

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

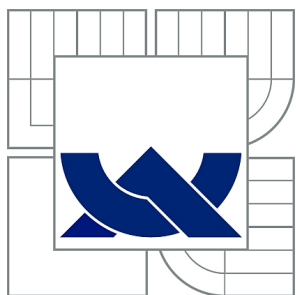
MĚŘENÍ DISPERZÍ OPTICKÝCH PŘENOSŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

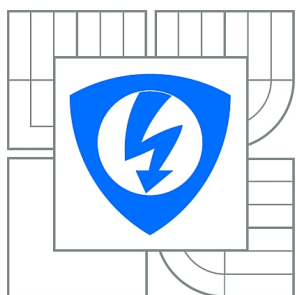
Bc. RASTISLAV MOTÚZ

BRNO 2015



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

MĚŘENÍ DISPERZÍ OPTICKÝCH PŘENOSŮ

DISPERSION MEASUREMENTS OF OPTICAL TRANSMISSIONS.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. RASTISLAV MOTÚZ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Rastislav Motúz

ID: 136563

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Měření disperzí optických přenosů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem práce bude řešení problematiky polarizační vidové disperze v jednovidových optických vláknech. Práce se bude zabývat popisem metod měření polarizační vidové disperze a následně návrhem metody měření PMD pomocí spektrálního optického analyzátoru. Výsledný návrh bude ověřen měřením. Hodnoty získané měřením budou srovnány s referenčními hodnotami získanými pomocí CD/PMD analyzátoru EXFO FTB-5700.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. CENTA, Brno 2009.
- [2] FILKA, M. Přenosová média. Skripta laboratoře. VUT FEKT, Brno 2003.
- [3] KUCHARSKI, M., DUBSKÝ, P. Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras. Mikrokom, Praha 2001.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 26.5.2015

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

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Diplomová práce se nejprve věnuje teoretickému rozboru jevů vyskytujících se v optických vláknových přenosech. V teoretické části je pojednáno o jevech lineárních a nelineárních, dále je prostor věnován disperzím, které se významnou měrou podílejí na kvalitě optovláknového přenosu. Těžisková pasáž této části práce se věnuje jevu polarizace jakožto základu jevu Polarizační vidové disperze (PMD), která je hlavním bodem zájmu. Následuje detailní popis PMD z hlediska polarizačních stavů, limitních hodnot, metod kompenzace a metod měření. Pozornost čitatele by se v tomto bodě měla upřít k metodě měření s fixním analyzátozem.

Praktická část práce definuje návrh měření PMD pomocí metody s fixním analyzátozem, kde ve funkci analyzátoru vystupuje optický spektrální analyzátor MS9740A. Návrh se pak věnuje referenčnímu měření s využitím modulární platformy EXFO FTB-200 v kombinaci s CD/PMD modulem EXFO FTB-5700 pro porovnání naměřených hodnot. Dále jsou uvedeny naměřené hodnoty, které byly vyhodnoceny z hlediska limitních hodnot definovaných normou. Závěr práce porovnává referenční měření a měření s fixním analyzátozem mezi sebou, přičemž jsou uvedeny výhody a nevýhody těchto měření.

KLÍČOVÉ SLOVÁ

Disperze, vlákno, polarizace, PMD, DGD, SOP

ABSTRACT

This thesis firstly theoretically describes phenomena which appear in optical fiber transmission. The theoretical part of the thesis deals with linear and non-linear phenomena, and later on proceeds to dispersions with a more significant effect on the optical transmission quality. It puts polarization to the centre of the phenomenon called Polarization mode dispersion (PMD), which is the main object of our interest. It leads to a deep PMD description from the point of view of polarization states, limit values, compensation methods, and methods of measurement.

The practical part of this thesis deals with a draft of PMD measurement via Fixed Analyzer method. For the purposes of this measurement, we used the optical spectral analyzer MS9740A. In order to compare measured values, the proposed idea then proceeds to the reference measurement by using a modular platform EXFO FTB-200 in combination with CD/PMD module EXFO FTB-5700. Results of measurements have been evaluated for the limit values defined by the standard. In the last chapter of this thesis, the reference measurements are compared to the Fixed Analyzer method. All the advantages and disadvantages of individual measurement methods are identified at the end of this chapter too.

KEYWORDS

Dispersion, fiber, polarization, PMD, DGD, SOP

MOTÚZ, Rastislav *Měření disperzí optických přenosů*: diplomová práce. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 95 s. Vedúci práce bol prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Měření disperzí optických přenosů“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej 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 diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej 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 rady k problematike práce.

Ďalej ďakujem pánovi Ing. Petrovi Münsterovi, Ph.D. za odborné rady, konzultácie a pomoc pri realizácii praktickej časti práce.

V neposlednom rade chcem poďakovať pánovi Ing. Františkovi Urbanovi za zapožičanie polarizačného syntetizéru Agilent N7786B firmy PROFIcomms s. r. o. a pánovi doc. Leošovi Boháčovi, Ph.D. z ČVUT v Prahe, Fakulty elektrotechnickej, Katedry telekomunikačnej techniky, za zapožičanie in-line vláknového polarizéru.

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 tejto diplomovej práci bol realizovaný v laboratóriách podporených projektom SIX; registračné číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačný program Výzkum a vývoj pro inovace.

BRNO

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	13
1 Úvod do problematiky disperzií	14
1.1 Súvislosť indexu lomu s disperziou	14
1.2 Fázová a skupinová rýchlosť	17
1.2.1 Prenosová rýchlosť a disperzia	19
1.3 Optický prenos	19
1.3.1 Prenosové okná – útlmová charakteristika	20
1.3.2 Modely pre popis šírenia energie vo vláknových vlnovodoch	22
1.3.3 Podmienka vidového šírenia v optickom vlákne	23
1.4 Straty pri prenose	24
1.4.1 Lineárne javy	24
1.4.2 Ohyby	26
1.4.3 Nelineárne javy	27
1.5 Disperzie	32
1.5.1 Vidová disperzia	32
1.5.2 Materiálová disperzia	34
1.5.3 Vlnovodová disperzia	37
1.5.4 Profilová disperzia	37
1.6 Chromatická disperzia (CD)	37
1.6.1 Charakteristika CD	37
1.6.2 Limitné hodnoty CD	39
1.6.3 Dôsledky CD	39
1.6.4 Metódy kompenzácie CD	40
1.6.5 Metódy merania CD	41
2 Polarizačná vidová disperzia (PMD)	42
2.1 Svetlo ako vlnenie	42
2.2 Polarizácia – elektrický vektor svetla	43
2.2.1 Polarizácia a Jonesov vektor	45
2.2.2 Dvojlom	46
2.3 DGD	48
2.4 Väzby medzi polarizačnými vidmi	49
2.4.1 Slabá medzividová väzba	50
2.4.2 Silná medzividová väzba	50
2.5 PMD druhého rádu	50
2.6 Limitné hodnoty PMD	51

2.6.1	PMD a rozšírenie pulzu	52
2.7	Vplyv PMD na prenosový kanál	52
2.7.1	Odolnosť modulačných formátov voči PMD	55
2.8	Metódy kompenzácie PMD	55
2.9	Metódy merania PMD	57
2.9.1	Metóda s fixným analyzátorom	57
2.9.2	Tradičná interferometrická metóda, TINTY	59
2.9.3	Obmedzenia metódy TINTY	61
2.9.4	Všeobecná interferometrická metóda, GINTY	62
2.9.5	Polarimetrická metóda	63
2.9.6	Metóda POTDR	64
3	Návrh praktického merania DGD	
	s OSA MS9740A	67
3.1	Metóda s fixným analyzátorom – MS9740A	67
3.2	Referenčné meranie – EXFO FTB-200	68
3.3	In-line vláknový polarizér	69
3.3.1	Princíp in-line polarizéru	69
3.4	PMD emulátor	71
3.5	Referenčné meranie – námer	71
3.6	Metóda s fixným analyzátorom – námer	73
3.6.1	Namerané hodnoty	75
3.7	Vyhodnotenie meraní	79
3.8	Vyhodnotenie meraní trasy s PMD emulátorom	80
	Záver	87
	Literatúra	89
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	94

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Zmena indexu lomu v závislosti na uhlovej frekvencii [3].	16
1.2	Zmena indexu lomu v závislosti na vlnovej dĺžke [4].	16
1.3	Porovnanie rýchlosti svetla v odlišných prenosových prostrediach [6]. . .	17
1.4	Superpozícia dvoch kosínusových vln s frekvenciami v pomere 8:10 [3].	18
1.5	Útlmová charakteristika optického vlákna [1, 6].	20
1.6	Priebeh a) Raileighovho rozptylu, b) Mieho rozptylu na menšej častici, c) Mieho rozptylu na častici väčších rozmerov [12].	26
1.7	Vplyv makro a mikroohybov na útlm vlákna v závislosti na vlnovej dĺžke [6].	27
1.8	Fázová podmienka pre TWM [15].	29
1.9	Jav FWM, vznik fantómových kanálov vo vlákne [6].	31
1.10	Delenie disperzií v optických vláknach [6].	32
1.11	Mnohovidový prenos [6].	33
1.12	Mnohovidový prenos po gradientnom vlákne [1].	33
1.13	Závislosť indexu lomu a skupinového indexu lomu na vlnovej dĺžke [17].	35
1.14	Pozitívna a negatívna disperzia [18].	36
1.15	Priebeh chromatickej disperzie konvenčného vlákna [21].	38
1.16	Disperzná charakteristika pre a)DSF, b) DFF [1].	39
1.17	Vznik medzysymbolových interferencií ako dôsledok CD v závislosti na rýchlosti dátového prenosu [21].	40
2.1	Postup elektromagnetickej vlny [26].	43
2.2	Superpozícia kmitov zložiek x a y vo fáze [3].	43
2.3	Skladanie kmitov v smere osi x a y, zložky E_x a E_y sú vyjadrené v reálnom i komplexnom tvare. [3].	44
2.4	Znázornenie pravotočivej kruhovej polarizácie z bočného pohľadu [28].	44
2.5	Základné tvary Jonesovho vektoru [27].	45
2.6	Optický systém s polarizačným zariadením [27].	46
2.7	Vonkajšie a vnútorné vplyvy spôsobujúce anizotropiu optického vlákna [21, 30].	47
2.8	Polarizačné vidy v dvojlomnom prostredí optického vlákna [21].	47
2.9	Príklad priebehu DGD v závislosti na vlnovej dĺžke [30].	48
2.10	Maxwellove pravdepodobnostné rozloženie hodnôt DGD [21, 30].	49
2.11	Silná väzba medzi vidmi v telekomunikačnom vlákne [21].	49
2.12	Súvislosť parametrov BER a SNR [33].	53
2.13	Diagram oka a SNR, prevzaté z [33].	54
2.14	Diagram oka a Q -faktor, prevzaté z [33].	54
2.15	Blokové schéma optickej PMD kompenzácie [21].	56

