

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

ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY CD A PMD V OPTICKÝCH SÍTÍCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RASTISLAV MOTÚZ

BRNO 2013



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

ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY CD A PMD V OPTICKÝCH SÍTÍCH

SOLVING PROBLEMS OF CD AND PMD IN OPTICAL NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RASTISLAV MOTÚZ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Rastislav Motúz

ID: 136563

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Řešení problematiky CD a PMD v optických sítích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem práce je seznámení se s novými parametry disperzí při přenosu vysokými rychlostmi, přinasazování DWDM systémů na optická vlákna s disperzemi CD a PMD. Seznamte se s metodikou měření těchto parametrů, prostudujte doporučení ITU a jejich limitní hodnoty, ovlivňující přenos. Seznamte se s přístrojem na měření těchto disperzí EXFO FTB 200 v laboratoři Přenosových médií a optický sítí. Na experimentální síti proveďte vlastní měření a v případě nesplnění limitních hodnot, navrhnete metody potlačení disperzí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. CENTA, Brno 2009.
- [2] KUCHARSKI, M., DUBSKÝ, P. Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras. Mikrom, Praha 2001.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 5.6.2013

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

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Obsahem této práce je teoretický rozbor disperzí, které ovlivňují vysokorychlostní přenos v optických systémech. Zaměřuje se na chromatickou – CD a polarizační vidovou – PMD disperzi. Věnuje se definicím, limitním hodnotám, metodám měření a metodám kompenzace nežádoucích vlivů na výslednou kvalitu přenosu. Práce je pomyslně členěna na teoretickou část (kapitoly 1, 2 a 3) a část praktickou (kapitoly 4 a 5). Výsledky experimentálních měření jsou uvedeny v praktické části, částečně však v příloze z důvodu rozsahu naměřených hodnot. Výstupem práce je ověření teoretických předpokladů testerem CD/PMD, modulární platformou EXFO FTB-200.

KLÍČOVÉ SLOVÁ

Disperze, polarizace, vlákno, časové zpoždění, CD, DGD, PMD, DOP, impuls.

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is to analyse dispersions which are affecting a high-speed transfer in optical systems. It is focused on chromatic – CD and polarisation mode – PMD dispersion. It is devoted to definitions, limit values, methods of measurements and compensation methods against disturbance to the final quality of transmission. The thesis is divided into the three-chapter long theoretical part and the practical part which contains two chapters. The results of the extensive experimental measurements done by CD/PMD tester – modular platform EXFO FTB-200 are stated in the practical part and partly in the Appendix too. The output of the measurement confirms the theoretical assumptions stated in the theoretical part and thus proves the aim of the thesis to be achieved.

KEYWORDS

Dispersion, polarization, fiber, time delay, CD, DGD, PMD, DOP, impulse.

MOTÚZ, Rastislav *Řešení problematiky CD a PMD v optických sítích*: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 95 s. Vedúci práce bol prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Řešení problematiky CD a PMD v optických sítích“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

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

Brno

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu práce, pánovi prof. Ing. Miloslavovi Filkovi, CSc. za odborné vedenie, konzultácie, metodickú pomoc a podnetné návrhy pri spracovaní práce.

Ďalej ďakujem pánovi Ing. Radimovi Šiftovi za odbornú pomoc pri realizácii praktickej časti práce.

V neposlednom rade by som chcel poďakovať pánovi Ing. Josefovi Beranovi za užitočné rady a konzultácie.

Brno

.....

(podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

POĎAKOVANIE

Výzkum popsaný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OP Výzkum a vývoj
pro inovace

OBSAH

Úvod	13
1 Úvodné pojmy, definície	14
1.1 Fyzikálna podstata disperzie – rozklad svetla	14
1.2 Šírenie energie v optických vláknach	15
1.3 Disperzie	16
1.3.1 Prenosová rýchlosť a disperzia	16
1.3.2 Straty v optických vláknach	18
1.3.3 Kompenzácia útlmu	19
1.4 Technológia multiplexu	20
1.5 Módová disperzia	21
2 Chromatická disperzia	22
2.1 Vznik, charakteristika a parametre.	22
2.2 Limitné hodnoty	24
2.3 Pozitívna a negatívna disperzia	26
2.4 Znižovanie vplyvu chromatickej disperzie	27
2.4.1 Vlákná s rôzne zmenenou spektrálnou charakteristikou koefi- cientu CD	27
2.4.2 Kompenzačné vlákna DCF	30
2.4.3 Využitie Braggovskej mriežky	31
2.5 Meranie chromatickej disperzie	34
2.5.1 Metóda fázového posunu	34
2.5.2 Metóda diferenciálneho fázového posunu	35
2.5.3 Metóda oneskorených impulzov v časovej oblasti	35
2.5.4 Využitie metódy OTDR	37
3 Polarizačná vidová disperzia	38
3.1 Fyzikálna podstata vzniku PMD – polarizácia	38
3.2 Popis polarizácie optickej vlny pomocou Jonesovho vektoru.	40
3.3 Charakteristika PMD	43
3.4 DGD, vzťah s PMD	45
3.5 Limitné hodnoty	47
3.6 Pôsobenie vplyvu PMD na rozšírenie impulzu	49
3.6.1 Vplyv PMD na chybovosť optického kanálu	50
3.6.2 Znižovanie vplyvu PMD	53

3.7	Metódy merania PMD	53
3.7.1	Tradičná interferometrická metóda – TINTY	54
3.7.2	Obmedzenia metódy TINTY	55
3.7.3	Všeobecná interferometrická metóda – GINTY	56
3.7.4	Metóda skenovania vlnovej dĺžky	57
3.7.5	Polarimetrická metóda	58
3.7.6	Metóda POTDR	59
3.7.7	Metóda analýzy SOP	60
3.7.8	Metóda analýzy DOP	62
3.8	Vyhodnotenie merania metódou analýzy DOP	63
3.9	Skúsenosti z merania PMD v praxi	65
4	Kompaktný tester CD/PMD	66
4.1	Porovnávacie meranie CD a PMD	69
5	Experimentálne meranie CD/PMD	72
5.1	Meranie PMD	72
5.1.1	Prvá časť merania – vyhodnotenie	75
5.1.2	Druhá časť merania – vyhodnotenie	76
5.2	Meranie CD	79
	Záver	83
	Literatúra	84
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	88
	Zoznam príloh	90
A	Prvá príloha – meranie PMD	91
A.1	Prvá časť merania	91
A.2	Druhá časť merania	92
B	Druhá príloha – DVD	95
B.1	Bakalárska práca – Řešení problematiky CD a PMD v optických sítích	95

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Rozklad svetla na monochromatické zložky	15
2.1	Porušenie rozhodovacích úrovní vplyvom deformácie signálu [13].	23
2.2	Grafické znázornenie parametru penalty (2 dB) pri určitej hodnote chybovosti [20].	25
2.3	Závislosť skupinového oneskorenia na vlnovej dĺžke [8].	26
2.4	Priebeh chromatickej disperzie konvenčného vlákna [1].	28
2.5	Priebeh chromatickej disperzie, posunutá a plochá disperzná charakteristika [1].	29
2.6	Kompenzácia CD pomocou zápornej hodnoty CD vlákna DCF [1].	31
2.7	Braggovská mriežka a jej index lomu [27].	32
2.8	Čerpovaná Braggovská mriežka pre kompenzáciu disperzie, rôzne vlnové dĺžky [27].	33
2.9	DCM kompenzačný modul obsahujúci Braggovskú mriežku [27].	33
2.10	a) Metóda fázového posunu, b) metóda oneskorených impulzov. [1].	36
2.11	Metóda oneskorených impulzov s využitím kaskády Braggovských mriežok [1].	37
3.1	Priebeh CD a PMD v závislosti na dĺžke vlákna [8].	38
3.2	Znázornenie vektoru intenzity elektrického poľa [7].	39
3.3	Jonesov vektor a jeho základné tvary [12].	41
3.4	Maticová reprezentácia polarizačného zariadenia [12].	42
3.5	Použitie dvoch polarizačných zariadení v optickom systéme [12].	42
3.6	Šírenie polarizačných vidov optickým vláknom [1].	43
3.7	Okolnosti pôsobiace na hodnoty PMD [10].	44
3.8	Maxwellove rozdelenie hodnôt DGD [7, 10].	45
3.9	Možný priebeh DGD v závislosti na vlnovej dĺžke.	46
3.10	Maximálne prípustné rozšírenie impulzu signálového prvku vplyvom PMD [21].	49
3.11	Závislosť parametru BER na SNR [21].	51
3.12	Diagram oka, SNR – prevzaté z [21].	51
3.13	Závislosť power penalty na DGD pre rôzne druhy modulácií [26].	52
3.14	Meranie PMD metódou TINTY [19].	54
3.15	Interferogram ako výsledok námeru PMD interferometrickou metódou [1].	55
3.16	Blokové usporiadanie metódy GINTY [24].	57
3.17	Blokové znázornenie metódy skenovania vlnovej dĺžky [1].	58
3.18	Blokové usporiadanie polarimetrickej metódy [19].	59
3.19	Blokové usporiadanie metódy analýzy SOP [24].	61
3.20	Blokové usporiadanie metódy analýzy DOP [1].	63

4.1	Platforma EXFO FTB-200 (prevzaté z www.profiber.eu).	67
4.2	Aproximácia zmeraných bodov a vyhodnotenie koeficientu disperzie. . .	68
5.1	Zapojenie meranej trasy prvej časti merania.	72
5.2	Zapojenie meranej trasy v druhej časti merania.	73
5.3	Blokové zapojenia meraní PMD.	73
5.4	Porovnanie nameraných a teoretických (limitných) hodnôt PMD. . . .	76
5.5	Emulátor PMD obsahujúci etalóny 1 ps, 5 ps a 10 ps.	76
5.6	Povolený rozptyl etalónov PMD emulátoru.	77
5.7	Porovnanie vypočítaných a nameraných hodnôt CD.	81
5.8	Priebeh CD na jednotlivých vlnových dĺžkach, 80 km vlákno G.652.D. . .	82
5.9	Priebeh CD na jednotlivých vlnových dĺžkach, 6 km DCF vlákno. . .	82

ZOZNAM TABULIEK

1.1	Pásma vlnových dĺžok využívaných pre prenos jednovidovými optickými vláknami[1].	21
2.1	Limitné hodnoty chromatickej disperzie podľa ITU-T G.695 [17].	24
2.2	Limitné hodnoty CD z pohľadu prenosovej rýchlosti a power penalty [14].	26
3.1	Limitné hodnoty polarizačnej módovej disperzie [1].	47
3.2	Maximálne DGD spolu s PMD a šírkou pulzu pre signál NRZ rôznych rýchlostí [14].	47
3.3	Garantované hodnoty PMD pre rôzne vlákna, ITU [21].	48
3.4	Limitné hodnoty pre STM-64 prenosy podľa odporúčania ITU-T G.691 [22].	48
4.1	Tabuľka združujúca testovacie vlnové dĺžky pre jednotlivé vlákna [9].	66
4.2	Tabuľka združujúca aproximačné krivky a počty bodov pre pásma C, L.	68
4.3	Výsledky merania CD/PMD vykonané prístrojom FTB vo vlastníctve FEKT VUT.	70
4.4	Výsledky merania CD/PMD vykonané prístrojom FTB od InfoTel.	70
4.5	Výsledky druhej časti merania CD/PMD.	70
5.1	Súhrn priemerných hodnôt merania PMD prvej i druhej časti.	74
5.2	Povolený rozptyl etalónov PMD emulátoru.	78
5.3	Tabuľka združujúca hodnoty PMD celej trasy, ďalej vypočítané hodnoty PMD emulátoru a ich porovnanie s teoretickými údajmi.	78
5.4	Výsledné hodnoty merania chromatickej disperzie.	80
A.1	Prvá časť merania, samostatné vlákna rôznych dĺžok.	91
A.2	Emulátor PMD (1; 5 a 10) ps+ vlákno dĺžky 5 km.	92
A.3	Emulátor PMD (1; 5 a 10) ps+ vlákno dĺžky 20 km.	92
A.4	Emulátor PMD (1; 5 a 10) ps+ vlákno dĺžky 40 km.	93
A.5	Emulátor PMD (1; 5 a 10) ps+ vlákno dĺžky 80 km.	93
A.6	Emulátor PMD (1; 5 a 10) ps+ vlákno dĺžky 100 km.	94

ÚVOD

Pri nasadzovaní vysokorýchlostných systémov WDM na optické vlákna sa otvárajú možnosti zvyšovania prenosových kapacít a prenosových rýchlostí. S tým však súvisí potreba sledovania parametrov ovplyvňujúcich prenos tak, aby bola zachovaná jeho kvalita.

Cieľom bakalárskej práce je oboznámenie sa s parametrami, ktoré sa podieľajú na kvalite prenosu. Konkrétne sa zaoberám chromatickou disperziou (ďalej len CD) a polarizačnou vidovou (módovou) disperziou (PMD). K obom metódam pripájam teoretické poznatky a v praktickej časti realizujem meranie týchto parametrov.

Práca je členená do piatich hlavných kapitol. V prvých troch kapitolách sa venujem teoretickému rozboru disperzií. Kým prvá kapitola rieši problematiku vo všeobecnej rovine, v druhej a tretej pojednávam o CD a PMD. Štvrtá a piata kapitola majú praktický charakter.

V úvodnej časti práce analyzujem fyzikálnu podstatu disperzie. Na rozklade svetla popisujem mechanizmus disperzie v súvislosti s okolitým prostredím. Ďalšou súčasťou kapitoly je prehľad modelov charakterizujúcich šírenie energie v optických vláknach. Nakoniec sa zaoberám definíciami prenosovej rýchlosti, či stratami, ktoré nastávajú v optickom vlákne. V závere úvodnej časti sa nachádza stručné pojednanie o multiplexných metódach.

Druhá kapitola rieši CD, kedy v jej úvode čitateľa oboznámim s definíciou CD a následne s otázkami, ktoré sú späté s týmto javom. Ide napríklad o zníženie vplyvu CD na prenos za pomoci rôznych technologických postupov. Záver kapitoly je určený pre metódy merania CD. Pri jednotlivých metódach sú uvedené blokové usporiadania merania optických trás ako i výhody a nevýhody, ktoré sú charakteristické pre ich použitie v praxi.

Ďalšia časť sa zaoberá PMD, na ktorú kladiem väčší dôraz z dôvodu nestálosti tohoto javu a potreby jeho merania či kompenzácie. Koncepcia tejto kapitoly je podobná ako predchádzajúcej. Tu by som rád upriamil pozornosť čitateľa na jav polarizácie a parametre DGD či parametre SOP a DOP, uvedené v metódach merania PMD.

Obsahom štvrtej kapitoly je stručná charakteristika testera CD/PMD EXFO FTB 200, ktorý sa nachádza v Laboratóriu prenosových médií a optických sietí FEKT VUT Brno. Uvedený prístroj som použil na praktické merania, ktorého výsledky sú súčasťou tejto kapitoly.

Piata kapitola uzatvára pojednanie o disperziách v tejto práci. Sú v nej uvedené postupy experimentálnych meraní, ich výsledky a závery plynúce z nameraných hodnôt.

1 ÚVODNÉ POJMY, DEFINÍCIE

1.1 Fyzikálna podstata disperzie – rozklad svetla

Disperziu svetelných paprskov môžeme popísať klasickým príkladom rozkladu bieleho svetla na hranole. Svetlo sa šíri v látkach rýchlosťou v a vo vákuu rýchlosťou c . Rýchlosť svetla v dosiahnutá v látke je závislá na vlnovej dĺžke, ktorá určuje vnem farby svetla dopadajúceho na sietnicu oka.

Väčšia hodnota vlnovej dĺžky predstavuje rýchlejšie šírenie sa svetla daným prostredím a nižší index lomu. Úzky zväzok lúčov bieleho svetla sa po dopade zo vzduchu (alebo vákuu) na hranu optického prostredia (napr. priesvitného hranola) rozloží na jednotlivé monochromatické zložky (farby), presne určené vlnovými dĺžkami. Prejaví sa spektrálna závislosť mechanizmu interakcie optického žiarenia s látkovým prostredím, teda závislosť na frekvencii, resp. vlnovej dĺžke [3]. Situáciu znázorňuje obr. 1.1.

Rýchlosť šírenia optického žiarenia závisí aj na permeabilite prostredia μ a permitivite prostredia ϵ , podľa vzťahu:

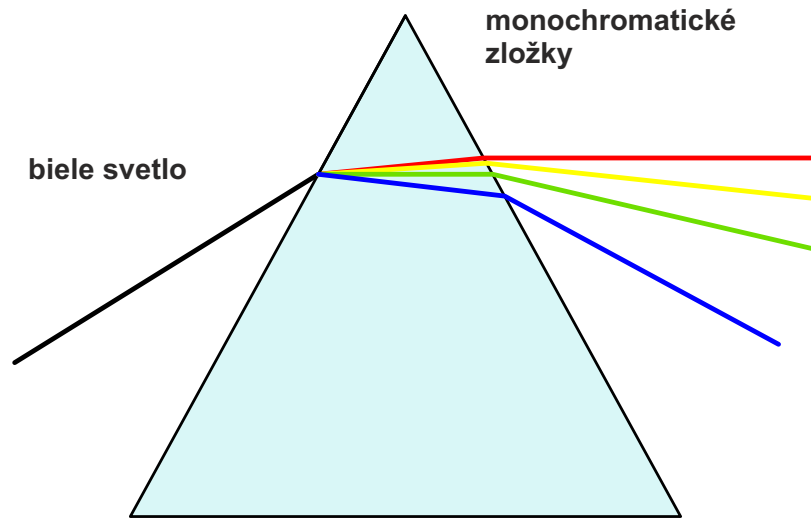
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.1)$$

kde $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ a $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, pričom ϵ_0 je permitivita vákuu, ϵ_r je relatívna permitivita prostredia, μ_0 permeabilita vákuu a μ_r relatívna permeabilita prostredia. Rýchlosť optického žiarenia v danom prostredí je označená v . Index lomu prostredia pre jednotlivé vlnové dĺžky (farby) n :

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

kde $c = 299\,792\,458 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ [4].

Rozoznávame **normálnu** a **anomálnu** disperziu. Ak sa index lomu so zväčšujúcou sa dĺžkou vlny znižuje, hovoríme o disperzii normálnej. Pokiaľ index lomu naopak rastie s vlnovou dĺžkou, daný rozklad nazývame anomálna disperzia, ktorá je pozorovaná len výnimočne [3].



Obr. 1.1: Rozklad svetla na monochromatické zložky

1.2 Šírenie energie v optických vláknach

Riešenie problematiky šírenia energie v optických vláknach môže byť realizované pomocou dvoch modelov.

Geometricko – optický model. Pomocou geometrickej optiky sa vyšetrovalo šírenie signálu vo vlnovodoch typu SI¹ a GI². Model je využívaný výhradne pre mnohovidové systémy, kedy je radiálna zmena indexu lomu zanedbateľná vo vzdialenosti porovnateľnej s vlnovou dĺžkou prenášaného žiarenia. Model je nepoužiteľný pre jednovidové štruktúry a pri skúmaní určitých porúch profilu indexu lomu u gradientných vlnovodov dáva nereálne výsledky, no názornosť pri interpretácii výsledkov je jeho značná výhoda [2].

Elektromagnetický (vlnový) model. Tento model využíva Maxwellove rovnice elektromagnetického poľa, pričom dáva presnejšie výsledky ako geometrický model. Vlnová optika ponúka presný a ucelený obraz o priestorovom usporiadaní elektromagnetického poľa v jadre aj mimo neho a stanovuje podmienky šírenia jednotlivých vidov. Pre priečne homogénne vlákna poznáme riešenia Maxwellových

¹Step index, Mnohovidový vlnovod s homogénnym jadrom a skokovou zmenou indexu lomu na rozhraní jadro – plášť.

²Graded index, Gradientný vlnovod.

rovníc s využitím zjednodušujúcich predpokladov s lineárnou polarizáciou vidov, vrátane suvislosti s elektromagnetickými zložkami. Pre priečne nehomogénne optické vlákna existujú len približné riešenia rovníc a presné riešenie sa dá uskutočniť len pre niektoré profily vlákien [1].

Súhrn Maxwellových rovníc pre neabsorbčné prostredie (ideálny vlnovod):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (1.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (1.6)$$

$$\text{kde } \mathbf{D} = \epsilon_0 \cdot n^2 \cdot \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H}.$$

Pričom \mathbf{E} a \mathbf{H} predstavujú intenzity elektrického a magnetického poľa, \mathbf{D} a \mathbf{B} elektrickú a magnetickú indukciu. V rovniciach ďalej vystupuje ϵ_0 a μ_0 čiže permitivita a permeabilita voľného priestoru, ∇ značí operátor nabla a n je index lomu materiálu vlnovodu [2].

1.3 Disperzie

Disperzie sú jedným z najdôležitejších parametrov v oblasti optických vlákien, pretože stanovujú prenosovú rýchlosť a šírku prenášaného pásma, teda prenosové vlastnosti. Sú hlavnou príčinou skreslenia signálu na výstupe optickej trasy. Disperziu v optických vláknach definujeme ako rozdiel šírky impulzu v polovici výšky na konci a na začiatku vlákna [1].

Všetky druhy disperzií prispievajú k rozšíreniu prenášaných impulzov (časová oblasť), čo u digitálnych systémov pozorujeme ako rozšírenie optického pulzu. U analógových systémov sa zmenší frekvenčná šírka modulačného signálu optickej nosnej (napr. káblová TV). Vzniká nežiadúci jav, ktorý sa nazýva medzisymbolová interferencia – zasahovanie časovo roztiahnutého signálu do susedných bitových medzier, porušenie rozhodovacích úrovní a v konečnom dôsledku skreslenie signálu [7].

1.3.1 Prenosová rýchlosť a disperzia

Na rýchlosť šírenia paprskov sa môže nazeráť aj z pohľadu vlnového, kedy poznáme fázovú v_f i skupinovú v_s rýchlosť šírenia, pričom fázová rýchlosť je daná vzťahom

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c_0}{n} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.7)$$

a skupinová rýchlosť vzťahom

$$v_s = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{\frac{dk}{d\omega}} = \frac{c_0}{n + \frac{dn}{d\omega}} = \frac{c_0}{n_s}, \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.8)$$

kde:

- k ... vlnové číslo,
- ω ... frekvencia vlny,
- ϵ a μ ... permitivita a permeabilita prostredia,
- c_0 ... rýchlosť svetla a
- n_s ... skupinový index lomu [1].

Môže nastať situácia, kedy by index lomu n v rovnici (1.7) nadobúdal hodnoty menšie ako 1 (napr. pri použití rentgenových lúčov). Potom by veľkosť fázovej rýchlosti presahovala rýchlosť svetla c . Fázová rýchlosť opisuje rýchlosť pohybu fázy signálu alebo uzlu vlny, ale nereprezentuje rýchlosť prenosu energie, čiže vlna sa nepohybuje väčšou rýchlosťou ako c . Rýchlosť prenosu informácie vlnením charakterizuje skupinová rýchlosť, teda rýchlosť prenosu obálky signálu.

Ako vyplýva z rovníc (1.7) a (1.8), skupinová rýchlosť je derivácia ω podľa k a fázová rýchlosť je ω/k [11].

Prenosová rýchlosť by sa dala definovať ako počet prenesených znakov za jednu sekundu, pod označením bit sa sekundu: $\text{b} \cdot \text{s}^{-1}$, alebo bps (bit per second).

Pre zariadenie komunikujúce rýchlosťou $\text{BR} = 10 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ bude doba vyčlenená pre jeden pulz

$$\Delta_t = \frac{1}{\text{BR}} = \frac{1}{1 \cdot 10^9} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ s} = 100 \text{ [ps]}, \quad (1.9)$$

kde BR značí prenosovú rýchlosť (bit rate).

V praxi väčšinou počítame s istou rezervou, aby sme vytvorili priestor pre rozšírenie impulzu vplyvom disperzií a nedochádzalo tak k medzisymbolovej interferencii. Zjednodušená relácia používaná v praxi

$$\text{BR} \leq \frac{1}{4\Delta_t}, \quad [\text{Gb} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.10)$$

kde Δ_t znamená časové rozšírenie pulzu pôsobením disperzie.

Pre SI vlákno (módová disperzia) platí

$$\text{BR}_{\text{SI}} \leq \frac{n_1 c}{2 \cdot L \cdot NA^2}. \quad [\text{Gb} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.11)$$

Pre gradientné vlákno (módová disperzia) platí

$$\text{BR}_{\text{GI}} \leq \frac{2c}{L \cdot n_1 \cdot \Delta_t^2}. \quad [\text{Gb} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.12)$$

Obmedzenie chromatickou disperziou

$$BR_{\text{chrom}} \leq \frac{1}{4 \cdot D(\lambda) \cdot L \cdot \Delta\lambda} \cdot [\text{Gb} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.13)$$

Zo vzťahov (1.11), (1.12) a (1.13) dostávame vzťah pre zloženú disperziu

$$BR_{\text{zlož}} \leq \frac{1}{4\sqrt{\Delta t_{\text{mod}}^2 + \Delta t_{\text{chrom}}^2}}, [\text{Gb} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.14)$$

kde:

- NA ... Numerická apertúra, určuje maximálny uhol vstupu paprskov (módov) do vlákna,
- $D(\lambda)$... koeficient chromatickej disperzie,
- n_1 ... index lomu jadra a
- L je dĺžka vlákna [5].

1.3.2 Straty v optických vláknach

Pojmom straty v optickom vlákne rozumieme zmenu signálu na výstupe oproti vstupnému signálu, po priechode optickým vláknom. Optické vlákno nie je ideálne prenosové médium, a preto mení tvar signálu, ktorý ním prechádza. V tejto kapitole sú v krátkosti popísané deje vplývajúce na výslednú podobu signálu, dôsledkom čoho môže byť pokles amplitúdy a rozťahnutie signálu v časovej oblasti.

Útlm – Útlm optického vlákna predstavuje odpor vlákna kladený postupu optického žiarenia. Úroveň energie užitočného signálu klesá, znižuje sa amplitúda a prenos môže kolabovať. Aby bolo možné prekenuť dostatočne veľké vzdialenosti bez použitia opakovačov či regenerátorov, je tu snaha o minimalizáciu týchto strát. Jedným z parametrov, ktoré majú vplyv na útlm vlákna je vlnová dĺžka prenášaného optického žiarenia. Hodnoty útlmu prvých optických vlákien sa pohybovali v rozsahu stoviek dB/km, no v súčasnej dobe vďaka pokročilým výrobným technológiám koeficient útlmu dosahuje 0,2 dB/km na vlnovej dĺžke 1550 nm. V prípade optických vlákien ako prenosových prostredí je útlm tvorený stratami absorpciou, vyžarovaním, rozptylom a ohybom [6].

