B
 - Měření polarizační vidové disperze optického vlákna
 - Metoda interferometrická GINTY v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty PMD ilustruje obrázek 7.28
 - Naměřené hodnoty koeficientu PMD ilustruje obrázek 7.29
 - Výsledný interferogram pro vlákno č.007 zobrazuje obrázek 7.30

Tab. 6.13: Limitní hodnoty PMD trasy VUT Kounicova – Kotlářská

vln. délka	délka	max. PMD koeficient	limit PMD
1550 nm	1,457 km	0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	2,5 ps

- Měření CD/PMD měřicím přístrojem FTB-5700
 - Komplexní měření polarizační a chromatické vidové disperze optického vlákna
 - Metoda měření CD a PMD z jednoho konce v C+L pásmu

- Obrázky 7.28, 7.26 a 7.29 zobrazují srovnání naměřených hodnot jednotlivými měřicími přístroji
- Vyhodnocení měření
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca $17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ na všech vláknech. Limit $17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ byl kontrolován následovně: $1,457 \times 17 = 24,77\text{ ps/nm}$ byl splněn na vláknech.
 - Porovnáním výsledků s limity CD za celou trasu byla vždy splněna hodnota 60 ps/nm u všech vláken. *Není nutná kompenzace CD před nasazením přenosového systému 40 Gbit · s⁻¹ NRZ.*
 - Porovnáním výsledků s koeficientem PMD $0,2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ byla všechna vlákna v limitu. Limit PMD $2,5\text{ ps}$ byl splněn na všech vláknech.

6.10 Trasa nám. Míru B – Žlutý kopec

Počet měřených vláken všemi měřicími přístroji: 6 (vlákna 001, 006, 019, 028, 038, 048)

strana A:	Žlutý kopec	strana B:	nám. Míru B
	FTB-5500 (PMD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5800 (CD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5700 (CD/PMD tester)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)

- Měření CD měřicím přístrojem FTB-5800
 - Měření chromatické disperze optického vlákna
 - Metoda fázového posunu v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40\text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty CD ilustruje obrázek 7.31
 - Průběh chromatické disperze v závislosti na vlnové délce od 1530 nm do 1620 nm pro vlákno č.001 zobrazuje obrázek 7.32

Tab. 6.14: Limitní hodnoty CD trasy nám. Míru B – Žlutý kopec

vln. délka	délka	max. CD koeficient	limit CD
1550 nm	2,860 km	$17\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$	60 ps/nm

- Měření PMD měřicím přístrojem FTB-5500B
 - Měření polarizační vidové disperze optického vlákna
 - Metoda interferometrická GINTY v C+L pásmu

- Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
- Naměřené hodnoty PMD ilustruje obrázek 7.33
- Naměřené hodnoty koeficientu PMD ilustruje obrázek 7.34
- Výsledný interferogram pro vlákno č.001 zobrazuje obrázek 7.35

Tab. 6.15: Limitní hodnoty PMD trasy nám. Míru B – Žlutý kopec

vln. délka	délka	max. PMD koeficient	limit PMD
1550 nm	2,860 km	$0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	2,5 ps

- Měření CD/PMD měřícím přístrojem FTB-5700
 - Komplexní měření polarizační a chromatické vidové disperze optického vlákna
 - Metoda měření CD a PMD z jednoho konce v C+L pásmu
 - Obrázky 7.33, 7.31 a 7.34 zobrazují srovnání naměřených hodnot jednotlivými měřícími přístroji
- Vyhodnocení měření
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ na všech vláknech. Limit $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ byl kontrolován následovně: $2,860 \times 17 = 48,62 \text{ ps}/\text{nm}$ byl mírně překročen na vláknech 028, 038, 048.
 - Porovnáním výsledků s limity CD za celou trasu byla vždy splněna hodnota $60 \text{ ps}/\text{nm}$ u všech vláken. *Není nutná kompenzace CD před nasazením přenosového systému $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ.*
 - Porovnáním výsledků s koeficientem PMD $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ byla všechna vlákna v limitu. Limit PMD 2,5 ps byl splněn na všech vláknech.

6.11 Trasa Žlutý kopec – Lipová

Počet měřených vláken všemi měřícími přístroji: 5 (vlákna 013, 023, 030, 039, 048)

strana A:	Žlutý kopec	strana B:	Lipová
	FTB-5500 (PMD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5800 (CD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5700 (CD/PMD tester)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)

- Měření CD měřícím přístrojem FTB-5800
 - Měření chromatické disperze optického vlákna
 - Metoda fázového posunu v C+L pásmu

- Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
- Naměřené hodnoty CD ilustruje obrázek 7.36
- Průběh chromatické disperze v závislosti na vlnové délce od 1530 nm do 1620 nm pro vlákno č.013 zobrazuje obrázek 7.37

Tab. 6.16: Limitní hodnoty CD trasy Žlutý kopec – Lipová

vln. délka	délka	max. CD koeficient	limit CD
1550 nm	1,806 km	17 ps/(nm · km)	60 ps/nm

- Měření PMD měřícím přístrojem FTB-5500B
 - Měření polarizační vidové disperze optického vlákna
 - Metoda interferometrická GINTY v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty PMD ilustruje obrázek 7.38
 - Naměřené hodnoty koeficientu PMD ilustruje obrázek 7.39
 - Výsledný interferogram pro vlákno č.013 zobrazuje obrázek 7.40

Tab. 6.17: Limitní hodnoty PMD trasy Žlutý kopec – Lipová

vln. délka	délka	max. PMD koeficient	limit PMD
1550 nm	1,806 km	0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	2,5 ps

- Měření CD/PMD měřícím přístrojem FTB-5700
 - Komplexní měření polarizační a chromatické vidové disperze optického vlákna
 - Metoda měření CD a PMD z jednoho konce v C+L pásmu
 - Obrázky 7.38, 7.36 a 7.39 zobrazují srovnání naměřených hodnot jednotlivými měřícími přístroji
- Vyhodnocení měření
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca 17ps/(nm·km) na všech vláknech. Limit 17ps/(nm·km) byl kontrolován následovně: $1,806 \times 17 = 30,7 \text{ ps/nm}$ byl splněn na všech vláknech.
 - Porovnáním výsledků s limity CD za celou trasu byla vždy splněna hodnota 60 ps/nm u všech vláken. *Není nutná kompenzace CD před nasazením přenosového systému $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ.*
 - Porovnáním výsledků s koeficientem PMD $0,2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ byla všechna vlákna v limitu. Limit PMD 2,5 ps byl splněn na všech vláknech.

6.12 Trasa Lipová – Kampus 48

Počet měřených vláken všemi měřicími přístroji: 3 (vlákna 027, 031, 036)

strana A:	Lipová	strana B:	Kampus
	FTB-5500 (PMD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5800 (CD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5700 (CD/PMD tester)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)

- Měření CD měřicím přístrojem FTB-5800
 - Měření chromatické disperze optického vlákna
 - Metoda fázového posunu v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty CD ilustruje obrázek 7.41
 - Průběh chromatické disperze v závislosti na vlnové délce od 1530 nm do 1620 nm pro vlákno č.027 zobrazuje obrázek 7.42

Tab. 6.18: Limitní hodnoty CD trasy Lipová – Kampus 48

vln. délka	délka	max. CD koeficient	limit CD
1550 nm	4,311 km	17 ps/(nm · km)	60 ps/nm

- Měření PMD měřicím přístrojem FTB-5500B
 - Měření polarizační vidové disperze optického vlákna
 - Metoda interferometrická GINTY v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty PMD ilustruje obrázek 7.43
 - Naměřené hodnoty koeficientu PMD ilustruje obrázek 7.44
 - Výsledný interferogram pro vlákno č.027 zobrazuje obrázek 7.45

Tab. 6.19: Limitní hodnoty PMD trasy Lipová – Kampus 48

vln. délka	délka	max. PMD koeficient	limit PMD
1550 nm	4,311 km	0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	2,5 ps

- Měření CD/PMD měřicím přístrojem FTB-5700
 - Komplexní měření polarizační a chromatické vidové disperze optického vlákna
 - Metoda měření CD a PMD z jednoho konce v C+L pásmu

- Obrázky 7.43, 7.41 a 7.44 zobrazují srovnání naměřených hodnot jednotlivými měřicími přístroji
- Vyhodnocení měření
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca $17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ na všech vláknech. Limit $17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ byl kontrolován následovně: $1,806 \times 17 = 30,7\text{ ps/nm}$ byl splněn na všech vláknech.
 - Porovnáním výsledků s limity CD za celou trasu byla vždy splněna hodnota 60 ps/nm u všech vláken. *Není nutná kompenzace CD před nasazením přenosového systému $40\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ NRZ.*
 - Porovnáním výsledků s koeficientem PMD $0,2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ byla všechna vlákna v limitu. Limit PMD $2,5\text{ ps}$ byl splněn na všech vláknech.

6.13 Trasa Lipová – Poříčí

Počet měřených vláken všemi měřicími přístroji: 4 (vlákna 003, 013, 023, 033)

strana A:	Lipová	strana B:	Poříčí
	FTB-5500 (PMD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5800 (CD)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)
	FTB-5700 (CD/PMD tester)		FLS-5834 (zdroj CD/PMD)

- Měření CD měřicím přístrojem FTB-5800
 - Měření chromatické disperze optického vlákna
 - Metoda fázového posunu v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ NRZ
 - Naměřené hodnoty CD ilustruje obrázek 7.46
 - Průběh chromatické disperze v závislosti na vlnové délce od 1530 nm do 1620 nm pro vlákno č.003 zobrazuje obrázek 7.47

Tab. 6.20: Limitní hodnoty CD trasy Lipová – Poříčí

vln. délka	délka	max. CD koeficient	limit CD
1550 nm	$2,623\text{ km}$	$17\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$	60 ps/nm

- Měření PMD měřicím přístrojem FTB-5500B
 - Měření polarizační vidové disperze optického vlákna
 - Metoda interferometrická GINTY v C+L pásmu
 - Stanoveno pro přenos $40\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ NRZ

- Naměřené hodnoty PMD ilustruje obrázek 7.48
- Naměřené hodnoty koeficientu PMD ilustruje obrázek 7.49
- Výsledný interferogram pro vlákno č.003 zobrazuje obrázek 7.50

Tab. 6.21: Limitní hodnoty PMD trasy Lipová – Poříčí

vln. délka	délka	max. PMD koeficient	limit PMD
1550 nm	2,623 km	0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	2,5 ps

- Měření CD/PMD měřícím přístrojem FTB-5700
 - Komplexní měření polarizační a chromatické vidové disperze optického vlákna
 - Metoda měření CD a PMD z jednoho konce v C+L pásmu
 - Obrázky 7.48, 7.46 a 7.49 zobrazují srovnání naměřených hodnot jednotlivými měřicími přístroji
- Vyhodnocení měření
 - Porovnáním výsledků s koeficientem CD byla zjištěna hodnota cca 17ps/(nm·km) na všech vláknech. Limit 17ps/(nm·km) byl kontrolován následovně: $2,623 \times 17 = 44,591$ ps/nm byl splněn na všech vláknech.
 - Porovnáním výsledků s limity CD za celou trasu byla vždy splněna hodnota 60 ps/nm u všech vláken. *Není nutná kompenzace CD před nasazením přenosového systému 40 Gbit · s⁻¹ NRZ.*
 - Porovnáním výsledků s koeficientem PMD 0,2ps/ $\sqrt{\text{km}}$ byla všechna vlákna v limitu. Limit PMD 2,5 ps byl splněn na všech vláknech.

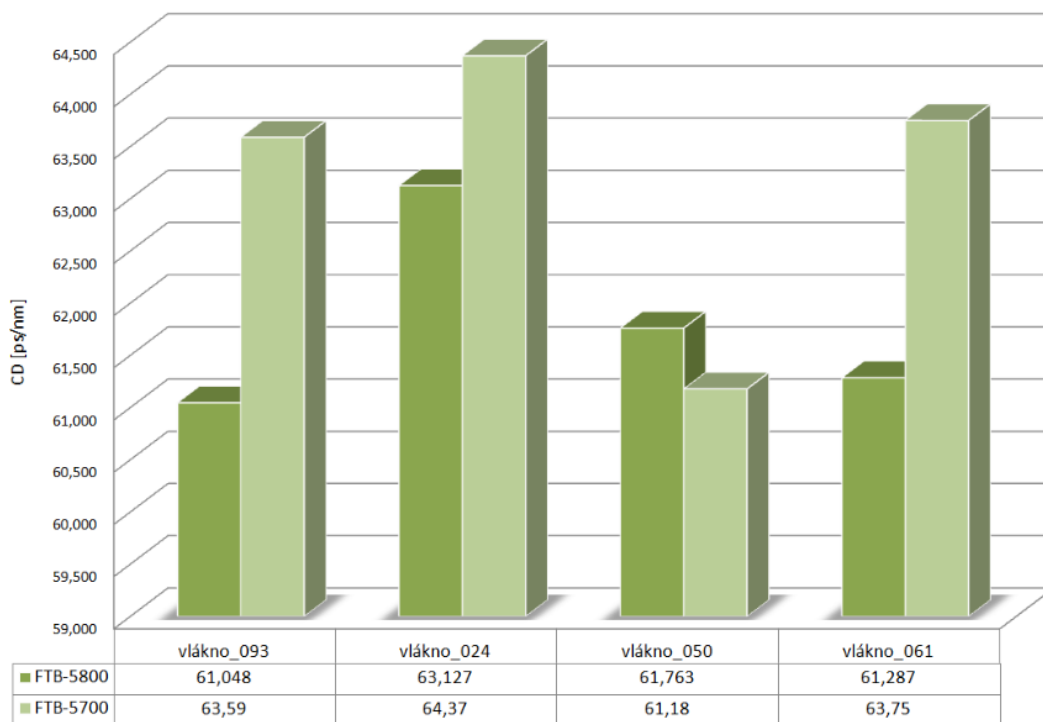
6.14 Výsledky expertního měření

- Seznam měřených tras je v tabulce 6.1.
- Kompletní zhodnocení výsledků expertního měření a porovnání metod měření lze nalézt v kapitole *Závěr* této diplomové práce.
- Náměry ve formátu zdrojových dat jsou uloženy na *CD1* v příloze této diplomové práce.
- Zpracované měřicí protokoly dat ve formátu pdf jsou na *CD2* v příloze této diplomové práce.

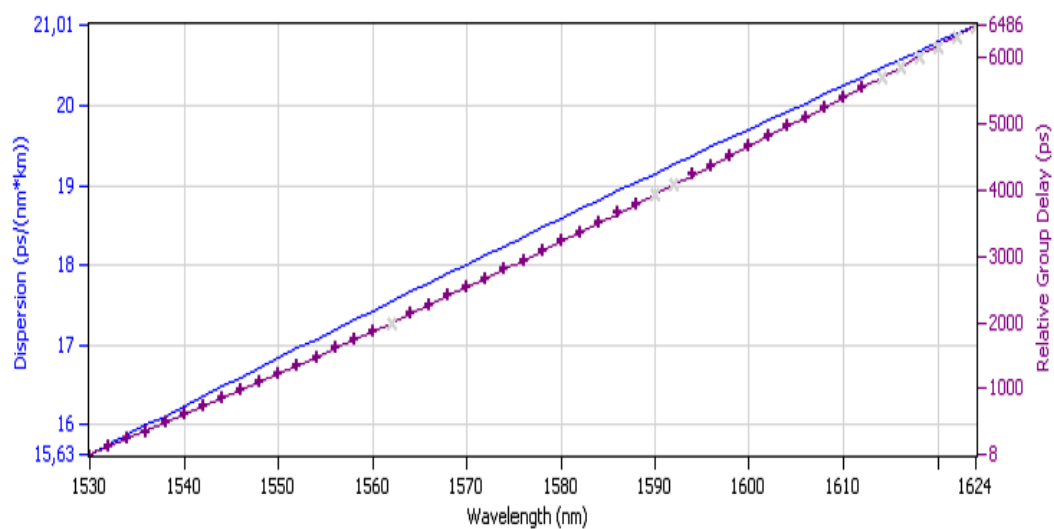
Výsledky měření CD/PMD (FTB-5700), OLTS, OTDR za každé vlákno jsou konsolidovány v jedné tabulce *Fiber Characterization Report* zpracované programem *FastReporter*. Reflektogramy z měření jednotlivých vláken metodou OTDR jsou v tabulce *OTDR Report*. Pokud byla některá vlákna měřena i metodou CD

FTB-5800 jsou výsledky za tyto vlákna v tabulce *Chromatic Dispersion Report* a obdobně výsledky měření PMD FTB-5500B jsou v tabulce *PMD Report*.