2.16	Blokové schéma metódy s fixným analyzátorom [21, 1].	58
2.17	Metóda TINTY [21].	60
2.18	Interferogram – námer metódy TINTY [21, 37].	61
2.19	Metóda GINTY [21].	62
2.20	Polarimetrická metóda [21, 25].	63
2.21	Metóda analýzy SOP [36, 30].	65
2.22	Metóda analýzy DOP [1, 30].	66
3.1	Blokové zapojenie merania (OSA prevzaté z [38]).	67
3.2	Referenčné meranie PMD (EXFO prevzaté z www.profiber.eu).	68
3.3	In-line polarizér [39].	70
3.4	In-line polarizér (1550 nm).	70
3.5	PMD emulátor s oneskorením (1, 5 a 10) ps.	71
3.6	Meranie hodnoty PMD referenčnou metódou so zaradeným PMD emulátorom.	72
3.7	Polarizačný syntetizér Agilent N7786B [40].	74
3.8	Stokesove parametre definujúce polarizačné stavy lineárnej polarizácie.	74
3.9	Usporiadanie meracieho pracoviska, metóda s fixným analyzátorom.	75
3.10	Príklad námeru; 20 km, 5 nm Span.	78
3.11	Príklad námeru; 20 km, 20 nm Span.	78
3.12	Grafické porovnanie hodnôt PMD optickej trasy dĺžky 20 km.	80

ZOZNAM TABULIEK

1.1	Pásma vlnových dĺžok využívaných pre jednovidový optický prenos podľa ITU-T G.692[1, 6].	21
1.2	Hodnoty indexu lomu, skupin. indexu lomu a koeficientu mat. disperzie [17].	35
1.3	Limitné hodnoty koeficientu CD podľa odporúčania ITU-T G.695 [23].	39
2.1	Limitné hodnoty polarizačnej módovej disperzie [1].	51
2.2	Garantované hodnoty PMD pre rôzne vlákna, ITU [30].	51
3.1	Presnosť etalónov PMD emulátoru.	71
3.2	Námer referenčnej metódy CD/PMD testerom EXFO FTB-200 . . .	72
3.3	Námer optickej trasy 20 km bez PMD emulátoru.	76
3.4	Námer trasy so zaradeným PMD emulátorom 1 [ps].	76
3.5	Námer trasy so zaradeným PMD emulátorom 5 [ps].	77
3.6	Námer trasy so zaradeným PMD emulátorom 10 [ps].	77
3.7	Súhrnné výsledky koeficientov PMD a hodnôt PMD námeru samotnej trasy.	80
3.8	Súhrnná tabuľka, namerané i vypočítané hodnoty pre etalón 1 ps. . .	81
3.9	Súhrnná tabuľka, namerané i vypočítané hodnoty pre etalón 5 ps. . .	81
3.10	Súhrnná tabuľka, namerané i vypočítané hodnoty pre etalón 10 ps. . .	82
3.11	Meranie PMD emulátoru metódou Skenovania vlnovej dĺžky (FA). . .	83
3.12	Meranie PMD emulátoru metódou GINTY.	83
3.13	Meranie PMD emulátoru metódou Skramblovania polarizačných stavov.	84
3.14	Porovnávacía tabuľka – referenčné meranie, zaradený PMD emulátor.	85
3.15	Porovnávacía tabuľka – fixný analyzátor, zaradený PMD emulátor. . .	85

ÚVOD

Polarizačná vidová disperzia je jav, ktorý postihuje optovláknovú komunikáciu v moderných optických infraštruktúrach a systémoch.

Charakter poskytovaných služieb typu prenos videa vo vysokom rozlíšení v reálnom čase, dátové služby, či systémy vzdialeného dohľadu a ovládania zariadení určujú trend, ktorý si však vyžaduje väčšiu šírku pásma a vyššie prenosové rýchlosti pre zachovanie kvality prenosu a komfortu, ktorý užívatelia očakávajú.

Dopady polarizačnej vidovej disperzie na stabilitu a vôbec celkovú kvalitu optickej komunikácie sa začínajú citelne prejavovať pri prenosových rýchlostiach vyšších ako $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$. V súčasnosti je však pomerne bežné, že prenosové rýchlosti dosahujú $10 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$, výhladovo možno počítať so $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ a viac. Z uvedeného vyplýva nutnosť merania a vyhodnotenia PMD, v prípade prekročenia limitných hodnôt potreba zvolenia vhodnej varianty kompenzácie, presnejšie potlačenia tohoto negatívneho javu.

Hodnoty PMD danej optickej trasy sú náhodné a premenné v čase, kedy zmena veľkosti PMD závisí od mnohých faktorov. Táto práca sa venuje polarizačnej vidovej disperzii zo širšieho pohľadu, kedy je podrobne popísaná jej súvislosť s javom polarizácie.

Kapitola 1 tvorí bázu práce, teoretický základ, ktorý uvádza čitateľa do problematiky javov vyskytujúcich sa v optovláknových prenosoch. Načrtne podstatu ich vzniku a potenciálne využitie, či snahu o ich potlačenie. Patričná pozornosť je venovaná indexu lomu, ktorý má svoje pevné miesto v popise disperzných javov uvedených neskôršie v tejto kapitole.

Nadväzujúca kapitola 2 sa venuje zadaniu práce v teoretickej rovine. Ako bolo spomenuté, podstatnú časť tvorí pojednanie o polarizácii a s ňou súvisiacim dvojlomom, na ktoré nadväzuje popis DGD a ďalšie spojitosti s PMD. Ďalej sú uvedené limitné hodnoty PMD a možné metódy kompenzácie. Metódy merania PMD sú popísané teoreticky a doplnené ilustračnými schémami zapojenia, kedy sú uvedené i výhody a nevýhody jednotlivých metód merania.

Kapitola 3 pojednáva o návrhu praktických meraní. Konkrétne ide o referenčné meranie prostredníctvom modulárnej meracej platformy EXFO FTB-200 s CD/PMD modulom EXFO FTB-5700 a o meranie metódou s fixným analyzátorom, ktorá využíva optický spektrálny analyzátor MS9740A. Táto kapitola obsahuje rozbor funkčnosti in-line vláknového polarizéru, ďalej krátky popis PMD emulátoru a pojednanie o polarizačnom syntetizére Agilent MS9740A, ktorý bol využitý v metóde merania PMD s fixným analyzátorom. Návrhy meraní prejdú v praktickú realizáciu a následné uvedenie, či vyhodnotenie nameraných hodnôt.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY DISPERZIÍ

1.1 Súvislosť indexu lomu s disperziou

Rýchlosť svetla v určitom prostredí je definovaná indexom lomu prostredia n a môže byť jednoducho určená vzťahom (1.1):

$$v = \frac{c_0}{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}, \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] [1] \quad (1.1)$$

kde je:

- c_0 ... rýchlosť svetla vo vákuu (299 792 458) $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$,
- ϵ ... permitivita prostredia,
- μ ... permeabilita prostredia [1, 2],

Platí, že $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, kde ϵ_0 je permitivita vákua, ϵ_r je relatívna permitivita prostredia, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, kde μ_0 permeabilita vákua a μ_r relatívna permeabilita prostredia.

Vzťah (1.1) je síce dostatočne presný, no nedáva úplnú predstavu o spomalení elektromagnetickej vlny v prostredí odlišnom od vákua, kedy je $n > 1$. Aby mohol byť vzťah $n = \frac{c}{v}$ rozšírený, je nutné uviesť tieto predpoklady:

- Celkové elektrické pole možno vyjadriť ako súčet polí, ktoré sú vytvorené všetkými nábojmi vo vesmíre. Toto platí za každých fyzikálnych podmienok.
- Vždy platí, že radiačné pole vytvorené jedným nábojom je určené jeho zrýchlením. To sa vypočíta s určitým oneskorením pri rýchlosti c [3].

Vyššie uvedené predpoklady platia aj pre priechod svetla, čiže elektromagnetickej vlny sklom. Vzniknuté pole je vytvorené pohybmi všetkých nábojov, vrátane nábojov, ktoré sa v látke pohybujú. Tieto príspevky ovplyvňujú pole zdroja, šíriace sa rýchlosťou c .

Otázka pohybujúcich sa nábojov v skle nachádza svoju odpoveď v podstate zloženia látky. Každá látka sa skladá z atómov. Tieto atómy obsahujú elektróny, ktoré sú rozkmitané elektrickým poľom zdroja, ktoré na ne dopadá a pôsobí na ne silou. Rozkmitané elektróny emitujú pole a prispievajú tak k určitej zmene primárneho poľa, vysielaného zdrojom a tak sa zdá, že sa pole vo vnútri skla pohybuje odlišnou rýchlosťou.

Obraz atómu podľa vlnovej mechaniky hovorí, že v otázkach spojených so svetlom sa elektrón pohybuje tak, akoby bol súčasťou pružiny. Z toho plynie, že na elektróny o hmotnosti m a vlastnej frekvencii ω_0 pôsobí lineárne vratná sila a následne sa chovajú ako malé oscilátory [3].

Z vyššie uvedeného, za pomoci teórie oscilátorov možno písať vzťah pre index lomu (1.2):

$$n = 1 + \frac{N \cdot q_e^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad [-] [3] \quad (1.2)$$

kde je:

- q_e ... náboj elektrónu
- N ... počet nábojov na jednotku objemu (napríklad sklenenej dosky),
- m ... hmotnosť elektrónu,
- ω_0 ... rezonančná frekvencia elektrónu viazaného v atóme (vlastná frekvencia),
- ω ... uhlová frekvencia žiarenia.

Vo vzťahu (1.2) možno sledovať, ako sa mení index lomu v závislosti na frekvencii svetla ω . Pre sklo, tak ako i pre väčšinu plynov (vzduch, vodík, hélium...) odpovedajú vlastné frekvencie elektrónových oscilátorov frekvencii ultrafialového žiarenia. Táto frekvencia je výrazne vyššia, ako frekvencia svetla, a teda možno zanedbať ω^2 . Index lomu sa následne javí ako konštantný.

Za povšimnutie stojí fakt, že s rastúcou ω sa znižuje menovateľ a hodnota indexu lomu sa zväčšuje, čiže n rastie s frekvenciou svetla. Preto sú modré lúče ohýbané viac pri priechode optickým hranolom, ako červené. Tento jav sa nazýva **disperzia**. Je to závislosť indexu lomu na frekvencii – hlavná príčina toho, že svetlo disperguje v spektre pri priechode optickým hranolom.

Aby však vzťah pre disperziu (1.2) dával reálnejšie výsledky, je nutné doň zahrnúť tlmenie (limit doby kmitania atómového oscilátoru). Výraz $(\omega_0^2 - \omega^2)$ sa zmení na $(\omega_0^2 - \omega^2 + i \cdot \gamma \cdot \omega)$, kde γ je koeficient útlmu [3].