- **Straty absorpciou** – V infračervenej oblasti ich spôsobujú prechody medzi molekulárnymi úrovňami základného materiálu, prímiesí a nečistôt. V ultrafialovej a viditeľnej oblasti hovoríme o atomárnych úrovniach. Najväčší vplyv majú ióny Cu, Fe a Cr, ktorých rezonancia na určitej frekvencii má za následok vznik tepelných strát. Rezonančný kmitočet iónov OH^- tvorí hlavný podiel strát, a preto je dôležité pri výrobe zaistiť nízku koncentráciu iónov OH^- a iónov kovov. Jedná sa o premenu svetelnej energie na teplo [1].

- **Straty vyžarováním** – Lom šíriacich sa paprskov na rozhraní dvoch rôznych dielektrických prostredí spôsobí, že časť energie opustí jadro a prenikne von [5]. Časť žiarenia sa odrazí späť do jadra, ale pod iným smerom ako je smer prenosu čo predstavuje ďalšiu stratu energie [6].
- **Straty rozptylom** – Sú dané výrobou, konkrétne nečistotami a fluktuáciami kryštalickej mriežky. Rozptylovým stratám na nich hovoríme Rayleighove straty. Charakteristickou črtou Rayleighovho rozptylu je jeho všesmerovosť [5]. Rayleighov rozptyl je prítomný v celom optickom spektre a v každom optickom prostredí, nedá sa odstrániť. Táto skutočnosť predstavuje určitý útlmový limit, ktorý udáva minimálny možný útlm vlákna. Tieto straty sú nepriamo úmerné štvrtej mocnине vlnovej dĺžky žiarenia, čiže s nárastom λ prudko klesajú [6].
- **Straty ohybom** – K celkovému útlmu vlákna prispieva aj jeho ohyb. Rozlišujeme mikroohyb a makroohyb.
Mikroohyb je v podstate akákoľvek odchýlka vlákna od jeho priamej polohy (napr. porušená kruhovitost vlákna), ktorá je neviditeľná voľným okom a môže byť spôsobená mechanickým namáhaním vlákna (ťah, tlak. . .), alebo už pri samotnej výrobe. Na vzniknutých nehomogenitách sa atypicky odráža žiarenie, ktoré môže opustiť vlnovod a následne tak ochudobniť prenos o energiu. V prípade jednoividových vlákien straty rastú s rastúcou vlnovou dĺžkou.
Makroohyb je naopak viditeľný voľným okom a platí, že najmenšie zakrivenie znamená najväčšie straty. Princíp je podobný ako u mikroohybu. Pri pokládke optického kábla treba dbať zvláštnej pozornosti a vyvarovať sa vzniku ohybov [6].
- **Disperzné straty** – Nie sú straty v pravom slova zmysle, teda úbytok energie. Naviazanú energiu rozprestierajú v čase, čím znehodnocujú vlastnosti optických vlákien [5].

1.3.3 Kompenzácia útlmu

Ako prostriedok k zabezpečeniu spoľahlivej detekcie signálu na prijímacej strane bolo v prípade jednokanálových prenosov zvolené riešenie kompenzácie útlmu pomocou opakovačov. Opakovače previedli signál z optickej oblasti do oblasti elektrickej, zosilnili ho (regenerácia 1R), obnovili jeho tvar (regenerácia 2R) a následne ho previedli späť do optickej oblasti (regenerácia 3R) [6].

Problém nastal pri rozmachu WDM systémov. Vyššie spomennutá kompenzácia spočívala v zosilnení každého kanálu zvlášť, čiže prenos musel byť demultiplexovaný, každý kanál prevedený do elektrickej oblasti a po obnove signálu zasa prevedený do optickej oblasti a späťne multiplexovaný. Táto procedúra bola drahá a náročná.

Riešenie ponúkajú tzv. OA zosilňovače, ktoré zosilnia všetky kanály súčasne – bez potreby demultiplexu a prevodu signálu do elektrickej oblasti [6].

1.4 Technológia multiplexu

Aby bolo vôbec možné pokryť zvyšujúce sa nároky na počet prenášaných kanálov optickým vláknom, pristúpilo sa na riešenie nazývané multiplexovanie signálov.

Základné delenie multiplexov tvorí:

- Časový multiplex – každý signál má alokovanú dobu, po ktorú môže byť prenášaný.
- Frekvenčný multiplex – spočíva v modulácii jednotlivých signálov do vyšších kmitočtových pásiem na optické žiarenie generované zdrojom (LED dióda alebo laser).
- Elektronický multiplex – využívaný pri prenosoch viacstavových signálov pri n -násobnom zvýšení prenosových rýchlostí.
- Priestorový multiplex – riešený jednoducho použitím viacerých vlákien.
- Vlnový multiplex – častá varianta, spočíva v modulovaní niekoľkých vlnových dĺžok do optického vlákna, v oblastiach nízkeho útlmu.
- Hybridný multiplex je kombinácia vlnového a elektronického multiplexu [1].

V nasledujúcich kapitolách sa bude pojednávať o technologických riešeniach prenosových systémov s využitím hustého vlnového multiplexu DWDM³. Pre lepší prehľad bude v krátkosti vysvetlená jeho podstata.

DWDM je schopný do jedného vlákna pojať desiatky vlnových dĺžok vďaka minimálnym rozstupom, ktoré sú zaistené medzi kanálmi. Nutné je zaistiť úzku spektrálnu čiaru a kmitočtovú stabilitu. Ďalšou podmienkou je voľba vhodného zdroja optického žiarenia, ktorý musí byť dostatočne stabilný. To je zaistené buď fázovým závesom, alebo použitím braggovských zrkadiel. Sú volené výhradne jednovidové lasery a úzkopásmové interferenčné filtre [1].

V súvislosti s DWDM je potrebné spomenúť aj technológiu hrubého vlnového multiplexu CWDM⁴, ktorý je lacnejšou alternatívou DWDM a používa väčšie rozstupy medzi prenosovými kanálmi. Dôsledok je prenos menšieho počtu vlnových dĺžok optickým vláknom [1].

Technológia WWDM⁵ (široký vlnový multiplex) využíva typicky 4 vlnové dĺžky s odstupom 25 nm, v oblasti 850 nm pre mnohovidové vlákna a 1300 nm či 1310 nm

³Dense Wavelength Division Multiplex

⁴Coarse Wavelength Division Multiplex

⁵Wide Wavelength Division Multiplex

pre jedno i mnohovidové vlákna. Tento druh multiplexu nachádza využitie pre prenos Gigabitového a 10 Gigabitového Ethernetu [1].

V tabulke 1.1 je uvedený prehľad pásiem vlnových dĺžok využívaných pre prenos prostredníctvom jednovidových optických vlákien vrátane označenia každého pásma a jeho názvu.

Tab. 1.1: Pásma vlnových dĺžok využívaných pre prenos jednovidovými optickými vláknami[1].

Pásma	Názov	Rozsah [nm]
O	Original	1260 – 1360
E	Extended	1360 – 1460
S	Short	1460 – 1530
C	Conventional	1530 – 1565
L	Long	1565 – 1625
U	Ultra-long	1625 – 1675

1.5 Módová disperzia

V multimódových vláknach sa uplatňuje tzv. módová disperzia. Je zapríčinená rozdielnou dobou šírenia jednotlivých vidov, ktoré prechádzajú rôznymi dráhami. Vplyvom vzájomného medzividového oneskorenia je optický signál na výstupe časovo rozšírený.

Pri prenosoch na veľké vzdialenosti sú nasadzované výlučne jednomódové vlákna, kde sa módová disperzia neuplatňuje. V takých prípadoch je pozornosť upriamená na chromatickú a polarizačnú módovú disperziu [6].

2 CHROMATICKÁ DISPERZIA

Chromatická disperzia je v povedomí už dlhšiu dobu, no potreba jej merania nastala prakticky v nedávnej minulosti, kedy sa začali vo veľkom využívať systémy WDM¹. Tie so sebou prinášajú rastúci trend prenosových kapacít. Konkrétny zástupca z radov WDM je napríklad systém hustého vlnového multiplexu DWDM.

2.1 Vznik, charakteristika a parametre.

Chromatickú disperziu tvoria dve zložky – materiálová a vlnododová disperzia. Pre lepšie pochopenie si tieto zložky v krátkosti popíšeme.

Pôvod materiálovej disperzie spočíva v závislosti indexu lomu prostredia (SiO_2) na vlnovej dĺžke prostredia, kedy sa každá vlnová dĺžka šíri rôznou rýchlosťou (nelineárny kmitočnotý priebeh indexu lomu).

Vlnododová disperzia je spôsobená zmenami geometrie vidu, konkrétne zmenou profilu indexu lomu vo vlákne a pomerom polomeru jadra vlákna s vlnovou dĺžkou signálu. Toto má za následok zmenu fázovej a skupinovej rýchlosti v pozdĺžnom smere šírenia pri zmene kmitočtu [15].

CD býva označovaná aj ako **farebná disperzia**. Zdroje optického žiarenia nie sú ideálne monochromatické – optické žiarenie obsahuje určité spektrum vlnových dĺžok, ktoré sa šíria vláknom rôznou rýchlosťou – analógia s kapitolou 1.1.

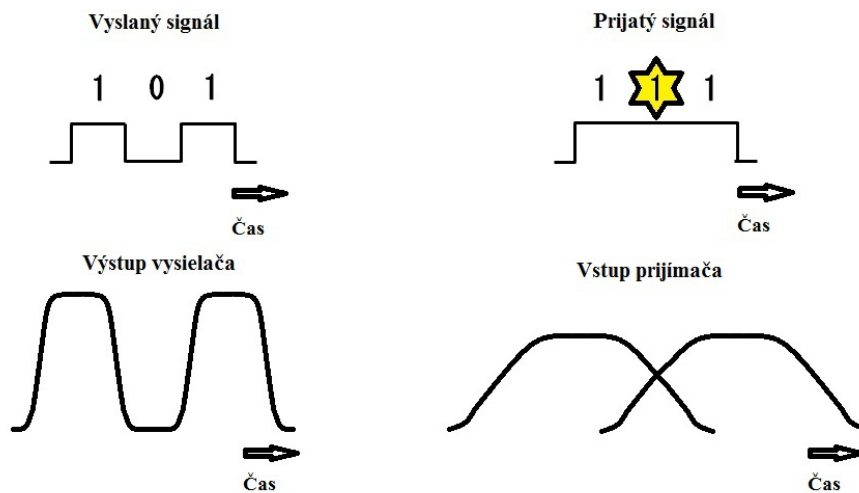
Ako už bolo spomenuté, jednotlivé spektrálne zložky žiarenia sa časovo oneskorujú. To spôsobuje, že sa impulz počas cesty optickým vláknom časovo rozťahuje, deformuje a dochádza ku skresleniu signálu. Na prijímacej strane môžu byť v takom prípade chybné vyhodnotenú rozhodovacie úrovne [1, 8]. Znázornené na obrázku 2.1.

Veľkosť chromatickej disperzie charakterizuje parameter nazývaný koeficient chromatickej disperzie $D(\lambda)$ a je popísaný vzťahom

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)}. \quad [\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.1)$$

Koeficient chromatickej disperzie popisuje zmenu skupinového oneskorenia svetelného pulzu optického vlákna jednotkovej dĺžky, v závislosti na jednotkovej zmene vlnovej dĺžky. Vyjadruje sa väčšinou v jednotkách $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Koeficient udáva rozšírenie Gaussovského impulzu (ps) pri spektrálnej pološírke 1 nm použitého svetelného zdroja, po priechode vláknom dĺžky 1 km. Skupinové oneskorenie signálu je označované t_g a zvyčajne sa vyjadruje v ps/km [1, 14].

¹Wavelength Division Multiplex



Obr. 2.1: Porušenie rozhodovacích úrovní vplyvom deformácie signálu [13].

Jedným zo spôsobov špecifikácie koeficientu chromatickej disperzie je určenie vlnových dĺžok pre rozsah povolených hodnôt $D(\lambda)$:

$$D_{\min}(\lambda) \leq |D(\lambda)| \leq D_{\max}(\lambda) \quad \text{pre} \quad \lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}, \quad (2.2)$$

kde hodnoty $D_{\min}(\lambda)$, $D_{\max}(\lambda)$, λ_{\min} a λ_{\max} sú špecifikované pre každý typ optického vlákna v príslušnom odporúčaní ITU.

Konkrétne typy optických jednoividových vlákien, napr. NZ-DSF² požadujú, aby koeficient chromatickej disperzie neprekročil nulovú hodnotu v určitom rozsahu vlnových dĺžok. Tieto vlákna sa používajú pre systémy vlnového multiplexu DWDM a ich popis nájdeme v odporúčaní ITU-T G.655 alebo ITU-T G.656.

Medzi ďalšie parametry patrí **sklon** disperznej charakteristiky (strmost) $S(\lambda)$, ktorý je definovaný:

$$S(\lambda) = \frac{dD}{d\lambda}. \quad [\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.3)$$

Vlnová dĺžka nulovej chromatickej disperzie je taká vlnová dĺžka, pri ktorej jav disperzie vymizne. Definujeme aj strmost disperznej charakteristiky na vlnovej dĺžke

²Non-Zero Dispersion Shifted Fiber

nulovej chromatickej disperzie. Tieto parametre spolu s koeficientom CD bežne nájdeme v katalógoch výrobcov optických vlákien [14].

2.2 Limitné hodnoty

V tabuľke 2.1 sú uvedené limitné hodnoty chromatickej disperzie charakterizované koeficientom $D(\lambda)$ pre vlákna typu G.652, G.653 a G.655 popísané príslušným odporúčaním ITU-T.

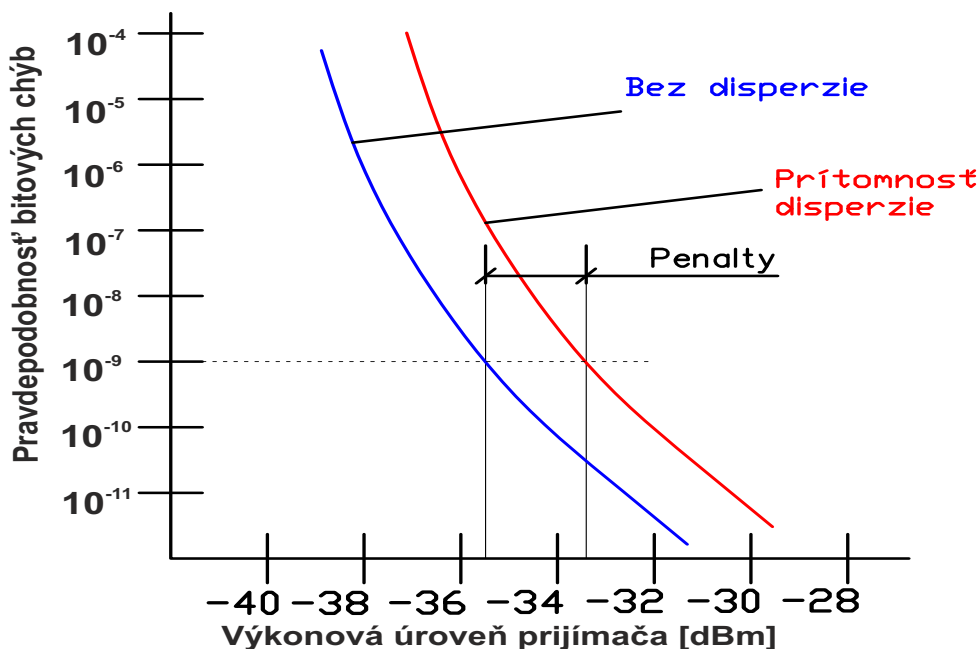
Tab. 2.1: Limitné hodnoty chromatickej disperzie podľa ITU-T G.695 [17].

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

Hovoríme tiež o limite CD charakterizovanom parametrom power penalty, ktorý udáva vplyv na pokles SNR³. Power penalty charakterizuje pokles tzv. diagramu oka. Z pohľadu prijímača rozlišujeme tzv. Receiver Tolerance (RT), kedy RT 1 dB power

³Signal to Noise Ratio

penalty bude znamenať stratu 1 dB úrovne výkonu signálu v prijímači, sprevádzanú nárastom chybovosti. Pre zachovanie stanovenej chybovosti je potrebné zvýšiť úroveň výkonu prijímača o 1 dB [8]. Niekedy sa uvádza power penalty 2 dB. Situácia je znázornená na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Grafické znázornenie parametru penalty (2 dB) pri určitej hodnote chybovosti [20].

Diagram oka je nástroj, ktorý umožňuje kvalitatívnu analýzu prenosového systému a identifikáciu kanálových chýb. V súvislosti s diagramom oka sledujeme parametre BER⁴ a SNR, čiže bitovú chybovosť a odstup signál–šum [7].

V tab. 2.2 sú uvedené limitné hodnoty chromatickej disperzie z pohľadu prenosovej rýchlosti signálu NRZ⁵, s ohľadom na parameter power penalty.

Príklad:

Máme trasu dĺžky 80 km pri použití vlákna G.652.D na $\lambda = 1550$ nm o hodnote $D(\lambda) = 17$ [ps · nm⁻¹ · km⁻¹]. Potom 17 [ps · nm⁻¹ · km⁻¹] · 80 [km] = 1360 [ps · nm⁻¹]. Z tab. 2.2 (1dB-penalty) je zrejmé, že pre uvedený príklad a pre prenosy 10 Gbit/s a rýchlejšie je potrebná kompenzácia CD [8].

⁴Bit Error Rate – bitová chybovosť.

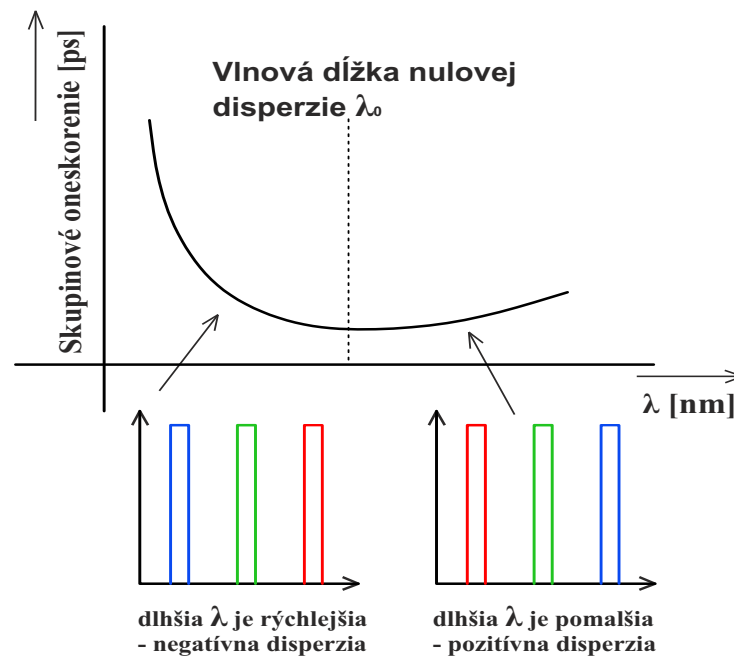
⁵Not Return Zero – bez návratu k nule.

Tab. 2.2: Limitné hodnoty CD z pohľadu prenosovej rýchlosti a power penalty [14].

NRZ bitová rýchlosť [Gbit/s]	Maximálna chromatická disperzia [ps/nm]	
	1-dB penalty	2-dB penalty
2,5	18 820	30 110
10	1 175	1 880
40	73,5	118

2.3 Pozitívna a negatívna disperzia

Na obr. 2.3 je načrtnutá závislosť skupinového oneskorenia na vlnovej dĺžke, kedy krivku pretína hranica vlnovej dĺžky s nulovou disperziou. Po krivke zľava od tejto vlnovej dĺžky je oblasť **negatívnej disperzie**, kedy je dlhšia λ rýchlejšia, skupinové oneskorenie sa znižuje. Po prekonaní hranice λ_0 sme v oblasti **pozitívnej disperzie**, dlhšia λ je pomalšia a skupinové oneskorenie narastá.



Obr. 2.3: Závislosť skupinového oneskorenia na vlnovej dĺžke [8].

2.4 Znižovanie vplyvu chromatickej disperzie

Problém s kompenzáciou CD nastal práve pri nasadzovaní systémov DWDM, konkrétne u starších, už položených vlákien (vlákna vyrobené v období roku 1990). Existuje celý rad postupov ako kompenzovať CD.

2.4.1 Vlákna s rôzne zmenenou spektrálnou charakteristikou koeficientu CD

Prvým z možných spôsobom ovplyvnenia CD bol vývoj špeciálne upravených vlákien s vybranými disperznými vlastnosťami. Tento postup sa aplikuje priamo pri výrobe vlákna. Vývojom vznikli vlákna typu G.653 (DS), G.654 (DFE), G.655 (NZ-DSF) a mnohé ďalšie varianty.

Chromatickú disperziu možno ovplyvniť zmenou disperzie vlnovodovej, keďže materiálová disperzia sa ovplyvniť takmer nedá. Zmenu dosiahneme voľbou vhodného profilu indexu lomu v jadre optického vlákna. Týmto spôsobom boli postupne vyvinuté rôzne druhy vlákien, ktoré majú zmenenú spektrálnu závislosť koeficientu chromatickej disperzie. Boli vyvinuté vlákna typu G.653 s posunutou disperznou charakteristikou DS⁶ alebo vlákna s tzv. plochou disperznou charakteristikou DFE⁷, u ktorých aj v oblasti $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ klesá hodnota disperzie k nule.

Graf 2.4 znázorňuje tradičný priebeh chromatickej disperzie konvenčného vlákna (G.652), viď prvý stĺpec tabuľky 2.1. Z charakteristiky vidíme, že oblasť nulovej disperzie sa pohybuje v okolí vlnovej dĺžky $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$.

Na obr. 2.5 je pod označením a) uvedený priebeh disperzie u vlákien s posunutou disperznou charakteristikou, pod označením b) zasa s plochou disperznou charakteristikou [1, 15].

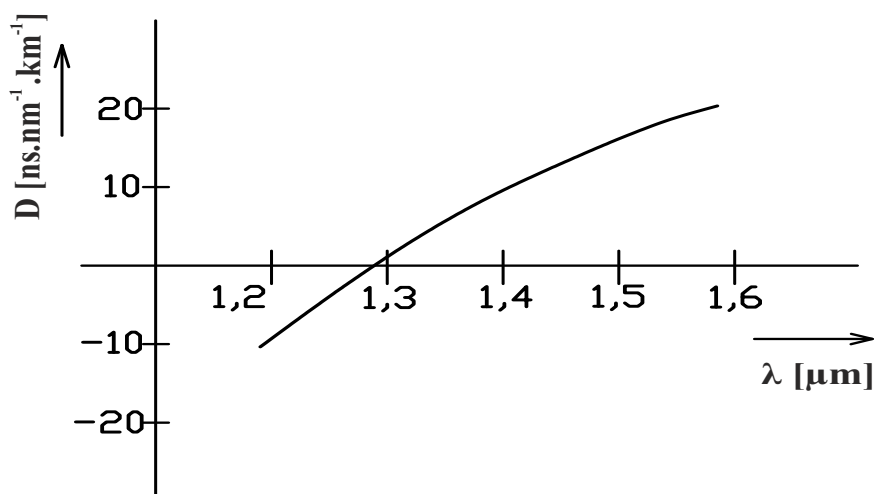
Ďalší vývoj sa niesol v znamení NZ-DSF⁸ vlákien. Priebeh disperznej charakteristiky týchto vlákien je podobný ako u vlákien typu G.653 (DS), no vlnová dĺžka nulovej chromatickej disperzie neleží v oblasti $1,55 \mu\text{m}$, ale mimo spektrálnu oblasť využívanú pre prenos. Prenosová oblasť NZ-DSF vlákien je v okolí vlnovej dĺžky $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, presnejšie špecifikovaná koeficientom chromatickej disperzie podľa odporúčania ITU-T G.655 [15, 18]:

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

⁶Dispersion Shifted

⁷Dispersion Flattened Fiber

⁸Non-Zero Dispersion Shifted Fiber



Obr. 2.4: Priebeh chromatickej disperzie konvenčného vlákna [1].

kde:

$$0,1 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} \leq D_{\min} \leq D_{\max} \leq 10 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}, \quad (2.5)$$

$$1530 \text{ nm} \leq \lambda_{\min} \leq \lambda_{\max} \leq 1565 \text{ nm}, \quad (2.6)$$

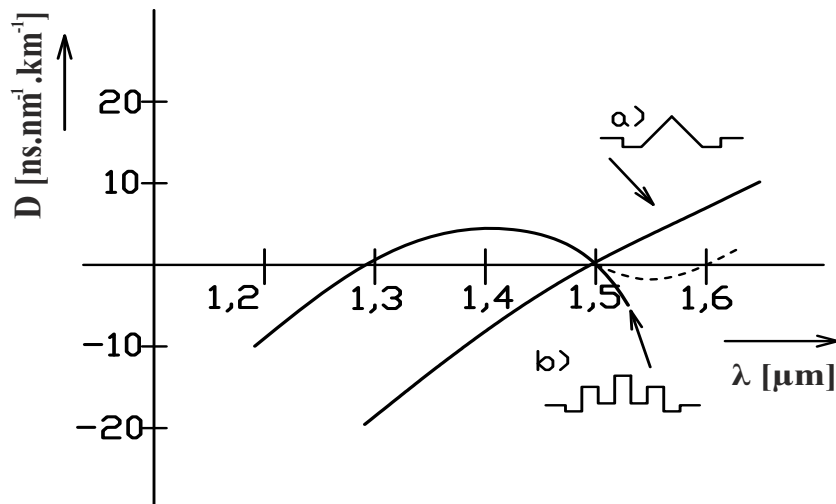
$$D_{\max} \leq D_{\min} + 5,0 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}. \quad (2.7)$$

V tejto oblasti (1,530–1,565) μm nadobúda veľkosť chromatickej disperzie nízkych hodnôt, nie však nulových. **Nenulová disperzia** je dôležitá z hľadiska **nelineárnych javov**.

Typickým príkladom nelineárneho javu je **štvorvlnné zmiešavanie FWM**⁹. Vzájomnou interakciou prenosových kanálov obsahujúcich nosné signálu, ktoré sú spektrálne blízko pri sebe, vznikajú nové zložky zasahujúce do oblastí prenosových kanálov.

Dôsledok vplyvu FWM je zarušenie prenášania užitočnej informácie, čiže zníženie odstupu signál–šum a skreslenie. Tento nelineárny jav je typický pri využití DWDM a značne obmedzuje potenciál vysokorýchlostného systému. FWM sa označuje ako aditívny šum [7, 15].

⁹Four Wave Mixing



Obr. 2.5: Priebeh chromatickej disperzie, posunutá a plochá disperzná charakteristika [1].

Vznik nelineárnych javov bol jedným z dôvodov, ktoré poukázali na nevhodnosť použitia DS vlákien so systémom DWDM v pásme 1,55 μm , práve pre veľmi nízku hodnotu disperzie v tomto pásme [19].