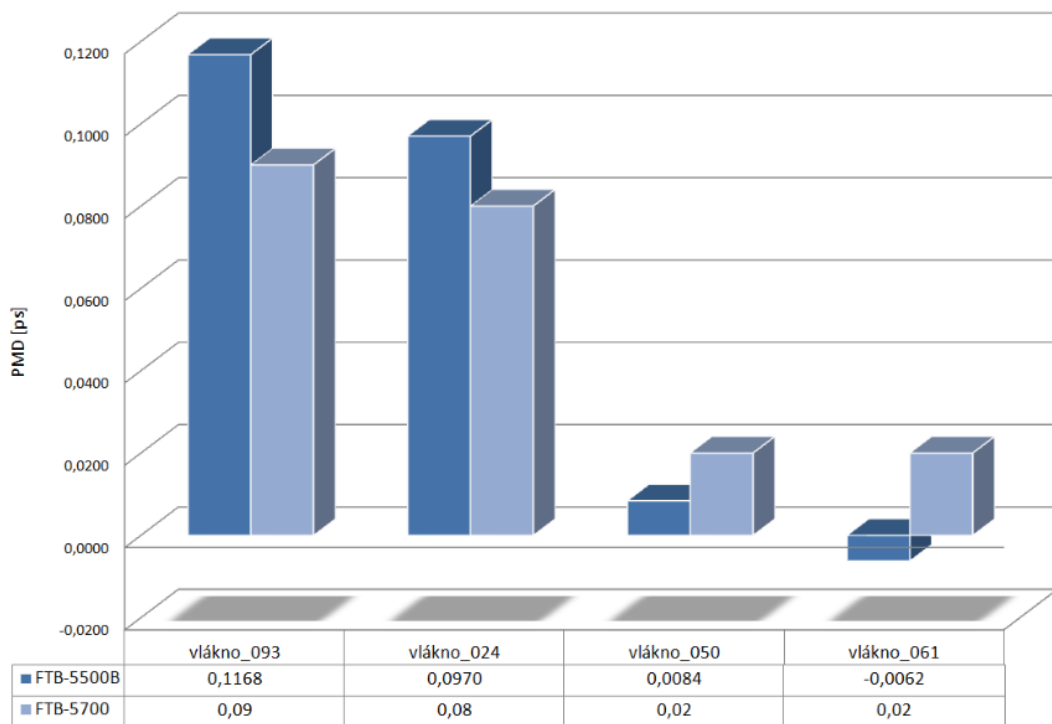
7 GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT



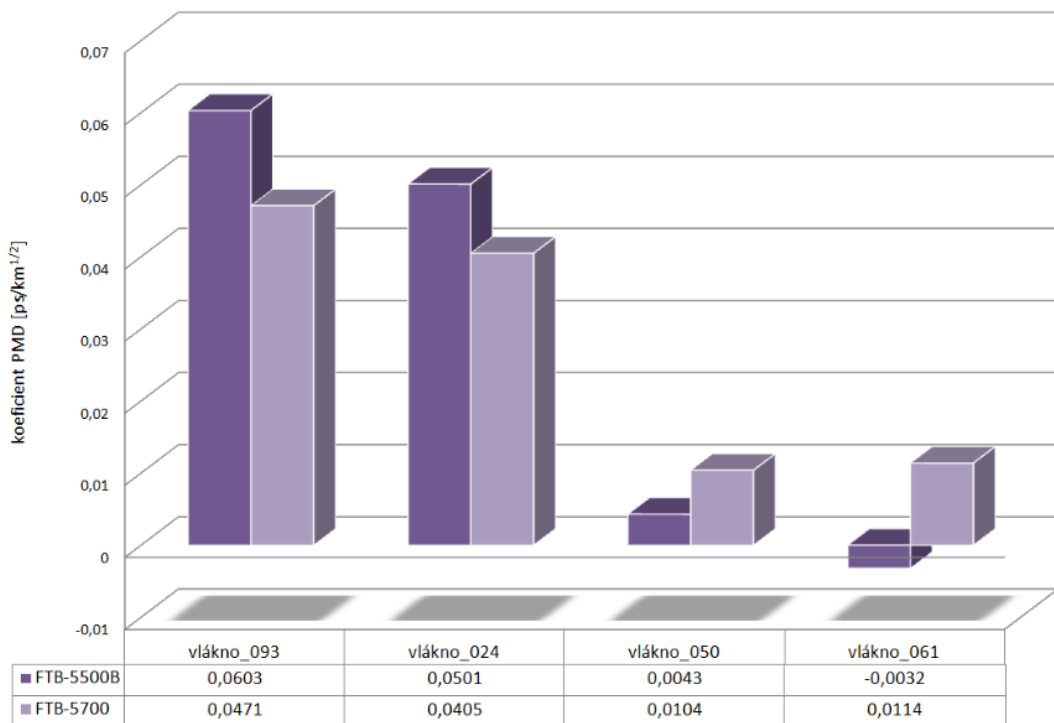
Obr. 7.1: Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Kovoterm – Botanická



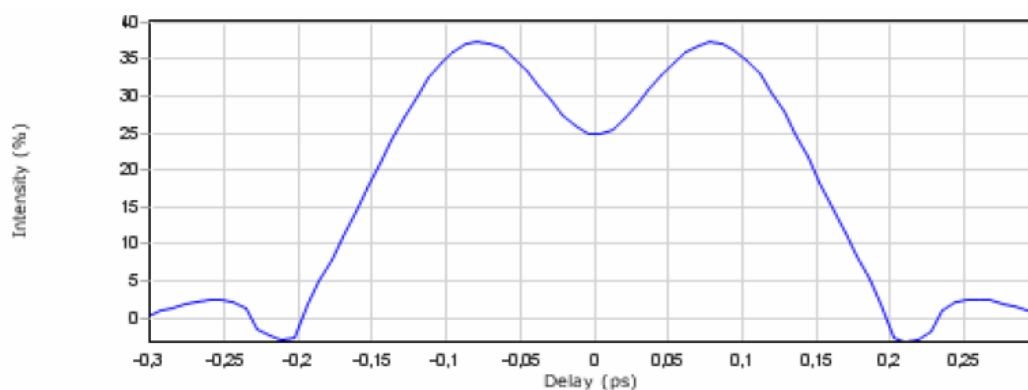
Obr. 7.2: Průběh CD v závislosti na vlnové délce o pro vlákno č.024 trasy Kovoterm – Botanická



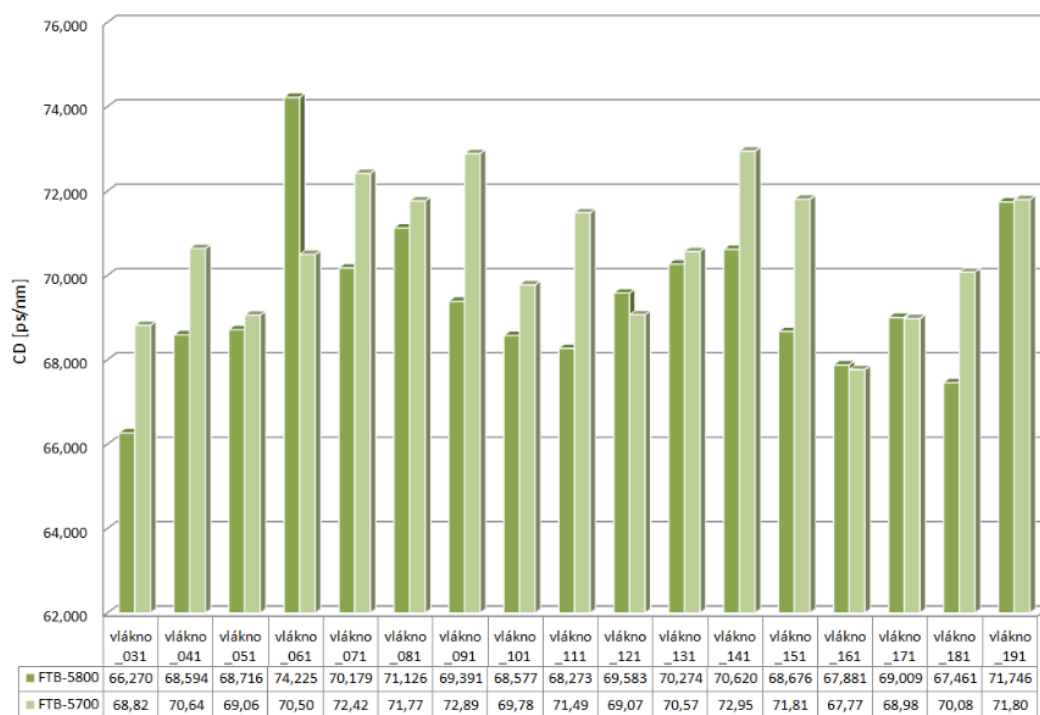
Obr. 7.3: Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Kovoterm – Botanická



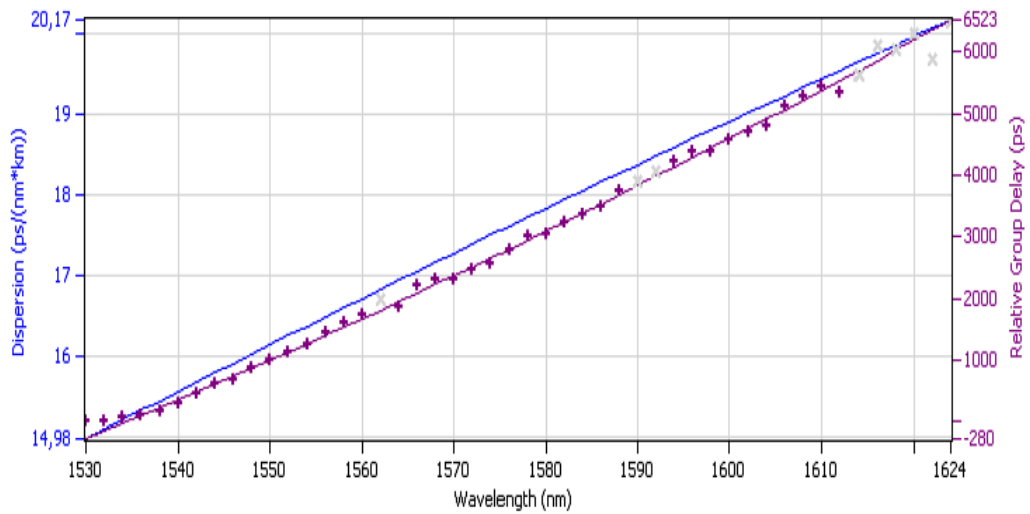
Obr. 7.4: Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Kovoterm – Botanická



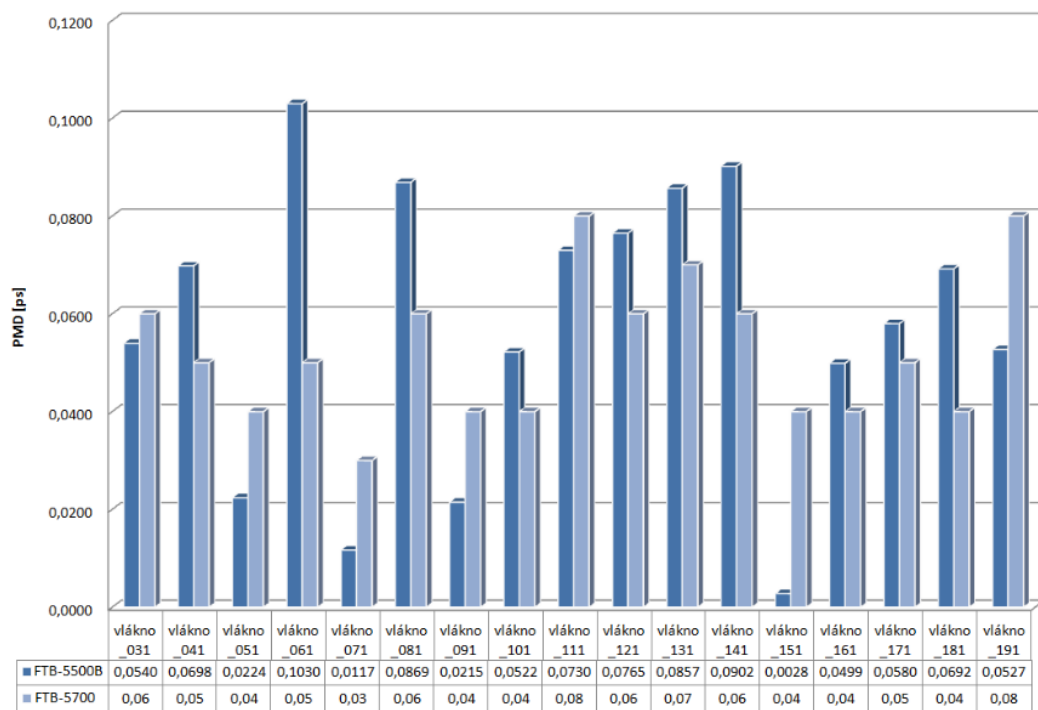
Obr. 7.5: Výsledný interferogram pro vlákno č.024 trasy Kovoterm – Botanická



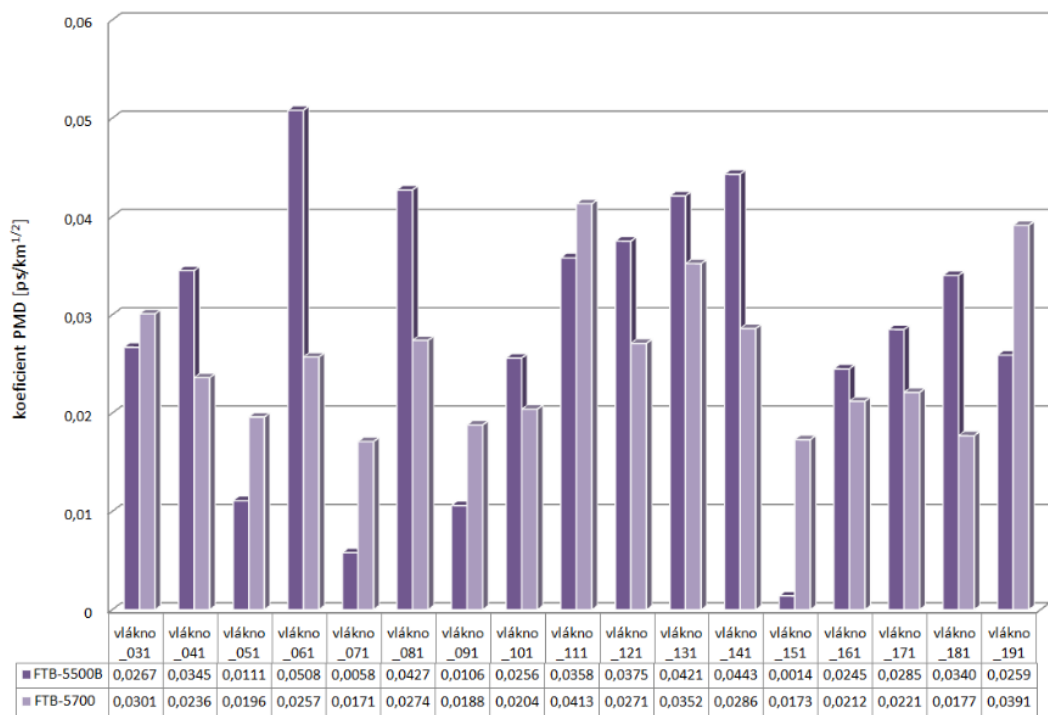
Obr. 7.6: Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Komenského – Kovoterm