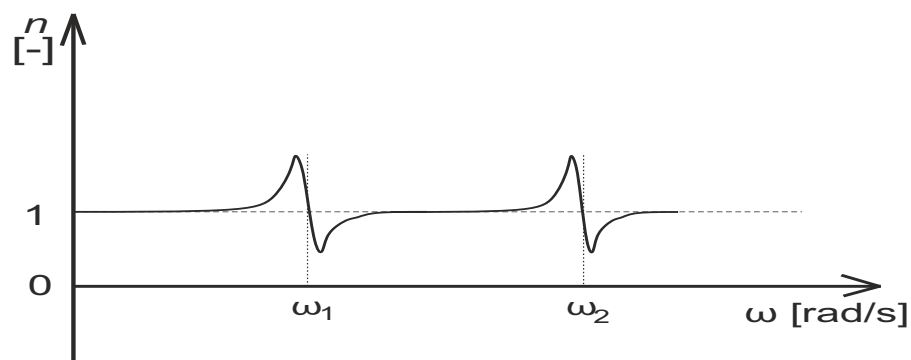
Ďalej uvažujeme skutočnosť, že atóm má viacero rezonančných frekvencií. Modifikovaný disperzný vzťah má nasledovnú podobu:

$$n = 1 + \frac{q_e^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot m} \cdot \sum_k \frac{N_k}{\omega_k^2 - \omega^2 + i \cdot \gamma_k \cdot \omega}, \quad [-] [3] \quad (1.3)$$

kde je:

- N_k ... počet elektrónov v jednotkovom objeme,
- ω_k ... vlastné frekvencie elektrónov,
- γ_k ... koeficient útlmu.

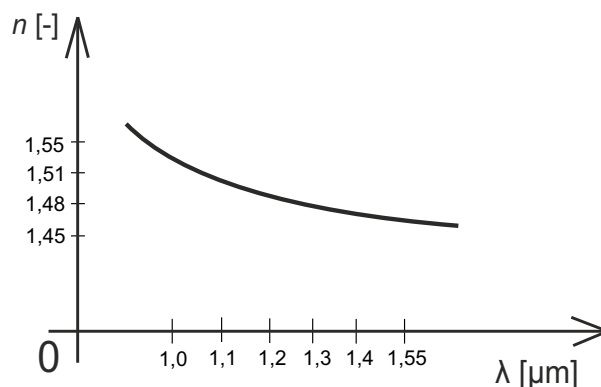
Závislosť indexu lomu na frekvencii, ktorú popisuje disperzný vzťah (1.3), má priebeh podľa krivky zobrazenej na obr. 1.1.



Obr. 1.1: Zmena indexu lomu v závislosti na uhlovej frekvencii [3].

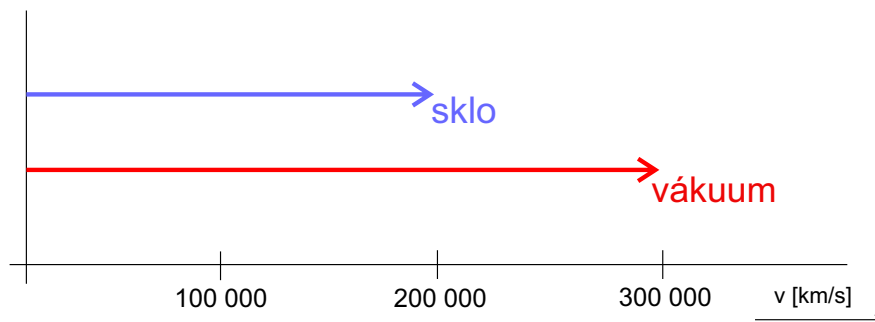
Ak ω nie je blízka k niektorej z rezonančných frekvencií, je sklon krivky kladný a pozorujeme tzv. **normálnu disperziu**. Pre malý rozsah frekvencií ω je sklon krivky záporný, pozorujeme tzv. **anomálnu disperziu**. Toto pomenovanie vzniklo tak, že sa táto disperzia javila nezvyklá v dobe, kedy bola pozorovaná po prvý raz - ešte pred objavom existencie elektrónov [3].

Obr. 1.2 znázorňuje závislosť indexu lomu na vlnovej dĺžke v disperznom prostredí – možno pozorovať evidentný pokles indexu lomu s rastúcou vlnovou dĺžkou λ .



Obr. 1.2: Zmena indexu lomu v závislosti na vlnovej dĺžke [4].

Typická hodnota indexu lomu n pre sklo, ako materiál a prenosové prostredie optických vlákien sa pohybuje v intervale 1,45 až 1,55. Podľa pravidla – čím vyššia hodnota indexu lomu, tým nižšia rýchlosť šírenia sa svetla v danom prostredí, potom možno uvažovať rýchlosť šírenia svetla v optickom vlákne približne $200\,000 \text{ [km} \cdot \text{s}^{-1}]$ – viď. obr. 1.3 [6].



Obr. 1.3: Porovnanie rýchlosti svetla v odlišných prenosových prostrediach [6].

1.2 Fázová a skupinová rýchlosť

V kapitole popisujúcej index lomu je uvedená problematika rôznych rýchlostí EM¹ žiarenia v prostrediach s odlišným indexom lomu. V tejto časti budú uvedené súvislosti s fázovou a skupinovú rýchlosťou šírenia vln.

Rovinná harmonická vlna, ktorá sa šíri v kladnom smere osi x , môže byť popísaná funkciou (1.4):

$$u(x, t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x), \quad [-] [4] \quad (1.4)$$

kde je:

- A ... amplitúda vlny,
- ω ... uhlová frekvencia,
- t ... časový údaj,
- k ... vlnové číslo,
- x ... údaj o polohe.

Ak výraz v zátvorke vo vzťahu (1.4) položíme rovný konštantu a zderivujeme podľa času, dostávame výraz (1.5):

$$\omega - k \cdot \frac{dx}{dt} = 0 \quad \text{po úprave :} \quad \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = v_f, \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] [4] \quad (1.5)$$

kde v_f je fázová rýchlosť.

¹Electromagnetic – elektromagnetický

Fázová rýchlosť je rýchlosť uzlu vlny alebo rýchlosť pohybu fáze vlny. Za určitých podmienok, napríklad pri nasadení rentgenového žiarenia je index lomu $n < 1$. Zo vzťahu (1.1) plynie, že fázová rýchlosť v danom prostredí (sklo) by presahovala konečnú hodnotu rýchlosti svetla vo vákuu c [3].

Pominúc fakty, že v oblasti rentgenového žiarenia neexistujú dostatočne citlivé detektory a je technologicky obtiažne vybudit žiarenie s tak vysokou hodnotou energie svetelných kvánt [1], fázová rýchlosť nereprezentuje rýchlosť prenosu energie obsiahnutej vo vlně – signály nemožno posielat rýchlosťou väčšou ako c [3].

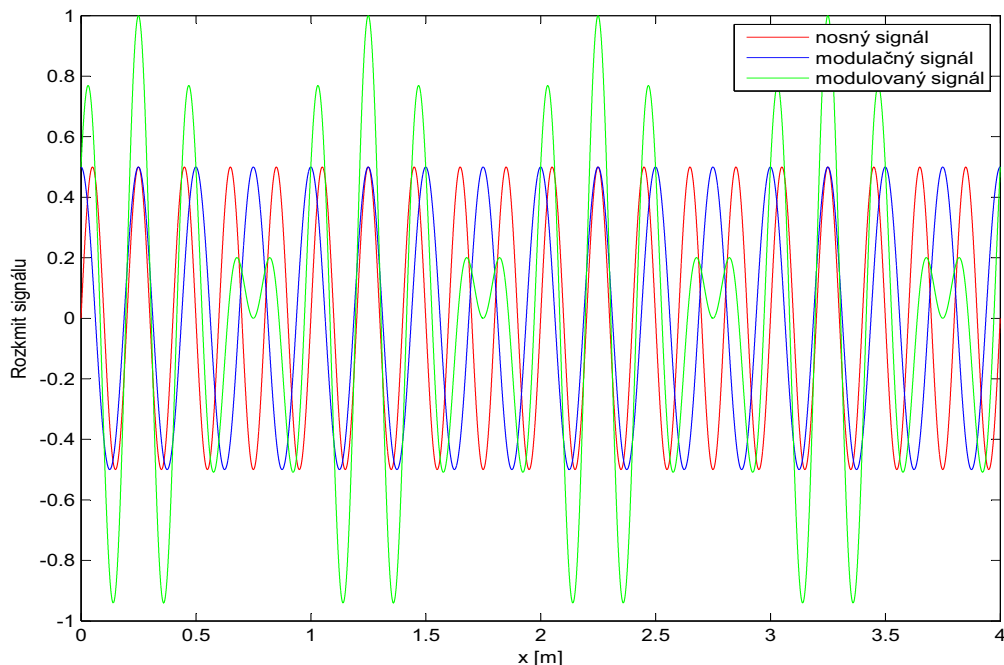
Skupinová rýchlosť, alebo rýchlosť modulácie je taká rýchlosť, ktorou sú vysielané modulované signály. Samotný uzol vlny nemožno považovať za signál. V prípade dokonalej – monochromatickej vlny nemožno určiť presne jej počiatok. Aby bolo možné vlnu použiť ako časovaný signál, je nutné ju pozmeniť, napríklad moduláciou [3].

Skupinová rýchlosť je definovaná vzťahom (1.6):

$$v_s = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{\frac{dk}{d\omega}} = \frac{c_0}{n + \frac{dn}{d\omega}} = \frac{c_0}{n_s}, \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] [1] \quad (1.6)$$

kde n_s je skupinový index lomu, ostatné parametre sú známe.

Na obr. 1.4 je zobrazená klasická superpozícia dvoch harmonických vlnení. Za nosný signál bolo prehlásené vlnenie o frekvencii $\omega = 10 \cdot \pi$ a fáze 0° . Modulačný signál sa líši kmitočtom $\omega = 8 \cdot \pi$ a fázou 90° .



Obr. 1.4: Superpozícia dvoch kosínusových vln s frekvenciami v pomere 8:10 [3].

Skupinová rýchlosť je prakticky rýchlosť pohybu obálky modulovaného signálu, charakterizuje prenos energie vlnením a je menšia ako c [3].

1.2.1 Prenosová rýchlosť a disperzia

Bitová rýchlosť (BR^2), teda počet prenesených bitov za sekundu môže byť v praxi definovaná vzťahom (1.7), kedy sa počíta s rozšírením impulzov vplyvom disperzií. Vzniká tak priestor pre rezervu a vyvarovanie sa medzisymbolových interferencií (ISI^3).

$$BR \leq \frac{1}{4\Delta_t}, \quad [Gb \cdot s^{-1}] \quad (1.7)$$

kde Δ_t znamená časové rozšírenie pulzu pôsobením disperzie.