Ako príklad vlákna s plochou disperznou charakteristikou DFF slúžia vlákna typu G.654, ktoré sú špeciálnym prípadom vlákien G.652. Tieto vlákna sú charakteristické nízkou hodnotou chromatickej disperzie v pásme (1,31–1,55) μm . V krajných polohách tohto pásma dosahuje disperzia nulovej hodnoty. Vlákna typu G.654 sa používajú len zriedkavo. Dôvod spočíva predovšetkým vo vysokých nákladoch, kedy sú nasadzované výhradne pre diaľkové prenosy vo forme podmorských káblov bez využitia zosilňovačov a podobne. Podrobnejšiu charakteristiku možno dohľadať v odporúčaní ITU-T G.654 [1, 15].

Ďalšie typy jednovidových vlákien sú:

- Vlákno G.652.A je optimalizované pre prenos v oblasti 1310 nm, ale dá sa využiť i v pásme vlnovej dĺžky 1550 nm, pre ktorú však nie je vlákno optimalizované. Vlákno vykazuje v oblasti 1310 nm minimálnu (až nulovú) disperziu. Používa sa pre prenos analógových i digitálnych signálov [23].
- Vlákno G.652.C ponúka pracovnú oblasť v celom rozsahu vlnových dĺžok, čím sa eliminuje limit klasických G.652 vlákien, ktoré napr. v prenosovom pásme E (1,36–1,46) μm vykazovali rezonanciu a mali väčší vložený útlm.
- Vlákno G.652.D nazývané aj All Wave vlákno, ktoré je charakteristické kompa-

tibilitou s vláknami H.652.

- Vlákna typu G.656 sú podobné ako G.655 čiže NZ-DSF, avšak sú optimalizované na prenos v oblasti (1,46–1,625) μm . Tieto vlákna sú využívané v spolupráci so systémom DWDM i CWDM [1].
- Typy vlákien G.657.A a G.657.B sa používajú v optických prístupových telekomunikačných sieťach a vyznačujú sa zníženou citlivosťou na ohyby.

Vlákna špecifikácie A majú mechanické i geometrické parametre totožné s vláknami typu G.652.D.

Vlákna podľa špecifikácie B majú mechanické a geometrické parametre totožné s vláknami typu G.652.A, avšak CD a PMD nie sú pri týchto vláknach definované. Dôvod spočíva v ich nasadení na krátke vzdialenosti, zvyčajne stovky metrov, kedy disperzie nedosahujú kritických hodnôt [28].

Okrem zmeny optického vlákna alebo zdroja optického žiarenia (napr. DFB laser s veľmi malou spektrálnou pološírkou $\Delta\lambda = 0,00003 \text{ nm}$) existujú aj iné metódy ovplyvňujúce chromatickú disperziu. Medzi také metódy patrí napríklad konverzia vlnových dĺžok zostavujúcich impulz signálu uprostred trasy, či zvyšovanie úrovni signálov za cieľom zväčšiť rozstup signál–šum [15].

2.4.2 Kompenzačné vlákna DCF

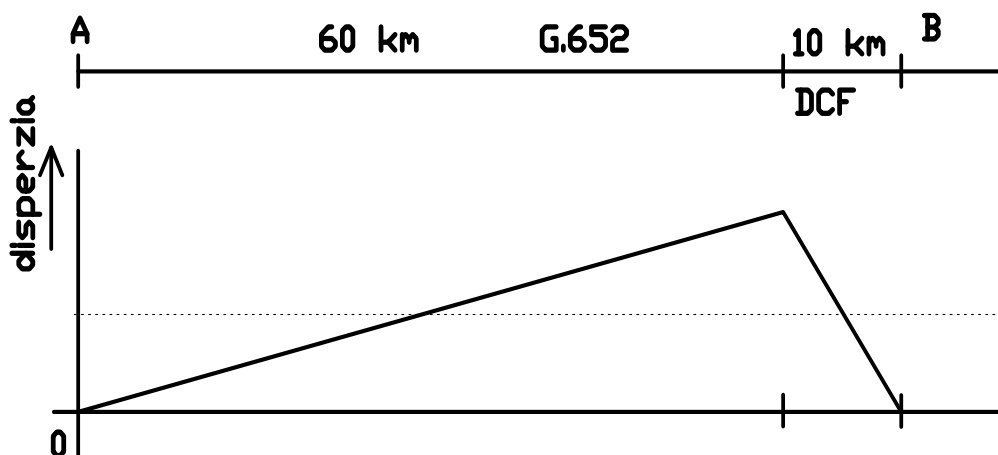
Využitie kompenzačných vlákien DCF¹⁰ sa radí medzi kompenzácie CD na trase. Ide o typ pasívnej optickej kompenzácie, ktorá je nasadzovaná na vlákna staršej výroby, kedy je už nereálne ovplyvniť štruktúru vlákna pri výrobe.

Princíp DCF vlákien tkvie v zápornej hodnote CD, kedy sa po napojení cievky tohto typu vlákna za (alebo pred) optickú trasu vyrovnajú časové rozdiely jednotlivých zložiek signálu na rôznych vlnových dĺžkach. Prichádza k opačnému disperznému javu.

Dĺžka DCF býva približne 1/6 dĺžky optickej trasy, no existujú aj špeciálne HOM¹¹ mnohovidové vlákna, ktoré majú približne 3-krát vyšší koeficient CD. To umožňuje použiť tretinovú dĺžku kompenzačného vlákna. HOM vlákna sú taktiež odolné proti nelineárnym javom a majú nízky merný útlm v porovnaní s DCF vláknami, ktoré sú viac náchylné na nelineárne javy a majú vyšší merný útlm, čo je zároveň ich nevýhodou. Príklad kompenzácie CD pomocou DCF vlákna je na obr. 2.6. V kapitole bolo čerpané z: [1, 15].

¹⁰Dispersion Compensation Fiber

¹¹High Order Mode Fiber



Obr. 2.6: Kompenzácia CD pomocou zápornej hodnoty CD vlákna DCF [1].

2.4.3 Využitie Braggovskej mriežky

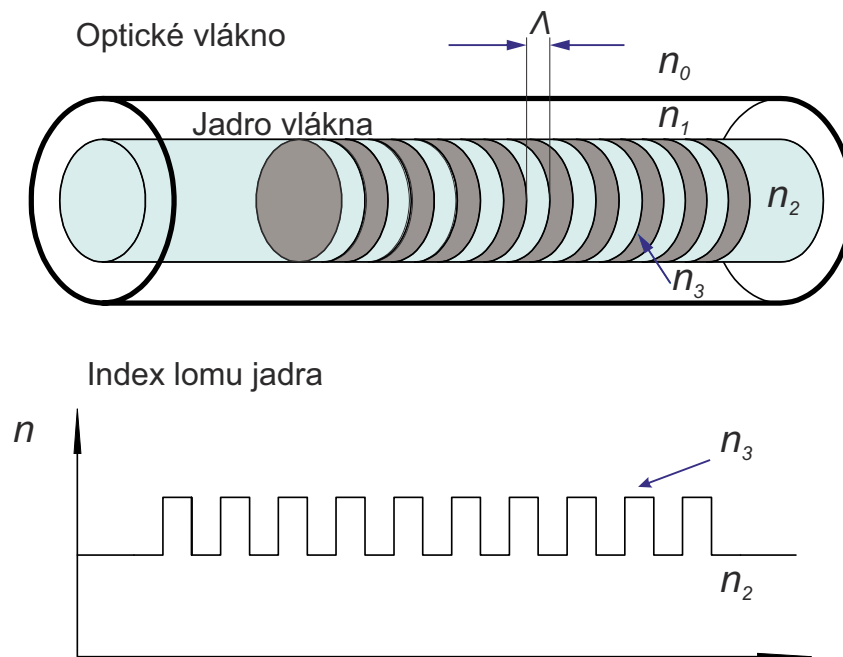
Braggovská mriežka s premennou periódou je ďalšou alternatívou vhodnou pre zníženie vplyvu CD. Funkcia mriežky je podobná ako u DCF kompenzačných vlákien, no použiteľná je len pre relatívne úzku spektrálnu oblasť (asi 6 nm). Aby bolo možné kompenzovať viacero spektrálnych kanálov, používa sa sústava Braggovských mriežok v kaskáde. V súčasnosti sú dostupné širokospektrálne kompenzátory chromatickej disperzie, ktoré postihujú oblasť až 35 nm [1, 15].

Na obr. 2.7 je znázornený Braggov reflektor, ktorý je distribuovanou variantou Braggovskej mriežky. Pravidelnou zmenou indexu lomu n jadra je dosiahnutý stav, kedy mriežka tvorí tzv. dielektrické zrkadlo o špecifickej vlnovej dĺžke, teda jednu λ odrazí a ostatné prepustí.

Pre kompenzáciu disperzie sa používa tzv. čerpaná mriežka, ktorá je vytvorená úpravou profilu indexu lomu lineárnou zmenou v perióde mriežky, viď obr. 2.8. Takáto zmena v perióde mriežky spôsobí odraz rôznych vlnových dĺžok. Vplyvom disperzie sa pulz roztiahne a pomalšie vlnové dĺžky zaostávajú. Kompenzácia je založená na odraze rýchlejšej časti spektra pulzu ďalej v mriežke, pričom pomalšia časť sa odrazí skorej, a tak sa pri návrate jednotlivých zložiek pulzu zložky zosynchronizujú a nastane časová kompresia pulzu, čiže kompenzácia disperzie. Spektrum pulzu na výstupe mriežky je užšie ako spektrum pôvodného pulzu na jej vstupe.

Ako širokospektrálny kompenzátor môže poslúžiť tzv. DCM¹² kompenzačný modul, ktorý pozostáva z Braggovskej mriežky a cirkulátoru, viď obr. 2.9. Takáto zo-

¹²dispersion compensating module



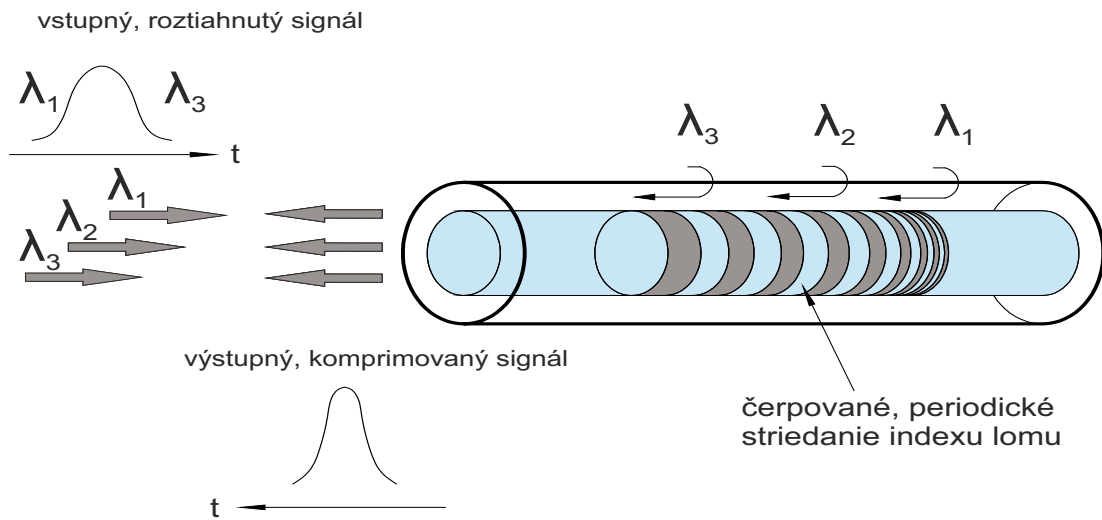
Obr. 2.7: Braggovská mriežka a jej index lomu [27].

stava ponúka jednoduchšiu kompenzáciu sklonu disperznej charakteristiky na rozdiel od vlákna DCF, čo je výhodné obzvlášť u systémov DWDM. Dané širokospektrálne FBG kompenzátory poskytujú dynamickú kontinuálnu kompenzáciu v pásme C i L.

Medzi ďalšie výhody oproti DCF vláknam patrí konštantný vložený útlm mriežky, ktorý je daný vloženým útlmom cirkulátoru a reflektivitou mriežky a neprekračuje hodnotu 3 dB (do dĺžky 120 km klasického vlákna). Ďalej malé rozmery a možnosť jednoduchého rozšírenia modulu o ďalšie pásma bez prerušenia trasy.

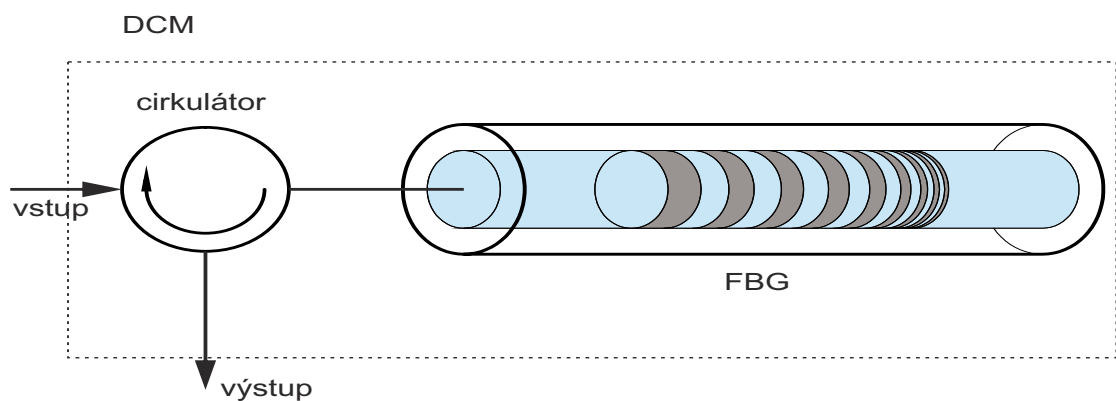
FBG mriežka poskytuje ako fixnú, tak i laditeľnú a kontinuálnu kompenzáciu v celom požadovanom pásme a to kladej i zápornej disperzie.

Fixné FBG kompenzátory sa používajú pre menej nákladné optické systémy (napr. DWDM Metro) a kompenzujú až 400 km dĺžky optickej trasy [27].



Obr. 2.8: Čerpovaná Braggovská mriežka pre kompenzáciu disperzie, rôzne vlnové dĺžky [27].

Laditeľné FBG kompenzátory sú nasadzované predovšetkým na optické systémy 40 Gbit/s, kde kompenzujú disperziu do dĺžky vlákna až 50 km [27].



Obr. 2.9: DCM kompenzačný modul obsahujúci Braggovskú mriežku [27].

2.5 Meranie chromatickej disperzie

Potreba merania chromatickej disperzie stále nadobúda dôležitosť navzdory faktu, že jej hodnoty možno relatívne presne vypočítať. Medzi hlavné príčiny jej merania patrí:

- Zvyšovanie bitovej rýchlosti, ktoré má za následok výraznejšie ovplyvnenie dosahu spoja vplyvom CD.
- Nasadenie systému DWDM, kedy nás zaujíma hodnota CD v celej šírke použitej spektrálnej oblasti.
- Skúmanie teplotnej závislosti CD vplyvom zvyšovania prenosových rýchlostí.
- V dnešnej dobe pozostávajú optické trasy z mnohých typov vlákien rôznych výrobcov, ktoré prevádzkujú (prevádzkovali) odlišní (napr. telekomunikační) operátori. Táto skutočnosť komplikuje výpočet CD daných trás, preto sa často pristupuje na presné stanovenie týchto hodnôt, teda meranie [15].

Metódy merania chromatickej disperzie skúmajú v princípe dobu šírenia optického signálu v požadovanej spektrálnej oblasti na niekoľkých vlnových dĺžkach (aspoň tri vlnové dĺžky). Merané vlnové dĺžky musia byť spektrálne blízko pri sebe. Určenie doby šírenia signálu môže prebiehať

- absolútnou cestou, kedy sa skúma celková doba šírenia každého spektrálneho kanálu samostatne, alebo
- relatívnou cestou, kedy je vyhodnocované diferenciálne oneskorenie medzi jednotlivými kanálmi.

Získaná hodnota t_g vystupuje vo vzťahu pre koeficient CD (2.1), ktorý charakterizuje chromatickú disperziu.

Poznáme tieto základné metódy merania CD:

- Metóda fázového posunu,
- metóda diferenciálneho fázového posunu a
- metóda oneskorenia impulzu v časovej oblasti [19].

Tieto metódy sú všeobecne charakteristické svojou presnosťou, keďže každá z nich vo svojej podstate meria čas a meranie času je jedno z najpresnejších meraní vôbec. Danú presnosť vždy ovplyvňujú parametre meracieho prístroja, stabilita jeho komponentov [15].

2.5.1 Metóda fázového posunu

Metóda fázového posunu¹³ je metódou merania CD vo frekvenčnej oblasti, ktorá je podľa odporúčania ITU-T G.650 stanovená ako referenčný spôsob merania CD

¹³phase-shift method

v optických vláknach. Je tu využitý poznatok, že doba šírenia signálov v optickom vlákne je spätá s fázovým posunom signálov vo frekvenčnej oblasti [15, 19].

V tejto metóde sa používa modulovaný zdroj žiarenia generujúci modulovaný signál pozostávajúci z niekoľkých vlnových dĺžok. Signál po priechode optickým vláknom zachytí prijímač schopný detekovať zmenu fáze, často vektorvoltmeter. Fáza signálu detekovaná na výstupe sa porovná s referenčnou hodnotou fáze vysieláča. Ich rozdiel určí zmenu fáze signálu vplyvom priechodu optickou trasou, z čoho sa určí oneskorenie a to dáva predstavu o disperzii.

Nevýhoda tejto metódy spočíva v nutnosti použitia referenčného vlákna v optickom kábli, po ktorom sa prenáša informácia o vstupnej fáze signálu z vysieláča priamo k prijímaču [1, 15].

2.5.2 Metóda diferenciálneho fázového posunu

Táto metóda je častejšie využívaná v praxi a meria sa fázový rozdiel medzi signálmi s rôznymi vlnovými dĺžkami. Vzájomné oneskorenie vlnových dĺžok je spôsobené výhradne chromatickou disperziou. Výhoda metódy spočíva v tom, že nie je bezpodmienečne nutné použiť referenčné vlákno tak, ako tomu bolo pri metóde fázového posunu.

Ak sa použije i komunikačné vlákno, potom sa po ňom prenášajú informácie z výstupu na vstup, kedy sa dá nastaviť na vysieláči vlnová dĺžka alebo modulačný kmitočet [15].

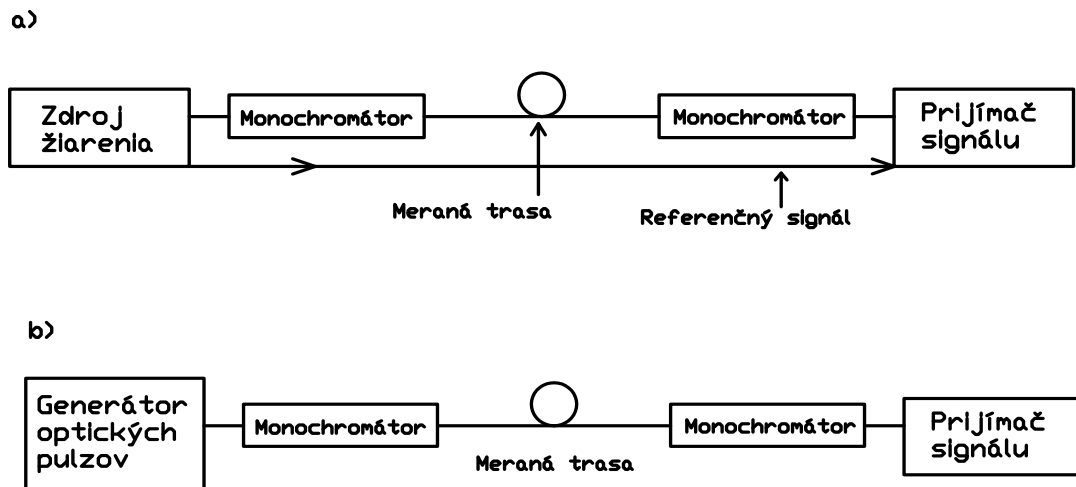
2.5.3 Metóda oneskorených impulzov v časovej oblasti

Do optickej trasy sú vysielané impulzy rôznych vlnových dĺžok, za sebou a v presných rozostupoch. Porovnaním rozostupov na výstupe a vstupe sa určí oneskorenie spôsobené vplyvom CD. Presne stanovené rozostupy medzi impulzami sú dôležité najmä preto, že určujú maximálne možné oneskorenie ktoré možno zmerať.

Môže nastať situácia, kedy by bolo oneskorenie impulzu väčšie ako rozostup medzi impulzami. Potom by nastala zámena impulzov a meranie by bolo vyhodnotené ako chybné [1, 15].

Na obr. 2.10 sú uvedené principiálne zapojenia pre metódu fázového posunu a metódu oneskorenia impulzov v časovej oblasti.

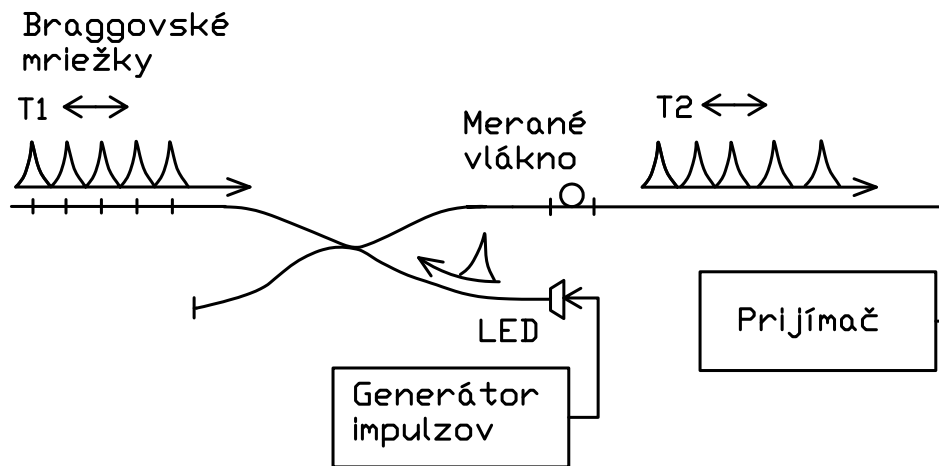
Na obr. 2.11 je znázornené zapojenie metódy oneskorených impulzov, kde ako monochromátor slúži kaskáda Braggovských mriežok. Každá z týchto mriežok odráža žiarenie s inou vlnovou dĺžkou, medzi mriežkami sú úseky optického vlákna. Používa sa len merané vlákno, pretože potreba využitia referenčného vlákna odpadla z dôvodu známych rozostupov impulzov na vstupe optického vlákna.



Obr. 2.10: a) Metóda fázového posunu, b) metóda oneskorených impulzov. [1].

Funkcia Generátoru optického žiarenia je modulovanie optického žiarenia zdroja (napr. LED dióda). Tá selektuje vybrané vlnové dĺžky z prichádzajúceho optického impulzu a odráža ich naspäť do meraného vlákna.

Pri presnom vyhodnotení výsledku sa môže objaviť problém, ktorý spočíva vo vlastnom rozťahovaní impulzov v čase, čo môže skresliť predstavu o vzájomnom posune impulzov. Presnosť merania tejto metódy je z tohto dôvodu taktiež závislá na veľkosti meranej chromatickej disperzie [1, 15].



Obr. 2.11: Metóda oneskorených impulzov s využitím kaskády Braggovských mriežok [1].

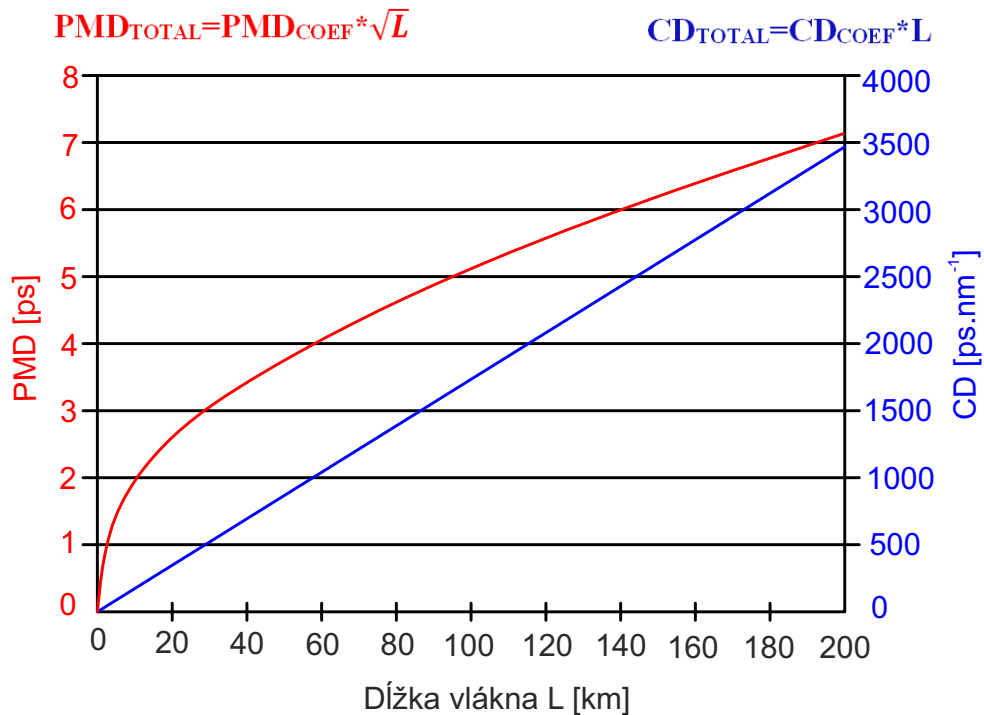
2.5.4 Využitie metódy OTDR

Metóda optickej reflektometrie OTDR sa štandardne využíva na meranie útlmu optických trás pomocou spätného rozptylu. OTDR sa dá v istej modifikácii použiť aj pre merania CD, kedy meranie prebieha na viacerých vlnových dĺžkach na rozdiel od štandardnej OTDR.

Klasicky sa meria na štyroch vlnových dĺžkach a cieľom je meranie v celom používanom spektrálnom pásme určenom pre prenos. Nevýhoda metódy môže spočívať v matematickej aproximácii nameraných hodnôt, čo v konečnom dôsledku ovplyvní presnosť stanovenia hodnôt CD. Výhodou môže byť súčasné spektrálne meranie CD i útlmu optickej trasy [15].

3 POLARIZAČNÁ VIDOVÁ DISPERZIA

Polarizačná vidová (módová) disperzia je ďalším faktorom, ktorý ovplyvňuje kvalitu prenosu signálu optickým vláknom. Na rozdiel od disperzie chromatickej, PMD je jav relatívne nestály. Zatiaľ čo CD môžeme takmer vždy ovplyvniť už pri výrobe vlákna, na PMD má vplyv mnoho ďalších okolností, ktoré budú ďalej popísané. Na obr. 3.1 je znázornený odlišný priebeh CD a PMD v závislosti na dĺžke vlákna.



Obr. 3.1: Priebeh CD a PMD v závislosti na dĺžke vlákna [8].