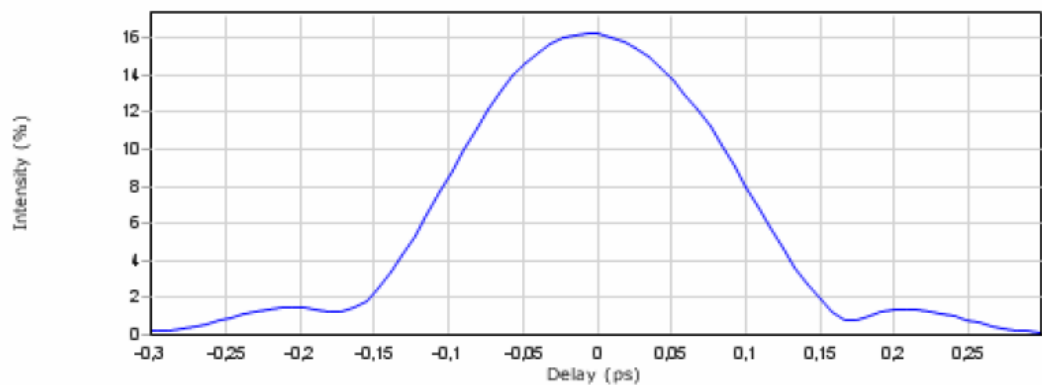
Obr. 7.7: Průběh CD v závislosti na vlnové délce o pro vlákno č.031 trasy Komenského – Kovoterm



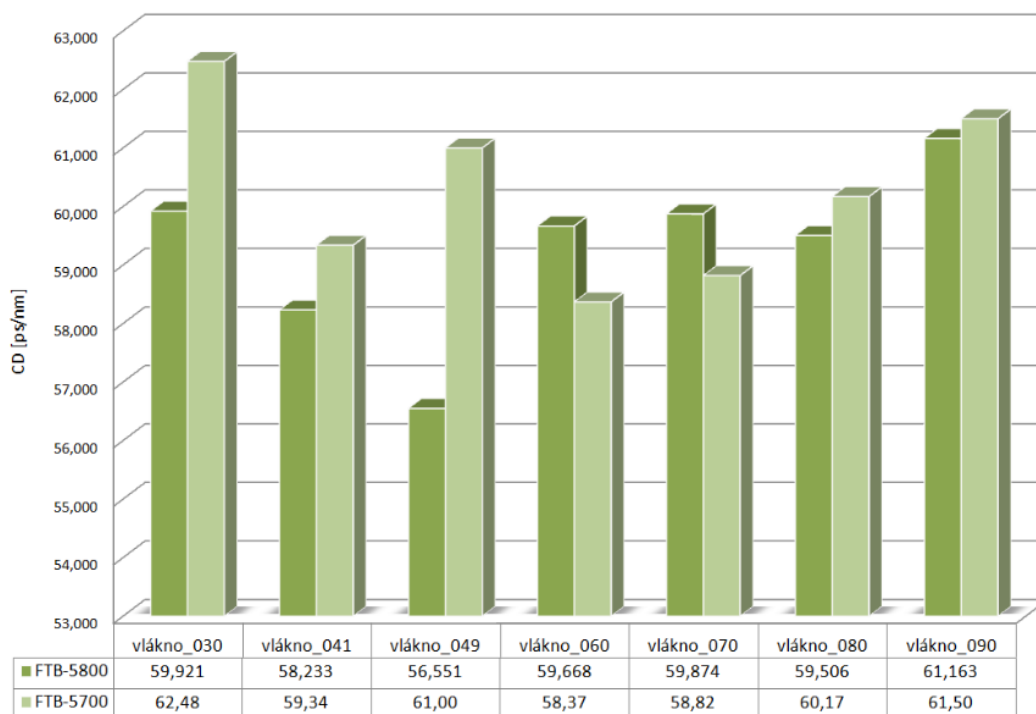
Obr. 7.8: Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Komenského – Kovoterm



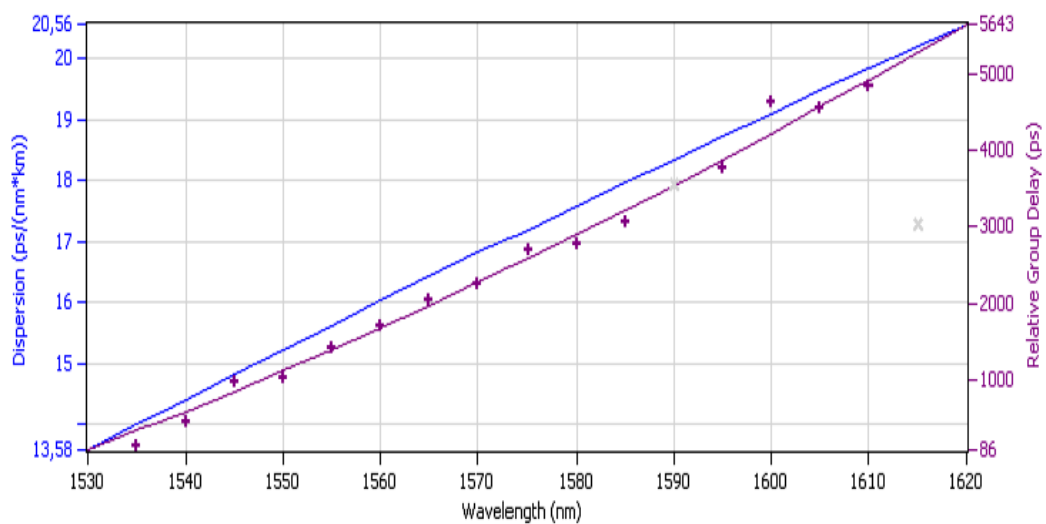
Obr. 7.9: Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Komenského – Kovoterm



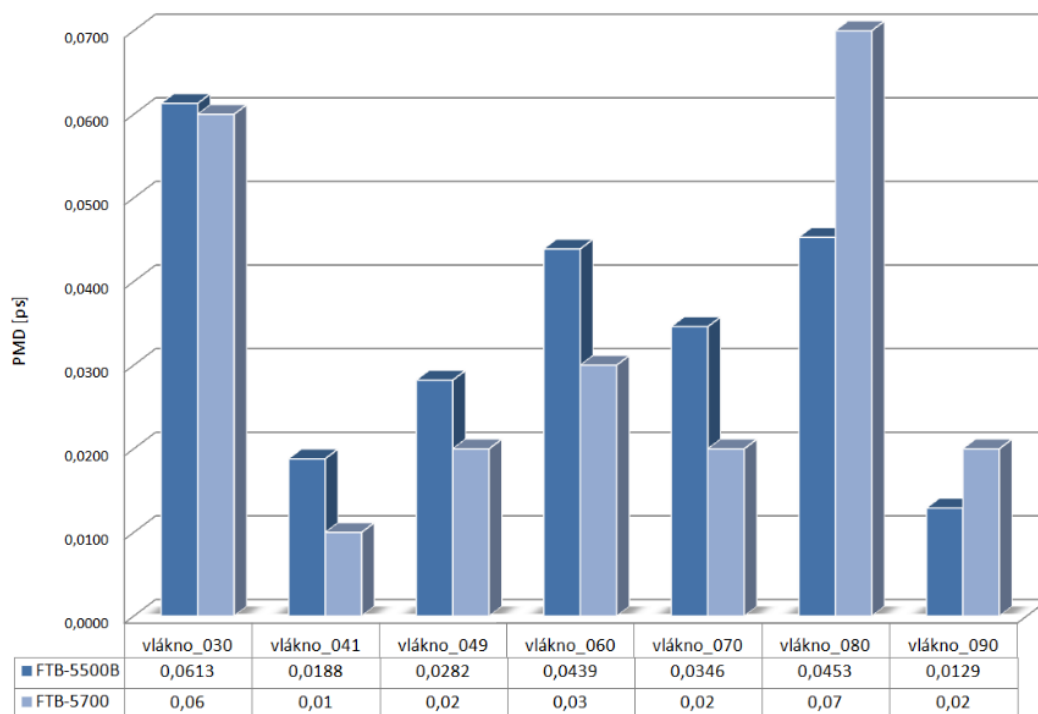
Obr. 7.10: Výsledný interferogram pro vlákno č.031 trasy Komenského – Kovoterm



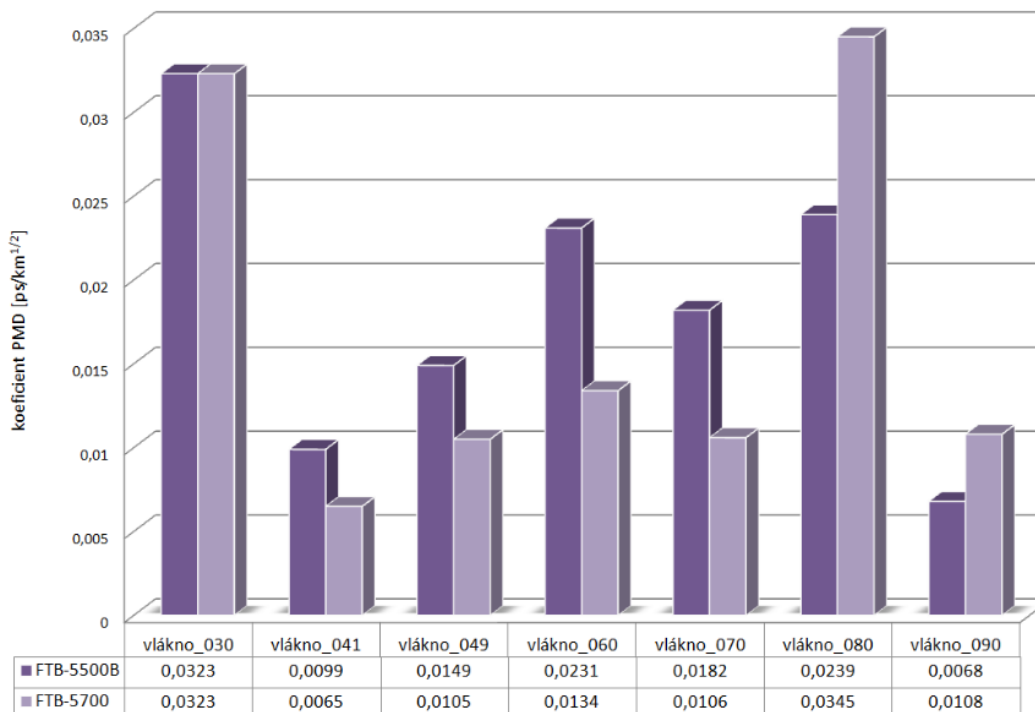
Obr. 7.11: Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Botanická – Komenského



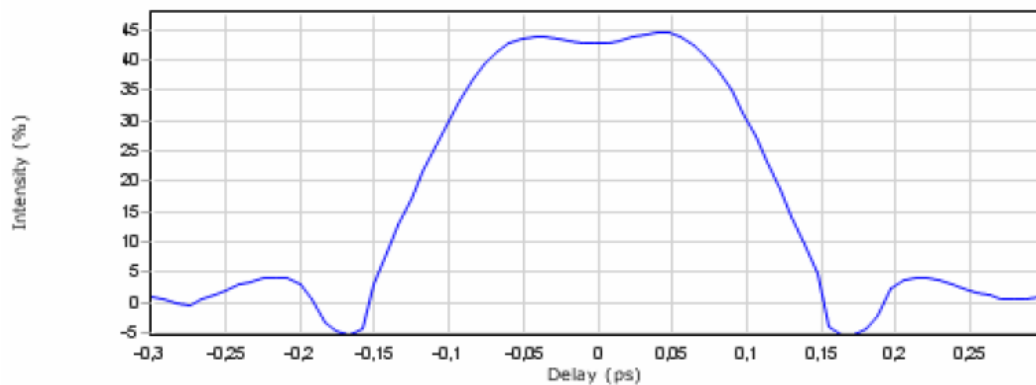
Obr. 7.12: Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.030 trasy Botanická – Komenského



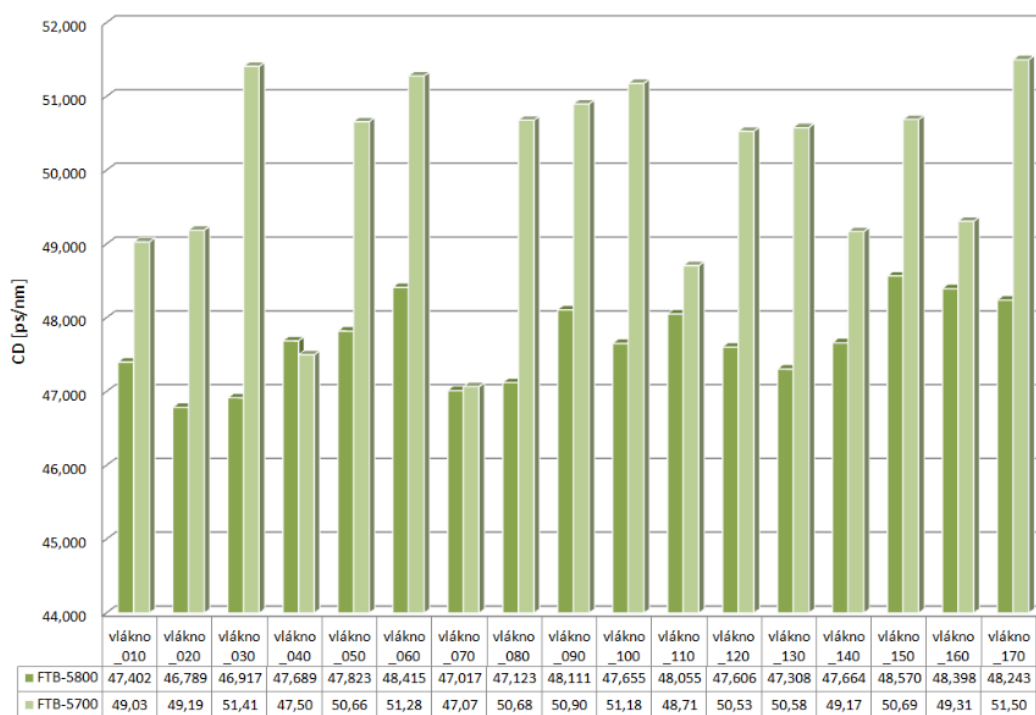
Obr. 7.13: Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Botanická – Komenského



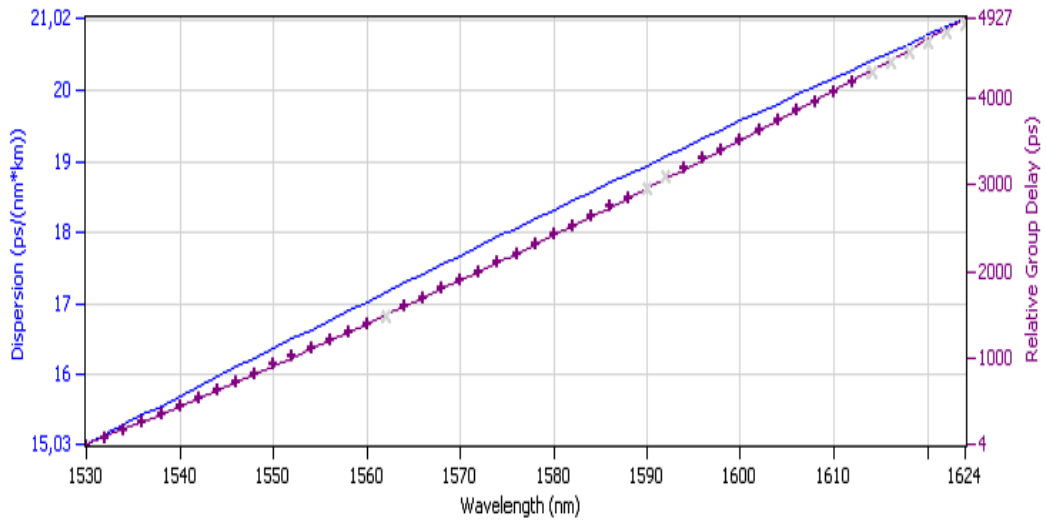
Obr. 7.14: Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Botanická – Komenského