Pri uvažovaní vidovej disperzie platí pre SI^4 vlákno:

$$BR_{SI} \leq \frac{n_1 c}{2 \cdot L \cdot NA^2}, \quad [Gb \cdot s^{-1}] \quad (1.8)$$

a pre GI^5 :

$$BR_{GI} \leq \frac{2c}{L \cdot n_1 \cdot \Delta_t^2}, \quad [Gb \cdot s^{-1}] \quad (1.9)$$

Prenosová rýchlosť pri uvažovaní chromatickej disperzie:

$$BR_{chrom} \leq \frac{1}{4 \cdot D(\lambda) \cdot L \cdot \Delta\lambda}, \quad [Gb \cdot s^{-1}] \quad (1.10)$$

Následne je možné písať vzťah prenosovej rýchlosti vzhľadom k zloženej disperzii:

$$BR_{zlož} \leq \frac{1}{4\sqrt{\Delta t_{mod}^2 + \Delta t_{chrom}^2}}, \quad [Gb \cdot s^{-1}] \quad (1.11)$$

kde je:

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

1.3 Optický prenos

Pre optické prenosi sú využívané svetlovody, ktoré pozostávajú z jadra a plášťa o rozdielnych indexoch lomu. Principiálne je optický prenos založený na totálnom odraze svetla na rozhraní jadro-plášť.

²Bit Rate

³Intersymbol Interference

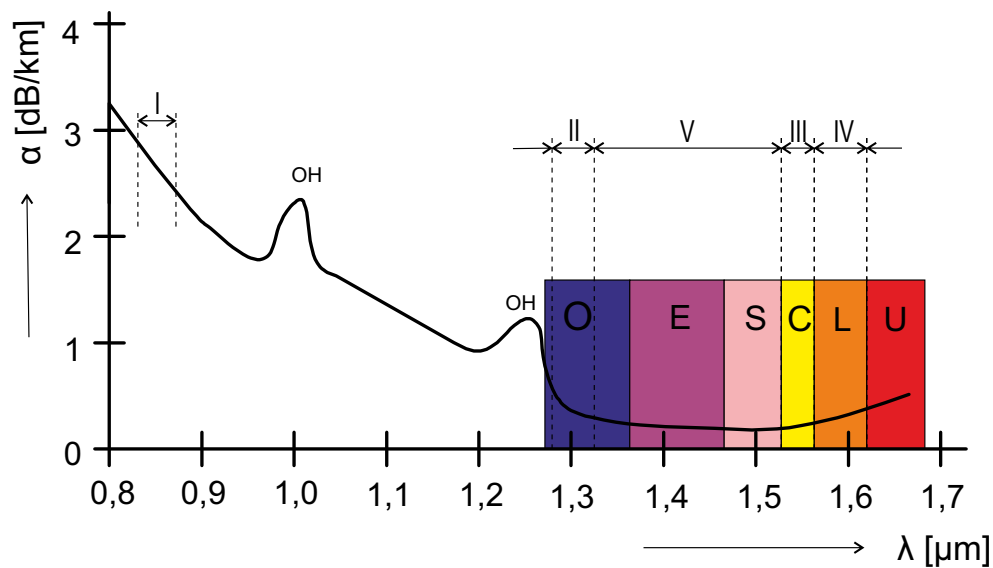
⁴Step Index – skoková zmena indexu lomu

⁵Graded Index – postupná zmena indexu lomu

V roku 1966 bola publikovaná práca od autorov Charles Kao a George Hockham vo vtedajších STL⁶ laboratóriách a poukázala na fakt, že optický prenos by sa stal realitou, ak by koeficient útlmu dosiahol hodnoty $20 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$. Vtedajšie sklo obsahovalo veľa nečistôt vo forme prímiesí, prevažne kovových iónov (železo, meď, vanád, chróm), pre telekomunikačné účely nepostačujúce. V roku 1970 sa podarilo vyrobiť optické vlákno zo syntetického kremeňa, ktorého merný útlm bol nižší ako $20 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$. Tento údaj bol nameraný pri pracovnej vlnovej dĺžke 850 nm . V roku 1975 činila hodnota merného útlmu už $4 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ a klesajúci trend pokračoval i naďalej [7, 1].

1.3.1 Prenosové okná – útlmová charakteristika

Na obr. 1.5 je zobrazená útlmová charakteristika optického vlákna, teda závislosť merného útlmu na pracovnej vlnovej dĺžke. V grafe sú vyznačené tzv. prenosové okná a takisto pásma využívané pre prenos v optických sieťach.



Obr. 1.5: Útlmová charakteristika optického vlákna [1, 6].

Okno I (820 nm – 880 nm) je charakteristické pre mnohovidový prenos. Táto oblasť je využívaná v prenosoch optických prístupových sietí, z čoho pramenia prenosy na kratšie vzdialenosti a možnosť nasadenia lacnejších zdrojov optického žiarenia.

⁶Standard Telecommunications Laboratories

Hodnoty merného útlmu sú však pre diaľkové prenosy – jednovidový prenos príliš vysoké [1, 6].

Okno II (1280 nm–1335 nm) značí prvú oblasť vlnových dĺžok, ktorá sa využívala pre diaľkové, jednovidové prenosy. Hodnota merného útlmu sa pohybovala v okolí $0,35 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ [1].

Okno III (1530 nm–1565 nm) je intervalom, ktorý je charakteristický minimom merného útlmu pre klasické kremíkové vlákno $0,19 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ až $0,22 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$. Tento fakt sa s výhodou využíva v transportných sieťach, diaľkových prenosoch [1].

Okno IV (1565 nm–1625 nm) je oknom s mierne vyšším merným útlmom ako v okne III, avšak dané rozdiely sú malé, pre prax bez väčšieho dopadu na prenos. Pri nasadení moderných technológií WDM⁷ a optických zosilňovačov sa s výhodou zdvojnásobí prenosová kapacita (okno III a IV) [1].

Okno V (1335 nm–1530 nm). Koncom 90. rokov boli zvládnuté techniky výroby optických vlákien do takej miery, že sa odstránilo lokálne maximum merného útlmu na vlnovej dĺžke 1383 nm, ktoré zapríčiňovali v hlavnej miere prímesty v podobe iónov OH na svojom rezonančnom kmitočte. Na obr. 1.5 vidno ďalšie dve lokálne útlmové maximá, ktoré sú však mimo prenosových okien. Spojením okien II až V vzniká prenosový kanál o šírke približne 50 THz [1].

Na obr. 1.5 sú tiež farebne odlíšené prenosové pásma. Ich názvy spolu s príslušnými rozsahmi vlnových dĺžok uvádza tabuľka 1.1.

Tab. 1.1: Pásma vlnových dĺžok využívaných pre jednovidový optický prenos podľa ITU-T G.692[1, 6].

Pásmo	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

Útlmové lokálne maximá (anglicky water peaks) na vlnových dĺžkach (950, 1244 a kedysi 1383) nm rezultujú z prítomnosti vody, ktorá sa dostane do optického materiálu pri výrobe vlákna počas chemických procesov, alebo ako vlhkosť v prostredí, v ktorom sa optické vlákno nachádza [6].

⁷Wavelength Division Multiplex

1.3.2 Modely pre popis šírenia energie vo vláknových vlnovodoch

Sú známe dva základné modely, ktoré popisujú problematiku šírenia energie v optických vláknach:

Geometricko–optický model. Pre popis mnohovidových systémov sa využíva prístup geometrickej optiky v prípadoch, že je možné zanedbať radiálnu zmenu indexu lomu vo vzdialenosti porovnateľnej s vlnovou dĺžkou optického žiarenia. Uvažujú sa vlnovody typu SI aj GI. Nevýhoda modelu je taká, že je prakticky nepoužiteľný v jednovidových aplikáciách. Model vykazuje nereálne výsledky pri analýze určitých porúch indexu lomu gradientných vlnovodov. Výhoda tohto modelu je však názorná interpretácia dosiahnutých výsledkov [8].

Elektromagnetický model, označovaný aj vlnový. Model vychádza z Maxwellových rovníc, ktoré spájajú elektrické a magnetické pole a dokazujú EM pole, ktorého šírením daným priestorom sa prenáša energia. Tento model je presnejší ako geometrický model. Podáva komplexný náhľad na rozloženie EM poľa vo vlnovode a tvorí základ pre podmienky šírenia jednotlivých vidov. Presné riešenia Maxwellových rovníc sú známe pre aplikácie priechne homogénnych vlákien, pri uvažovaní zjednodušujúcich predpokladov (lineárna polarizácia vidov) vrátane súvislosti s EM zložkami. V prípade priechne nehomogénnych vlákien majú riešenia rovníc len približný charakter, len v prípade niektorých profilov takýchto optických vlákien dáva podiel dostatočne presné riešenia [1, 5].

Maxwellove rovnice:

1. rovnica

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \quad (1.12)$$

Elektrické pole vzniká akoukoľvek časovou zmenou magnetického indukčného toku.

2. rovnica

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}, \quad (1.13)$$

Priechodom vodivého či posuvného prúdu vzniká magnetické pole.

3. rovnica

$$\operatorname{div}\vec{D} = \rho, \quad (1.14)$$

Pôvod elektrického toku je vo voľných nábojoch, nachádzajúcich sa vo vnútri uzavretej plochy. Indukčné čiary majú svoj začiatok, aj koniec.

4. rovnica

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0, \quad (1.15)$$

Neexistujú magnetické náboje. Indukčné čiary majú uzavretý charakter [5].

Kde je:

- \vec{E} ... intenzita elektrického poľa,
- \vec{H} ... intenzita magnetického poľa,
- \vec{D} ... indukcia elektrického poľa,
- \vec{B} ... indukcia magnetického poľa,

pričom uvedené veličiny sú vektorové funkcie v závislosti od časovej a priestorovej súradnice. Ďalej platí, že ρ je objemová hustota voľného náboja a \vec{J} je prúdová hustota prúdov, ktoré tvoria voľné náboje [4].

Ďalej možno uviesť tzv. materiálové vzťahy pre izotropné materiály:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad \text{a} \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H}. \quad (1.16)$$

Permitivita ϵ je skalárna funkcia priestorových súradníc a permeabilita μ je v prípade optických frekvencií rovná μ_0 (permeabilita vákua) a nie je závislá od priestorových súradníc, ani od časovej súradnice [4].

1.3.3 Podmienka vidového šírenia v optickom vlákne

Na úvod bude definované tzv. vlnové číslo vákua k_0 :

$$k_0 = \omega \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (1.17)$$

Pre optický vláknový vlnovod existujú priečne konštanty:

$$U = a \cdot \sqrt{n_1^2 \cdot k_0^2 - \beta^2}, \quad (1.18)$$

$$V = a \cdot \sqrt{\beta^2 - n_2^2 \cdot k_0^2}, \quad (1.19)$$

kde je:

- β ... pozdĺžna konštanta šírenia,
- n_1 ... index lomu jadra,
- n_2 ... index lomu plášťa
- a ... polomer jadra vlákna.