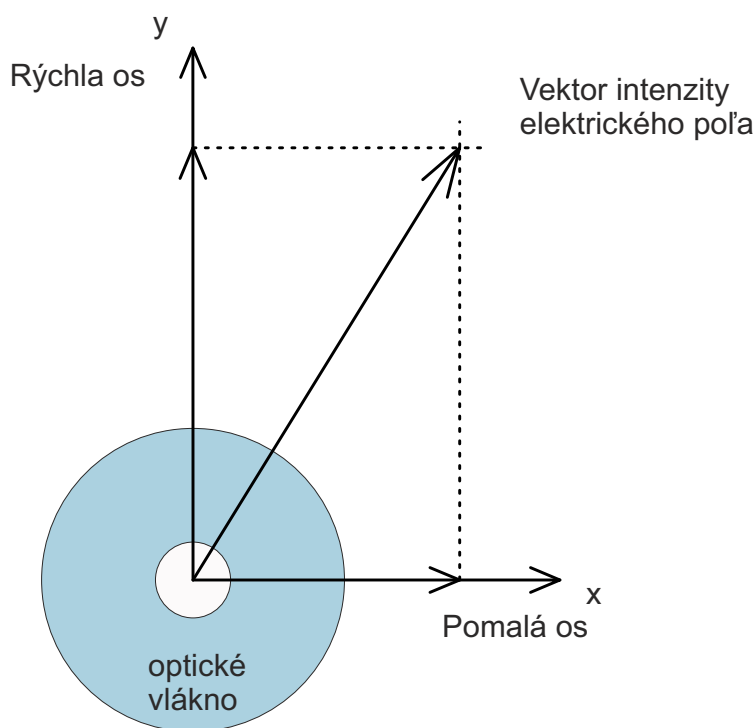
3.1 Fyzikálna podstata vzniku PMD – polarizácia

Základnou príčinou vzniku polarizačných vidov je dvojlom, ktorý vzniká v materiáloch z ktorých sú vyrábané optické vlákna. Rýchla a pomalá os sú tzv. „hlavné stavy polarizácie“ (Principal State of Polarisation) [7].

Polarizácia je dôležitou oblasťou vo fyzike svetla a dá sa definovať ako konkrétny smer oscilácií elektrického poľa. Vychádzame z poznatku, že intenzita elektrického poľa popisujúca elektrické pole je vektor. Elektrické pole osciluje s presnou frekvenciou

v prípade ideálneho monochromatického svetla, no z dôvodu dvoch nezávislých vzájomne kolmých oscilácií treba vyšetriť možné výsledné stavy.

Svetlo je **lineárne polarizované** vtedy, keď vektor intenzity elektrického poľa osciluje pozdĺž priamky. **Eliptická polarizácia** nastáva v prípade pohybu vektoru intenzity elektrického poľa po elipse. Podobne dostávame i **kruhovú polarizáciu**. Lineárna polarizácia vznikne v prípade, keď sú kolmé kmity navzájom vo fáze. Ak nie sú vo fáze, nastanú ostatné prípady [11].



Obr. 3.2: Znážornenie vektoru intenzity elektrického poľa [7].

Pre kruhovú polarizáciu definujeme tzv. pravotočivú i ľavotočivú polarizáciu, v závislosti na smere pohybu vektoru intenzity elektrického poľa.

Svetlo označujeme za **nepolarizované** ak nie je dokonale monochromatické, alebo ak pomer fází x a y nie je ustálený. To spôsobí neustálu zmenu polarizácie, čiže vektor intenzity kmitá určitú dobu v jednom a potom zasa druhom smere. V našom prípade však uvažujeme už spomínaný dvojlom. Niektoré látky sú dvojlomné, čo znamená, že majú iný index lomu pre lineárne polarizované svetlo v jednom smere a iný index lomu pre smer druhý [11].

3.2 Popis polarizácie optickej vlny pomocou Jonesovho vektoru.

Pre ideálne prostredie, v ktorom sa vlna šíri, platí:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \left(\dot{\vec{A}}_x + \dot{\vec{A}}_y \right) e^{-jkz} e^{j\omega t} = \left(\dot{A}_x \vec{x}_0 + \dot{A}_y \vec{y}_0 \right) e^{-jkz} e^{j\omega t}, \quad (3.1)$$

z toho:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} \left\{ \dot{\vec{E}}(\vec{r}, t) \right\}, \quad (3.2)$$

kde:

- \vec{r} ... polohový vektor,
- t ... čas,
- $\dot{\vec{E}}(\vec{r}, t)$... komplexný vektor intenzity elektrického poľa,
- $\dot{A}_x = a_x e^{j\varphi_x}$ a $\dot{A}_y = a_y e^{j\varphi_y}$... komplexné súradnice intenzity poľa,
- $e^{j\varphi_x}$ a $e^{j\varphi_y}$... konštantné fázové členy vln \vec{E}_x a \vec{E}_y (zložky vektoru \vec{E}).

Obecne platí $a_x \neq a_y$ a $\varphi_x \neq \varphi_y$, pričom ide o elipticky polarizovanú vlnu.

Z nasledujúceho zápisu sústavy rovníc možno pozorovať lineárne závislosti:

$$\begin{aligned} \dot{A}_{2x} &= \dot{T}_{11} \dot{A}_{1x} + \dot{T}_{12} \dot{A}_{1y} \\ \dot{A}_{2y} &= \dot{T}_{21} \dot{A}_{1x} + \dot{T}_{22} \dot{A}_{1y}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

kde:

- $\dot{T}_{11}, \dot{T}_{12}, \dot{T}_{21}$ a \dot{T}_{22} ... konštanty optického systému,
- $\dot{A}_{1x}, \dot{A}_{1y}$... komplexné súradnice intenzity poľa na vstupe optického systému,
- $\dot{A}_{2x}, \dot{A}_{2y}$... komplexné súradnice intenzity poľa na výstupe optického systému [12].

Ako výhodné sa ukazuje zapísať sústavu rovníc (3.3) maticovým zápisom:

$$\begin{pmatrix} \dot{A}_{2x} \\ \dot{A}_{2y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{T}_{11} & \dot{T}_{12} \\ \dot{T}_{21} & \dot{T}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{A}_{1x} \\ \dot{A}_{1y} \end{pmatrix}. \quad (3.4)$$

Maticový zápis (3.4) možno zjednodušiť na tvar:

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{T} \mathbf{J}_1, \quad (3.5)$$

kde:

- \mathbf{T} ... predstavuje tzv. Jonesovu maticu,
- obecne matica typu $\begin{pmatrix} \dot{A}_x \\ \dot{A}_y \end{pmatrix} = \mathbf{J}$... predstavuje tzv. Jonesov vektor.

Na obr. 3.3 je znázornený prehľad základných tvarov Jonesovho vektoru, ktorý definuje stavy polarizácie optickej vlny. Názvy stavov polarizácie vyplývajú z profilu pohybu koncového bodu vektora \vec{E} , ktorý je následne premietnutý do roviny (x,y).

Poznámka:

Pomer $\frac{a_y}{a_x}$ a rozdiel $\varphi_y - \varphi_x$ definujú orientáciu elipsy a jej tvar, poukazujú na obecné eliptický charakter polarizácie optickej vlny.

lineárne polarizovaná vlna v smere osi x, (os z smeruje k pozorovateľovi)	$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	
lineárne polarizovaná vlna v smere osi y, vektory $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ a $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ tvoria bázu pre vyjadrenie ľubovoľnej lineárnej polarizácie	$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	
lineárne polarizovaná vlna, zvierajúca s osou x uhol θ (x - rýchla os, y - pomalá os)	$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$	
pravotočivo kruhovo polarizovaná vlna	$\mathbf{J} = 1/\sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$	
ľavotočivo kruhovo polarizovaná vlna, vektory $1/\sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$ a $1/\sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$ sú bázou pre vyjadrenie obcej eliptickej polarizácie	$\mathbf{J} = 1/\sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$	

Obr. 3.3: Jonesov vektor a jeho základné tvary [12].

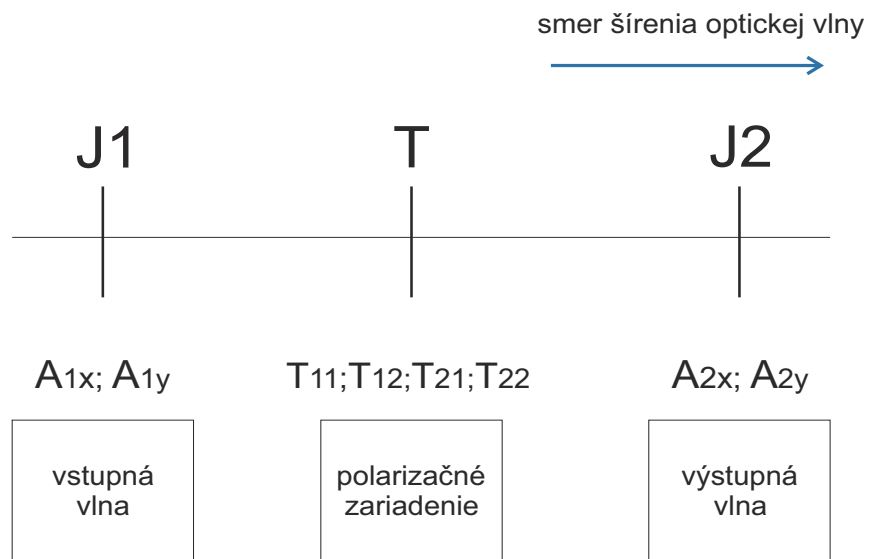
Optický systém obsahujúci polarizačné zariadenie je znázornený na obr. 3.4. Predpokladá sa, že polarizačné zariadenie je lineárne a zachováva rovinnú vlnu, no mení jej polarizáciu.

Konštanty $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$ vystupujúce v Jonesovej matici charakterizujú dané polarizačné zariadenie a tým pádom aj optický systém. Ich vhodnou voľbou prispôbujeme polarizáciu optickej vlny do požadovanej podoby na výstup systému.

Ak je v optickom systéme použitých viacero polarizačných zariadení (situáciu znázorňuje obr. 3.5), potom výsledný popis optickej sústavy možno vyjadriť maticovým súčynom, pri **zachovaní poradia**:

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_1 \mathbf{J}_1. \quad (3.6)$$

Stupeň polarizácie definuje štatistická optika [12].



Obr. 3.4: Maticová reprezentácia polarizačného zariadenia [12].



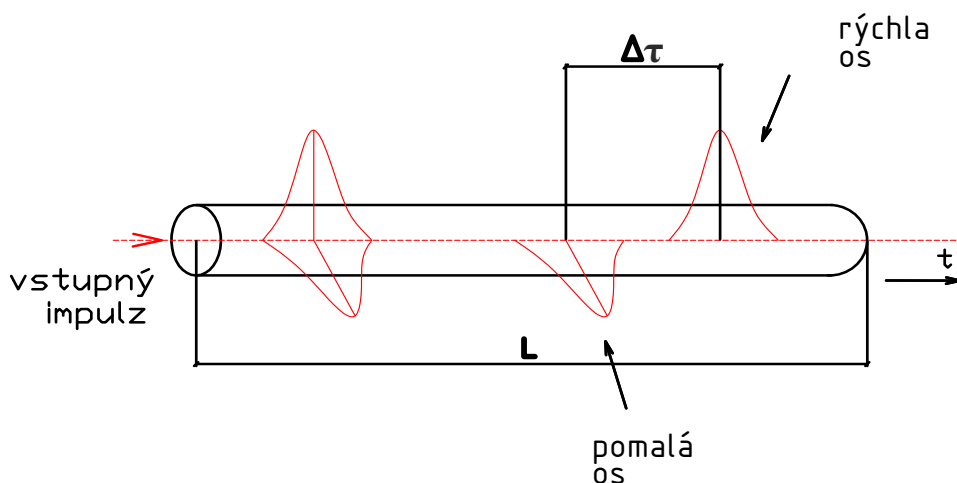
Obr. 3.5: Použitie dvoch polarizačných zariadení v optickom systéme [12].

3.3 Charakteristika PMD

Potreba merania PMD vznikla pri zvyšovaní prenosových rýchlostí, kedy sa už nad $(2,5 - 10) \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ stáva tento jav citelným obzvlášť po vykompenzovaní CD. Energia šíriaca sa v jednojovom optickom vlákne je rozdelená do dvoch vzájomne na seba kolmých polarizačných zložiek (vidov).

V ideálnom homogénnom vlákne presných geometrických rozmerov sa tieto vidy šíria rovnakou rýchlosťou a sú tzv. degenerované. V reálnom prípade sa pôsobením rôznych podmienok odstráni degenerácia vidov vplyvom dvojlomu, ktoré sa potom šíria rôznymi rýchlosťami a vzniká PMD [19].

Na obr. 3.6 je znázornené vzájomné oneskorenie polarizačných vidov $\Delta\tau$.



Obr. 3.6: Šírenie polarizačných vidov optickým vláknom [1].

Jav PMD je ovplyvniteľný pri výrobe optického vlákna, montáži i samotnej prevádzke vlákna a je závislý na mnohých faktoroch, viď obr. 3.7.

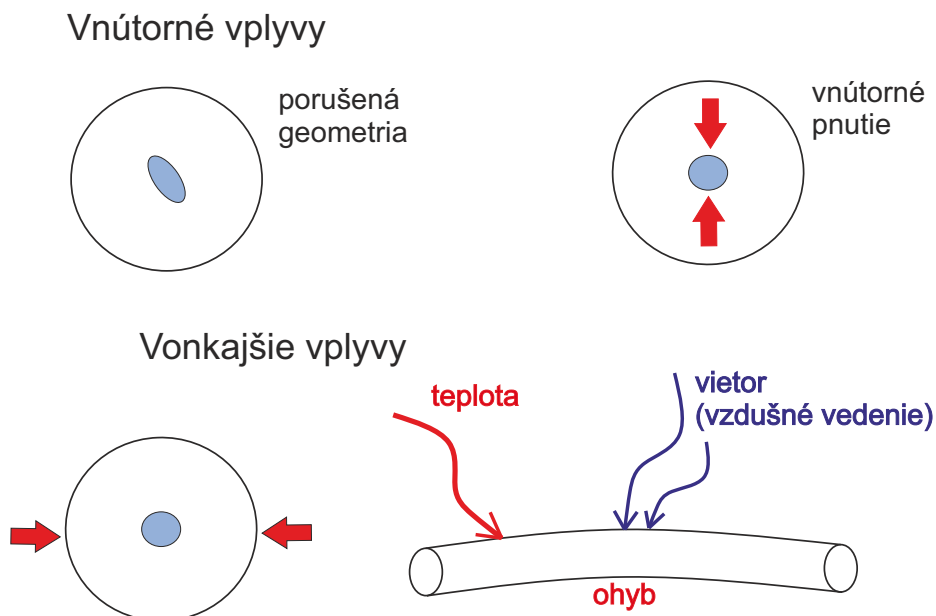
Sú to napríklad vnútorné okolnosti:

- Nedokonalá kruhová symetria optického vlákna,
- vnútorné pnutie, tlak na jadro vlákna. . .

Medzi vonkajšie okolnosti môžeme začleniť:

- Pôsobenie vonkajšieho tlaku spôsobujúceho ohyb vplyvom zlého umiestnenia optického kábla,
- poveternostné podmienky (vzdušné vedenie), zmena teploty a iné.

Okamžitá hodnota PMD sa dá ovplyvniť aj samotným preladením zdroja optického žiarenia [1, 10].



Obr. 3.7: Okolnosti pôsobiace na hodnoty PMD [10].

Podobne ako je chromatická disperzia vyjadrená koeficientom, tak i PMD je vyjadrená koeficientom PMD. Rozlišujeme definičné vzťahy pre krátke trasy (asi do 10 km) a pre veľké vzdialenosti. Na krátkych trasách sa PMD javí približne lineárna

$$D_{\text{PMD}}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{l}, \quad [\text{ps} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (3.7)$$

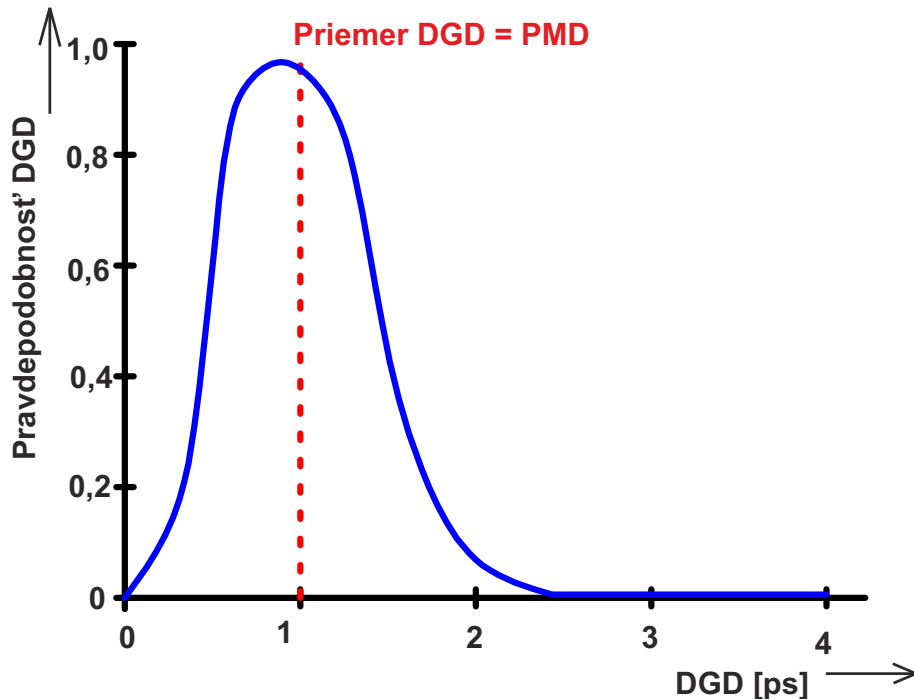
kde l je dĺžka trasy a $\Delta\tau$ je oneskorenie signálu v optickom vlákne. Pre veľké vzdialenosti je šírenie nelineárne a platí

$$D_{\text{PMD}}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}}. \quad [\text{ps} \cdot (\sqrt{\text{km}})^{-1}] [1] \quad (3.8)$$

3.4 DGD, vzťah s PMD

Dôležitý parameter je DGD¹. Diferenciálne skupinové oneskorenie sa mení v čase a dá sa popísať ako časový rozostup rýchlej a pomalej osi $\Delta\tau$ -naznačené na obr. 3.6. DGD sa uvádza v (ps) a je závislé na vlnovej dĺžke i ďalších parametroch, ako sú napríklad polarizácia zdroja žiarenia a okamžik merania [10].

Spriemerovaním hodnôt DGD získaných v čase dostaneme hodnotu PMD. Pretože PMD i okamžitá hodnota DGD sú prakticky náhodné, nemožno ich použiť na presné kalkulácie. Riešenie vychádza z faktu, kedy hodnoty DGD kolíšu v oblasti priemernej hodnoty, čo popisuje Maxwellovo štatistické rozloženie hodnôt DGD [7, 10]. Naznačené na obr. 3.8. Na obr. 3.9 je znázornená závislosť DGD na vlnovej dĺžke, čoho možno využiť v snahe o prípadnú kompenzáciu.

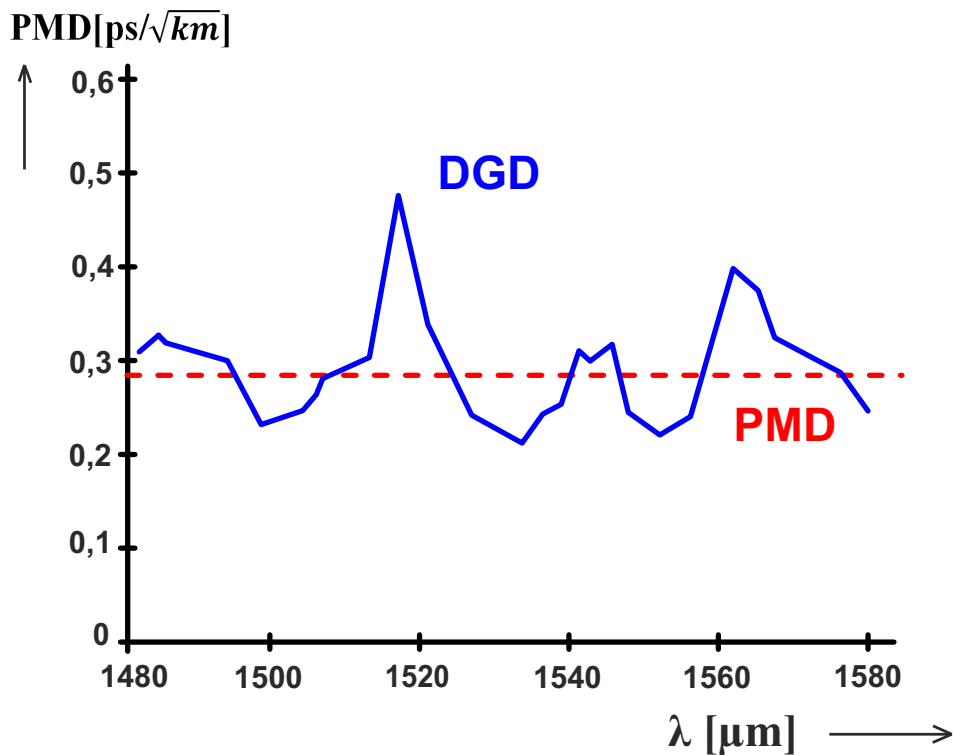


Obr. 3.8: Maxwellove rozdelenie hodnôt DGD [7, 10].

Ako bolo spomenuté, ide o štatistiku, čiže je možné len predpovedať pravdepodobnosť dosiahnutia určitých hodnôt DGD.

Matematický prepočet medzi DGD a PMD stanovený normou ITU-T G.959-1 zaisťuje hranicu, aby v 99,9954% nebol problém s PMD pri prenose. Potom platí

¹Differential Group Delay



Obr. 3.9: Možný priebeh DGD v závislosti na vlnovej dĺžke.

vyššie uvedené Maxwelllove rozdelenie. Uvedené informácie platia pre SDH prenosy. Prepočetný vzťah:

$$\max \text{DGD} [\text{ps}] = 3 \cdot \text{PMD} [\text{ps}]. \quad (3.9)$$

Pre prenos 10 Gbit Ethernet stanovuje odporúčanie IEEE-802.3ae maximálny limit DGD na 19 ps s 99,999987% pravdepodobnosťou, že PMD nespôsobí problémy s prenosom. V takom prípade platí vzťah

$$\max \text{DGD} [\text{ps}] = 3,73 \cdot \text{PMD} [\text{ps}]. \quad (3.10)$$

Potreba stanovenia presnej hranice pre DGD pramení z bezpečnostných nárokov bánk, podnikov a mnohých ďalších inštitúcií, kde by problémy s DGD (PMD) mohli spôsobiť skreslenie dôležitých dát v značnej miere a s fatálnymi následkami [10].

3.5 Limitné hodnoty

V tab. 3.1 sú zhrnuté limitné hodnoty PMD podľa odporúčania ITU-T G.697 pre rôzne prenosové rýchlosti a systémy.

Tab. 3.1: Limitné hodnoty polarizačnej módovej disperzie [1].

Prenosová rýchlosť Gbit·s ⁻¹	0,155	0,622	2,500	10,000	40,000
SDH	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64	STM-256
doba 1 bitu [ps]	6430,00	1610,00	401,88	100,47	25,12
limit PMD [ps]	640,0	160,0	40,0	10,0	2,5
limit PMD deklarácia 1/10 [ps]	643,00	161,00	40,10	10,00	2,51
PMD _{koef.} na 400 km [ps/√km]	< 32,000	< 8,000	< 2,000	< 0,500	< 0,125

Príklad: Odporúčanie ITU-T G.959-1 stanovuje maximálnu hodnotu DGD 10 Gbit/s (pre STM-64) na 30 ps. Dosadením tejto hodnoty do vzťahu (3.9) dostávame hodnotu PMD, konkrétne 10 ps, čo súhlasí so štvrtým riadkom tab. 3.1.

Hodnoty šírky impulzov, PMD, DGD pri určitých hodnotách bitových rýchlostí sú uvedené spolu v prehľadnej tabuľke 3.2.

Tab. 3.2: Maximálne DGD spolu s PMD a šírkou pulzu pre signál NRZ rôznych rýchlostí [14].

Bitová rýchlosť	Šírka impulzu [ps]	DGD limit [ps]	PMD limit [ps]
2,5 Gbit·s ⁻¹	400	120	40
10 Gbit·s ⁻¹	100	30	10
40 Gbit·s ⁻¹	25	7,5	2,5

Hodnoty DGD sú v tab. 3.2 uvedené s ohľadom na 1 dB penalty, čiže rozťahnutie impulzu spôsobí úbytok 1 dB výkonovej úrovne na prijímacej strane optickej trasy [14].

Tab. 3.3 združuje garantované hodnoty polarizačnej módovej disperzie pre určité druhy vlákien vzťahnuté na √km, podľa odporúčania ITU.

V nasledujúcej tab. 3.4 sú uvedené limitné hodnoty DGD pre SDH prenosy, konkrétne **STM-64**, podľa odporúčania ITU-T G.691. V tabuľke sa takisto nachádzajú limity pre chromatickú disperziu.

Tab. 3.3: Garantované hodnoty PMD pre rôzne vlákna, ITU [21].

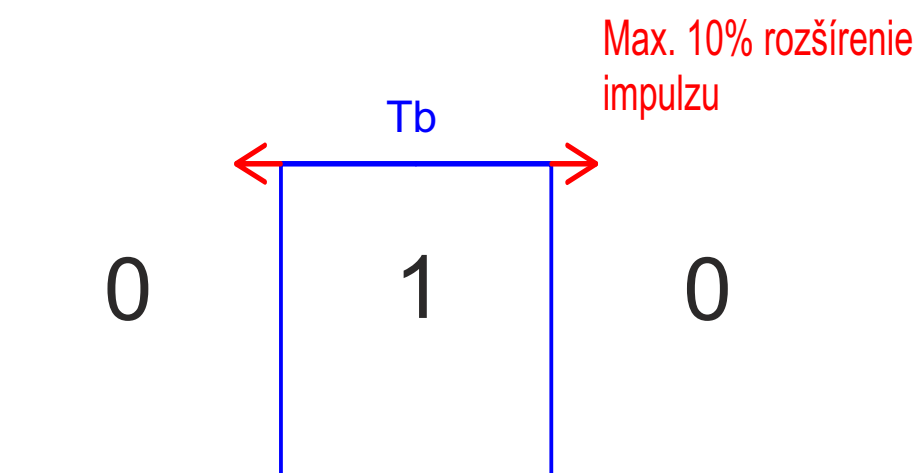
Druh vlákna podľa ITU-T	Hodnota PMD
G.652.A, C	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
G.652.B, D	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
G.653.A, B	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
G.654.A, B, C	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
G.655.A, B	$\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
G.655.C	$\leq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

Tab. 3.4: Limitné hodnoty pre STM-64 prenosy podľa odporúčania ITU-T G.691 [22].