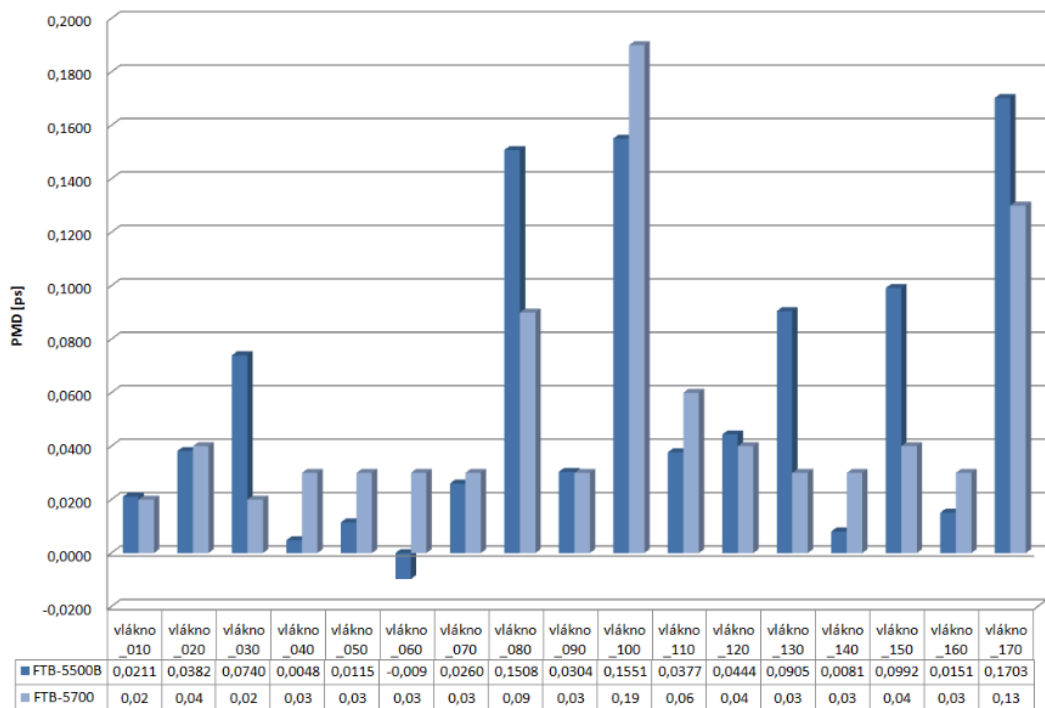
Obr. 7.15: Výsledný interferogram pro vlákno č.030 trasy Botanická – Komenského



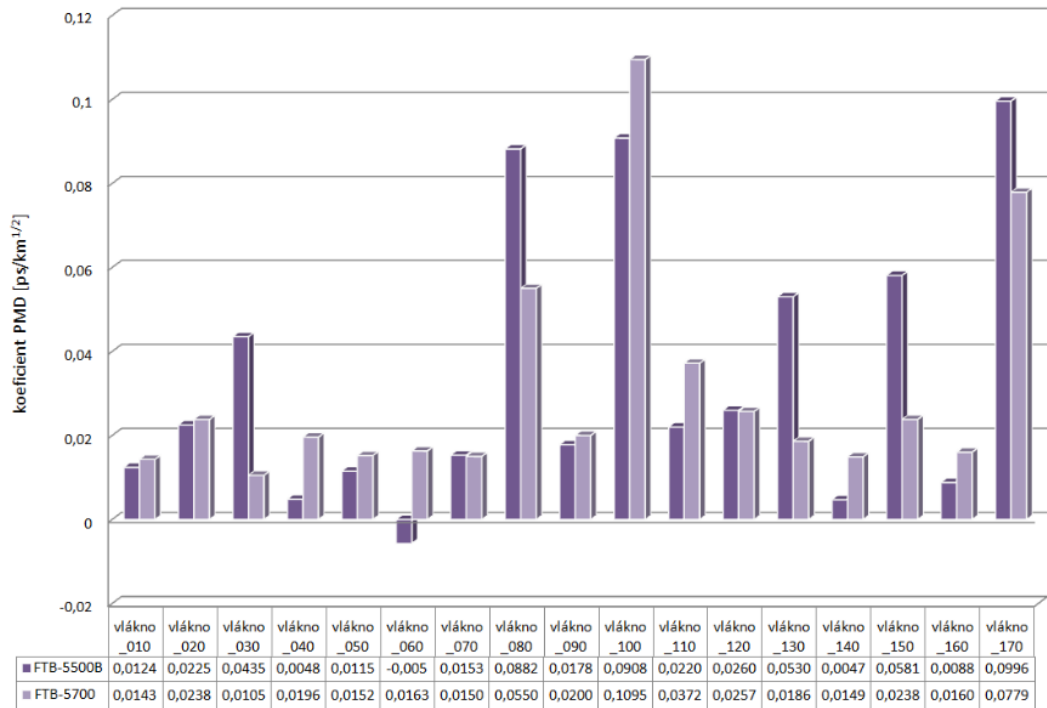
Obr. 7.16: Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Komenského – Poříčí



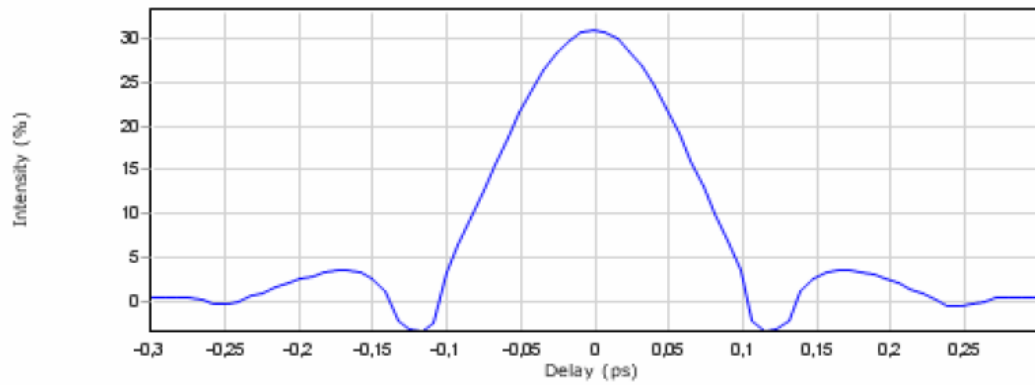
Obr. 7.17: Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.010 trasy Komenského – Poříčí



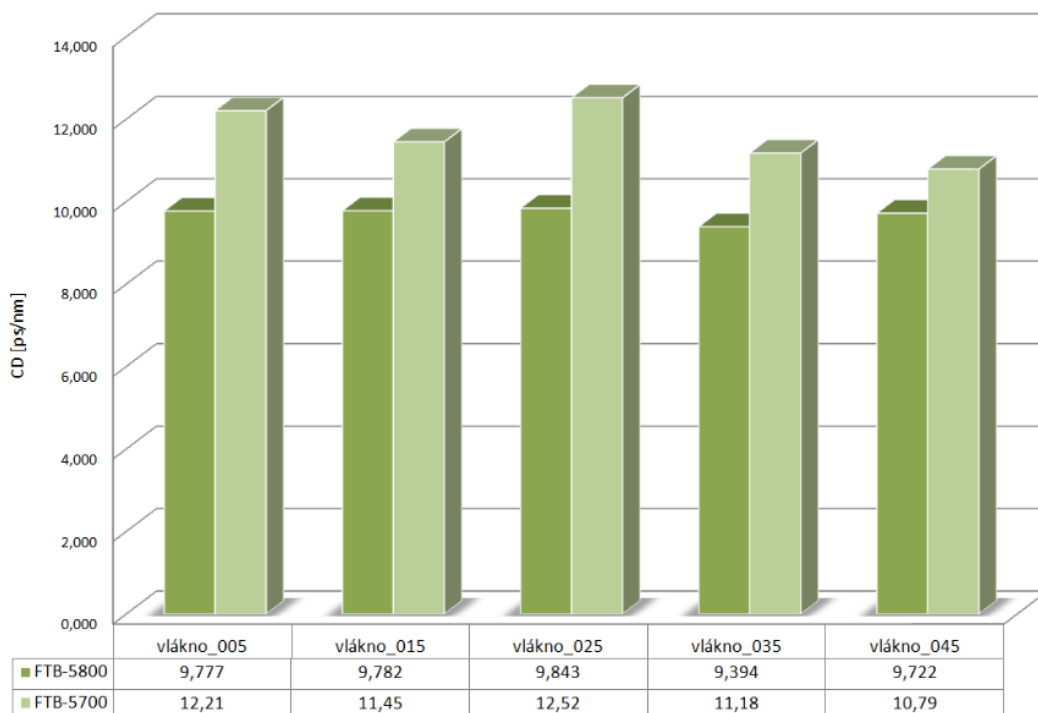
Obr. 7.18: Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Komenského – Poříčí



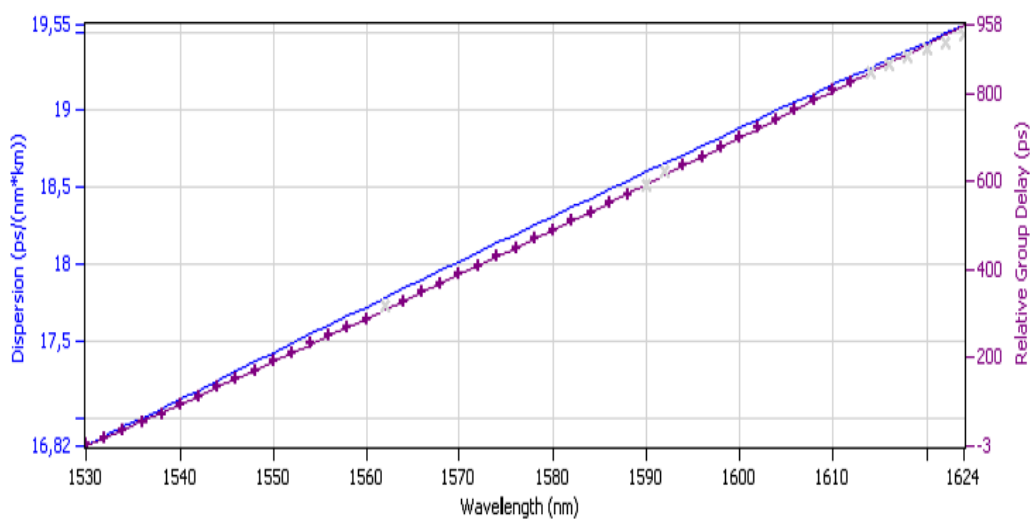
Obr. 7.19: Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Komenského – Poříčí



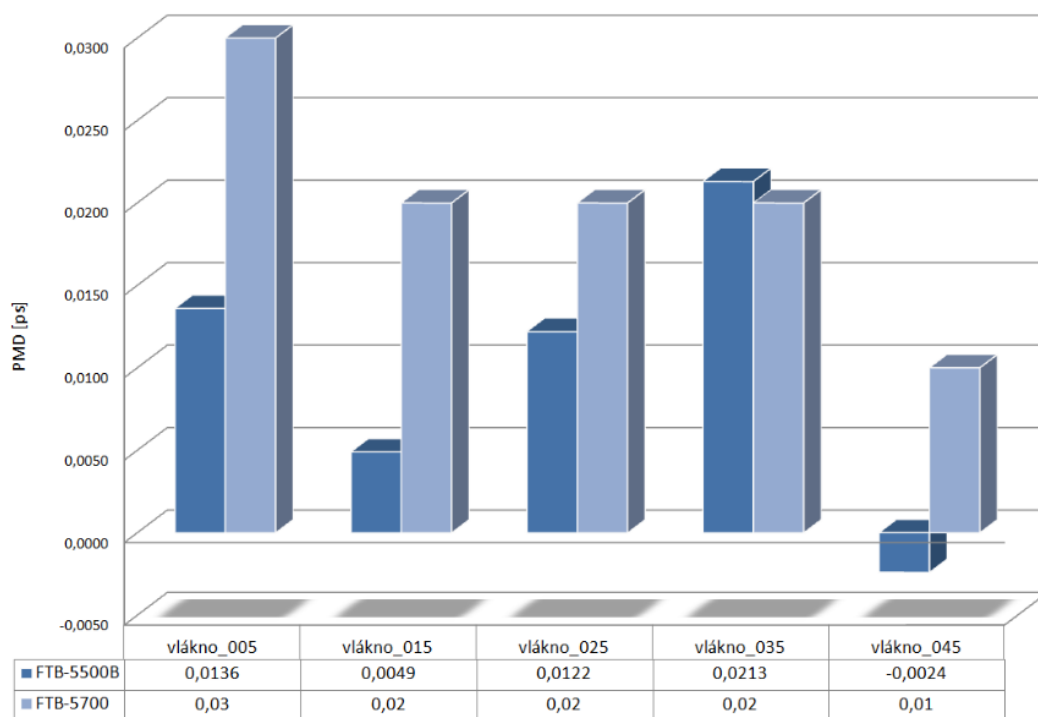
Obr. 7.20: Výsledný interferogram pro vlákno č.010 trasy Komenského – Poříčí



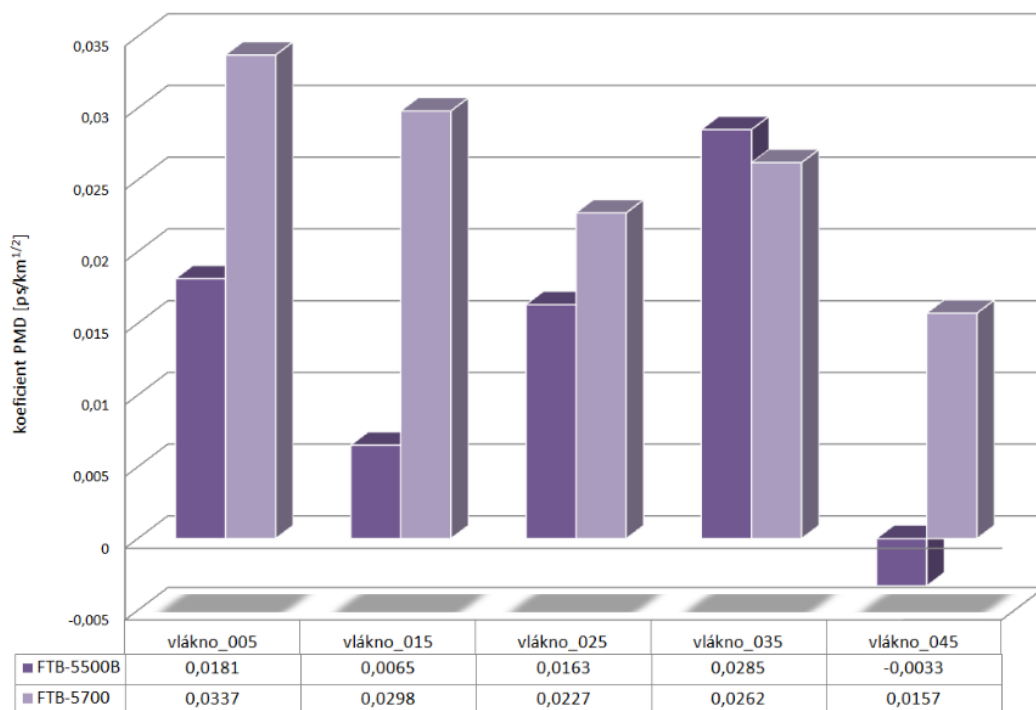
Obr. 7.21: Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Kounicova Družba – VUT Kounicova



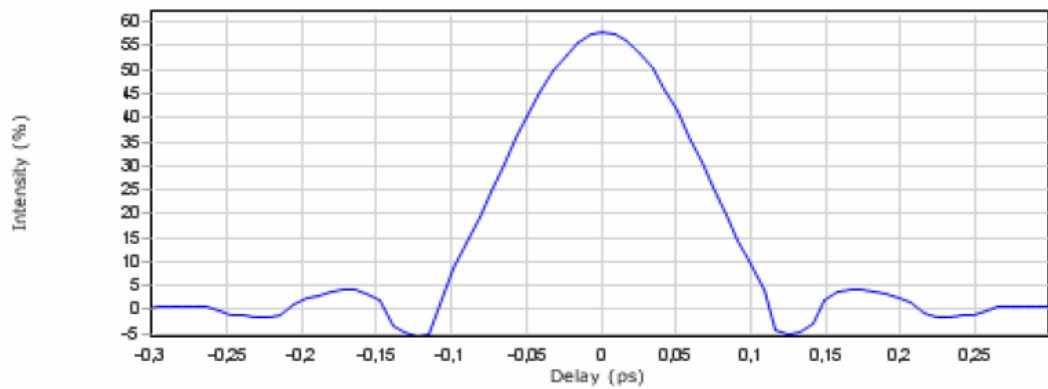
Obr. 7.22: Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.005 trasy Kounicova Družba – VUT Kounicova