Následne možno s výhodou definovať tzv. normovanú frekvenciu v :

$$v \equiv \sqrt{U^2 + V^2} = k_0 \cdot a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad [4] \quad (1.20)$$

Vzťah (1.17), spolu so vzťahmi (1.18) a (1.19) sa tiež nazýva disperzná rovnica [4].

Výraz $\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ sa nazýva numerická apertúra NA ⁸. Vzťah (1.20) možno prepísať do podoby

$$v = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA. \quad [1] \quad (1.21)$$

⁸ NA : maximálny uhol, pod ktorým je možné naviazať vedené vidy do vlákna [5].

Pre prenos jednovidovými vláknami musí platiť podmienka prenosu prvého koreňa Besselovskej funkcie $v \leq 2,405$. Ak toto neplatí, prenos je mnohovidový [1, 5]. Zo vzťahu (1.21) spolu s podmienkou jednovidového prenosu, možno vyjadriť kritickú vlnovú dĺžku jednovidového prenosu:

$$\lambda_c = \frac{2 \cdot \pi}{2,405} \cdot a \cdot NA. \quad [\text{nm}] [4] \quad (1.22)$$

1.4 Straty pri prenose

V kapitole 1.3.1 je uvedený priebeh útlmovej charakteristiky pre optické vlákno, z ktorej vidno, že hodnota merného útlmu je okrem iného závislá aj na vlnovej dĺžke optického žiarenia. Je všeobecne známe, že signál vplyvom tlmenia stráca svoju výkonovú úroveň a dokonca sa rozťahuje v čase. Toto je zapríčinené optickým vláknom ako „nedokonalým“ prenosovým médiom. Podstata tlmenia signálu tkvie vo viacerých javoch vyskytujúcich sa v optike. Útlm spolu s disperziami tvoria dôležité limity, na ktoré treba brať zreteľ pri návrhu spoľahlivých optických trás. V nasledujúcom texte budú stručne popísané lineárne a nelineárne javy, ktoré sa podieľajú na útlmových stratách. Disperziám budú venované samostatné kapitoly.

1.4.1 Lineárne javy

Útlm optického vlákna možno zistiť ako pomer výkonu na výstupe vlákna a výkonu na jeho vstupe. Vyjadruje sa v decibeloch dB, merný útlm v $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$. Matematický zápis:

$$A = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{výst}}}{P_{\text{vst}}} \right), \quad [\text{dB}] [5] \quad (1.23)$$

merný útlm vlákna je definovaný podľa (1.24):

$$\alpha = \frac{A}{L} = -\frac{1}{L} \cdot 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{výst}}}{P_{\text{vst}}} \right), \quad [\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}] [5] \quad (1.24)$$

kde L značí celkovú dĺžku vlákna.

Absorpcia. Jedná sa o premenu svetelnej energie na tepelnú. Materiálová absorpcia je spôsobená prítomnosťou nečistôt a prímiesí (ióny kovov a OH), ktoré rezonujú na určitých frekvenciách – viď kapitola 1.3.1, obr. 1.5, lokálne útlmové maximá.

Vlastná absorpcia je spôsobená vlastným stavebným materiálom vlákna. V ultrafialovej a viditeľnej oblasti je na úrovni atómov a nedá sa odstrániť, v infračervenej oblasti je na molekulárnej úrovni a dá sa riešiť voľbou iného materiálu odolného voči rozkmitaniu pôsobením svetelnej vlny.

Nevlastná absorpcia vzniká prítomnosťou iónov kovov či OH, ktoré sa dostávajú do základného materiálu pri výrobe, tvorí hlavný podiel strát. Ióny OH spôsobujú navyše mikro-trhliny, čo môže viesť k praskaniu vlákna [9, 1].

Vyžarovanie. Straty vyžarovaním nastanú vtedy, keď šíriaci sa svetelný lúč dosiahne lom na rozhraní dvoch dielektrických prostredí. Žiarenie sa odrazí späť do jadra, no časť unikne do plášťa a to predstavuje straty energie [5].

Rozptyl. Dominantným javom je **Rayleighov rozptyl**, ktorý vzniká na mikronehomogenitách indexu lomu materiálu. Tieto drobné nečistoty a nehomogenity sú rozmerovo menšie ako je vlnová dĺžka žiarenia. Rayleighov rozptyl je nepriamo úmerný štvrtej mocnine vlnovej dĺžky žiarenia, jeho hodnoty sa prudko zvyšujú smerom k ultrafialovej oblasti optického žiarenia, so zvyšovaním λ prudko klesajú. Pre tento druh rozptylu je charakteristická jeho všesmerovosť [1, 9].

Výskyt tohto lineárneho javu je naprieč celým svetelným spektrom v každom prostredí, nedá sa odstrániť. Minimálny možný útlm optického vlákna by bol definovaný práve Rayleighovým rozptylom [10].

Útlmový koeficient Rayleighovho rozptylu je definovaný podľa (1.25).

$$\gamma_R = \frac{8 \cdot \pi^3}{3 \cdot \lambda^4} \cdot n^8 \cdot p^2 \cdot \beta_c \cdot k \cdot T_F, \quad [11] \quad (1.25)$$

kde je:

- p ...stredná hodnota fotoelastického javu,
- β_c ...koeficient stlačiteľnosti pri fiktívnej teplote T_F a
- k ... Boltzmannova konštanta.

Vplyv Rayleighovho rozptylu na útlm vlákna:

$$L_{TR} = \exp\{-\gamma_R \cdot L\}. \quad [11] \quad (1.26)$$

Intenzitu Rayleighovho rozptylu popisuje vzťah (1.27):

$$I = I_0 \left(\frac{d}{2}\right)^6 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda}\right)^4 \cdot \left(\frac{n_r^2 - 1}{n_r^2 + 1}\right) \cdot \frac{1 + \cos^2 \theta}{2 \cdot R^2}, \quad [11] \quad (1.27)$$

kde je:

- I_0 ... pôvodná intenzita svetla,
- d ... priemer rozptyľujúcej častice,
- n_r ... index lomu rozptyľujúcej častice,
- θ ... uhol rozptylu,
- R ... vzdialenosť od častíc.

Druhým typom lineárneho rozptylu je **Mieho rozptyl**. Mieho teória je obecnjšia než Rayleighova a teda i zložitejšia, čo je jej nevýhoda. Nemá však obmedzujúce podmienky, ktoré platia pre Rayleighov rozptyl:

1. podmienka:

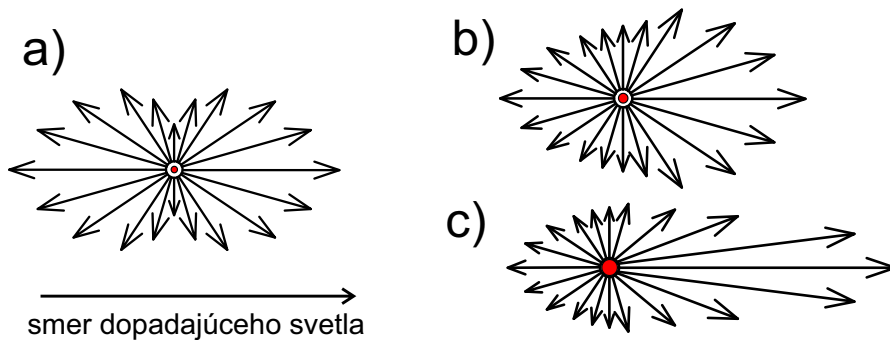
$$\frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \ll 1 \implies r \ll \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \implies r_{\max} \approx 100 \text{ nm}, \quad (1.28)$$

kde r je polomer rozptyľujúcej častice.

2. podmienka: Rozptyľujúce častice musia byť elektricky nevodivé.

Mieho rozptyľ (klasická Mieho teória) vzniká na sférických časticiach, ktorých rozmery môžu byť ľubovoľné, rádu vlnovej dĺžky aj väčšie a môžu byť elektricky vodivé. Rozšírená Mieho teória sa dá aplikovať na nesférické častice [12].

Na obr. 1.6 je ilustrovaný priebeh Rayleighovho a Mieho rozptyľu.



Obr. 1.6: Priebeh a) Raileighovho rozptyľu, b) Mieho rozptyľu na menšej častici, c) Mieho rozptyľu na častici väčších rozmerov [12].

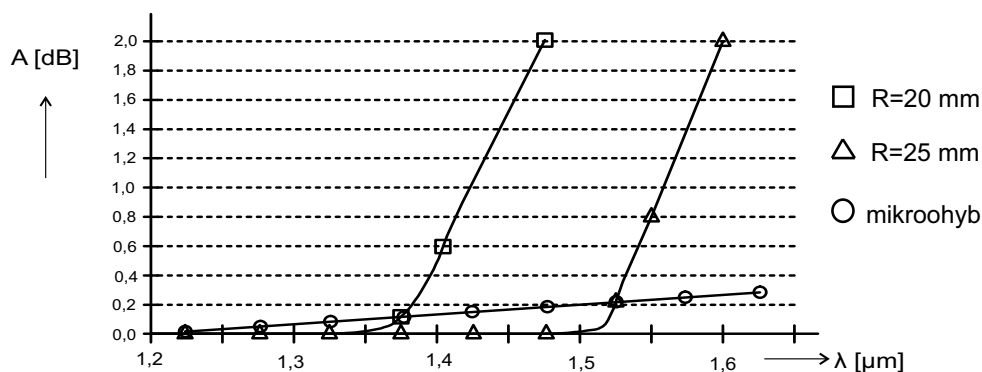
1.4.2 Ohyby

Výroba a manipulácia s optickým vláknom sú faktory, ktoré samé o sebe spôsobujú energetické straty, tentokrát z mechanického hľadiska. V tejto oblasti rozlišujeme mikroohyby a makroohyby.

Mikroohyby vznikajú pri výrobe vlákna, mechanickým pôsobením (ťah či tlak) na vlákno po jeho inštalácii, alebo okolitými podmienkami (teplota, vlhkosť...). Ide o akékoľvek odchýľky od priamočiarej polohy vlákna (napríklad porušená kruhovitost) a nie sú viditeľné voľným okom [10, 6].

Makroohyby vznikajú podobne ako mikroohyby, no pre polomer ohybu vlákna platí $R > 2 \text{ mm}$ [6]. Na obr. 1.7 je zobrazený vplyv ohybov vlákna na útlm, v závislosti na vlnovej dĺžke. U makroohybov platí, čím menší polomer ohybu, tým vyššie straty.

Makroohyby vznikajú napríklad pri nadmernom ohýbaní rezerv vlákien v optických rozvádzačoch [11].