Signál NRZ – vlákna " Intra Office "				
Označenie G.691	I-64.1r	I-64.1	I-64.2r	I-64.2
Celková vzdialenosť [km]-G.652	0,6	2	2	25
Nominálna λ [nm]	1310	1310	1550	1550
Rozsah λ [nm] -pásmo C	1260-1360	1290-1330	1530-1565	1530-1565
Max. CD [ps/nm]	3,8	6,6	40	500
Max. DGD [ps]	30	30	30	30
Signál NRZ – vlákna "Short Haul"(krátke vlákno)				
Označenie G.691	S-64.1		S-64.2	
Celková vzdialenosť [km]-G.652	20		40	
Nominálna λ [nm]	1310		1550	
Rozsah λ [nm] -pásmo C	1290-1330		1530-1565	
Max. CD [ps/nm]	70		800	
Max. DGD [ps]	30		30	
Signál NRZ	Long Haul	Long Haul	Very Long Haul	
Označenie G.691	L-64.2	L-64.2	V-64.2	
Celková vzdialenosť [km]-G.652	40	80	120	
Nominálna λ [nm]	1310	1550	1550	
Rozsah λ [nm] -pásmo C	1290-1320	1530-1565	1530-1565	
Max. CD [ps/nm]	130	1600	2400	
Max. DGD [ps]	30	30	30	

3.6 Pôsobenie vplyvu PMD na rozšírenie impulzu

Polarizačná módová disperzia resp. DGD vplýva v značnej miere na rozšírenie impulzu počas jeho priechodu optickým vláknom. V tab. 3.1 je stanovená limitná hodnota PMD podľa odporúčania ITU, ktorá zodpovedá desatine doby trvania jedného signálového prvku (bitu) pre rôzne prenosové rýchlosti.



Obr. 3.10: Maximálne prípustné rozšírenie impulzu signálového prvku vplyvom PMD [21].

Z obr. 3.10 vyplýva vzťah pre maximálne prípustné rozšírenie impulzu

$$\Delta\tau_{\max} = 0,1 \cdot T_b, \quad [\text{ps}] \quad (3.11)$$

kde:

- $\Delta\tau_{\max}$... maximálne rozšírenie pulzu (DGD),
- T_b ... doba trvania jedného bitu.

Dobu trvania jedného bitu môžeme definovať vzťahom

$$T_b = \frac{1}{B}, \quad [\text{s}] \quad (3.12)$$

kde:

- B ... bitová rýchlosť.

V rovnici (3.11) dosadením zo vzťahu (3.8) za $\Delta\tau_{\max}$ a zo vzťahu (3.12) za T_b dostaneme

$$D_{\text{PMD}} \cdot \sqrt{L_{\max}} \leq \frac{0,1}{B}, \quad [\text{ps}] \quad (3.13)$$

kde:

- D_{PMD} (PMD_{koef}) ... koeficient PMD,
- L_{\max} ... maximálna dĺžka optického vlákna .

Rovnica (3.16) predstavuje tvar, z ktorého úpravou dostaneme vzťah pre koeficient PMD závislom na bitovej rýchlosti B aj maximálnej dĺžke vlákna L_{\max} :

$$D_{\text{PMD}} \leq \sqrt{\frac{0,01}{B^2 \cdot L_{\max}}}, \quad [\text{ps} \cdot (\sqrt{\text{km}})^{-1}] \quad (3.14)$$

alebo si môžeme vyjadriť vzťah pre maximálnu dĺžku vlákna L_{\max} :

$$L_{\max} \leq \frac{0,01}{B^2 \cdot D_{\text{PMD}}^2}. \quad [\text{km}] \quad (3.15)$$

V tejto kapitole bolo čerpané zo zdroja [21].

3.6.1 Vplyv PMD na chybovosť optického kanálu

Polarizačná módová disperzia vplyva rôzne na rôzne typy modulačných formátov, medzi používané patria napr.:

- ASK ... amplitúdová modulácia známa aj ako OOK (On-off keying),
- DBPSK ... diferenčná dvojstavová fázová modulácia, či
- DQPSK ... diferenčná kvadratúrna fázová modulácia,

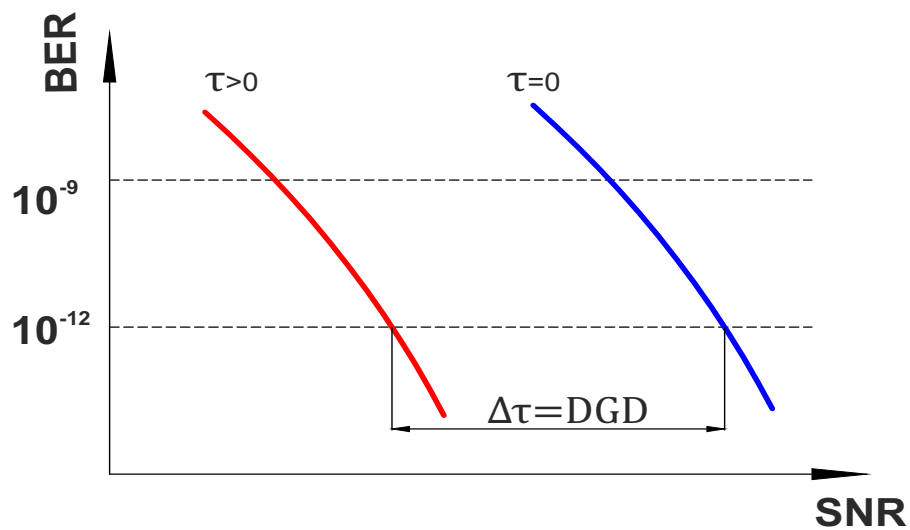
v režimoch NRZ (bez návratu k nule), či RZ (návrat k nule).

Parametry charakterizujúce chybovosť optického kanálu sú bitová chybovosť BER a odstup signál–šum SNR, ktoré určuje diagram oka. So zvyšujúcim sa odstupom užitočného signálu od šumu sa znižuje BER a prenos je kvalitnejší. Zvýšením DGD sa SNR znižuje a BER narastá, čo vedie k chybovosti prenosu informácií optickým kanálom a prijímač nie je schopný vyhodnotiť správne prijímané dáta. Vzájomný vzťah parametrov BER a SNR je znázornený na obr. 3.11 a je popísaný vzťahom

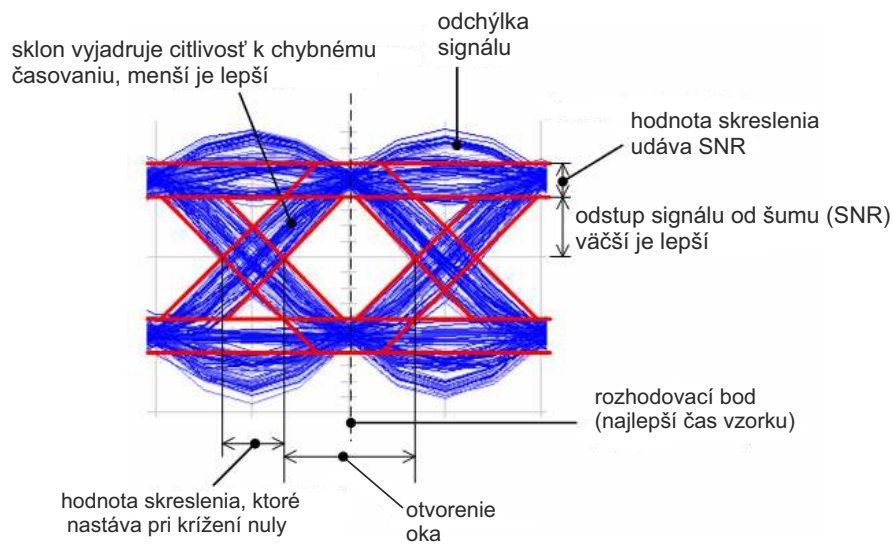
$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\text{SNR}}{2}}. \quad [-] \quad [21] \quad (3.16)$$

Diagram oka reaguje na túto situáciu poklesom ako v horizontálnom, tak i vo vertikálnom smere, uzatvára sa.

Na obr. 3.12 je znázornený diagram oka spolu s dôležitými parametrami, ktoré určuje.



Obr. 3.11: Závislosť parametru BER na SNR [21].

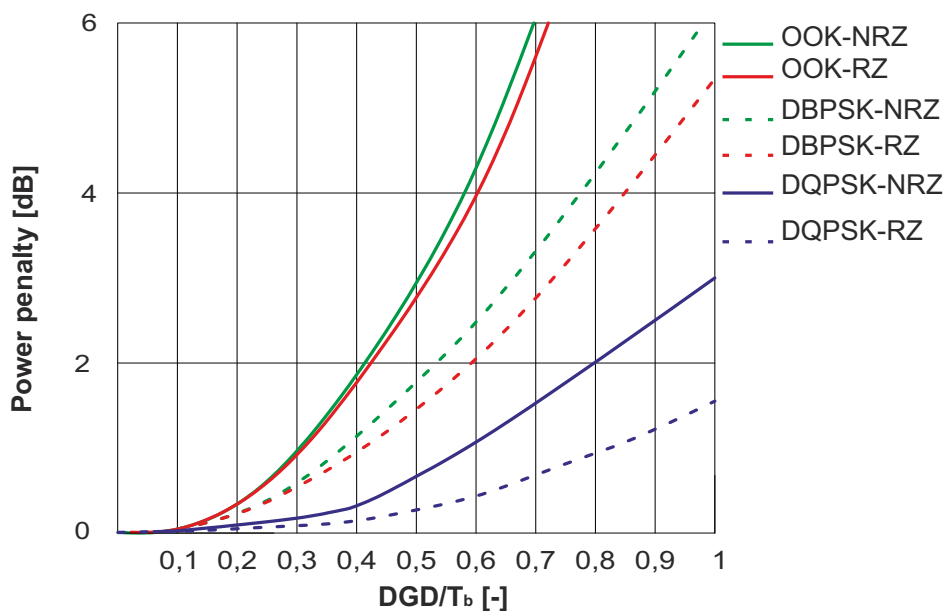


Obr. 3.12: Diagram oka, SNR – prevzaté z [21].

Pokles diagramu oka charakterizuje parameter power penalty, ktorý je vzťahnutý k dĺžke bitového intervalu T_b . Pomer hodnoty DGD a T_b sa nazýva **normované**

diferenčné skupinové oneskorenie.

Simulácia podľa [26] popisuje závislosť power penalty na DGD pre rôzne modulácie, grafické zobrazenie na obr. 3.13.



Obr. 3.13: Závislosť power penalty na DGD pre rôzne druhy modulácií [26].

Prenosová rýchlosť bola stanovená na 40 Gb/s a bitová chybovosť $BER = 10^{-12}$, typ vlákna G.652.D o nízkej hodnote PMD ($0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$) a dĺžke vlákna 1000 km pre dosiahnutie vyšších hodnôt DGD.

Do úvahy sa nebralo skreslenie spôsobené útlmom alebo chromatickou disperziou, len skreslenie vyvolané vplyvom polarizačnej vidovej disperzie. Podľa normy ITU je pre prenosovú rýchlosť 40 Gb/s maximálna hodnota DGD 2,5 ps. Ak sa táto hodnota DGD prekročí, diagram oka sa zatvára a prenos neprebíha.

Z obr. 3.13 vidno, že najvhodnejšie modulácie z hľadiska tolerancie PMD sú DQPSK-NRZ a DQPSK-RZ. Ako ich ďalšiu výhodu možno označiť ich nasadenie na veľké prenosové vzdialenosti. S tým ale prichádza nevýhoda vo vysokých nákladoch a zložitosti realizácie.

Na krátke vzdialenosti možno nasadiť modulácie DBPSK-NRZ a OOK-NRZ, sú charakteristické nízkou toleranciou PMD, no jednoduchosť ich realizácie a cena sú výhodou.

Istý kompromis medzi vzdialenosťou, cenou a zložitosťou realizácie predstavujú modulácie DBPSK-RZ a OOK-RZ. V tejto kapitole bolo čerpané z [21, 26].

3.6.2 Znižovanie vplyvu PMD

Polarizačnú módovú disperziu nemožno kompenzovať pasívnymi kompenzačnými prvkami ako chromatickú disperziu, pretože je to jav značne náhodný a časovo premenný. PMD teda nie je možné kompletne odstrániť, ale dá sa znížiť jej hodnota na únosnú mieru. Toho sa dá dosiahnuť použitím aktívnych kompenzátorov, ktoré vyhodnocujú stavy polarizácie vo vlákne a podľa toho upravujú svoju činnosť.

Možné spôsoby zníženia vplyvu PMD sú:

- Zaradenie regenerátorov (opakovačov) do optickej trasy zariadi detekovanie signálu ešte pred rizikovým úsekom z hľadiska PMD. Táto metóda so sebou prináša i nevýhody hlavne pri využití multiplexných systémov, a preto nebýva používaná často.
- Použitie vlnového multiplexu znižuje hodnotu PMD už zo svojej podstaty, kedy sa kapacita jedného kanálu prerozdelení medzi viacero kanálov. Zníži prenosovú rýchlosť na kanál. Nižšia prenosová rýchlosť spôsobí menšie PMD. Je len na uvážení prevádzkovateľa optickej siete ekonomická stránka tejto varianty prenosu.
- Prenos na inej vlnovej dĺžke je variantou najekonomickejšou, no nemusí byť dosiahnutá požadovaná hodnota PMD.
- Ďalšia možnosť istej kompenzácie PMD je výber takých vlákien optického kábla, ktoré majú garantovanú hodnotu PMD (viď tab. 3.3), alebo najvýhodnejších vlákien z hľadiska prenosu. Postupným skúšaním sa určia vhodné vlákna, ktoré sa použijú pre prenos. Táto metóda sa kombinuje často s metódou zmeny vlnovej dĺžky a nemusí tak prísť k výmene úseku optickej trasy.
- Výmena optickej trasy, alebo úseku optickej trasy patrí k nákladným a krajným riešeniam. Prístupuje sa k tejto variante v prípade poškodených alebo starých vlákien obzvlášť tam, kde sa vyžaduje striktne spoľahlivý prenos (banky, podniky...). Táto metóda je výhodná pri využití zafukovania či zaťahovania vlákien, kedy sú náklady na výmenu nižšie.

V tejto kapitole bolo čerpané zo zdrojov [1, 7].

3.7 Metódy merania PMD

Ako už bolo spomenuté v úvode do problematiky polarizačnej módovej disperzie, po vykompenzovaní chromatickej disperzie sa môže práve PMD stať hlavným faktorom obmedzujúcim prenosy na veľké vzdialenosti či vysokorýchlostné prenosy. Keďže hodnota PMD sa mení aj v dôsledku mechanického pôsobenia, je potrebné stále

sledovať jej veľkosť počas všetkých etáp existencie optickej trasy (výroba, pokládka, prevádzka...)[19]. Poznáme niekoľko možných postupov merania PMD.

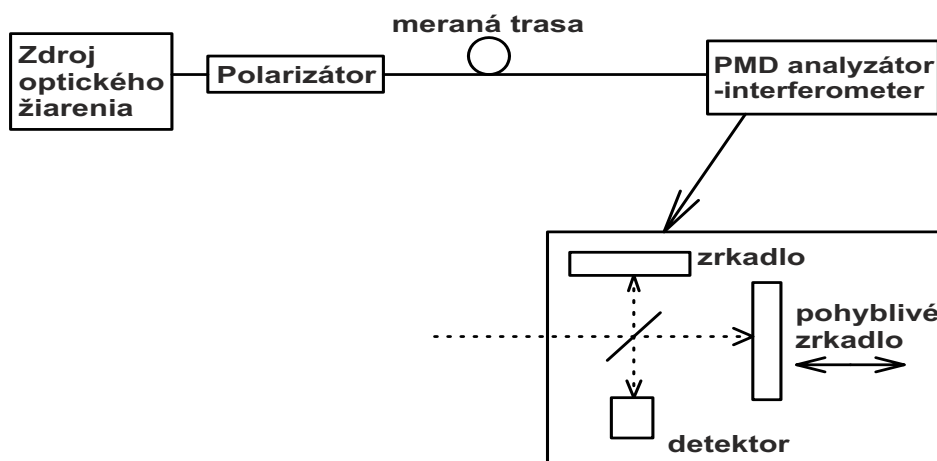
3.7.1 Tradičná interferometrická metóda – TINTY

Interferometrická metóda (INTY) je veľmi používaná v praxi a princíp jej tradičnej varianty TINTY² je v interferencii³ nízkokoharentného⁴ optického žiarenia [1].

Na vstupe optickej trasy je do vlákna naviazané lineárne polarizované optické žiarenie so spojitým, širokým spektrom. Výstup trasy je vybavený PMD analyzátorom, ktorý obsahuje interferometer (napr. Michelsonov interferometer).

Interferometer rozdelí žiarenie do dvoch samostatných vetiev, pričom jedna z nich obsahuje statické, pevné zrkadlo a druhá pohyblivé zrkadlo. Kľúčová je činnosť vetvy s pohyblivým zrkadlom, ktorého posun ovplyvňuje fázový rozdiel medzi signálmi oboch vetiev. Odrazom od zrkadiel dopadá žiarenie na detektor, kde sa interferenciou získa interferogram, pomocou ktorého sa vyhodnotí oneskorenie vplyvom PMD. Vďaka použitiu širokospektrálneho zdroja žiarenia sa dá PMD vyhodnotiť priamo ako stredná hodnota oneskorenia [24].

Blokové usporiadanie metódy TINTY je znázornené na obr. 3.14, ďalej je na obr. 3.15



Obr. 3.14: Meranie PMD metódou TINTY [19].

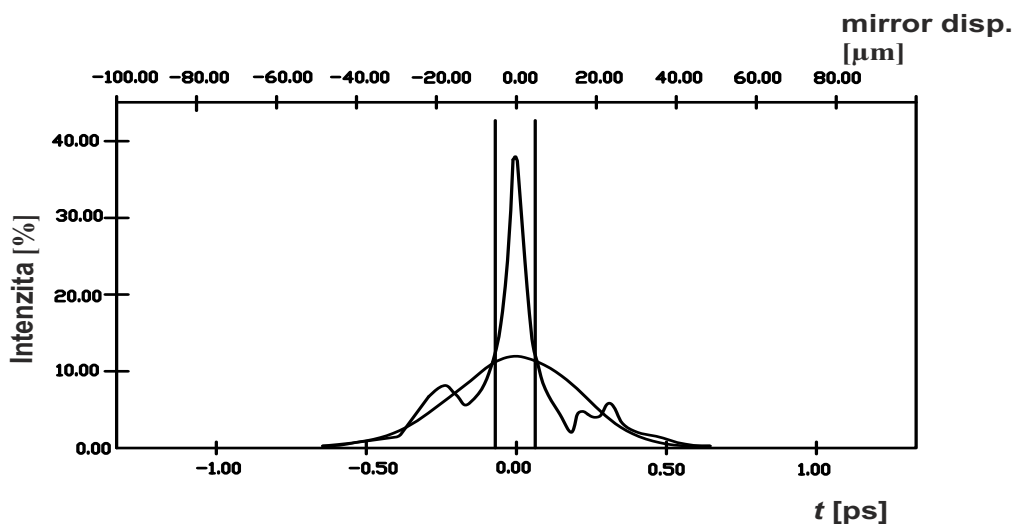
ukážka interferogramu, v ktorom možno pozorovať koreláciu dvoch vzájomne na seba

²Traditional Interferometry Analysis

³interferencia – skladanie vlnenia

⁴koherencia – spektrálna čistota

kolmých polarizačných vidov. Ostrá špička pozorovateľná v námere reprezentuje autokorelačnú funkciu⁵ [1].



Obr. 3.15: Interferogram ako výsledok námeru PMD interferometrickou metódou [1].

3.7.2 Obmedzenia metódy TINTY

Výsledný interferogram je tvorený prakticky z dvoch zložiek.

Sú to:

- vzájomná korelačná funkcia dvoch na seba kolmých polarizačných vidov, z ktorej sa vyhodnocuje PMD a
- autokorelačná funkcia vlastného meracieho signálu závislá na tvare spektra.

Smerodatné výsledky pri určovaní hodnoty PMD dáva zložka vzájomnej korelácie vidov (tzv. cross-correlation). Autokorelačná zložka interferogramu môže spôsobiť obmedzenia metódy TINTY [24].

Použitý zdroj žiarenia ako i spektrálne závislé prvky, napr. EDFA vláknové zosilňovače či add-drop multiplexery a iné ovplyvňujú tvar spektra meracieho signálu, a to určuje šírku a tvar autokorelačnej špičky. Zámerom je vyhladenie tejto špičky a jej maximálne zúženie. K danému cieľu je potreba dodržať dve podmienky:

- Použitie takého zdroja žiarenia, ktorý sa svojím spektrálnym priebehom čo najviac blíži k tvaru Gaussovej krivky, ktorou sa interferogram prekladá.

⁵Autokorelácia je matematická operácia, kedy sa funkcia s časovým oneskorením násobí tou istou funkciou bez časového oneskorenia [19].

- Druhá podmienka stanovuje požiadavky na optickú trasu, aby ani tá neovplyvňovala tvar spektra meracieho signálu vo väčšej miere. Preto sa metóda TINTY neodporúča nasadiť na optickú trasu, ktorá obsahuje napr. už spomínané EDFA zosilňovače a tým pádom je potreba merať každý úsek trasy samostatne.

Pri meraní nízkych hodnôt PMD (napr. ≤ 1 ps) môže autokorelačná špička spôsobiť neistotu merania v desiatkach percent. Ďalší problém ohľadne presnosti vyhodnotenia výsledkov môže spôsobiť i samotné preloženie interferogramu Gaussovou krivkou, ktoré predpokladá medzividovú väzbu nekonečnej veľkosti, čo však nie je reálne pri klasických telekomunikačných vláknoch navzdory medzividovej väzbe silného charakteru [24].

3.7.3 Všeobecná interferometrická metóda – GINTY

Metóda GINTY⁶ je modernejšou variantou metódy TINTY a jej hlavný princíp spočíva v potlačení vplyvu autokorelačnej špičky. Výsledný signál pozostávajúci zo signálov prichádzajúcich z oboch ramien interferometru je rozdelený polarizačným deličom na dve navzájom kolmé polarizované zložky. Každá zložka dopadá na samostatný detektor, pričom na každom z nich nastáva interferencia. V oboch interferenčných obrazcoch sú zastúpené obe korelačné zložky, ktoré možno matematickými operáciami medzi interferogramami od seba oddeliť [24].

Odčítaním interferogramov získame vzájomnú koreláciu a ich súčtom obdržíme čistú autokoreláciu [1].

Na obr. 3.16 je zobrazené blokové schéma metódy GINTY, kde

- PD... je polarizačný delič a
- D... sú detektory.

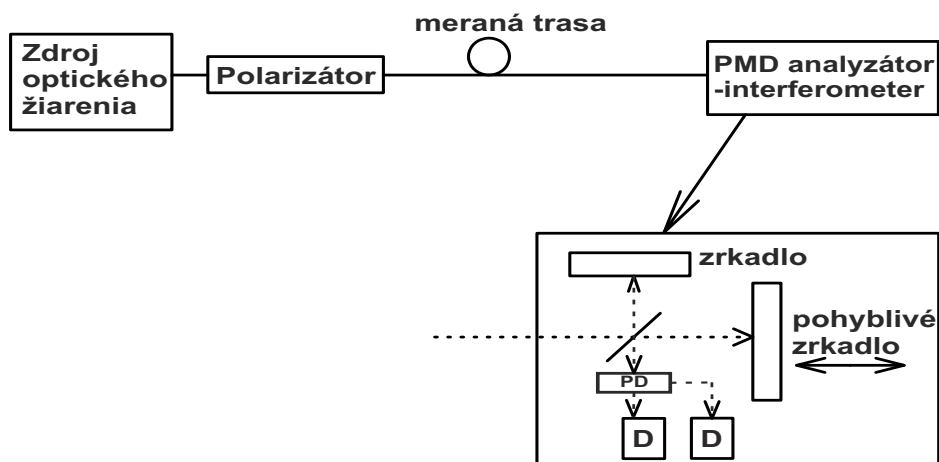
Metóda GINTY poskytuje jednoznačnú výhodu v určení PMD zo vzájomnej korelačnej funkcie, kedy je potlačený vplyv autokorelačnej špičky a nie je nutné ani prekladať interferogram Gaussovou krivkou. PMD sa určí z bodov interferogramu výpočtom strednej kvadratickej hodnoty RMS⁷.

Určité obmedzenie vplyvom autokorelácie však nastáva i pri tejto metóde, pretože pri meraní nízkych hodnôt PMD sú signály zo vzájomne kolmých polarizačných vidov prakticky totožné. Vzájomná korelácia sa potom stáva takmer autokoreláciou. Tento stav však u metódy GINTY môžeme potlačiť. Korekciu hodnoty PMD získame tak, že od hodnoty RMS vypočítanej zo vzájomnej korelačnej funkcie odpočítame RMS vypočítanú z čistej autokorelácie (získanej súčtom interferogramov)[24].

Metóda GINTY umožňuje merať optické trasy s EDFA zosilňovačmi, pričom nie je nutné meranie po úsekoch. Interferometrická metóda sa vo všeobecnosti vyznačuje

⁶General Interferometry Analysis

⁷Root Mean Square



Obr. 3.16: Blokové usporiadanie metódy GINTY [24].

vysokou toleranciou k vibráciám optického vlákna, ďalej rýchlosťou a jednoduchosťou merania. Z uvedeného vyplýva vhodnosť použitia interferometrickej metódy na meraniach v teréne.

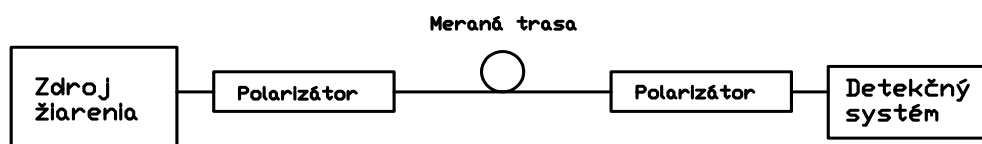
Ako nevýhoda vystupuje nemožnosť merania DGD ako funkciu vlnových dĺžok či stavu polarizácie [1, 19].

3.7.4 Metóda skenovania vlnovej dĺžky

Ďalšou možnosťou merania PMD je metóda skenovania vlnovej dĺžky (metóda s fixným analyzátorom). Jej princípom je sledovanie závislosti optického výkonu, ktorý prechádza optickou trasou, v závislosti na vlnovej dĺžke [1]. Blokové schéma je zobrazené na obr. 3.17.

Ako zdroj žiarenia sa používa širokopásmový zdroj či preladiteľný laser. Po priechode polarizátorom je žiarenie naviazané do optického vlákna a na výstupe prechádza ďalším polarizátorom do optického spektrálneho analyzátoru (v prípade širokopásmového zdroja), či detekčného systému merajúceho výkon (pri použití laditeľného laseru) [19].