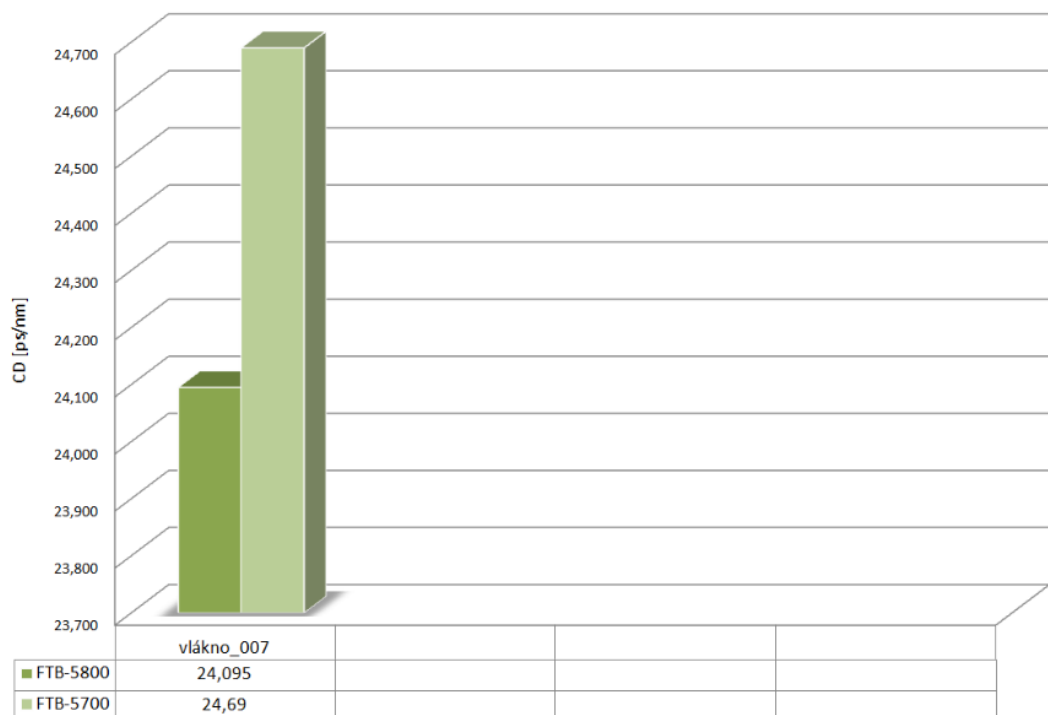
Obr. 7.23: Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Kounicova Družba – VUT Kounicova



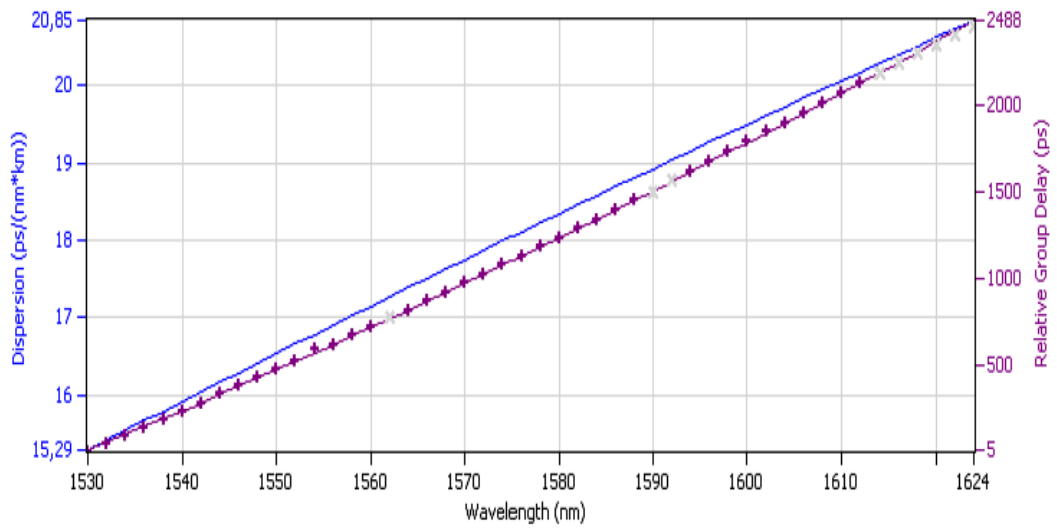
Obr. 7.24: Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Kounicova Družba – VUT Kounicova



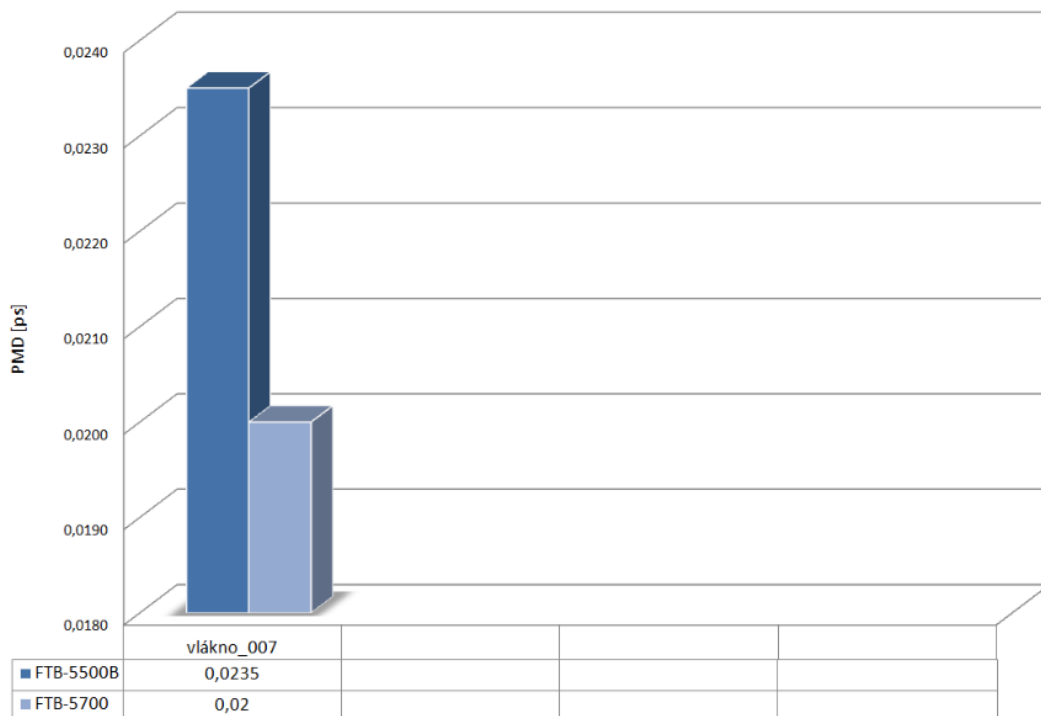
Obr. 7.25: Výsledný interferogram pro vlákno č.005 trasy Kounicova Družba – VUT Kounicova



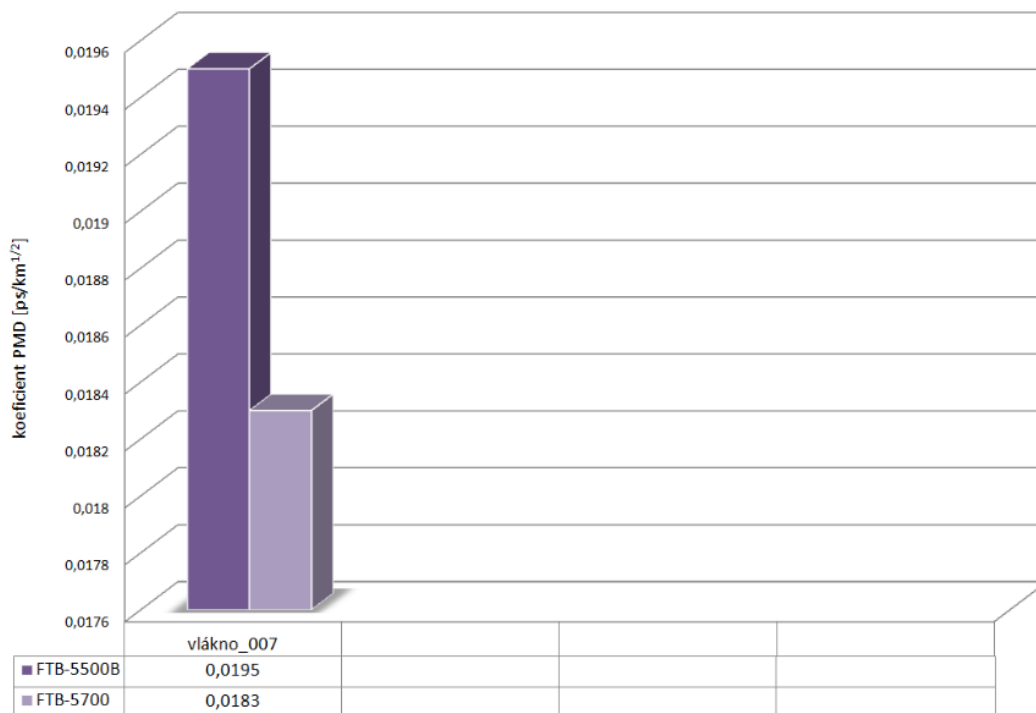
Obr. 7.26: Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu VUT Kounicova – Kotlářská



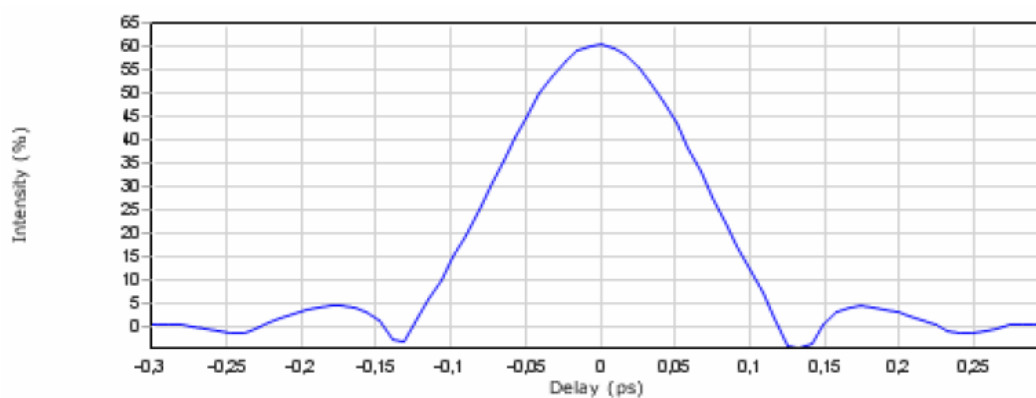
Obr. 7.27: Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.007 trasy VUT Kounicova – Kotlářská



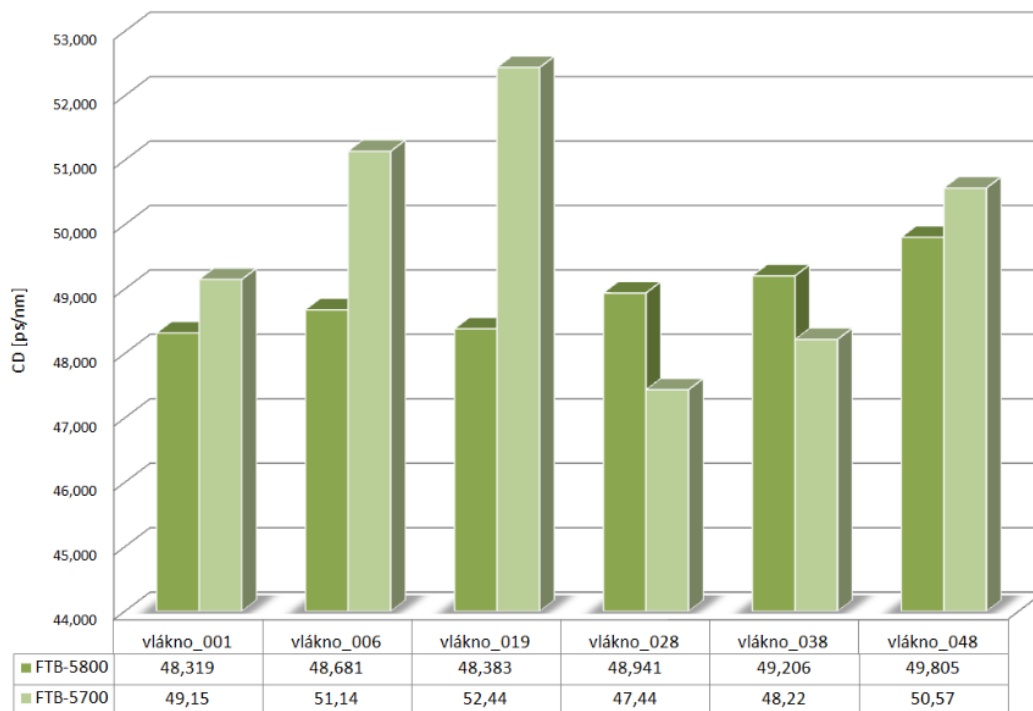
Obr. 7.28: Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu VUT Kounicova – Kotlářská



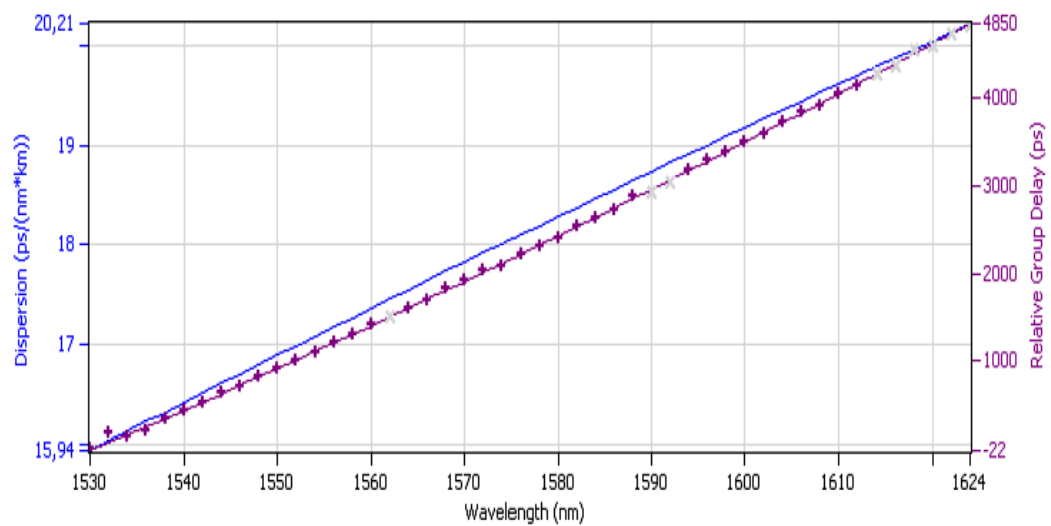
Obr. 7.29: Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu VUT Kounicova – Kotlářská