Obr. 1.7: Vplyv makro a mikroohybov na útlm vlákna v závislosti na vlnovej dĺžke [6].

Smernica ITU-T⁹ G.657 definuje optické vlákna so zníženou citlivosťou na ohyby. Tieto vlákna sa používajú prevažne v optických prístupových sieťach. Vlákna odolné voči ohybu sú rozdelené do kategórií A a B, v každej kategórii sú 2 podkategórie.

G.657.A – sú vlákna prenosovými vlastnosťami porovnateľné s konvenčným vláknom typu G.652.D. Možno ich nasadiť v prenosových pásmach O, E, S, C a L (1260–1625) nm.

- Podkategória G.657.A1... minimálny polomer ohybu 10 mm,
- Podkategória G.657.A2... minimálny polomer ohybu 7,5 mm.

G.657.B – sú vlákna špecializované pre nasadenie na veľmi krátke vzdialenosti (max. 1000 m) v optických prístupových sieťach. Sú vhodné pre inštalácie v budovách, či ich blízkosti. Vlákna špecifikácie B sú určené pre ďalšiu redukciu útlmových strát, z čoho plynú aj malé polomery ohybu. Tieto vlákna sú systémovo kompatibilné s G.657.A vláknami, no nie nevyhnutne s G.652.D z hľadiska disperzií, ktoré nie sú definované takéto aplikácie z hľadiska krátkych vzdialeností.

- Podkategória G.657.B2... minimálny polomer ohybu 7,5 mm,
- Podkategória G.657.B3... minimálny polomer ohybu 5 mm [13].

1.4.3 Nelineárne javy

Zvyšujúce sa nároky na optický prenos z hľadiska prenášaného výkonu a prenosových kapacít otvorili v problematike optiky v posledných rokoch otázku nelineárnych javov, s ktorými sa muselo začať počítať, pretože spôsobovali celý rad nepríjemností. Niektoré nelineárne javy boli pochopené a zvládnuté do takej miery, že sa stali užitočným nástrojom v aplikáciách vláknovej optiky.

Podstata vzniku nelineárnych javov

⁹International Telecommunication Union – Telecommunications

S príchodom systémov WDM sa do optických trás začali začleňovať optické zosilňovače, ktorých úloha je zosilniť výkon naviazaný vo vlákne a to až niekoľkonásobne [5].

Tento naviazaný výkon musí pojať vlákno, ktorého priemer jadra je veľmi malý. Podstata problému tkvie vo výkonovej závislosti indexu lomu optického materiálu, ktorá môže byť vyjadrená vzťahom (1.29):

$$n = n_0 + n_2 \cdot \frac{P}{A_{\text{eff}}}, \quad [-] [14] \quad (1.29)$$

kde je:

- n_0 ... index lomu jadra vlákna pri nízkych hodnotách prenášaného výkonu,
- n_2 ... tzv. materiálovo závislá Kerrova konštanta. Jej hodnota sa môže meniť vzhľadom na prímiesy (germánium), no štandardná hodnota pre telekomunikačné vlákna činí $2,35 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$,
- A_{eff} ... efektívna plocha jadra vlákna v m^2 ,
- P ... optický výkon W [9, 14].

Parameter n_2 vo vzťahu (1.29) reprezentuje nelineárnu zložku, n_2 nie je skutočná konštanta a je frekvenčne závislá:

$$n_2 = \frac{3 \cdot \chi^{(3)}}{4 \cdot \epsilon_0 \cdot c \cdot n_0^2}, \quad [\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}] [14] \quad (1.30)$$

kde $\chi^{(3)}$ je tretí rád elektrickej susceptability materiálu.

Pri WDM systémoch sa v praxi prenáša vláknom väčší počet kanálov, výkony laserov (16, 32 laserov...) sa sčítajú a výkon vlákna sa môže pohybovať okolo hodnoty 0,5 W. Takýto výkon dokáže trvale poškodiť zrak. Pri návrhu optických trás nad 10 Gbit · s⁻¹ na kanál je povinnosťou zaoberať sa nelineárnymi javmi [5].

Nasleduje stručný popis niektorých nelineárnych javov.

Ramanov rozptyl – Interakcia svetelnej vlny, ktorá sa šíri v optickom prostredí s prostredím samotným. Vzniká vlna, ktorá je frekvenčne posunutá a šíri sa ako v priamom, tak i v spätnom smere [9]. Ramanov rozptyl sa dá využiť ako zosilňovací jav v optických vláknach. Konštruujú sa tzv. pumpovacie Ramanovské lasery, ktoré zaisťujú presun energie z oblasti nižších vlnových dĺžok do vyšších a tým poskytujú zosilňujúci efekt, v niektorých prípadoch bez nutnosti vkladania zosilňovačov do trasy [11].

Brillouinov rozptyl – Je tzv. nelineárnym javom tretieho rádu a vzniká vtedy, keď sa optickým vláknom šíri svetelná vlna, ktorá sa rozptýli na akusticky kmitajúcich atómov vlákna. Dochádza k lokálnej zmene indexu lomu a k oddeleniu fotónu, ktorý postupuje v spätnom smere. Rozptýlená vlna je frekvenčne položená nižšie, ako vlna postupná.

Prahová hodnota pre vznik tohto javu je len niekoľko mW, preto je snaha o potlačenie Brillouinovho rozptylu. Dochádza k ovplyvneniu stability a pomeru šumu vysielača.

Brillouinov rozptyl predstavuje výkonové obmedzenie pre vláknové zosilňovače a lasery, teda horný energetický limit. Ak by bol tento limit prekročený, určité množstvo energie signálu, pre prenos významné, by smerovalo späť k vysielaču [9, 15].

Potlačenie tohto javu je možné napríklad zvýšením spektrálnej čiary zdroja vysielačania, Brillouinov rozptyl je závislý na druhu použitého vlákna a na šírke prenášaného pásma. V niektorých aplikáciách v praxi je možné využiť týchto skutočností v podobe tzv. stimulovaného Brillouinovho rozptylu, kedy sa do vlákna s Brillouinovým rozptylom naviaže silný energetický impulz vyslaný laserom a výsledkom je značné zosilnenie tohto javu [15].

Nelineárne javy druhého rádu

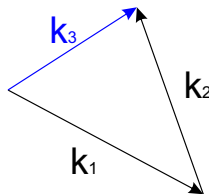
Do tejto skupiny patrí napríklad jav generovania druhej harmonickej – SHG¹⁰ a trojvlnného zmiešavania – TWM¹¹.

SHG

Tento jav charakterizuje vznik druhej harmonickej vlny. SHG súvisí s objavom rubínového laseru, kedy v roku 1961 žiarenie o vlnovej dĺžke $\lambda_1 = 694,3$ nm emitované laserom prešlo kremenným kryštálom. Výstupné žiarenie malo presne polovičnú vlnovú dĺžku, teda $\lambda_2 = 347,15$ nm. Využitie v aplikáciách, kde je nutné previesť svetelné žiarenie z infračervenej oblasti do oblasti viditeľného svetla [15].

TWM

Pri vzájomnom zmiešavaní dvoch optických vln s rôznymi frekvenciami vzniká tretia vlna, ktorá je produktom ich súčtu, či rozdielu: $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$, alebo $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$. Musí byť dodržaná fázová podmienka vid' obr. 1.8, interagujúce vlny musia byť rovinné a jedna vlna musí byť lineárnou kombináciou druhej [15].



Obr. 1.8: Fázová podmienka pre TWM [15].

kde platí: $k_3 = k_1 + k_2$.

¹⁰Second Harmonic Generation

¹¹Three Wave Mixing

Nelineárne javy tretieho rádu

Do tejto kategórie spadajú nelineárne javy, ktoré sú charakterizované tzv. Kerrovskou nelinearitou. Dochádza k optickému Kerrovmu javu, ktorý tvorí základ pre niektoré nelineárne javy tretieho rádu, napríklad pre vlastnú fázovú moduláciu – SPM¹², krížovú moduláciu XPM¹³, alebo štvorvlnné zmiešavanie – FWM¹⁴.

Kerrov jav popisuje závislosť indexu lomu na intenzite svetelného lúča, ktorý vstupuje do prostredia. Zmena indexu lomu je premenlivá v rôznych častiach impulzu, čo má vplyv na tvar a polarizáciu impulzu [15].

SPM

SPM popisuje frekvenčné zmeny, ktoré vyvolali zmeny výkonu v jednom prenosovom kanále. Ak rastie výkon, zväčšuje sa aj fáza s frekvenciou. Podobne s poklesom výkonu klesá aj fáza a frekvencia. U binárnych signálov sa vyskytuje tzv. **frekvenčný chirp** – prenos signálu prostredníctvom maximálneho a minimálneho výkonu. SPM sa vyskytuje pri nasadení optických zosilňovačov, no nejedná sa vždy o negatívny jav. Klady SPM sa prejavujú pri tzv. **solitonovom prenose**. Pri takomto prenose je prenášaný špeciálne tvarovaný pulz, ktorého tvar sa mení vplyvom SPM – šírka je konštantná po celú dobu prenosu. Solitonový prenos sa v minulosti ukázal ako perspektívny, no v súčasnosti ustúpil požiadavkám na vyššie prenosové kapacity systémom WDM [5].

XPM

Jav XPM je podobný SPM, no vyskytuje sa v systémoch WDM, ktoré obsahujú vyšší počet kanálov. XPM charakterizuje frekvenčné zmeny vyvolané zmenou výkonu v jednom kanále systému WDM. Fázové zmeny u XPM majú negatívnejšie dopady, pretože rastú s počtom kanálov. Z toho pramení nutnosť regulácie výkonu v jednotlivých kanáloch. V systéme obsahujúcom 10 kanálov by nemal výkon prekročiť hranicu 1 [mW], oproti tomu v systéme HDWDM¹⁵, ktorý môže obsahovať 100 prenosových kanálov, by mal výkon klesnúť na 0,1 mW [5].

SPM a XPM rastú či klesajú nielen s naviazaným optickým výkonom, ale aj s prenosovou rýchlosťou. Tieto javy možno eliminovať nulovou, alebo mierne kladnou hodnotou chromatickej disperzie, alebo zväčšením efektívnej oblasti [16].