Samotné meranie prebieha v dvoch krokoch. V prvom kroku sú do meranej trasy zaradené oba polarizátory a meria sa optický výkon v spektrálnom rozsahu $P(\lambda)$ o určitej polarizácii. Pre zachovanie polarizácie je dôležité nemeniť počas merania uhlovú orientáciu polarizátorov. Ak by vláknom prechádzalo polarizované svetlo bez prítomnosti dvojlomu vo vlákne, výstupný výkon bude konštantný (meraný pre



Obr. 3.17: Blokové znázornenie metódy skenovania vlnovej dĺžky [1].

každú vlnovú dĺžku). V prípade prítomnosti dvojlomu vo vlákne sa mení i výstupný výkon v závislosti na zmene polarizácie, ktorú dvojlom vyvoláva.

V druhom kroku sa odstráni polarizátor umiestnený pred detekčnou sústavou a získa sa referenčná hodnota, spektrálna závislosť celkového výkonu $P_{\text{total}}(\lambda)$ pri rovnakom spektrálnom rozsahu.

Ako výstup merania sa stanoví pomer výsledkov čiastkových krokov, teda oboch spektrálnych priebehov výkonov $R(\lambda) = P(\lambda)/P_{\text{total}}(\lambda)$. Tento pomer predstavuje spektrálnu závislosť zmeny stavu polarizácie výstupného žiarenia, čo vedie k výpočtu PMD.

Hodnota PMD sa v súčasnej dobe počíta najčastejšie využitím Rýchlej Fourierovej analýzy (FFT), ktorá transformuje dáta z frekvenčnej oblasti do časovej oblasti, čo ponúka priamy pohľad na časové rozťahnutie impulzov. Meranie PMD metódou skenovania vlnovej dĺžky je časovo menej výhodné keďže vyžaduje viacero krokov, takisto náchylnosť metódy na vibrácie vlákna je jej ďalšou nevýhodou [19, 24].

3.7.5 Polarimetrická metóda

Polarizačná módová disperzia sa dá popísať analýzou v Jonesovom, Stokesovom i Poyntingovom priestore. PMD definovaná pomocou Jonesových priestorových matic dáva úplnú informáciu o disperzii [7].

Polarimetrická metóda sa niekedy označuje ako metóda analýzy Jonesovej matice, pretože jej výsledkom je určenie štyroch elementov Jonesovej matice. Tá charakterizuje

konkrétny vplyv meraného vlákna alebo súčiastky na stav polarizácie či intenzitu vlny [19]. Blokové schéma je uvedené na obr. 3.18.



Obr. 3.18: Blokové usporiadanie polarimetrickej metódy [19].

Táto metóda komplexne analyzuje polarizačný stav optického žiarenia a je veľmi vhodná a využívaná v laboratórnych podmienkach, pri vývoji a testovaní optoelektronických súčiastok. Zároveň sa však nevyužíva v teréne, pretože merací cyklus je pomerne dlhý (asi 10 minút). Ďalej situáciu komplikuje veľká citlivosť metódy na zmenu teploty či vibrácie vlákna [19].

3.7.6 Metóda POTDR

Pri nutnosti lokalizovať problematický úsek optickej trasy z hľadiska PMD je vhodné použiť metódu POTDR⁸, ktorá je istou kombináciou merania PMD s metódou optickej reflektometrie – OTDR. Metóda POTDR preberá z OTDR princíp spätného rozptylu, no zároveň sa líšia tým, že interferogram metódy POTDR je vyhodnotený polarizovane.

POTDR funguje všeobecne na princípe vyslania sledu krátkych impulzov do meraného vlákna. V dôsledku spätného rozptylu⁹ získame informáciu o hodnotách PMD jednotlivých úsekoch optickej trasy [1].

Hlavný prínos metódy spočíva v dôležitosti informácie o stave PMD na úsekoch trasy. Po detekovaní chybného úseku sa dá urobiť výmena celého úseku, zvolit

⁸Polarization Optical Time Domain Reflectometry.

⁹Rayleighov spätný rozptyl.

iné – záložné vlákno z optického kábla alebo kompletne obísť rizikový úsek optickej trasy [24].

Hodnota PMD pozostáva z niekoľkých faktorov, ktoré popisuje vzťah

$$\text{PMD} \approx \beta \sqrt{L \cdot h}, \quad [\text{ps}] \quad (3.17)$$

kde:

- β predstavuje veľkosť dvojlomu vlákna v jednotkách ($\text{ps} \cdot \text{km}^{-1}$), teda rozdiel rýchlostí šírenia polarizačných vidov,
- L je dĺžka vlákna,
- h predstavuje tzv. väzobnú dĺžku charakterizujúcu väzbu medzi polarizačnými vidmi.

Väzobná dĺžka h predstavuje takú dĺžku vlákna, na ktorej sa výrazne zmení os dvojlomu (jeho tvar), z čoho rezultuje značná výmena energie polarizačných vidov. Ako vidno zo vzťahu (3.17), hodnota PMD sa zvyšuje s dvojlomom vo vlákne, veľkosťou väzobnej dĺžky a so samotnou dĺžkou vlákna. Väčšia väzobná dĺžka znamená menšiu výmenu energie medzi polarizačnými vidmi šíriacimi sa odlišnou rýchlosťou, čo má v konečnom dôsledku za následok ešte väčšiu odlišnosť v rýchlosti šírenia spomínaných polarizačných vidov. Na pozdĺžnu analýzu PMD je nutné získať informáciu o lokálnom dvojlome a väzobnej dĺžke – to všetko zo spätného rozptylu [1].

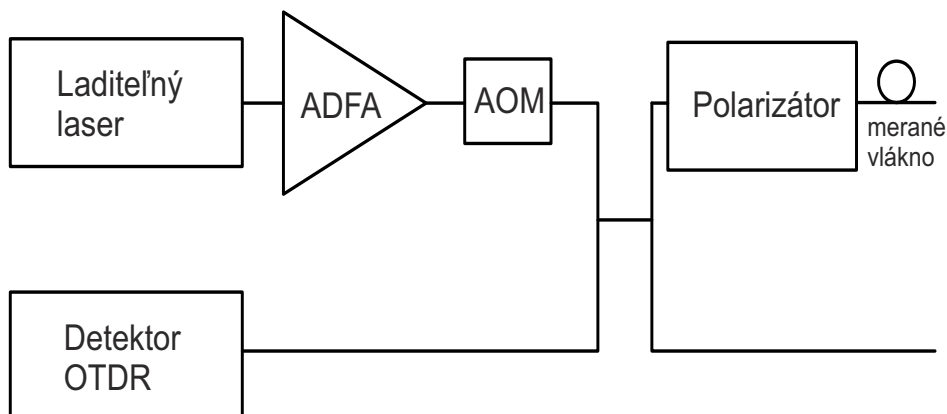
V nasledujúcom texte budú popísané dve základné metódy POTDR, ktorých spoločným prvkom je posielanie sledu krátkych impulzov do optického vlákna, no líšia sa postupmi získavania vyššie uvedených parametrov zo spätného rozptylu žiarenia. Hovoríme o metódach analýzy SOP a DOP [24].

3.7.7 Metóda analýzy SOP

Metóda analýzy SOP¹⁰ je prvou metódou v rámci POTDR, kedy sa zo spätné rozptýleného žiarenia sleduje **zmena stavu** polarizácie, spôsobená vplyvom dvojlomu vlákna a väzby medzi vidmi. Vyššie spomenutý dvojlom sa svojou veľkosťou podiela na rýchlosti zmeny stavu polarizácie, väzobná dĺžka h zasa určuje charakter tejto zmeny. V prípade rozprestreného merania na viacerých vlnových dĺžkach sme schopní získať spektrálnu závislosť zmien SOP jednotlivých úsekov optickej trasy a určiť PMD. Blokové usporiadanie je znázornené na obr. 3.19 [24].

Na vysielačnej strane meracej aparatury je zaradený laditeľný laser o malej spektrálnej šírke, ktorý generuje optické žiarenie putujúce do optického vláknového zosilovača EDFA. Po zosilnení je žiarenie modulované blokom AOM, ktorý predstavuje akusticko-optický modulátor, výsledkom čoho je vznik potrebných impulzov

¹⁰State of polarization



Obr. 3.19: Blokové usporiadanie metódy analýzy SOP [24].

vyslaných cez polarizátor do optickej trasy. Vplyvom spätného rozptylu sa časť žiarenia vracia späť a po priechode polarizátorom dopadá na detektor OTDR.

Metóda sleduje spektrálnu závislosť výkonu spätne rozptýleného žiarenia jednotlivých úsekoch trasy a použitie polarizátora umožní sledovať spektrálne zmeny parametru SOP v týchto úsekoch [24].

Táto metóda však prináša so sebou aj isté obmedzenia, ktoré budú popísané nasledovne. V blokovom usporiadaní metódy je zaradený optický vláknový zosilňovač EDFA, ktorý zosilňuje merací signál, a tým kompenzuje dynamické zníženie rozsahu merania vznikajúce vplyvom enormne krátkych impulzov využívaných pri meraní.

Hlavným problémom je však skutočnosť, že dĺžka aj tých najkratších impulzov (rádovo desiatky ns) používaných pri meraniach OTDR je v konečnom dôsledku príliš dlhá v prípade meraní vlákien so silným dvojlomom. Hrozí stav depolarizácie. Impulz šíriaci sa vláknom zaberá svojou dĺžkou určitú dĺžku vlákna, v prípade extrémne krátkych impulzov hovoríme o jednotkách metrov. To znamená, že v prípade vyššieho PMD vlákna bude čelná časť impulzu nadobúdať inú hodnotu SOP ako je hodnota SOP v tyle pulzu. Ak nastáva stav rôznej polarizácie jedného impulzu, hovoríme o jeho depolarizácii [24].

Z vyššie spomínaných dôvodov rezultuje záver, ktorý neodporúča nasadenie tejto metódy na vyhľadávanie úsekov so zvýšenou hodnotou PMD na dlhších optických trasách, pretože dynamické zníženie rozsahu merania vplyvom použitia extrémne krátkych impulzov limituje dĺžku meraných trás. Metóda je vhodná na meranie krátkych trás (jednotky km) s malou hodnotou PMD ¹¹ ($< 0,7 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$) [24].

3.7.8 Metóda analýzy DOP

Druhá metóda analyzuje **stupeň** polarizácie DOP ¹². Výsledky získava takisto zo spätne rozptýleného žiarenia. Hodnoty DOP pre

- impulz, ktorý je celý zhodne polarizovaný, platí $\text{DOP} = 1$,
- celkom depolarizovaný impulz platí $\text{DOP} = 0$ a
- žiarenie spätne rozptýlené z celkom depolarizovaného impulzu platí $\text{DOP} \approx 1/3$.

Vyhodnocovanie DOP robí zo zásadného problému prvej metódy nástroj vyhodnotenia, kedy sme v konečnom dôsledku skutočne schopní merať PMD na dlhé vzdialenosti a lokalizovať zvýšené hodnoty na jednotlivých úsekoch. Blokové usporiadanie metódy je znázornené na obr. 3.20.

Všimnime si, že ako zdroj žiarenia je použitý značne úzkospektrálny DFB laser, čo nebýva zvykom v tradičných prístrojoch OTDR. Opodstatnenie tkvie vo vyvarovaní sa depolarizácie, ktorá by mohla nastať vo vlákne vplyvom šírenia signálu prostredníctvom mnohých vlnových dĺžok.

Dvojlom vlákna by tak zapríčinil rôzne zmeny stavu polarizácie SOP pre rôzne vlnové dĺžky, a tým depolarizoval signál. Ide o ďalší spôsob depolarizácie signálu, ktorý je nutné potlačiť použitím úzkospektrálneho zdroja žiarenia.

Výstupné žiarenie z DFB laseru je ďalej polarizované a naviazané do meraného vlákna. Polarimeter a detektor OTDR analyzujú DOP spätne rozptýleného žiarenia z jednotlivých miest optickej trasy [16, 24].

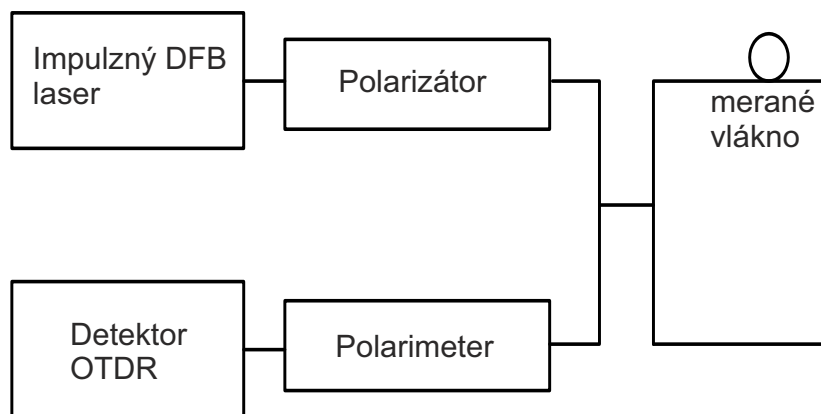
Z analýzy DOP plynie:

Silný dvojlom β spôsobuje vo vlákne rýchle stáčanie stavu polarizácie vedúce k depolarizácii žiarenia v rámci meracieho impulzu, k zníženiu jeho stupňa polarizácie DOP. Analogicky platí, že slabému dvojlomu vkákna β korešponduje vysoký merný DOP. Stupeň polarizácie DOP závisí však i na medzividovej väzbe resp. väzobnej dĺžke h , čo komplikuje situáciu. Vplyv h a β na parameter DOP možno zjednodušene zhrnúť do troch skupín :

1. Vlákna so slabým dvojlomom (malé β) – DOP sa blíži k hodnote 1 bez ohľadu na medzividovú väzbu. Takéto vlákna sa vyznačujú v praxi malou hodnotou PMD.

¹¹so slabším dvojlomom

¹²Degree of Polarisation



Obr. 3.20: Blokové usporiadanie metódy analýzy DOP [1].

2. Vlákna so silným dvojlomom a silnou medzividovou väzbou (veľké β a krátka väzobná dĺžka h) – DOP bude nadobúdať malých hodnôt vplyvom silného dvojlomu vlákna¹³ a bude rýchlo premenlivé vplyvom silnej medzividovej väzby.
3. Vlákna charakteristické silným dvojlomom a slabou medzividovou väzbou (veľké β a dlhá väzobná dĺžka h). V tomto prípade sa prejaví okrem h a β aj závislosť na vzájomnej polohe SOP žiarenia a na tvare dvojlomu vlákna. DOP môže potom kolísať medzi nízkymi a vysokými hodnotami (interval 0 až 1), ale zmena bude pomalá. V praxi je to charakteristické pre vlákna s vysokou hodnotou PMD.

Z uvedených informácií vyplýva skutočnosť, že nie je dôležitá samotná hodnota DOP ako taká, ale je dôležité sledovať i rýchlosť zmeny DOP [1].

3.8 Vyhodnotenie merania metódou analýzy DOP

Ako bolo uvedené, analýza nameraných výsledkov sa vykonáva z parametru DOP zo spätne rozptýleného žiarenia meracieho impulzu v optickom vlákne.

¹³U spätne rozptýleného signálu sa blíži k 1/3

Kedže rýchlosť zmeny DOP môže byť vysoká, je potrebné určiť strednú hodnotu DOP z veľkého počtu vzorkov (niekoľko desiatok). Merací prístroj vykonáva meranie pre dva stavy vstupnej polarizácie¹⁴, čiže získame dva výsledky merania, a to DOP a DOP_c (complementary). Z týchto výsledkov sa určí parameter DOP_{GEO} vzťahom

$$DOP_{GEO} = \sqrt{DOP^2 + DOP_c^2}, \quad (3.18)$$

ktorý dobre popisuje hodnotu DOP žiarenia rozptýleného z daného úseku optickej trasy. Ďalej prístroj sleduje aj rýchlosť zmeny DOP, k tomu mu slúži parameter $hDOP$. Tento parameter predstavuje dĺžku vlákna, na ktorej sa DOP výrazne zmení – s rýchlejšími zmenami DOP sa znižuje parameter $hDOP$.

Záver, ktoré je možné stanoviť z analýzy parametru DOP jednotlivých úsekov vlákna sú:

- Na úsekoch vykazujúcich vysokú hodnotu DOP_{GEO} bude nízka hodnota PMD z dôvodu malého dvojlomu vlákna.
- Na úsekoch s premennou či nízkou hodnotou DOP_{GEO} je predpoklad väčšieho dvojlomu vlákna a s:
 - malým $hDOP$ – hodnota PMD bude nízka v dôsledku silnej medzividovej väzby,
 - stredným $hDOP$ – hodnota PMD sa pohybuje v strednom rozsahu,
 - veľkým $hDOP$ – hodnota PMD nadobúda veľkých hodnôt (slabá medzividová väzba) [1, 24].

Vo vyššie uvedenom texte sa vyskytovali pojmy (nízka, stredná a vysoká) hodnota PMD – sú určené nastavenými hraničnými hodnotami v meracom prístroji (pre parametry $hDOP$ a DOP_{GEO}) a sú definované dlhodobou analýzou počas tisícov námerov výrobcami prístrojov [24].

Výsledkom námeru metódou POTDR je polarizačný reflektogram, ktorý zobrazuje jednotlivé úseky trasy v náväznosti na PMD. Možno vyčítať aj informácie o miestach zvarov a konektorov.

Meranie metódou POTDR poskytuje mapujúci prehľad o stave PMD v jednotlivých úsekoch optickej trasy, no nedokáže plnohodnotne nahradiť meranie celkových absolútnych hodnôt oneskorenia PMD, ktoré meria napr. niektorá z interferometrických metód. Táto metóda zvláda meranie trás o dĺžke niekoľko desiatok km pri rozlišovacej schopnosti v ráde stoviek metrov [1].

¹⁴Polarizátor v blokovej schéme 3.20.

3.9 Skúsenosti z merania PMD v praxi

Meranie polarizačnej módovej disperzie sa vykonáva popri meraní hodnôt útlmu a tiež útlmu odrazu. Tieto merania sa vykonávali na rôznych optických trasách pozostávajúcich z rôznych typov káblov¹⁵ a z praktických skúsenosti možno vyvodit nasledujúce závery [24]:

- Z katalógových údajov nemožno určiť smerodajnú odchýlku PMD oneskorenia trasy zo známej hodnoty koeficientu PMD vlákna. Takýto výpočet hodnoty PMD nemôže ani plniť funkciu odhadu v porovnaní s námerom trasy. Tým však koeficient PMD nestráca na dôležitosť, pretože jeho nízka hodnota je nutným predpokladom a dnes už samozrejmosťou pri výstavbe káblových trás. Je však len jedným z mnoha ďalších faktorov pôsobiacich na hodnotu PMD, no ich vplyv nie je možné presne vyjadriť.
- Keďže na hodnoty PMD vplýva veľa faktorov od výroby cez pokládku až po prevádzku, výsledkom môže byť odlišnosť PMD pre vlákna od rôznych výrobcov z rôznych dodávok, dokonca i pre vlákna z rovnakého kábla či rovnakej trubičky.
- V prípade použitia tzv. ribbonu¹⁶ môžu byť zlepené vlákna vystavené väčšiemu mechanickému namáhaniu a hodnotu PMD je nutné sledovať obzvlášť v krajných vláknach pásku, ktoré su namáhané najviac.
- Staršie vlákna sú rizikovejšie z hľadiska zvýšenej PMD.
- PMD vlákien sa výrazne nelíši na 1550 nm či 1310 nm.
- Meranie neukazuje závislosť PMD na iných prenosových parametroch – napríklad na útlme. Hovoríme o útlme na vlnových dĺžkach 1310 nm a 1550 nm, taktiež o pomere útlmov $A(1550)/A(1310)$, ktorý vypovedá o mechanických deformáciách – o ohyboch vlákna. Vlákňové ohyby negatívne vplývajú na PMD, avšak je obtiažne tento vplyv všeobecne charakterizovať.
- Laboratórne merania ukazujú, že bodové ohyby majú pomerne malý vplyv vzhľadom na útlm vlákna. Na vytvorenie oneskorenia PMD aspoň 0,5 ps ohybom či deformáciou je nutné vlákno namáhať tak, že jeho útlm vzrastie na 1550 nm minimálne o 10 dB. Táto hodnota útlmu predstavuje ďaleko väčší problém než zvýšenie hodnoty PMD. Slabšie deformácie vlákna na dlhých vzdialenostiach spôsobujú o niečo väčšie problémy a je veľmi obtiažne charakterizovať alebo odhadnúť tento vplyv [24].

¹⁵závesné, kombinované zemné laná, uložené v zemi

¹⁶vlákno páskovej štruktúry

4 KOMPAKTNÝ TESTER CD/PMD

V nasledujúcich kapitolách je čerpané zo zdrojov Exfo, Profiber a ďalších – uvedených v zozname použitej literatúry. Ďalej je čerpané zo skúseností a informácií nadobudnutých meraním a konzultáciami.

Na Fakulte elektrotechniky a komunikačných technológií VUT v Brne vzniklo v roku 2012 CD/PMD pracovisko Centra senzorických, informačných a komunikačných systémov v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072 OP. Pracovisko je vybavené kompletným meracím vybavením.

Jadro pracoviska tvorí kompaktný tester CD a PMD – teda modul EXFO FTB-5700 v modulárnej platforme FTB-200 – viď obr. 4.1, poskytujúci rýchle a presné meranie chromatickej a polarizačnej módovej disperzie na optických (metropolitných) trasách. Prístroj je ideálnym nástrojom pre mapovanie siete a akceptačné merania pred nasadením systémov do optických trás.

Prístroj vykonáva meranie z jedného konca a pokryje trasu až 150 km bez zosilňovačov, s použitím odrazky. Ako mechanizmus na dopravenie signálu z konca vlákna slúži Fresnelov odraz. Parametre meracieho prístroja:

- CD
 - 0 až 150 km pri presnosti ± 10 ps/nm
 - 8 meracích bodov
 - čas merania 40 s
- PMD
 - merací rozsah 0 až 20 ps pri presnosti $\pm 0,2$ ps
 - čas merania < 180 s [25].

Tab. 4.1 združuje vlnové dĺžky, ktoré využíva CD/PMD tester pri meraní CD, a to vždy v ôsmich bodoch (defaultne) pre konkrétny typ vlákna.

Tab. 4.1: Tabuľka združujúca testovacie vlnové dĺžky pre jednotlivé vlákna [9].

ITU	ITU štandard	Testovacie vlnové dĺžky
G.652	(1500 – 1625) nm	(1500-1518-1536-1554-1571-1589-1607-1625) nm
G.653	(1525 – 1575) nm	(1525-1532-1539-1546-1554-1561-1568-1575) nm
G.655	(1530 – 1625) nm	(1530-1544-1557-1571-1584-1598-1611-1625) nm
G.656	(1460 – 1625) nm	(1480-1501-1521-1542-1563-1584-1604-1625) nm



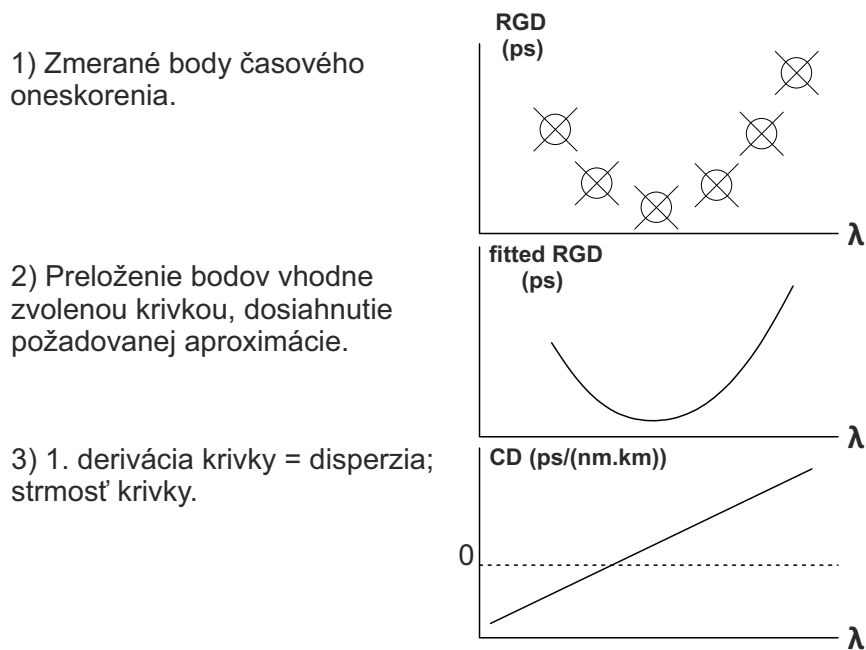
Obr. 4.1: Platforma EXFO FTB-200 (prevzaté z www.profiber.eu).

Namerané body časového oneskorenia – tzv. RGD¹. Dôležitý je počet týchto bodov a ich vlastná poloha. Fitted RGD – hodnoty RGD po aproximácii.

Pre rôzne typy vlákien ponúka tester rôzne **aproximačné krivky**. Dôvodom ich využitia je čo najpresnejšie preloženie nameraných bodov vhodnou krivkou a tým dosiahnutie najlepšej možnej aproximácie. Výsledná krivka má potom vplyv na výpočet strmosti (slope), čiže hodnoty CD na určitej vlnovej dĺžke. Situáciu znázorňuje obr. 4.2.

V tabuľke 4.2 sú uvedené voliteľné aproximačné krivky s minimálnym počtom potrebných bodov, pre pásma C, L.

¹Relative Group Delay – relatívne skupinové oneskorenie



Obr. 4.2: Aproximácia zmeraných bodov a vyhodnotenie koeficientu disperzie.

Tab. 4.2: Tabuľka združujúca aproximačné krivky a počty bodov pre pásma C, L.

	Krivka	Pásmo C alebo L	Pásmo C a L
	Sellmeirova 3. stupňa	3	4
Minimálny počet zmeraných bodov	Sellmeirova 5. stupňa	5	6
	Logaritmickej	3	4
	Kubická	4	5
	Kvadratická	3	4
	Lineárna	2	3

4.1 Porovnávacie meranie CD a PMD

Dňa 17. 10. 2012 sa uskutočnilo predstavenie meracieho pracoviska CD/PMD na FEKT VUT v Brne. V rámci programu prebehlo skúšobné meranie CD a PMD dvomi meracími prístrojmi. Jeden z meracích prístrojov je vo vlastníctve FEKT VUT a druhý prístroj bol zapožičaný firmou InfoTel, spol. s.r.o. Oba prístroje boli typovo rovnaké a totožné produkty, pričom ich konfigurácia bola nasledovná: merací modul pre meranie CD a PMD EXFO FTB-5700 umiestnený v modulárnej meracej platforme EXFO FTB-200.

Súčasťou meracieho pracoviska boli:

- 3 kusy cievok referenčného vlákna typu G.652.D o dĺžke 40 km (dohromady 120 km),
- modul DCF (ekvivalent -60 km G.652.D),
- PMD emulátor EM-550 (PMD 1, 5 a 10 ps).