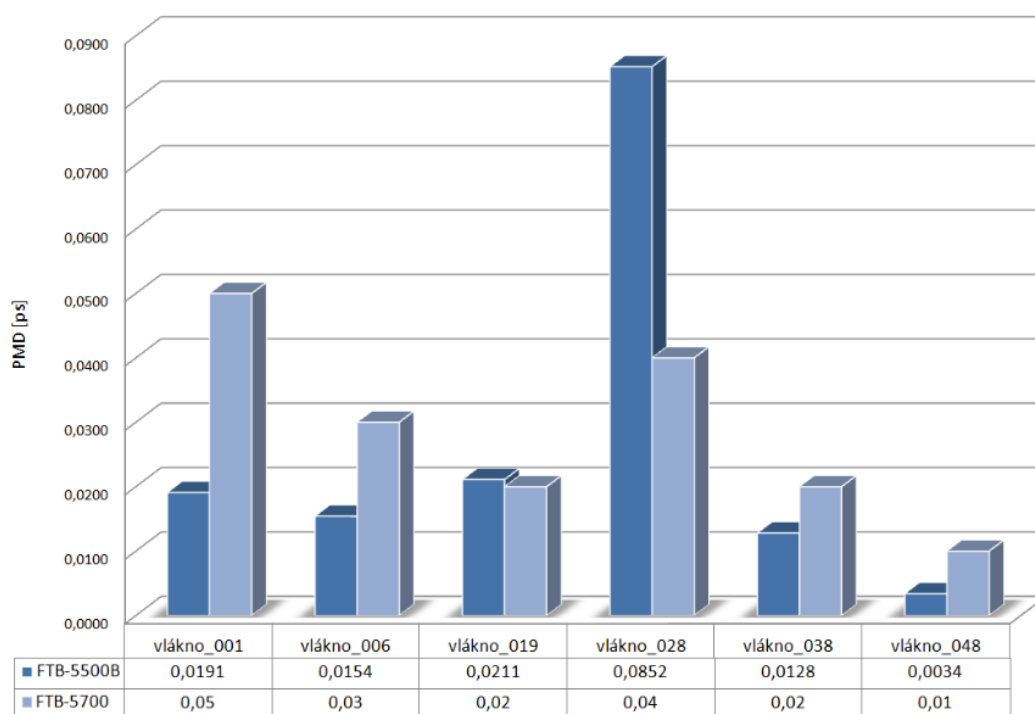
Obr. 7.30: Výsledný interferogram pro vlákno č.007 trasy VUT Kounicova – Kotlářská



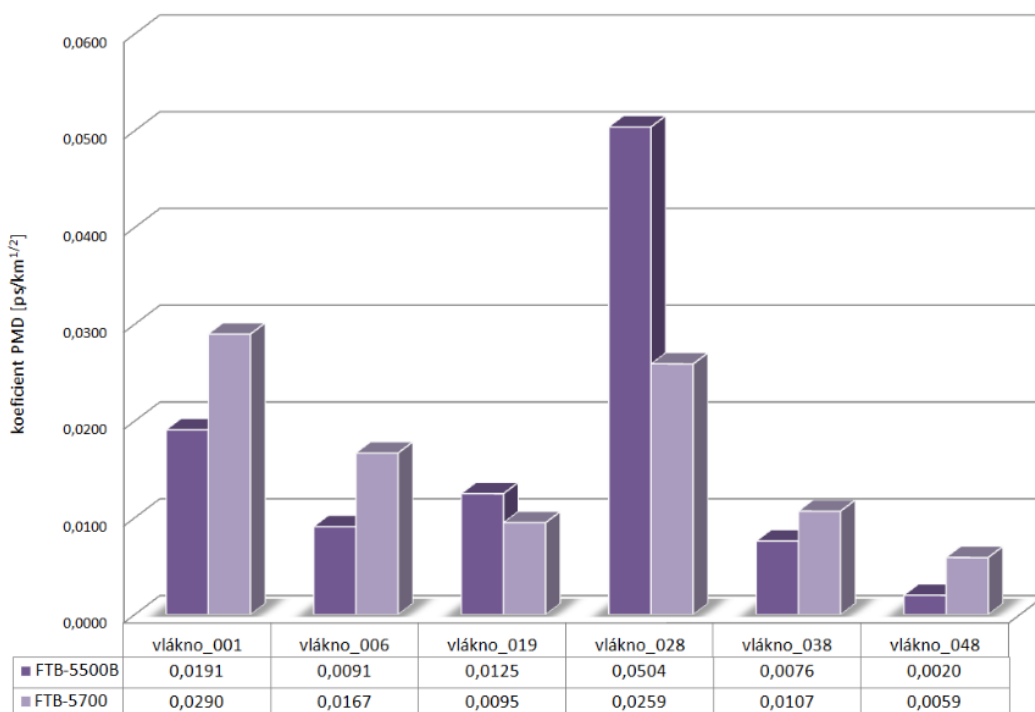
Obr. 7.31: Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu nám. Míru B – Žlutý kopec



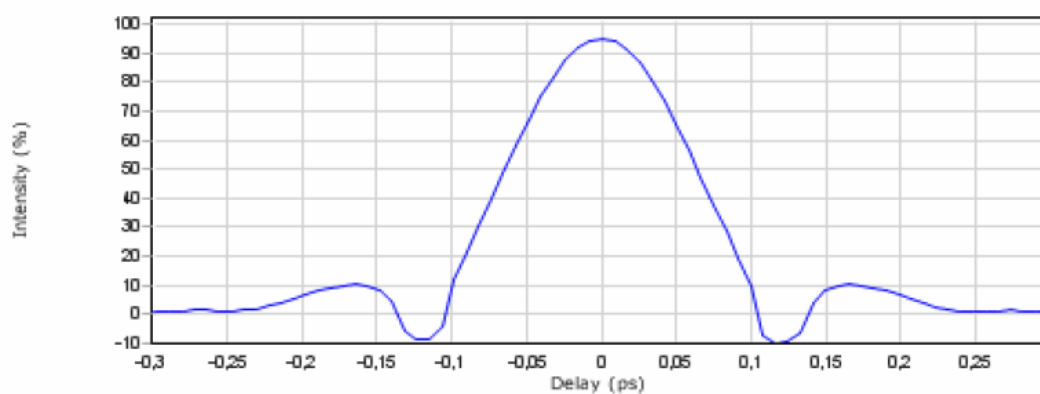
Obr. 7.32: Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.001 trasy nám. Míru B – Žlutý kopec



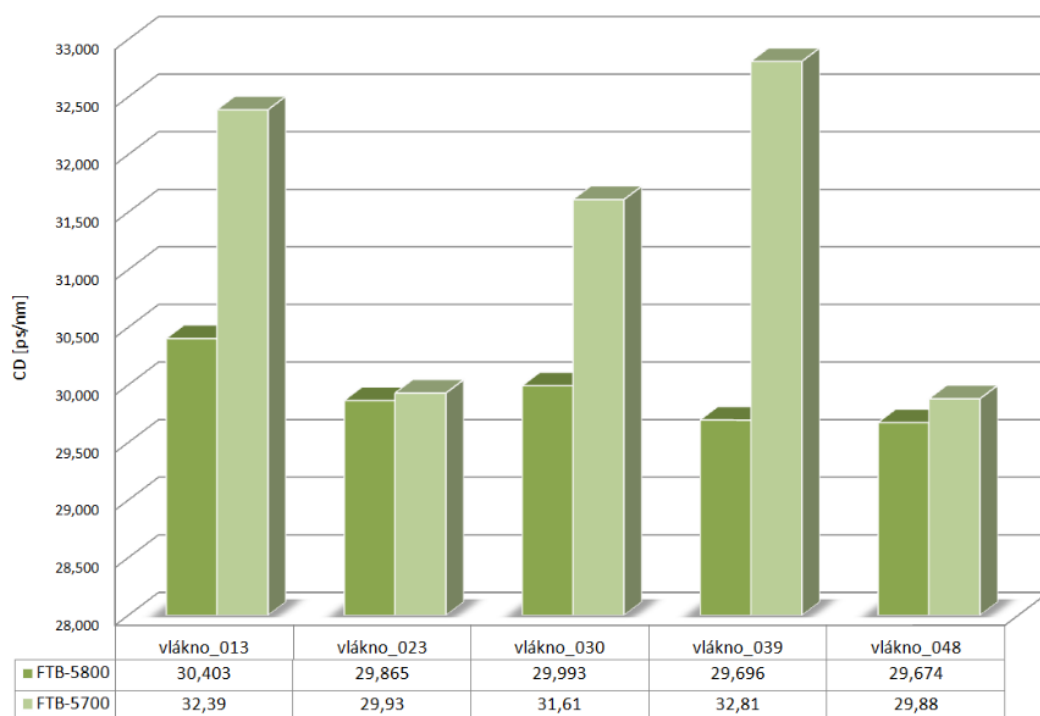
Obr. 7.33: Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu nám. Míru B – Žlutý kopec



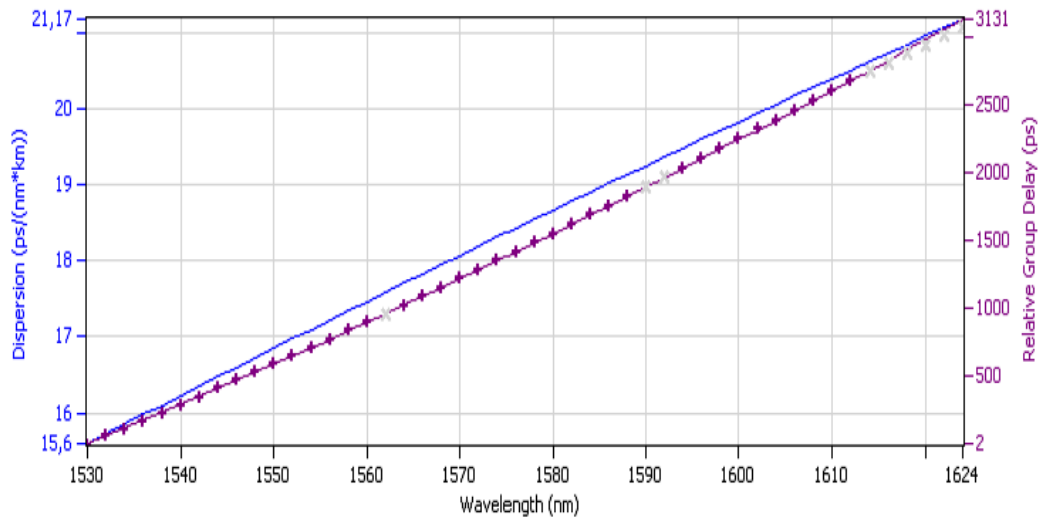
Obr. 7.34: Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu nám. Míru B – Žlutý kopec



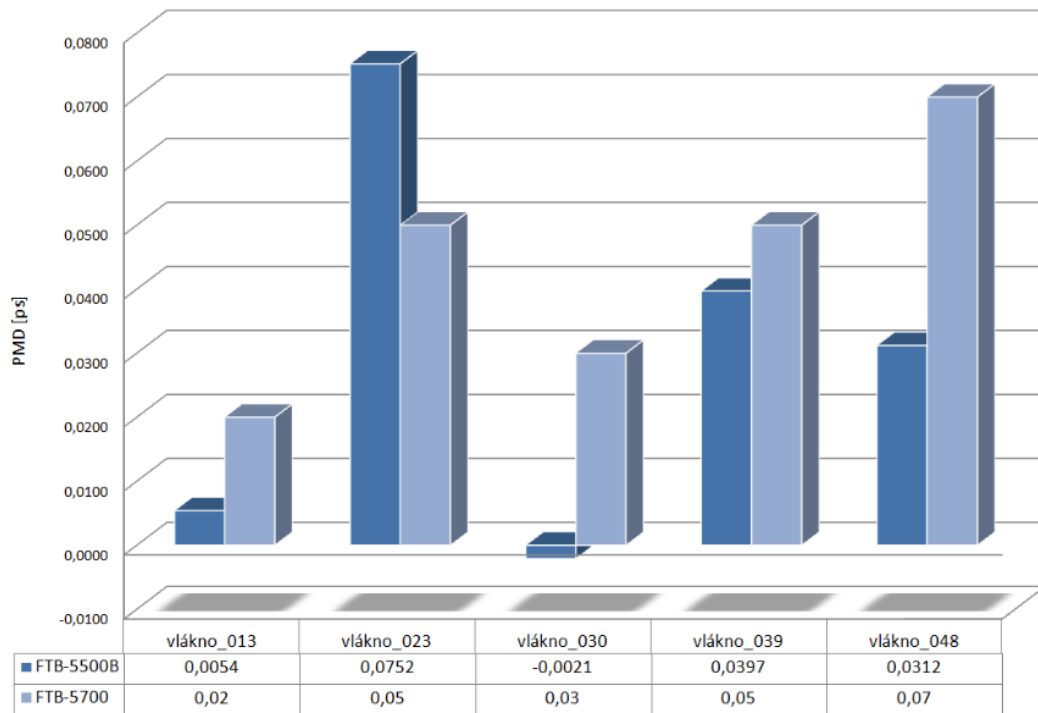
Obr. 7.35: Výsledný interferogram pro vlákno č.001 trasy nám. Míru B – Žlutý kopec



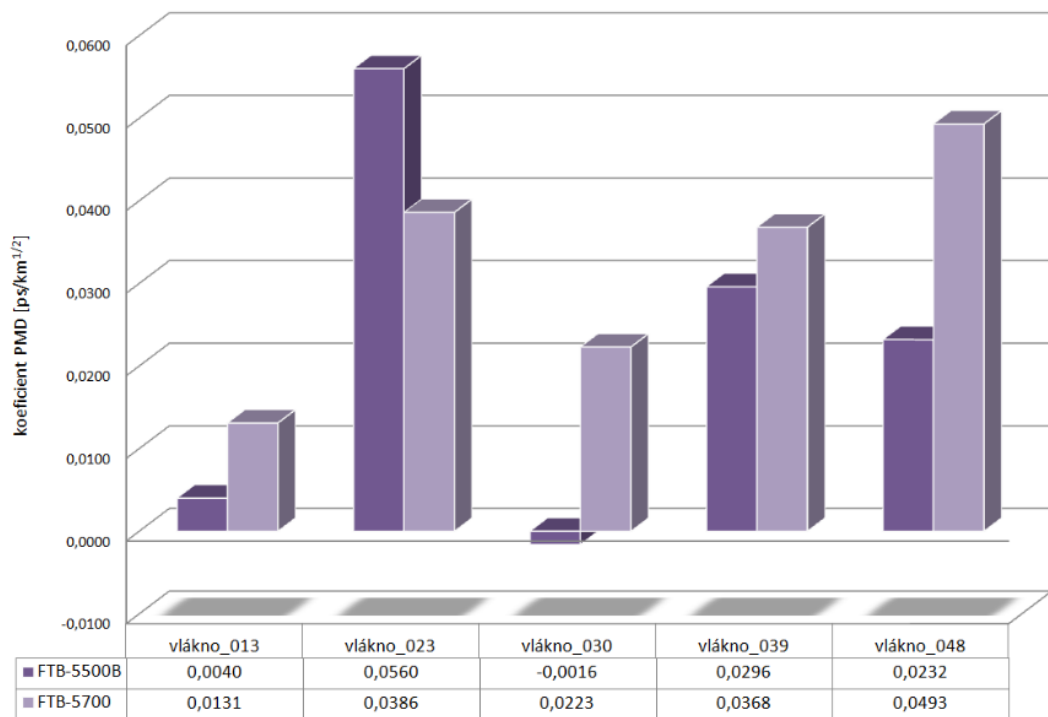
Obr. 7.36: Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Žlutý kopec – Lipová



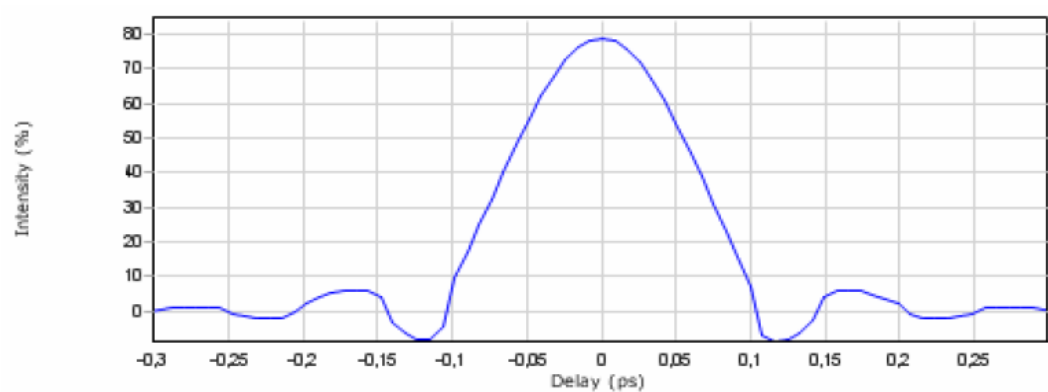
Obr. 7.37: Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.013 trasy Žlutý kopec – Lipová