FWM

Štvorvlnné zmiešavanie je názov pre nelineárny jav, ktorý vzniká pri interakcii troch signálov o rôznych vlnových dĺžkach, kedy vzniká štvrtý signál podľa vzťahu (1.31):

$$\lambda_{123} = \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3. \quad [\text{nm}] \quad (1.31)$$

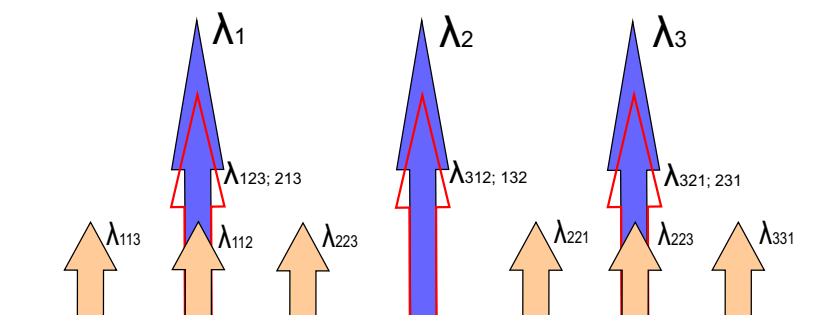
¹²Self-phase Modulation

¹³Cross-phase Modulation

¹⁴Four-wave Mixing

¹⁵High Density Wavelength Division Multiplex

V dôsledku vysokých úrovní výkonov FWM produkuje zároveň štvrtým kanálom aj tzv. fantómové kanály, ktorých počet závisí na aktuálnom počte signálových prenosových kanálov, pričom niektoré fantómové kanály prekrývajú aktuálne signálové kanály – viď obr. 1.9. Napríklad 4 kanálový systém vytvorí 24 fantómových kanálov, 16 kanálový systém potom 1920 fantómových kanálov. Z uvedeného vyplýva, že FWM je najviac nepriaznivý nelineárny jav, ktorý sa uplatňuje v DWDM¹⁶ systémoch, kde sú prenosové kanály blízko pri sebe [6].



Obr. 1.9: Jav FWM, vznik fantómových kanálov vo vlákne [6].

Priam obrovský problém predstavuje FWM pri prenosoch po vláknach s posunutou disperznou charakteristikou (DSF¹⁷) pri prenose na vlnových dĺžkach okolo 1550 nm, alebo na vlnovej dĺžke pre nulovú chromatickú disperziu. Prenos rozdielnych vlnových dĺžok rovnakou skupinovú rýchlosťou a s konštantou fázou po dlhý časový interval zvýši účinky efektu FWM. V konvenčných vláknach (G.652.D) určitá hodnota chromatickej disperzie na vlnovej dĺžke okolo 1500 nm spôsobí, potom sa rozdielne vlnové dĺžky prenášajú odlišnými skupinovými rýchlosťami a to znižuje vplyv FWM. Redukcia FWM môže byť dosiahnutá i aplikovaním netradičného rozmiestnenia prenosových kanálov, spravidla ďalej od seba, ak to prenosový systém dovolí [6].

FWM sa spolu s XPM označujú ako aditívny šum [16].

¹⁶Dense Wavelength Division Multiplex

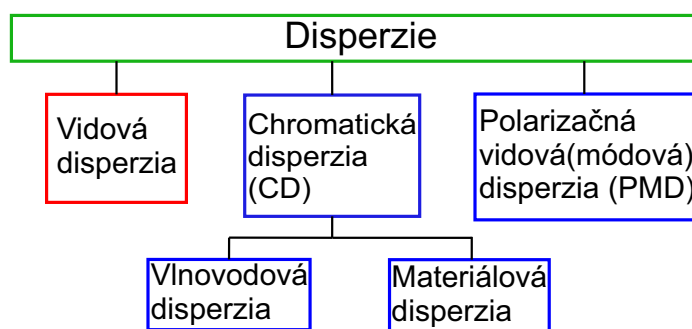
¹⁷Dispersion Shifted Fiber: ITU-T G.653

1.5 Disperzie

V kapitole 1.1 bola načrtnutá súvislosť indexu lomu s disperziou. Ukázalo sa, že index lomu je frekvenčne závislý a bol uvedený disperzný vzťah (1.2), resp. (1.3).

Rozdiel šírky pulzu meranej v polovici jeho výšky na vstupe a výstupe optického vlákna spôsobujú disperzie. Všetky druhy disperzií sa podieľajú na rozšírení pulzu (časová oblasť) v digitálnych systémoch, v analógových systémoch sa zmenší frekvenčná šírka modulačného signálu optickej nosnej. Disperzie predstavujú limitujúci faktor z hľadiska šírky prenášaného pásma, rýchlosti a vzdialenosti prenosu. Rozšírený signál zasahuje do okolitých bitov, následkom čoho vznikajú medzisymbolové interferencie ISI, rastie bitová chybovosť BER¹⁸, prijímač chybné vyhodnotí rozhodovacie úrovne [1, 16].

Na obr. 1.10 je schematicky naznačené delenie disperzií vyskytujúcich sa v optických vláknach.



Obr. 1.10: Delenie disperzií v optických vláknach [6].

V nasledujúcom texte budú popísané jednotlivé druhy disperzií, podmienky ich vzniku, metódy kompenzácie, metódy merania.

Zvláštna pozornosť bude venovaná javu polarizácie svetla, na ktorú nadviaže Polarizačná vidová disperzia (PMD¹⁹), ktorá je hlavným predmetom záujmu tejto práce.

1.5.1 Vidová disperzia

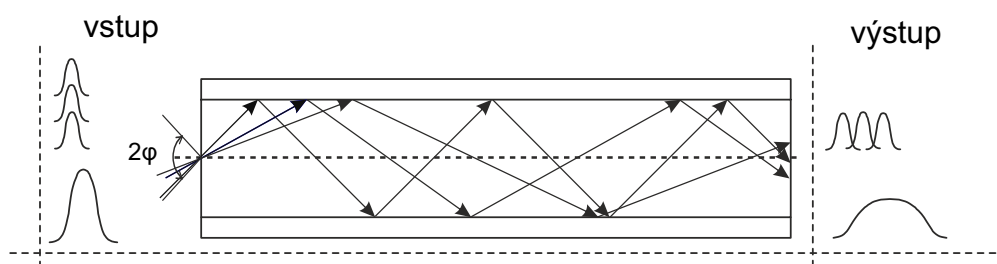
V mnohovidových prenosoch sa vyskytuje vidová disperzia a chromatická disperzia (CD²⁰), o ktorej bude pojednané v samostatnej časti textu.

¹⁸Bit Error Rate

¹⁹Polarisation Mode Dispersion

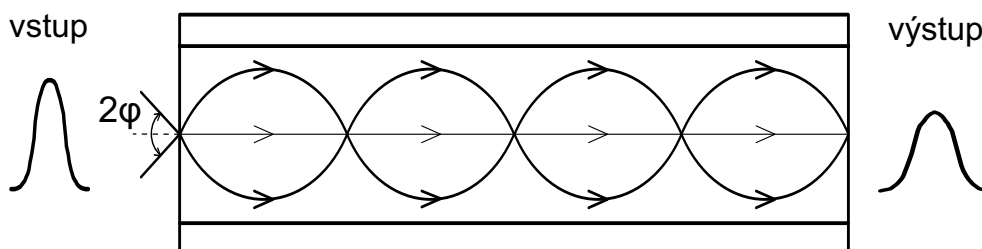
²⁰Chromatic dispersion

Mnohovidové prenosy rozkladajú prenášanú energiu do viacerých vidov. Z geometrickej optiky možno odvodiť, že čím je uhol, ktorý zvierajú trajektória lúča s osou svetlovodu vyšší, tým je dráha lúča dlhšia a jeho pozdĺžna rýchlosť klesá. Takýto lúč sa nazýva vyšší vid. Z uvedeného vyplýva, že nižšie vidy sa šíria svetlovodom rýchlejšie [1]. Situácia je ilustrovaná na obr. 1.11, kde je energia vstupného pulzu rozdelená do troch vidov, ktoré putujú mnohovidovým svetlovodom so skokovou zmenou indexu lomu, výstupný pulz je rozšírený dôsledkom pôsobenia vidovej disperzie.



Obr. 1.11: Mnohovidový prenos [6].

Priebeh vidového šírenia u gradientných mnohovidových vlákien je znázornený na obr. 1.12.



Obr. 1.12: Mnohovidový prenos po gradientnom vlákne [1].

Výpočet vidovej disperzie pre mnohovidové vlákno typu SI:

$$\tau_{v-SI} \cong \frac{n_1 \cdot L}{c_0} \cdot \Delta \approx \frac{L}{2 \cdot n_1 \cdot c_0} \cdot (NA)^2, \quad [\text{ns} \cdot \text{km}^{-1}] \quad [17] \quad (1.32)$$

kde je:

- n_1 ... index lomu jadra vlákna,
- L ... dĺžka vlákna v metroch,
- NA ... numerická apertúra.

Ďalej platí pre kremíkové vlákno, kde $\Delta \ll 1$ – keď n_1 je veľmi blízke n_2 :

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2}, \quad [-] [17] \quad (1.33)$$

kde n_2 predstavuje index lomu plášťa vlákna.

Pre tento typ vlákna o parametroch $n_1 = 1,465$, $\Delta = 0,01$ ($n_2 = 1,45$), $L = 1$ [km] vychádza typická hodnota vidovej disperzie 50 [ns · km⁻¹].

Výpočet vidovej disperzie pre mnohovidové vlákno typu GI:

$$\tau_{v-GI} \cong \frac{n_2 \cdot L}{2 \cdot c_0} \cdot \Delta^2 \approx \frac{L}{8 \cdot n_1^3 \cdot c_0} \cdot (NA)^4, \quad [\text{ns} \cdot \text{km}^{-1}] [17] \quad (1.34)$$

Pre gradientné mnohovidové vlákno s parabolickým indexom lomu $n_2 \approx 1,45$, $\Delta = 0,01$ a $L = 1$ km dostávame hodnotu vidovej disperzie približne $0,25$ ns · km⁻¹ [17].

U mnohovidového svetlovodu predstavuje vidová disperzia hlavný obmedzujúci faktor z hľadiska šírky prenášaného pásma. Pri použití jednovidových vlákien sa vidová disperzia neuplatní [1].

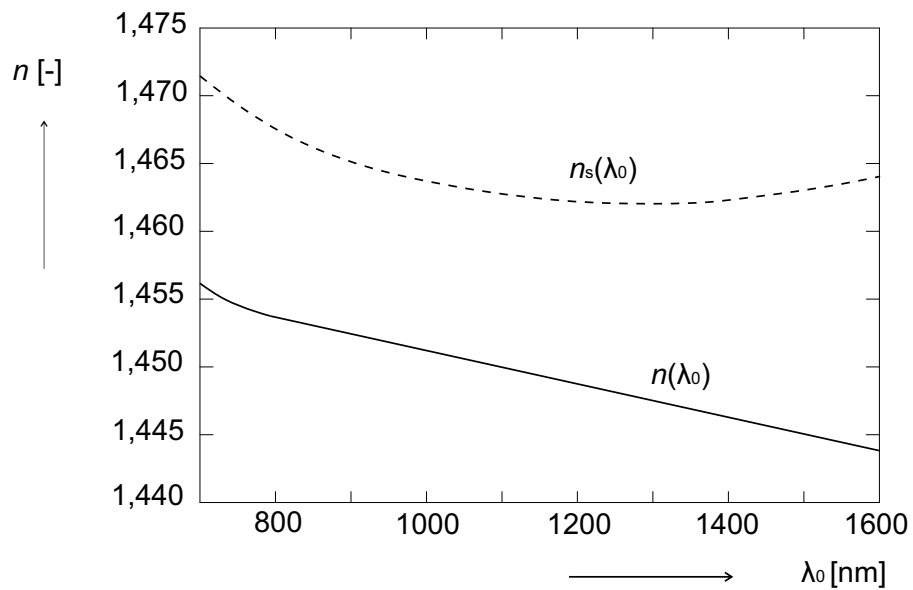
1.5.2 Materiálová disperzia

V kapitole 1.2 je uvedený vzťah (1.6), ktorý popisuje skupinovú rýchlosť šírenia signálu. Pozornosť bude upriamená na parameter n_s , skupinový index lomu.