Samotné meranie prebiehalo v niekoľkých konfiguráciách, vždy rovnaká zostava meraných prvkov pre oba prístroje.

- Najprv sa merala trasa pozostávajúca z jednej cievky vlákna G.652.D (40 km).
- Nasledovalo meranie dvoch cievok vlákna G.652.D o celkovej dĺžke 80 km.
- Tretie meranie nepozostávalo z merania troch cievok vlákna, pretože by mohol nastať problém s dynamikou meracieho prístroja – pri útlme vlákna cca 0,2 dB na 1 km by malo byť teoreticky možné merať trasu dĺžky 125 km, no v trase by boli zaradené tri konektorové spojenia, ktoré by hodnotu útlmu trasy ešte zvýšili a dynamický rozsah prístroja udávaný výrobcom (25 dB) by nemusel stačiť. Tomu sa predchádzalo zaradením DCF modulu medzi dve cievky. Modul DCF kompenzuje CD vlákna typu G.652.D o dĺžke 60 km.

Výsledky merania obsahujú tabuľky 4.3 a 4.4.

Druhá časť merania prebiehala s využitím jedného prístroja a merali sa nasledovné konfigurácie:

- Meranie parametrov CD a PMD vlákna typu G.655 o dĺžke 20 km.
- Meranie CD a PMD modulu DCF.
- Meranie PMD emulátoru pre jednu hodnotu $PMD = 1$ ps. Pri tomto meraní sa nemeral samotný emulátor, ale bolo za ním zaradené vlákno dĺžky cca 5 km známej hodnoty PMD. Zmerala sa hodnota PMD celej trasy, z ktorej sa PMD hodnota emulátoru dopočítala. Zaradené vlákno sa použilo pretože CD/PMD tester využíva na vyhodnotenie dát odraz od konca vlákna či odraznej koncovky. Meranie emulátoru bez zaradeného vlákna nebude úspešné, pretože PMD emulátor obsahuje krátke úseky referenčných vlákien a trasa nie je dostatočne

dlhá, vznikla by tzv. mŕtva zóna. Je to obdobný princíp ako pri OTDR. Výpočet hodnoty polarizačnej módovej disperzie PMD emulátoru je uvedený ďalej v texte. Tab. 4.5 obsahuje výsledky tohoto merania.

Tab. 4.3: Výsledky merania CD/PMD vykonané prístrojom FTB vo vlastníctve FEKT VUT.

Meraná konfigurácia	CD (1550 nm)	CD _{koef} (1550 nm)	PMD	PMD _{koef}
G.652D (40 km)	671 ps/nm	16,74 ps/(nm · km)	0,32 ps	0,051 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
G.652D (80 km)	1335 ps/nm	16,67 ps/(nm · km)	0,52 ps	0,058 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
G.652D (80 km)+DCF	329 ps/nm	3,81 ps/(nm · km)	0,46 ps	0,049 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Tab. 4.4: Výsledky merania CD/PMD vykonané prístrojom FTB od InfoTel.

Meraná konfigurácia	CD (1550 nm)	CD _{koef} (1550 nm)	PMD	PMD _{koef}
G.652D (40 km)	673 ps/nm	16,81 ps/(nm · km)	0,32 ps	0,051 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
G.652D (80 km)	1337 ps/nm	16,7 ps/(nm · km)	0,47 ps	0,052 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
G.652D (80 km)+DCF	329 ps/nm	3,82 ps/(nm · km)	0,46 ps	0,049 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Tab. 4.5: Výsledky druhej časti merania CD/PMD.

Meraná konfigurácia	CD	PMD
G.655 (20 km)	674 ps/nm	0,36 ps
DCF modul	89 ps/nm	0,23 ps
PMD emulátor+vlákno (5 km)	–	1,05 ps

Výpočet PMD hodnoty emulátoru PMD:

$$PMD_{\text{TOT}} = \sqrt{PMD_1^2 + PMD_2^2}, [\text{ps}] \quad (4.1)$$

kde:

- PMD_{TOT} ... je hodnota PMD celej trasy,
- PMD_1 ... je neznáma hodnota emulátoru PMD a
- PMD_2 ... je hodnota PMD zaradného vlákna (0,2 ps).

Zo vzťahu (4.1) dostávame vzťah pre hodnotu PMD emulátoru:

$$PMD_1 = \sqrt{PMD_{\text{TOT}}^2 - PMD_2^2} = \sqrt{1,1025 - 0,04} = \mathbf{1,03} [\text{ps}]. \quad (4.2)$$

Ako vidno z tab. 4.3 a 4.4, kompenzácia chromatickej disperzie kompenzačným DCF vláknom krátkej dĺžky nemá veľký vplyv na hodnoty PMD.

Účelom merania bolo otestovať dva meracie prístroje chromatickej a polarizačnej módovej disperzie a porovnať dosiahnuté výsledky. Prístroje boli prakticky totožné, preto sa očakávali veľmi podobné výsledky. Pri pohľade na namerané hodnoty v tab. 4.3 a tab. 4.4 môžeme konštatovať, že sa očakávania naplnili a zmerané hodnoty boli vo veľkej miere totožné.

5 EXPERIMENTÁLNE MERANIE CD/PMD

5.1 Meranie PMD

Dňa 12. 4. 2013 sa uskutočnilo experimentálne meranie chromatickej a polarizačnej módovej disperzie v laboratóriu prenosových médií FEKT VUT Brno. Meranie PMD bolo rozdelené na 2 časti, pričom každá časť obsahuje niekoľko konfigurácií meranej trasy.

V prvej časti sa merala konfigurácia, ktorá pozostávala z testera CD/PMD (modulárna meracia platforma EXFO FTB-200 + CD/PMD modul EXFO FTB-5700) + optické vlákno dĺžok (5; 20; 40; 80 (2x40) a 100 (20+2x40)) km – viď obr. 5.1 .



Obr. 5.1: Zapojenie meranej trasy prvej časti merania.

Druhá časť merania sa líšila tým, že sa medzi tester a zaradné vlákno vložil PMD emulátor, pričom dĺžky optického vlákna boli totožné ako v prvej časti merania – viď obr. 5.2 .

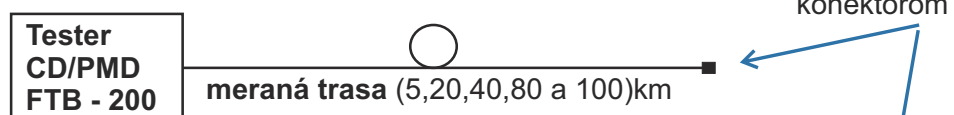
Námer každej trasy ako v prvej, tak i v druhej časti merania – pre každú hodnotu PMD emulátoru, bol vyhotovený trikrát. Týmto sa zobrala do úvahy istá náhodnosť javu PMD.

Blokové zapojenia meraní PMD sú uvedené na obr. 5.3 .

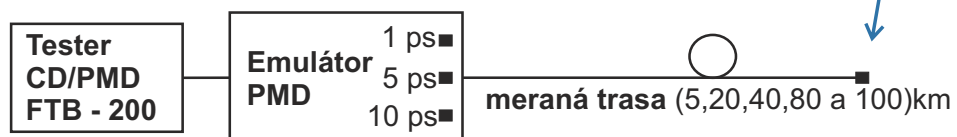


Obr. 5.2: Zapojenie meranej trasy v druhej časti merania.

Prvá časť merania PMD



Druhá časť merania PMD



Obr. 5.3: Blokóvé zapojenia meraní PMD.

Dôležité parametre merania:

- Teplota ovzdušia v laboratóriu prenosových médií... 23°C,
- nastavený merací rozsah vlnových dĺžok... (1478–1625) nm (S, C a L pásmo),
- cievka typu G.652.D, 5 km (5 118 m)... rok výroby 2010,
- cievka typu G.652.D, 20 km (19 995 m)... rok výroby 1995,
- cievky typu G.652.D, 40 km (3 kusy)... rok výroby 2012.

Tabuľka 5.1 obsahuje súhrnné výsledky merania PMD prvej i druhej časti. Sú v nej uvedené **priemerné hodnoty** merania samotného vlákna rôznych dĺžok, ako aj priemerné hodnoty vlákna rôznych dĺžok pre rôzne zapojenie emulátoru PMD (1, 5 a 10) ps.

Kompletné výsledky merania PMD sú z dôvodu rozsahu uvedené v prílohe tejto práce.

Tab. 5.1: Súhrn priemerných hodnôt merania PMD prvej i druhej časti.

Námer	Trasa mer. [m]	PMD 2.rád $[\frac{\text{ps}}{\text{nm}}]$	PMD [ps]	PMD _{koef} $[\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}]$
dĺžka 5 km	4725	0,0043	0,09	0,0447
emul.5 km; 1 ps	4730	0,4594	1,00	0,4623
emul.5 km; 5 ps	4739	12,6876	5,28	2,4262
emul.5 km; 10 ps	4751	64,7885	11,95	5,4818
dĺžka 20 km	19996	0,0602	0,36	0,0814
emul.20 km; 1 ps	19998	0,4439	0,99	0,2210
emul.20 km; 5 ps	20007	13,6579	5,48	1,2249
emul.20 km; 10 ps	20018	68,0191	12,22	2,7324
dĺžka 40 km	40072	0,0494	0,33	0,0520
emul.40 km; 1 ps	40075	0,4028	0,94	0,1486
emul.40 km; 5 ps	40084	13,4648	5,44	0,8583
emul.40 km; 10 ps	40096	60,8177	11,57	1,8270
dĺžka 80 km	80072	0,1626	0,59	0,0665
emul.80 km; 1 ps	80075	0,5058	1,06	0,1180
emul.80 km; 5 ps	80084	15,2992	5,79	0,6468
emul.80 km; 10 ps	80096	57,3303	11,24	1,2562
dĺžka 100 km	100065	0,1886	0,65	0,0644
emul.100 km; 1 ps	100068	0,8217	1,35	0,1345
emul.100 km; 5 ps	100077	13,5751	5,45	0,5447
emul.100 km; 10 ps	100089	62,9145	11,78	1,1771

5.1.1 Prvá časť merania – vyhodnotenie

Zvýraznené riadky tabuľky 5.1 reprezentujú priemer počítaný z troch meraní, vždy konkrétnej dĺžky samostatného optického vlákna. Kompletné údaje sú uvedené v prílohe, tab. A.1.

Podľa vzťahu (3.8), ktorý charakterizuje hodnotu koeficientu PMD pre šírenie na dlhé vzdialenosti

$$D_{\text{PMD}}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} \quad [\text{ps} \cdot (\sqrt{\text{km}})^{-1}] \quad [1]$$

a podľa limitnej – garantovanej hodnoty koeficientu PMD pre vlákno typu G.652.B; D, uvedenej v tab. č. 3.3

$$D_{\text{PMD}}(\lambda) \leq 0,2 \text{ (ps}/\sqrt{\text{km}}), \quad [21]$$

môžeme uvažovať limitné hodnoty PMD vzťahnuté k meraným dĺžkam vlákna:

$$PMD_{5 \text{ km}} = 0,2 \cdot \sqrt{4,725} = 0,4347 \text{ [ps]} \quad (5.1)$$

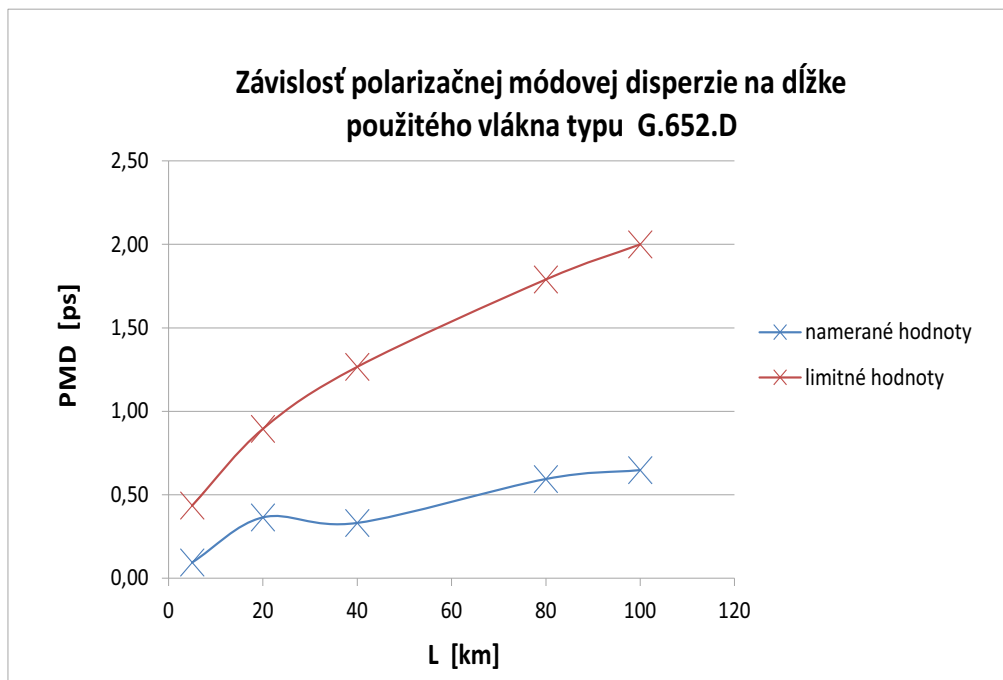
$$PMD_{20 \text{ km}} = 0,2 \cdot \sqrt{19,996} = 0,8943 \text{ [ps]} \quad (5.2)$$

$$PMD_{40 \text{ km}} = 0,2 \cdot \sqrt{40,072} = 1,2660 \text{ [ps]} \quad (5.3)$$

$$PMD_{80 \text{ km}} = 0,2 \cdot \sqrt{80,072} = 1,7897 \text{ [ps]} \quad (5.4)$$

$$PMD_{100 \text{ km}} = 0,2 \cdot \sqrt{100,072} = 2,000 \text{ [ps]}. \quad (5.5)$$

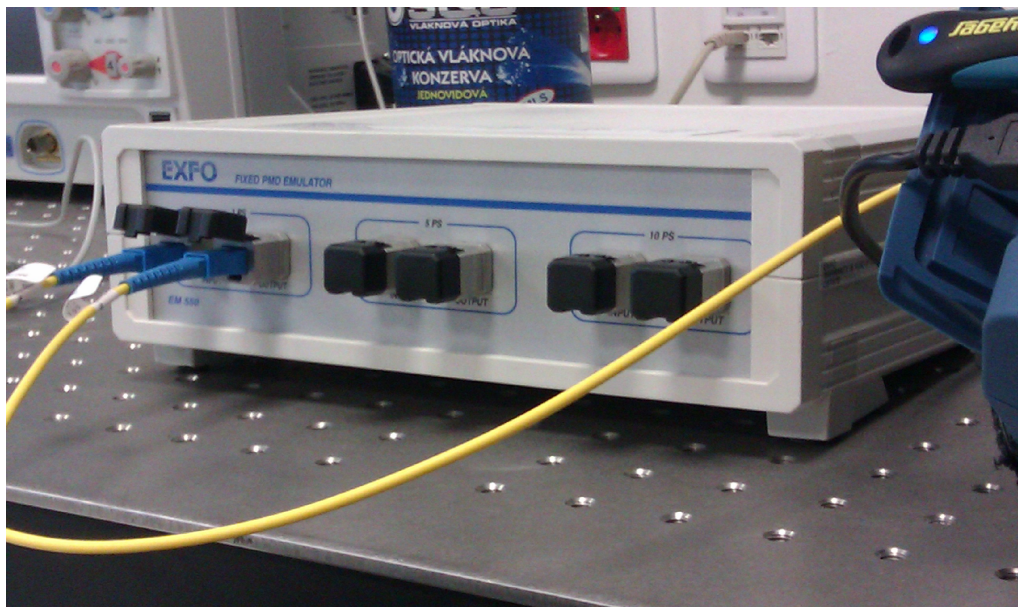
- Pri pohľade do súhrnnej tab. 5.1, alebo do podrobnej tab. A.1 v prílohe možno konštatovať, že namerané hodnoty (koeficienty, či celková PMD) prvej časti merania PMD spĺňajú odporúčanie ITU pre vlákna typu G.625.D. Nie je nutná kompenzácia PMD.
- Priemerná hodnota PMD pri meraní vlákna dĺžky 20 km činí 0,36 ps a pre 40 km vlákno 0,33 ps, čo je nepatrne nižšia hodnota navzdory dvojnásobnej dĺžke vlákna. Tento jav môže byť klasickým prejavom veku 20 km cievky vlákna (r. 1995), pričom cievky 40 km sú prakticky nové (r. 2012), priamo z výroby.
- Priemerné hodnoty prvej časti merania PMD a vypočítané hodnoty sú vynesené do grafickej závislosti – obr. 5.4.



Obr. 5.4: Porovnanie nameraných a teoretických (limitných) hodnôt PMD.

5.1.2 Druhá časť merania – vyhodnotenie

Druhá časť merania PMD mala za úlohu overiť funkčnosť PMD modulátoru – obr. 5.5 .



Obr. 5.5: Emulátor PMD obsahujúci etalóny 1 ps, 5 ps a 10 ps.

- Pri začlenení emulátoru PMD do optickej trasy a získaní prvých hodnôt pre PMD (1, 5 a 10) ps určitej dĺžky vlákna sme mohli pozorovať, že dĺžka optickej trasy zmeraná testerom CD/PMD sa menila – viď tab. 5.1, alebo podrobné výsledky merania v prílohe: tabuľky A.2 A.3 A.4 A.5 a A.6.
- Pre porovnanie funkčnosti/presnosti etalónov emulátoru opäť využijeme vzťah (5.6), kde poznáme:
 - hodnotu PMD celej trasy... PMD_{TOT} ,
 - hodnotu PMD zaradného vlákna... PMD_2 .

Výpočtom pomocou vyššie spomenutého vzťahu určíme:

- hodnotu emulátoru PMD... PMD_1 .

$$PMD_1 = \sqrt{PMD_{TOT}^2 - PMD_2^2} \text{ [ps]}.$$

Príklad výpočtu pre piaty riadok tabuľky 5.1 od konca, označený **emul.80km; 10ps**:

$$PMD_1 = \sqrt{PMD_{TOT}^2 - PMD_2^2} = \sqrt{11,24^2 - 0,59^2} = 11,22 \text{ [ps]}. \quad (5.6)$$

Na obr. 5.6 sú uvedené limitné hodnoty emulátoru PMD, s ktorými možno porovnať vypočítané hodnoty.

Mean PMD (ps) *	0.91	5.02	10.8
Std. Dev. PMD (ps)*	0.11	0.37	0.44
Min & Max PMD Value (ps)*	0.61 & 1.19	3.83 & 5.68	9.9 & 11.7
Mean PMD (ps) **	0.82	4.58	10.1
* As per TIA-455-124-A			
** As per TIA/EIA-455-124			
Tested at 1550 nm. See Test Report for more details			

Obr. 5.6: Povolený rozptyl etalónov PMD emulátoru.

Pre prehľadnosť sú najdôležitejšie údaje uvedené znovu, v tab. 5.2.

Tab. 5.2: Povolený rozptyl etalónov PMD emulátoru.

Mean PMD [ps]	0,91	5,02	10,8
Std. Dev. PMD [ps]	0,11	0,37	0,44
Min. & Max. PMD Value [ps]	0,61 & 1,19	3,83 & 5,68	9,9 & 11,7

Vypočítaná hodnota 11,22 [ps] teda spĺňa rozsah etalónu hodnoty 10 [ps].

Kompletné výsledky výpočtov sú uvedené v tab. 5.3 aj porovnanie s tab. 5.2.

Tab. 5.3: Tabuľka združujúca hodnoty PMD celej trasy, ďalej vypočítané hodnoty PMD emulátoru a ich porovnanie s teoretickými údajmi.

Námer	Zmeraná dĺžka [m]	PMD [ps]	PMD _{emul.} [ps]	Výsledok
dĺžka 5 km	4725	0,09	–	–
emul.5 km; 1 ps	4730	1,00	0,9959	OK
emul.5 km; 5 ps	4739	5,28	5,2792	OK
emul.5 km; 10 ps	4751	11,95	11,9497	Chyba
dĺžka 20 km	19996	0,36	–	–
emul.20 km; 1 ps	19998	0,99	0,9222	OK
emul.20 km; 5 ps	20007	5,48	5,4682	OK
emul.20 km; 10 ps	20018	12,22	12,2147	Chyba
dĺžka 40 km	40072	0,33	–	–
emul.40 km; 1 ps	40075	0,94	0,8802	OK
emul.40 km; 5 ps	40084	5,44	5,4300	OK
emul.40 km; 10 ps	40096	11,57	11,5653	OK
dĺžka 80 km	80072	0,59	–	–
emul.80 km; 1 ps	80075	1,06	0,8806	OK
emul.80 km; 5 ps	80084	5,79	5,7599	OK
emul.80 km; 10 ps	80096	11,24	11,2245	OK
dĺžka 100 km	100065	0,65	–	–
emul.100 km; 1 ps	100068	1,35	1,1832	OK
emul.100 km; 5 ps	100077	5,45	5,4111	OK
emul.100 km; 10 ps	100089	11,78	11,7621	Chyba

- Možno zhodnotiť, že etalóny emulátoru PMD sú pomerne presné. Chybu vykazoval len etalón 10 ps pri zapojení na 5 km, 20 km a 100 km, pričom posledný spomenutý presahoval horný limit rádovo len v stotinách pikosekundy. Nutno podotknúť, že uvedené údaje sú priemerom viacerých meraní, uvedených v prílohe práce. Takisto treba uvážiť náhodnosť PMD.
- Výsledné hodnoty PMD emulátoru (v tab. 5.3 označené ako $PMD_{emul.}$) sú počítané už z týchto priemerných hodnôt.
- Podľa vzťahu (3.9) a tabuľky 3.4 plynie, že pre SDH prenosy (napr. STM-64) je limit DGD na optickú trasu (uvažujeme max. 120 km) 30 ps, teda 10 ps PMD. Tieto požiadavky boli splnené pre meranie samostatných dĺžok optických vlákien, ako aj pre zaradenie emulátoru PMD do optickej trasy (1 a 5) ps.
- Pre použitie etalónu 10 ps by hodnota PMD takejto trasy už hranične porušovala normu, no zvýšenie hodnoty nie je fatálne. Ako snahu o prípadnú kompenzáciu by sme mohli zvoliť prenos na inej vlnovej dĺžke, alebo lokalizovať úsek optickej trasy so zvýšenou PMD (metóda analýzy DOP) a nahradiť ho vláknom novým, s garantovanou hodnotou PMD, či ich kombinácia.

5.2 Meranie CD

Meranie chromatickej disperzie prebiehalo pre totožný typ vlákna ako meranie PMD – teda G.652.D a pre totožné vzdialenosti (5; 20; 40; 80 a 100) km. Pri trase dĺžky 80 km sme navyše zaradili 6 km kompenzačného vlákna chromatickej disperzie, ktoré kompenzuje disperziu približne na 60 km trasy. Na záver bola premeraná CD samotného kompenzačného vlákna.

- V tab. 5.4 sú uvedené údaje získané meraním, konkrétne zmeraná dĺžka optickej trasy, strmosť (slope) na 1550 nm, koeficient CD na 1550 nm a výsledná hodnota disperzie, opäť na $\lambda = 1550$ nm.
- Podľa normy ITU-T G.652 pre vlákno typu D a vlnovú dĺžku 1550 nm je typická hodnota koeficientu CD 17 ps/(nm · km).
- V spomínanej tabuľke sa všetky koeficienty merané na rôznych dĺžkach vlákna pohybovali okolo teoretických 17 ps/(nm · km), len meranie na 5 km trase hranične presahuje túto hodnotu. Niektorí výrobcovia stanovujú koeficient CD vlákien G.625.D ≤ 18 ps/(nm · km), čiže sa nejedná o závažné prekročenie limitov a prípadnú kompenzáciu CD treba zvážiť.

Tab. 5.4: Výsledné hodnoty merania chromatickej disperzie.

Vzdialenosť	Strmosť [1550 nm]	CD _{koef} [1550 nm]	CD [1550 nm]
[m]	[ps/(nm ² · km)]	[ps/(nm · km)]	[ps/nm]
4725	0,0615	17,11	80,86
19996	0,0605	17,00	339,95
40072	0,0578	16,78	672,58
80072	0,0583	16,68	1335,65
86251 (80+DCF)	0,0166	3,83	330,19
100063	0,0591	16,73	1673,95
6183 DCF	-0,4434	-163,19	-1008,99
Merací rozsah (1475–1625) nm			

- Pre jednotlivé dĺžky optických trás, uvedené v tab. 5.4 (okrem trasy so zaradným DCF vláknom a samostatného DCF vlákna) a koeficientu CD: 17 [ps/(nm · km)] udávaného ITU ako štandardná hodnota, činí teoretická hodnota chromatickej disperzie:

$$17 \text{ [ps/(nm} \cdot \text{km)]} \cdot 4,725 \text{ [km]} = 80,325 \text{ [ps/nm]} \quad (5.7)$$

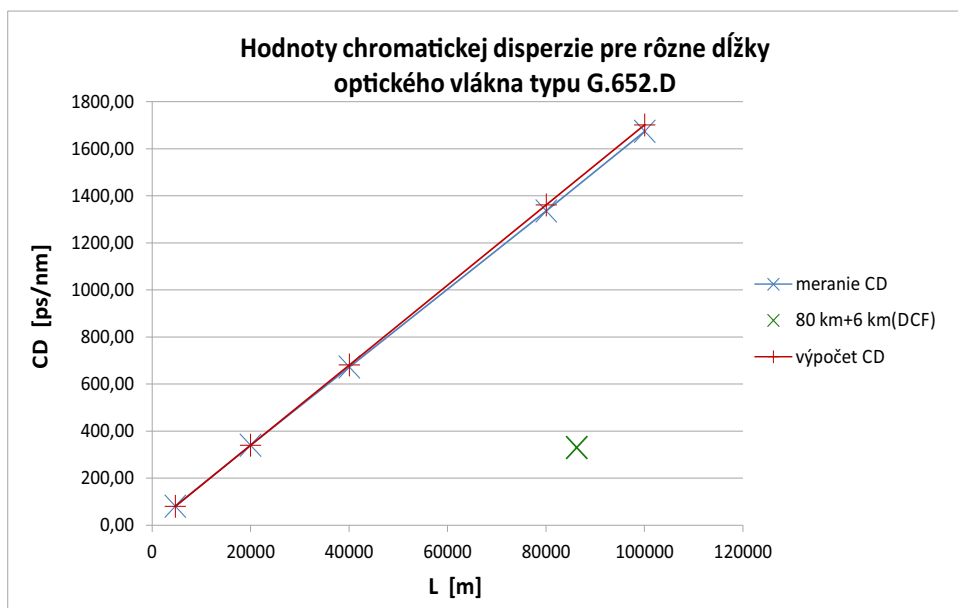
$$17 \text{ [ps/(nm} \cdot \text{km)]} \cdot 19,996 \text{ [km]} = 339,932 \text{ [ps/nm]} \quad (5.8)$$

$$17 \text{ [ps/(nm} \cdot \text{km)]} \cdot 40,072 \text{ [km]} = 681,224 \text{ [ps/nm]} \quad (5.9)$$

$$17 \text{ [ps/(nm} \cdot \text{km)]} \cdot 80,072 \text{ [km]} = 1361,224 \text{ [ps/nm]} \quad (5.10)$$

$$17 \text{ [ps/(nm} \cdot \text{km)]} \cdot 100,063 \text{ [km]} = 1701,071 \text{ [ps/nm]}. \quad (5.11)$$

- Vypočítané hodnoty CD (červená farba) sú porovnané s nameranými hodnotami (modrá farba) v grafe, ktorý znázorňuje obr. 5.7. Ďalej je v ňom znázornená výsledná hodnota merania optickej trasy 80 km + 6 km (DCF), (spolu 86 251 m) zelenou farbou.
- Z merania ďalej vyplýva, že ak by sme uvažovali na prijímacej strane 1 dB power penalty, (tab. 2.3 pre rýchlosť 10 Gbit/s a vyššie), potom je nutná kompenzácia chromatickej disperzie pre použitie vlákna G.652.D o dĺžke 80 km a viac (100 km).
- Kompenzácia disperzie bola vykonaná na vlákne dĺžky 80 km, ktoré vykazovalo disperziu 1335,65 [ps/nm], pričom hodnota disperzie kompenzačného vlákna o dĺžke približne 6 km činila –1008,99 [ps/nm] (záporný koeficient CD). Výsledná hodnota disperzie celkovej trasy o dĺžke 86 km bola 330,19 [ps/nm].