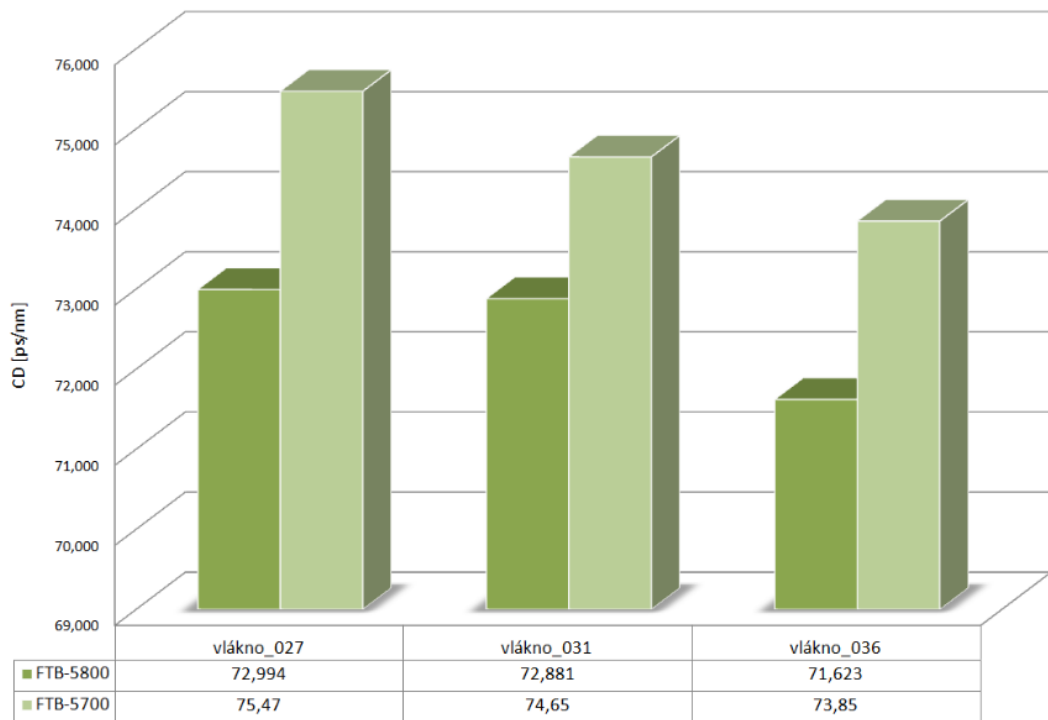
Obr. 7.38: Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Žlutý kopec – Lipová



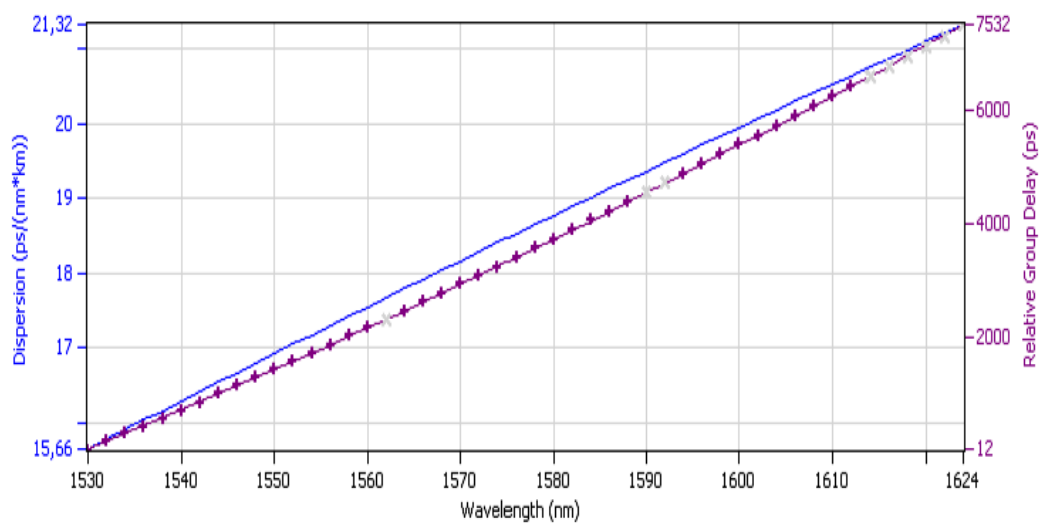
Obr. 7.39: Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Žlutý kopec – Lipová



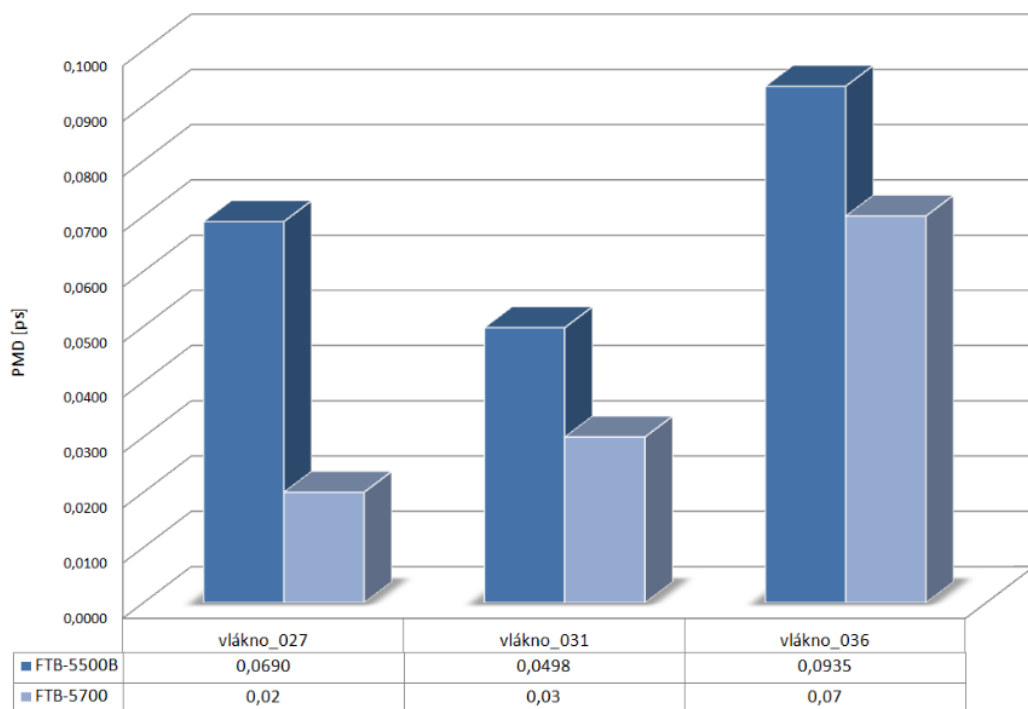
Obr. 7.40: Výsledný interferogram pro vlákno č.013 trasy Žlutý kopec – Lipová



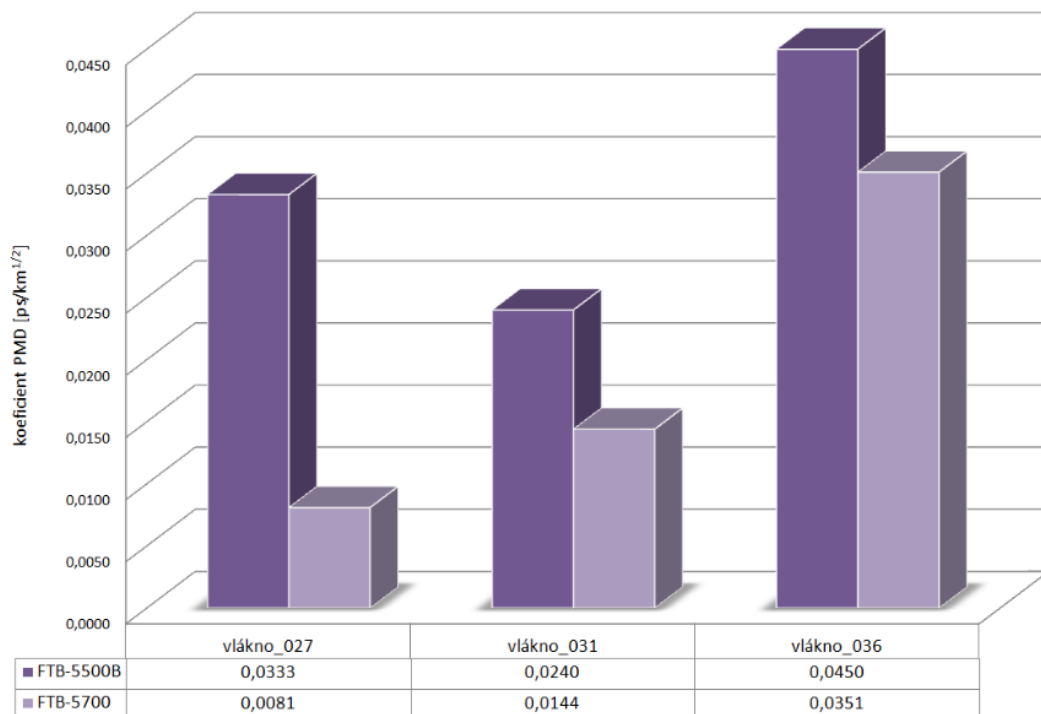
Obr. 7.41: Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Lipová – Kampus 48



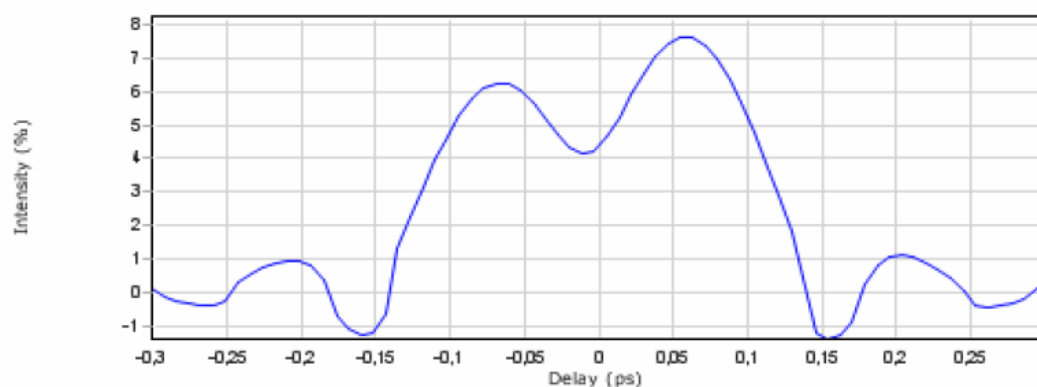
Obr. 7.42: Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.027 trasy Lipová – Kampus 48



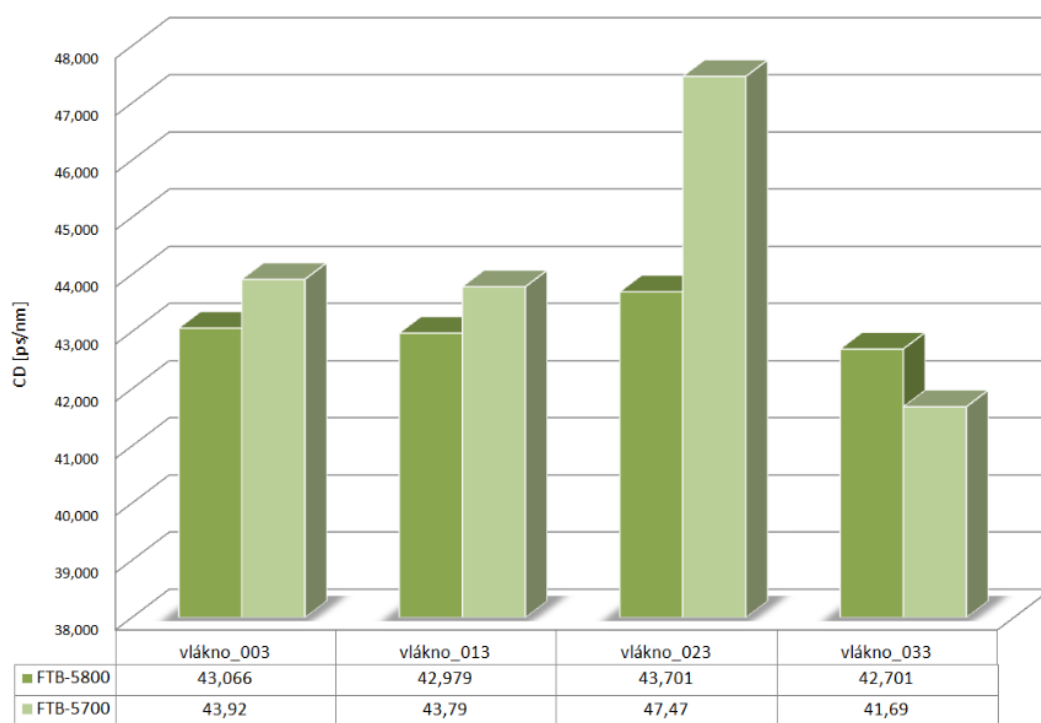
Obr. 7.43: Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Lipová – Kampus 48



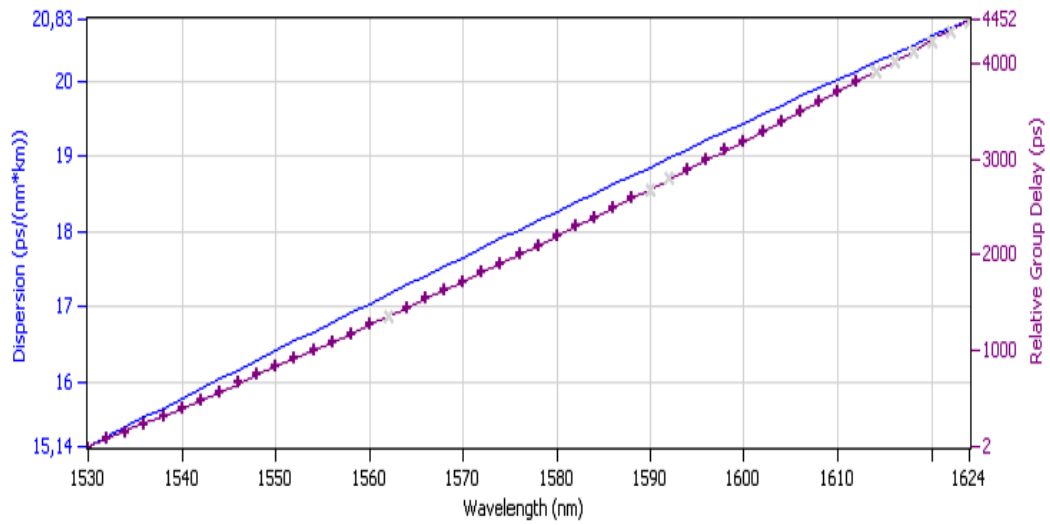
Obr. 7.44: Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Lipová – Kampus 48



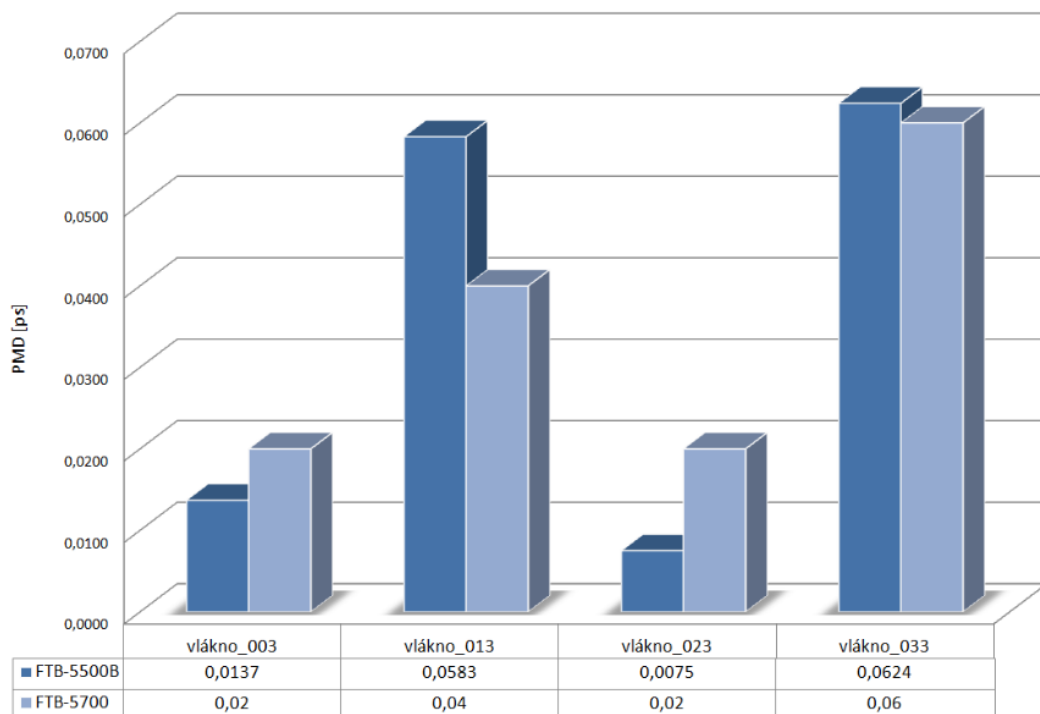
Obr. 7.45: Výsledný interferogram pro vlákno č.027 trasy Lipová – Kampus 48