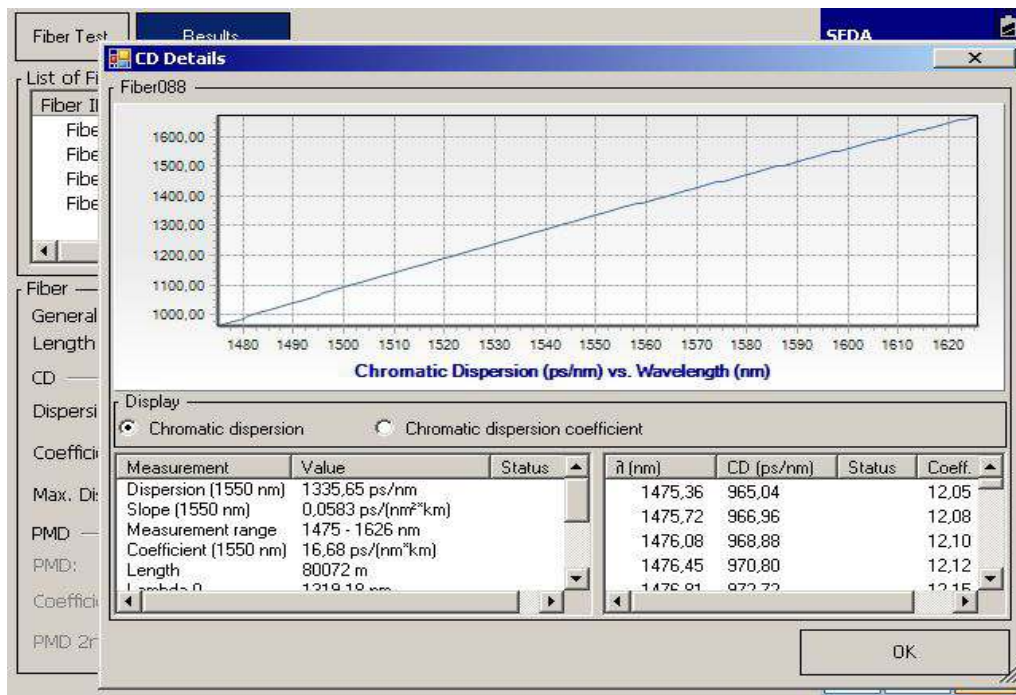


Obr. 5.7: Porovnanie vypočítaných a nameraných hodnôt CD.

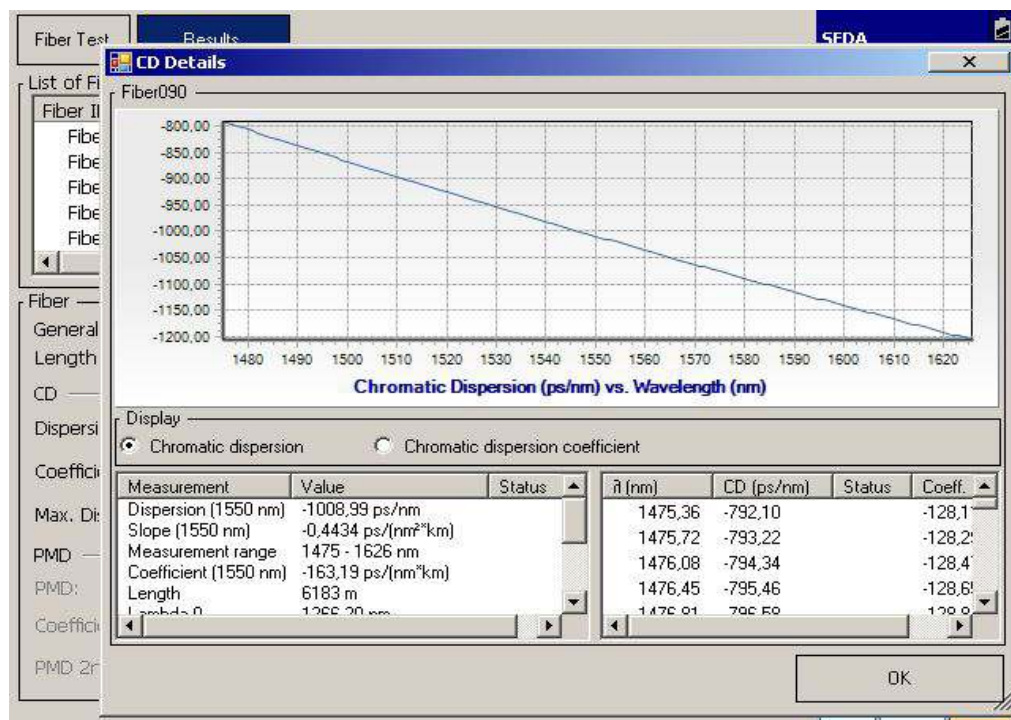
- Po zredukování disperzie na únosnú mieru sa znižuje chybovosť na prijímacej strane. V prípade zníženia disperzie na nulovú hodnotu narastá riziko vzniku nelineárnych javov.

Zaujímavé výsledky prináša porovnanie tohoto merania – konkrétne kompenzácie 80 km + 6 km DCF a porovnávacieho merania – kapitola 4.1, tab. 4.3 a 4.4. Výsledky sú prakticky totožné – ako koeficienty CD tak i celková chromatická disperzia.

Obr. 5.8 a 5.9 znázorňujú výstupy testeru CD/PMD pre testovanie chromatickej disperzie, konkrétne pre 80 km a pre DCF vlákno (6 km) možno pozorovať klesajúci priebeh.



Obr. 5.8: Priebch CD na jednotlivých vlnových dĺžkach, 80 km vlákno G.652.D.



Obr. 5.9: Priebch CD na jednotlivých vlnových dĺžkach, 6 km DCF vlákno.

ZÁVER

Koncepcia bakalárskej práce predstavuje prehľadové zoznámenie sa s javmi CD a PMD, vplyvajúcimi na optický prenos. V úvode do práce som sa venoval témam v rámci prvej kapitoly so zámerom uviesť dôležité pojmy. Následne som v ďalších kapitolách nadviazal na riešenie problematiky CD (kapitola č. 2) a PMD (kapitola č. 3).

Štýl jednotlivých kapitol sa nesie v snahe pojednať o vzniku týchto javov, o ich parametroch ovplyvňujúcich prenos, ako aj o limitných hodnotách ITU-T, ktoré sú zárukou stabilného prenosu pri najhorších možných podmienkach. V práci nie sú opomenuté ani možnosti eliminácie javov v snahe zníženia ich negatívneho dopadu na prenosový systém.

Väčší dôraz prináleží téme PMD, ktorá sa v porovnaní s CD vyznačuje menšou stabilitou, čo v prenosových systémoch znamená ohrozenie stabilného prenosu v dôsledku náhodného charakteru javu. Pri rastúcom trende prenosových rýchlostí sa zvyšuje vplyv PMD, čo len podčiarkuje dôležitosť merania tohoto javu a disperzií všeobecne dnes i v budúcnosti.

V práci sú taktiež uvedené metódy merania parametrov CD a PMD (DGD) optických trás, ich výhody a nevýhody, prípadne vhodnosť použitia v teréne či laboratórnych podmienkach. Záleží na charaktere metód. Konfigurácie jednotlivých metód sú uvedené v blokových schémach.

Ďalšie kapitoly majú praktický charakter, konkrétne kapitoly č.4 a č.5. Porovnávanie meranie CD a PMD za pomoci dvoch totožných meracích prístrojov (modulárna meracia platforma EXFO FTB-200), ako i výsledky merania sú uvedené v štvrtej kapitole. Vo veľkej miere sú zhodné, čo prináša pozitívnu informáciu v zmysle spoľahlivosti meraní parametrov optických trás. Ďalej prebehlo doplnkové meranie CD/PMD niekoľkých konfigurácií jedným z prístrojov.

Piata kapitola združuje výsledky experimentálneho merania PMD a CD pri uvedení meraných konfigurácií optických trás a následných záverov. Meranie CD kompenzačného vlákna a následnej kombinácie s klasickým vláknom demonštruje efektivitu kompenzácie javu CD.

Je nutné podotknúť, že merania prebiehali v laboratórnych podmienkach Laboratória prenosových médií a optických sietí FEKT, VUT Brno.

V samotnom závere by som rád vyzdvihol dôležitosť merania parametrov optických trás, ešte pred nasadením technológie na danú optickú trasu. Týmto postupom sa dá predísť značným problémom, kedy by sa ich dodatočné riešenie podpísalo predovšetkým na zvýšení finančných nákladov.

LITERATÚRA

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Centa, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] KARÁSEK, Miroslav a Tomáš ZAHŘÁDKA. *Disperze signálu v optických vláknových vlnovodech*. 1. vydanie. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1990, 132 s. ISBN 80-200-0216-2
- [3] HORÁK, Zdeněk a František KRUPKA. *Fyzika : příručka pro vysoké školy technického směru*. 2. vyd. Zväzok 2. Praha: SNTL, Nakladatelství technické literatury, Bratislava: ALFA, Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1976, celkom 1130 s.
- [4] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky; Optoelektronika a optoelektronické prvky*. 1. vydanie. 3. diel. Praha: BEN, Technická literatura, 2005, 208 s. ISBN 80-7300-184-5. Kapitola 12, O světle.
- [5] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. *Technická univerzita Ostrava*, verzia: 2.1.3, 2006. [cit. 2012-10-25]. 172 s. Dostupné z URL: <<http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>>.
- [6] STÍSKAL, Radoslav *Vplyv disperzie v optických vláknach G.652-655 na prenášaný signál pri prenosových rýchlostiach vyšších ako 2,5 Gbit/s*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Elektrotechnická fakulta, Katedra telekomunikácií, 2006. 71 s. Diplomová práca. Vedúci práce: Ing. Branislav Lihosit.
- [7] KYSELÁK, Martin. *Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2008, 110 s. Doktorská práca. Vedúci práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [8] BERAN, Josef a Jan BROUČEK. *Kdy měřit a kdy neměřit CD/PMD na optických trasách?* PROFiber Networking s.r.o, 2012. [cit. 2012-10-26].
- [9] BERAN, Josef. *Měření disperze CD/PMD*. PROFiber Networking s.r.o. 2012. [cit. 2012-11-23].
- [10] BERAN, Josef a Jan BROUČEK. *Měření a monitorování PMD trasy za provozu nebo bez provozu?* [online]. PROFiber Networking s.r.o, 2003. Posledná aktualizácia 2012-10-25 [cit. 2012-11-23]. Dostupné z URL: <<http://goo.gl/JAlNa>>.

- [11] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B LEIGHTON a Matthew SANDS. *FEYNMANOVY přednášky z fyziky: s řešenými příklady*. 1. vyd. 3. dotlač. Praha: Fragment, 2005, 732 s. ISBN 80-7200-405-0.
- [12] WILFERT, Otakar. *Kvantová a laserová elektronika*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. 141 s. Skriptum. ISBN: 978-80-214-4493-5
- [13] YAMANE, Kazuo. *New functionalities for advanced optical interfaces: Dispersion compensation* [online]. 2012, posledná aktualizácia 2011-15-07 [cit. 2012-10-27]. Dostupné z URL: <<http://www.docstoc.com/docs/85164258/Dispersion-compensation-in-fibre-optical-transmission>>.
- [14] International Telecommunication Union. *Handbook Optical fibres, cables and systems* [online]. 2009, posledná aktualizácia 2010-2-24 [cit. 2012-10-26]. Dostupné z URL: <<http://goo.gl/hj0kg>>.
- [15] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *Chromatická disperze jednovidových optických vláken a její měření* [online]. 2003, posledná aktualizácia 2003-12-4 [cit. 2012-10-27]. Dostupné z URL: <<http://www.mikrokom.eu/sk/pdf/chrom-disperze.pdf>>.
- [16] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *POTDR – Lokalizace úseků se zvýšenou hodnotou PMD v optických trasách* [online]. 2003, posledná aktualizácia 2004-1-27 [cit. 2012-11-20]. Dostupné z URL: <<http://www.mikrokom.eu/sk/pdf/potdr.pdf>>.
- [17] ITU-T Recommendation G.695: *Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications* [online]. ITU-T, 10/2010, posledná aktualizácia 2011-07-04 [cit. 2012-11-13]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.695-201010-I/en>>.
- [18] ITU-T Recommendation G.655: *Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable* [online]. ITU-T, 11/2009, posledná aktualizácia 2010-05-17 [cit. 2012-11-13]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.655-200911-I/en>>.
- [19] KUCHARSKI, Maciej a Pavel DUBSKÝ. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. Praha: Mikrokom, 1998, 141 s.

- [20] FARELL, Gerald, School of Electronics and Communication Engineering. *Introduction to System Planning and Power Budgeting* [online]. Applied Optoelectronics Centre, 2008, posledná aktualizácia 2005-12-15 [cit. 2012-11-07]. Dostupné z URL: <<http://goo.gl/UO5vf>>.
- [21] DROCIÁK, Petr. *Vliv polarizační disperze na chybovost optického kanálu*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2008. 103 s. Diplomová práce. Vedúci práce Ing. Martin Kyselák, Ph.D.
- [22] ITU-T Recommendation G.691: *Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers* [online]. ITU-T, 10/2010, posledná aktualizácia 2006-07-19 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.691-200603-I/en>>.
- [23] ITU-T Recommendation G.652: *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* [online]. ITU-T, 11/2009, posledná aktualizácia 2010-05-10 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-200911-I/en>>.
- [24] ŤUPA, Martin. *Polarizační vidová disperze – PMD*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. 112 s. Diplomová práce. Vedúci práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [25] Profiber Networking. *FTB-5700 Single-Ended Dispersion Analyzer: AUTOMATED CD AND PMD MEASUREMENTS IN ONE EASY-TO-USE MODULE* [online]. 2011, posledná aktualizácia 2007-12-20 [cit. 2012-11-21]. Dostupné z URL: <<http://goo.gl/260i8>>.
- [26] ŤUPA Martin, Miloslav FILKA a Otto DOSTÁL. Polarizační vidová disperze – PMD. *Elektrorevue: časopis pro elektrotechniku*. [online]. 2012-04-03, č.24, ISSN: 1213-1539. [cit. 2013-02-23]. Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/20/polarizacni-vidova-disperze—pmd/>>.
- [27] ČEPA L, M. LUCKI a J. HÁJEK. Access Server, České vysoké učení technické v Praze, FEL *Porovnání metod kompenzace chromatické disperze u klasického optického jednovidového vlákna*. [online]. 2010-02-03, ISSN: 1214-9675. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010020001>>.

- [28] OFA, Optical Fibre Apparatus. *Jednovidová optická vlákna se sníženou citlivostí na ohyby* [online]. posledná aktualizácia 2010-04-27 [cit. 2013-5-19]. Dostupné z URL: <http://www.ofacom.cz/index.php?option=com_contentview=articleid=206:g657-v>.

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

- BER bitová chybovosť – Bit Error Rate
- CD chromatická disperzia – Chromatic Dispersion
- CWDM hrubý vlnový multiplex – Coarse Wavelength Division Multiplex
- DCF kompenzačné vlákno – Dispersion Compensating Fiber
- DCM kompenzačný modul – Dispersion Compensating Module
- DFF vlákno s plochou disperznou charakteristikou – Dispersion Flattened Fiber
- DGD diferenciálne skupinové oneskorenie – Differential Group Delay
- DOP stupeň polarizácie – Degree of Polarisation
- DS posunutá disperzná charakteristika – Dispersion Shifted
- DWDM hustý vlnový multiplex – Dense Wavelength Division Multiplex
- EM elektromagnetický – electromagnetic
- FWM štvorvlnné zmiešavanie – Four Wave Mixing
- GI gradientný priebeh indexu lomu – Gradient Index
- GINTY všeobecná interferometrická metóda – General Interferometry Analysis
- HOM špeciálne mnohovidové vlákna – High Order Mode Fiber
- ITU-T medzinárodná telekomunikačná únia – International Telecommunication Union-Telecommunications
- NRZ bez návratu k nule – Not Return Zero
- NZ-DSF vlnová dĺžka nulovej CD leží mimo prenosového pásma – Non-Zero Dispersion Shifted Fiber
- PMD polarizačná módová disperzia – Polarisation Mode Dispersion
- POTDR kombinácia metódy merania PMD s metódou OTDR – Polarization Optical Time Domain Reflectometry
- RGD relatívne skupinové oneskorenie – Relative Group Delay
- RMS stredná kvadratická hodnota – Root Mean Square

SI skokový priebeh indexu lomu – Step Index

SNR odstup signál-šum – Signal to Noise Ratio

SOP zmena stavu polarizácie – State of Polarisation

TINTY tradičná interferometrická metóda – Traditional Interferometry Analysis

WDM systém vlnového multiplexu – Wavelength Division Multiplex

WWDM široký vlnový multiplex – Wide Wavelength Division Multiplex

ZOZNAM PRÍLOH

A Prvá príloha – meranie PMD	91
A.1 Prvá časť merania	91
A.2 Druhá časť merania	92
B Druhá príloha – DVD	95
B.1 Bakalárska práca – Řešení problematiky CD a PMD v optických sítích	95

A PRVÁ PRÍLOHA – MERANIE PMD

A.1 Prvá časť merania

Vysvetlivky:

- 5km;1.mer...meraná trasa dĺžky 5 km, meranie číslo 1,
- 5km;1.mer; 1ps...meraná trasa dĺžky 5 km, meranie číslo 1, hodnota emulátoru PMD = 1 ps.
- avg 5km; 1ps...priemer troch meraní trás dĺžky 5 km pri hodnote emulátoru PMD = 1 ps.
- Trasa mer. [m]...dĺžka trasy zistená testerom CD/PMD,

Tab. A.1: Prvá časť merania, samostatné vlákna rôznych dĺžok.

Popis námeru	Trasa mer. [m]	PMD 2.rád [$\frac{\text{ps}}{\text{nm}}$]	PMD [ps]	PMD _{koef} [$\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}$]
5 km; 1.mer	4725	0,0041	0,09	0,0436
5 km; 2.mer	4725	0,0049	0,10	0,0477
5 km; 3.mer	4725	0,0039	0,09	0,0427
priemer 5 km	4725	0,0043	0,09	0,0447
20 km; 1.mer	19995	0,0649	0,38	0,0846
20 km; 2.mer	19996	0,0565	0,35	0,0789
20 km; 3.mer	19996	0,0592	0,36	0,0807
priemer 20 km	19996	0,0602	0,36	0,0814
40 km; 1.mer	40072	0,0532	0,34	0,0541
40 km; 2.mer	40072	0,0398	0,30	0,0468
40 km; 3.mer	40072	0,0553	0,35	0,0552
priemer 40 km	40072	0,0494	0,33	0,0520
80 km; 1.mer	80072	0,1382	0,55	0,0617
80 km; 2.mer	80072	0,2153	0,69	0,0770
80 km; 3.mer	80072	0,1342	0,54	0,0608
priemer 80 km	80072	0,1626	0,59	0,0665
100 km; 1.mer	100065	0,2010	0,67	0,0665
100 km; 2.mer	100065	0,1958	0,66	0,0657
100 km; 3.mer	100065	0,1691	0,61	0,0610
priemer 100 km	100065	0,1886	0,65	0,0644

A.2 Druhá časť merania

Tab. A.2: Emulátor PMD (1; 5 a 10) ps+ vlákno dĺžky 5 km.

Popis námeru	Trasa mer. [m]	PMD 2.rád [$\frac{\text{ps}}{\text{nm}}$]	PMD [ps]	PMD _{koef} [$\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}$]
5 km; 1.mer; 1 ps	4730	0,4737	1,02	0,4698
5 km; 2.mer; 1 ps	4730	0,4188	0,96	0,4414
5 km; 3.mer; 1 ps	4730	0,4857	1,03	0,4758
avg 5 km; 1 ps	4730	0,4594	1,00	0,4623
5 km; 1.mer; 5 ps	4739	12,7494	5,30	2,4343
5 km; 2.mer; 5 ps	4739	14,2516	5,61	2,5758
5 km; 3.mer; 5 ps	4739	11,0617	4,94	2,2685
avg 5 km; 5 ps	4739	12,6876	5,28	2,4262
5 km; 1.mer; 10 ps	4751	61,6858	11,66	5,3506
5 km; 2.mer; 10 ps	4751	69,3488	12,37	5,6733
5 km; 3.mer; 10 ps	4751	63,3310	11,82	5,4215
avg 5 km; 10 ps	4751	64,7885	11,95	5,4818

Tab. A.3: Emulátor PMD (1; 5 a 10) ps+ vlákno dĺžky 20 km.

Popis námeru	Trasa mer. [m]	PMD 2.rád [$\frac{\text{ps}}{\text{nm}}$]	PMD [ps]	PMD _{koef} [$\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}$]
20 km 1.mer; 1 ps	19998	0,3917	0,93	0,2079
20 km 2.mer; 1 ps	19999	0,4938	1,04	0,2333
20 km 3.mer; 1 ps	19998	0,4463	0,99	0,2218
avg 20 km; 1 ps	19998	0,4439	0,99	0,2210
20 km 1.mer; 5 ps	20008	11,6262	5,06	1,1319
20 km 2.mer; 5 ps	20008	14,2107	5,60	1,2511
20 km 3.mer; 5 ps	20006	15,1368	5,78	1,2916
avg 20 km; 5 ps	20007	13,6579	5,48	1,2249
20 km 1.mer; 10 ps	20019	57,1828	11,23	2,5096
20 km 2.mer; 10 ps	20018	71,3566	12,54	2,8035
20 km 3.mer; 10 ps	20018	75,5179	12,90	2,8841
avg 20 km; 10 ps	20018	68,0191	12,22	2,7324

Tab. A.4: Emulátor PMD (1; 5 a 10) ps+ vlákno délky 40 km.

Popis námeru	Trasa mer. [m]	PMD 2.rád [$\frac{\text{ps}}{\text{nm}}$]	PMD [ps]	PMD _{koef} [$\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}$]
40 km 1.mer; 1 ps	40075	0,4177	0,96	0,1516
40 km 2.mer; 1 ps	40075	0,3386	0,86	0,1365
40 km 3.mer; 1 ps	40075	0,4522	1,00	0,1577
avg 40 km; 1 ps	40075	0,4028	0,94	0,1486
40 km 1.mer; 5 ps	40084	14,2513	5,61	0,8854
40 km 2.mer; 5 ps	40084	10,7926	4,88	0,7705
40 km 3.mer; 5 ps	40084	15,3505	5,82	0,9189
avg 40 km; 5 ps	40084	13,4648	5,44	0,8583
40 km 1.mer; 10 ps	40096	53,3873	10,85	1,7134
40 km 2.mer; 10 ps	40096	64,9415	11,97	1,8898
40 km 3.mer; 10 ps	40096	64,1244	11,89	1,8779
avg 40 km; 10 ps	40096	60,8177	11,57	1,8270

Tab. A.5: Emulátor PMD (1; 5 a 10) ps+ vlákno délky 80 km.

Popis námeru	Trasa mer. [m]	PMD 2.rád [$\frac{\text{ps}}{\text{nm}}$]	PMD [ps]	PMD _{koef} [$\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}$]
80 km 1.mer; 1 ps	80075	0,5097	1,06	0,1185
80 km 2.mer; 1 ps	80075	0,5265	1,08	0,1204
80 km 3.mer; 1 ps	80075	0,4812	1,03	0,1151
avg 80 km; 1 ps	80075	0,5058	1,06	0,1180
80 km 1.mer; 5 ps	80084	13,4702	5,43	0,6067
80 km 1.mer; 5 ps	80084	16,4760	6,03	0,6735
80 km 1.mer; 5 ps	80084	15,9514	5,91	0,6602
avg 80 km; 5 ps	80084	15,2992	5,79	0,6468
80 km 1.mer; 10 ps	80096	57,0662	11,22	1,2534
80 km 1.mer; 10 ps	80096	58,8622	11,39	1,2730
80 km 1.mer; 10 ps	80096	56,0626	11,12	1,2423
avg 80 km; 10 ps	80096	57,3303	11,24	1,2562

Tab. A.6: Emulátor PMD (1; 5 a 10) ps+ vlákno délky 100 km.

Popis námeru	Trasa mer. [m]	PMD 2.rád [$\frac{\text{ps}}{\text{nm}}$]	PMD [ps]	PMD _{koef} [$\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}$]
100 km 1.mer; 1 ps	100068	0,7436	1,28	0,1280
100 km 2.mer; 1 ps	100068	0,8971	1,41	0,1406
100 km 3.mer; 1 ps	100068	0,8244	1,35	0,1348
avg 100 km; 1 ps	100068	0,8217	1,35	0,1345
100 km 1.mer; 5 ps	100077	11,8532	5,09	0,5091
100 km 1.mer; 5 ps	100077	13,3951	5,41	0,5412
100 km 1.mer; 5 ps	100077	15,4769	5,84	0,5839
avg 100 km; 5 ps	100077	13,5751	5,45	0,5447
100 km 1.mer; 10 ps	100089	63,4695	11,83	1,1825
100 km 1.mer; 10 ps	100088	65,1955	11,99	1,1984
100 km 1.mer; 10 ps	100089	60,0785	11,51	1,1504
avg 100 km; 10 ps	100089	62,9145	11,78	1,1771

B DRUHÁ PRÍLOHA – DVD

B.1 Bakalárska práca – Řešení problematiky CD a PMD v optických sítích