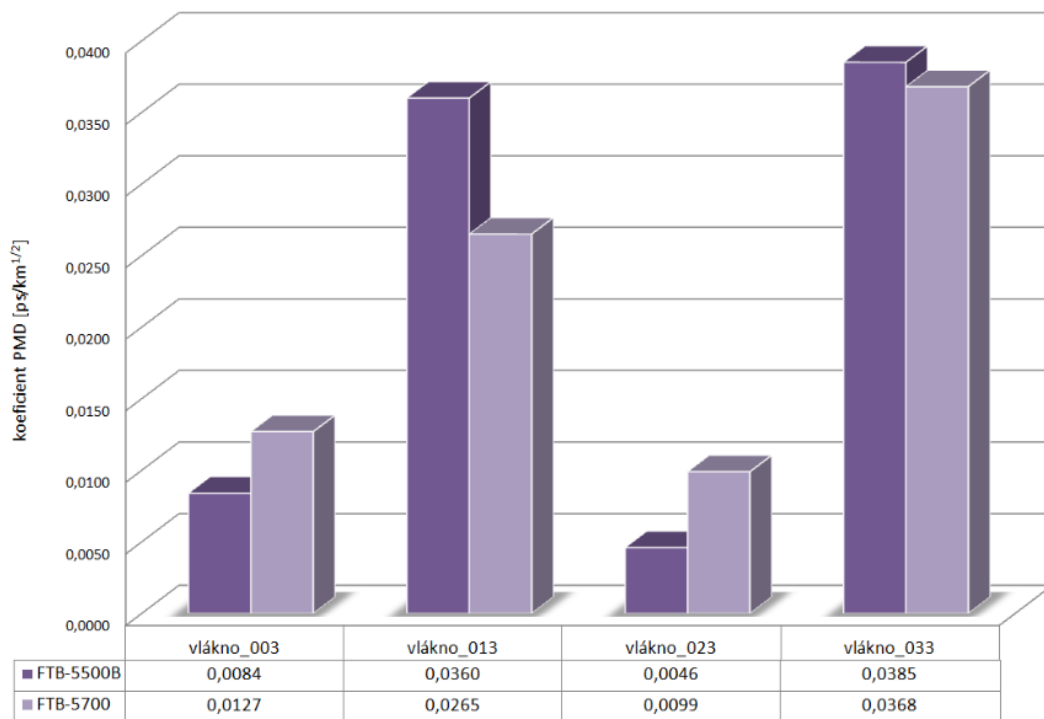
Obr. 7.46: Srovnání naměřených hodnot CD pro trasu Lipová – Poříčí



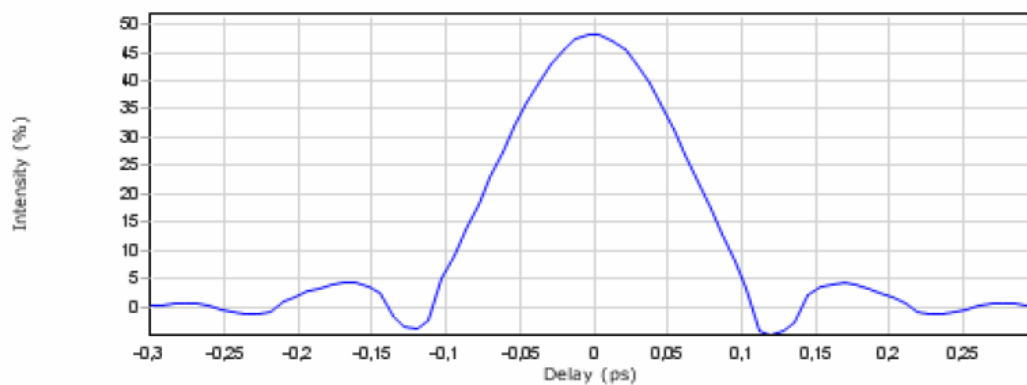
Obr. 7.47: Průběh CD v závislosti na vlnové délce pro vlákno č.003 trasy Lipová – Poříčí



Obr. 7.48: Srovnání naměřených hodnot PMD pro trasu Lipová – Poříčí



Obr. 7.49: Srovnání naměřených hodnot koeficientu PMD pro trasu Lipová – Poříčí



Obr. 7.50: Výsledný interferogram pro vlákno č.003 trasy Lipová – Poříčí

8 ZÁVĚR

Diplomová práce je koncipována jako obecné seznámení s problematikou jevu zvaného polarizační vidová disperze – PMD. Detailně je vysvětlena podstata vzniku PMD, matematický popis, dopad na celý optický systém a faktory či vlivy ovlivňující její velikost. Krátce jsou uvedeny možnosti eliminace jevu a kompenzační techniky používané v praxi.

V této práci je uveden popis základních měřících metod pro zjištění parametru PMD na optických vláknech a trasách. Pro jednotlivé metody je zobrazeno blokové schéma zapojení měřících přístrojů, soupis výhod/nevýhod a možnosti použití v závislosti na typu měření (laboratorní nebo praktické měření), lokalitě či velikosti měřené veličiny.

Praktické měření optických vláken jsem zaměřil na posouzení a srovnání dvou základních parametrů optických přenosů¹ a různých měřících technik.

Z výše uvedeného měření, zpracovaných výsledků a jejich analýzy vyplývá, že vlákna na měřených trasách jsou spolehlivá pro přenosové rychlosti do $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ a lze je do budoucna za jistých podmínek využít i pro $100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ v jednom kanálu. Stejně tak jsou vlákna, která prošla expertním měřením a auditem vhodná pro nasazení vícekanálových systémů CWDM/DWDM. Tento poznatek lze s vysokou pravděpodobností extrapolovat i na ostatní vlákna v profilu tras:

- Botanická – Rektorát – Komenského (studovna)
- Botanická – Žlutý kopec – Lipová
- Campus – Komárov
- Lipová – Campus (kabel A)
- Lipová – Campus (kabel B)
- Rektorát – FF Arna Novaka
- Rektorát – knihovna nám. Svobody (kabel B)

Byla zmapována chromatická disperze CD jednotlivých vláken na trasách, což umožní snadnou kompenzaci chromatické disperze v budoucnu a jasné podmínky při poskytování vláken dalším subjektům provozovatelům.

Byla zmapována polarizační disperze PMD jednotlivých vláken na trasách. Byly zjištěny jen mírně nevyhovující hodnoty koeficientu PMD jen u několika málo vláken. Výsledek mapování a znalost PMD vláken umožní výběr „lepší“ vláken při poskytování vláken nebo při nasazení nových systémů.

Mapování sítě potvrdilo dobrou shodu výsledků různých měřících metod. Jedná se zejména o následující srovnání parametrů získaných různými metodami:

- Disperze CD – analyzátor EXFO FTB-5800 a analyzátor EXFO FTB-5700

¹CD – chromatická disperze; PMD – polarizační vidová disperze

- Disperze PMD – analyzátor EXFO FTB-5500B a analyzátor EXFO FTB-5700

Zejména u kompaktního analyzátoru CD/PMD EXFO FTB-5700 existovala obava, že vzhledem k charakteru starší metropolitní sítě ² nemusí tato metoda poskytovat reprodukovatelné výsledky s požadovanou přesností. Testy a srovnání s referenční metodou CD FTB-5800 a referenční metodou PMD FTB-5500B však tyto obavy vyvrátily. Ověřilo se, že i v podmínkách metropolitní sítě poskytuje tester FTB-5700 přesné a stabilní výsledky. Lze jej proto bez obav používat kdykoliv pro provozní měření a audit tras z pohledu CD a PMD před nasazením do provozu.

²krátké vzdálenosti, odrazy na konektorech, atd.

LITERATURA

- [1] AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems – second edition*. San Francisco: Morgan, 2002. 573 s. ISBN 0–471–21571–b.
- [2] Dorociak, P.; Kyselák, M. *Vliv polarizační vidové disperze na odolnost modulačních formátů* [online]. 1.3.2008 [cit. 15.4.2011]. Dostupné na internetu: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008040002> ISSN 1214-9675
- [3] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku* Brno: CENTA, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1
- [4] FILKA, M. *Optické sítě* Brno: FEKT VUT v Brně, 2007. 210 s.
- [5] FILKA, M. *Přenosová média* Brno: FEKT VUT v Brně, 2003. 185 s.
- [6] GALTAROSA, A. *Polarization Mode Dispersion* Springer: JLT, 2005. 534 s. ISBN 0387231935.
- [7] HÁJEK, M. *Zkušenosti s měřením polarizační vidové disperze (PMD) jednovídrových optických kabelových tras* [online]. 5.12.2002 [cit. 20.2.2011]. Dostupné na internetu: www.mikrokom.eu/sk/pdf/zkusenosti-smerenim.pdf
- [8] HÁJEK, M.; HOLOMEČEK P. *POTDR – Lokalizace úseků se zvýšenou hodnotou PMD v optických trasách* [online]. 18.10.2006 [cit. 19.4.2011]. Dostupné na internetu: www.mikrokom.eu/sk/pdf/potdr.pdf
- [9] HÁJEK, M.; HOLOMEČEK P. *Nová metoda měření PMD optických kabelových tras* [online]. 23.9.2007 [cit. 19.4.2011]. Dostupné na internetu: www.mikrokom.eu/cz/pdf/pmd-mereni-tras.pdf
- [10] KONDAMURI, P. K. *Characterization of Polarization–Mode Dispersion on buried standard single–mode fibers* India: Sri Venkateswara University Tirupathi, 2000. 127s. Brno: FEKT VUT v Brně, 2003. 185 s.
- [11] KUCHARSKI, M. *Normalizace optických vláken a kabelů* [online]. 5.9.2006 [cit. 23.5.2011]. Dostupné na internetu: www.mikrokom.eu/pdf/normaelektroinst.pdf
- [12] KUCHARSKI, M.; DUBSKÝ, P. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras* Praha: Mikrokom, 2001. 141 s. ISBN 0-521-77129-3.

- [13] LEBLANC, M.; FOUGERES A. *Polarization-OTDR: identifying high-PMD sections along installed fibers* Africa: Lightware, 2002. 341 s. ISBN 978-0-07-366011-0.
- [14] LIETAERT, G. *Testing Polarization Mode Dispersion (PMD) in the Field* [online]. 3.2.2007 [cit. 23.2.2011]. Dostupné na internetu: <http://www.fiberoptic.com/FiberCharacterization/pdf/fieldtesting.pdf>
- [15] MARŠÁLEK, L. *Optická vlákna* Ostrava: Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2006. 172 s.
- [16] SEWTER, J. *Electronic equalization of Polarization-Mode Dispersion in 40-Gb/s optical systems* Toronto: Electrical and Computer Engineering University of Toronto, 2005. 115 s.
- [17] STODIČKA, L.; JEŽEK M.; MIČUDA M. *Přenos a detekce optického signálu* Olomouc: Přírodovědecká Fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, 2007. 189 s.
- [18] URBAN, F.; MIKEL B. *Optoelektronika a optické komunikace* Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 198 s.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- ASK amplitudová digitální modulace – Amplitude-Shift Keying
- B přenosová rychlost
- BER bitová chybovost – Bit Error Rate
- c rychlost světla
- CD chromatická disperze – Chromatic Dispersion
- CWDM hrubý vlnový multiplex – Coarse Wavelength Division Multiplex
- DGD zpoždění impulzu vzniklé vlivem polarizace – Differential Group Delay
- DBPSK dvoustavová fázová digitální modulace – Differential Binary Phase Shift Keying
- DOF stupeň volnosti – Degree of Freedom
- DOP stupeň polarizace – Degree of Polarization
- DQPSK kvadrurní diferenční fázová digitální modulace – Differential Quadrature Phase Shift Keying
- DSF disperzně posunuté vlákno – Dispersion Shifted Fiber
- DWDM hustý vlnový multiplex – Dense Wavelength Division Multiplex
- E intenzita elektrického pole
- EDFA optický předzesilovač – Erbium-Doped Fiber Amplifier
- ER extinční poměr
- FEC metoda zjišťování a opravy chyb vzniklých při přenosu – Forward Error Correction
- FWM čtyřvlnné směšování – Four Wave Mixing
- FFT rychlá Fourierova transformace – Fast Fourier Transformation
- GINTY obecná interferometrická metoda měření PMD
- h vazební délka
- I optická intenzita

IEC mezinárodní elektrotechnická komise – International Electrotechnical Commission

ITU-T mezinárodní telekomunikační unie – International Telecommunication Union

INTY interferometrická metoda měření PMD

L délka optického vlákna

L_C korelační délka optického vlákna

LED světlo emitující diody – Light Emitting Diode

LMS typ adaptibilního algoritmu – Least Mean Square

LWP vlákno s nízkým obsahem hydroxidových iontů – Low Water Peak

NRZ modulace bez návratu k nule – Non Return to Zero

NZDF vlákno s nenulovou chromatickou disperzí – Non Zero Dispersion Fiber

OLTS souprava pro měření útlumu – Optical Loss Test Set

OOK amplitudová digitální modulace – On Off Keying

OTDR optický reflektometr v časové oblasti – Optical Time Domain Reflectometer

P stupeň polarizace

PC polarizační kontroler – Polarization Controller

PMD polarizační vidová disperze – Polarization Mode Dispersion

PMF vlákno s identickou polarizací – Polarization-maintaining fiber

PSP model polarizačních os – Principal States of Polarization

P-OTDR polarizační a optický reflektometr v časové oblasti – Polarization Optical Time Domain Reflectometer

QPSK kvadrurní fázová digitální modulace – Quadrature Phase Shift Keying

RZ modulace s návratem k nule – Return to Zero

SDH synchronní digitální síť – Synchronous Digital Hierarchy

SNR odstup signálu od šumu – Signal to Noise Ratio

SOP změna stavu polarizace – State of Polarization

STM synchronní transportní jednotka – Synchronous Transport Module

T_B bitová délka

TINTY tradiční interferometrická metoda měření PMD

WDM vlnový multiplex – Wavelength Division Multiplex

XPM křížová modulace – Cross Phase Modulation

ZWP vlákno s nulovým obsahem hydroxidových iontů – Zero Water Peak

λ vlnová délka

ω úhlový optický kmitočet

$\Delta\tau$ maximální PMD zpoždění

Δn efektivní rozdíl indexu odrazu mezi pomalou a rychlou osou

$\Delta\beta$ činitel šíření

SEZNAM PŘÍLOH

A	CD1 se zdrojovými daty z měřících přístrojů	109
B	CD2 s PDF listy z měření + topologie měřených tras	110
C	Technická specifikace měřících přístrojů	111
C.1	DataSheet CD/PMD FTB-5700	111
C.2	DataSheet CD EXFO FTB-5800	111
C.3	DataSheet PMD EXFO FTB-5500B	111

A CD1 SE ZDROJOVÝMI DATY Z MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ

**B CD2 S PDF LISTY Z MĚŘENÍ + TOPOLO-
GIE MĚŘENÝCH TRAS**

C TECHNICKÁ SPECIFIKACE MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ

C.1 DataSheet CD/PMD FTB-5700

C.2 DataSheet CD EXFO FTB-5800

C.3 DataSheet PMD EXFO FTB-5500B