Skupinový index lomu dosahuje vyšších hodnôt ako n , ich priebeh v závislosti na vlnovej dĺžke (pre čistý kremík) je znázornený na obr. 1.13.

Zdroje optického žiarenia nie sú dokonale monochromatické. Zdroj bieleho svetla (napr. slnko) má spektrálnu šírku približne 300 nm, spektrálna šírka LED je 25 nm a pre typickú laserovú diódu LD činí hodnota spektrálnej šírky približne 2 nm, alebo menej. Každá vlnová dĺžka sa bude šíriť vláknom odlišnou skupinovú rýchlosťou v dôsledku príslušného n_s – viď obr. 1.13. Nastáva rozšírenie pulzu, ktoré je úmerné dĺžke vlákna a spektrálnej šírke zdroja žiarenia. Je vhodné definovať koeficient materiálovej disperzie D_{mat} , ktorého rozmer je $\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$. Parameter D_{mat} charakterizuje materiál z hľadiska materiálovej disperzie pre konkrétnu λ a je nemenný takmer u všetkých druhov kremíkového vlákna [17].

V tabuľke 1.2 sú uvedené hodnoty n , n_s a D_{mat} platné pre čisté kremenné sklo a pre vybrané vlnové dĺžky.



Obr. 1.13: Závislosť indexu lomu a skupinového indexu lomu na vlnovej dĺžke [17].

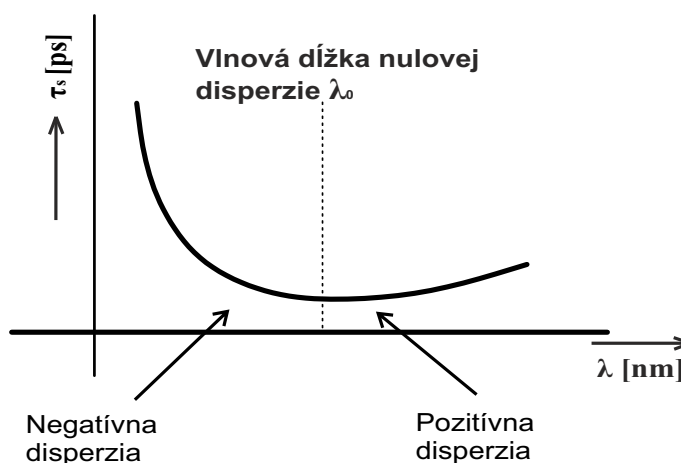
Tab. 1.2: Hodnoty indexu lomu, skupin. indexu lomu a koeficientu mat. disperzie [17].

λ_0 [nm]	$n(\lambda_0)$ [-]	$n_s(\lambda_0)$ [-]	D_{mat} [$\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$]
750	1,45456	1,46924	-135,313
800	1,45364	1,46744	-106,609
850	1,45282	1,46601	-84,2077
-	-	-	-
1250	1,44783	1,46189	-2,57872
1300	1,44726	1,46189	2,38579
1350	1,4467	1,46196	6,86631
-	-	-	-
1500	1,44498	1,46253	18,2268
1550	1,44439	1,46283	21,5187
1600	1,44379	1,46318	24,6358

Znamienko ($-$) pri hodnotách D_{mat} uvedených v tab. 1.2 značí tzv. **negatívnu disperziu**. Dlhšie vlnové dĺžky sa šíria rýchlejšie (menšia hodnota n_s) ako kratšie vlnové dĺžky so záporným D_{mat} (vyššia hodnota n_s).

V okolí $\lambda = 1250$ nm sa n_s ustáli a ďalším zvyšovaním λ rastie. Oblasť **pozitívnej disperzie** prislúcha ku kladným hodnotám D_{mat} , kde sa kratšie λ šíria rýchlejšie vplyvom nižších hodnôt n_s [17, 18].

Popísané skutočnosti ilustruje obr. 1.14, na zvislej ose je veličina τ_s nazývaná skupinové oneskorenie s rozmerom ps.



Obr. 1.14: Pozitívna a negatívna disperzia [18].

Hodnotu materiálovej disperzie τ_{mat} možno vypočítať prostredníctvom vzťahu (1.35)

$$\tau_{\text{mat}} = D_{\text{mat}} \cdot L \cdot \Delta\lambda_0, \quad [\text{ns}] [17] \quad (1.35)$$

kde je:

- L ... dĺžka vlákna,
- $\Delta\lambda_0$... spektrálna šírka zdroja optického žiarenia.

Príklad výpočtu: Je použitá LED so spektrálnou šírkou $\Delta\lambda_0 = 20$ nm, $\lambda_0 = 825$ nm, D_{mat} z tab. 1.2 pre $\lambda = 850$ nm, $L = 1$ km:

$$\tau_{\text{mat}} = 84,2 \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \right] \cdot 1 [\text{km}] \cdot 20 [\text{nm}] = 1684 [\text{ps}] \cong 1,7 [\text{ns}], [17] \quad (1.36)$$

pri prenose na $\lambda_0 = 1300$ nm:

$$\tau_{\text{mat}} = 2,4 \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \right] \cdot 1 [\text{km}] \cdot 20 [\text{nm}] \cong 0,05 [\text{ns}]. [17] \quad (1.37)$$

Vlnová dĺžka $\lambda_0 \approx 1270$ nm je zvyčajne považovaná za vlnovú dĺžku nulovej materiálovej disperzie [17].

1.5.3 Vlnovodová disperzia

Jej význam je predovšetkým v jednovidových vláknach. Podstata vlnovodovej disperzie je v závislosti skupinového oneskorenia na frekvencii svetla, to znamená, že tvar pozdĺžneho poľa jednotlivého vidu sa mení v závislosti na frekvencii. Vlnovodová disperzia je dominantná na vlnových dĺžkach, kde má materiálová disperzia nízku hodnotu [16].

Väčšina svetelného lúča sa šíri v jadre optického vlákna, no časť uniká v plášti a šíri sa tam. Konštanta šírenia každého vidu je odlišná – z toho pramení zmena frekvencie, čo má v konečnom dôsledku vplyv na rýchlosť šírenia [19].

Prostredníctvom geometrickej konštrukcie vlákna (polomer jadra, profil indexu lomu) možno ovplyvniť hodnoty vlnovodovej disperzie pri výrobe, a tým do istej miery kompenzovať materiálovú disperziu (pre istú frekvenčnú oblasť každého materiálu) [16].

1.5.4 Profilová disperzia

Tento druh disperzie sa prejavuje zvyčajne pri vysokých prenosových rýchlostiach. Zložky signálu sa šíria rozdielnymi rýchlosťami, pretože profil indexu lomu jadra a plášťa je závislý na vlnovej dĺžke. Z toho plynie závislosť rýchlosti šírenia vlny na frekvencii [9, 16].

1.6 Chromatická disperzia (CD)

CD je disperzný jav, na ktorom sa podieľa materiálová, vlnovodová i profilová disperzia [16]. CD sa nazýva aj intermódová, či intramodálna disperzia [19].

Potreba jej merania nastala predovšetkým príchodom WDM systémov, ktoré ponúkajú možnosť veľkých prenosových kapacít pri rastúcich rýchlostiach.

1.6.1 Charakteristika CD

Parameter, ktorý charakterizuje CD sa nazýva koeficient chromatickej disperzie $D_{ch}(\lambda)$ a je daný vzťahom:

$$D_{ch}(\lambda) = \frac{dt_s(\lambda)}{d\lambda} \cdot \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \right] \quad [20] \quad (1.38)$$

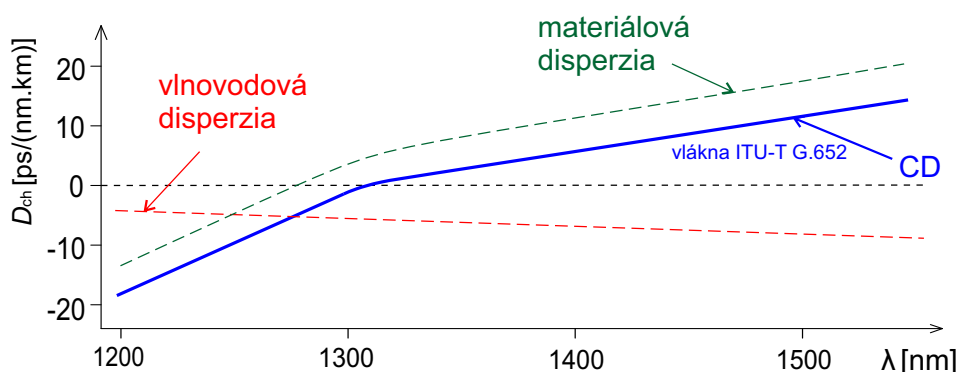
Vzťah (1.38) popisuje zmenu skupinového oneskorenia t_s signálu počas jeho priechodu vláknom v závislosti na vlnovej dĺžke žiarenia [1].

Ďalší parameter je strmota alebo sklon disperznej charakteristiky $S(\lambda)$, určený vzťahom:

$$S(\lambda) = \frac{dD_{ch}(\lambda)}{d\lambda}. \quad \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm}^2 \cdot \text{km}} \right] \quad [20] \quad (1.39)$$

Dôležitý údaj v optických prenosoch býva vlnová dĺžka, na ktorej CD vymizne. Definujeme tiež strmota na vlnovej dĺžke nulovej CD [20].

Na obr. 1.15 je znázornený priebeh chromatickej disperzie štandardného ITU-T G.652 vlákna ako súčet materiálovej a vlnovodovej disperzie. Profilová disperzia je zanedbaná vzhľadom na jej nízky príspevok. Ide o závislosť koeficientu $D_{ch}(\lambda)$ na vlnovej dĺžke.



Obr. 1.15: Priebeh chromatickej disperzie konvenčného vlákna [21].

Z obr. 1.15 vidno, že vlnovodová disperzia nadobúda len záporných hodnôt. Ako bolo spomenuté v predchádzajúcom texte, možno ju do istej miery ovplyvniť a využiť k čiastočnej kompenzácii materiálovej disperzie.

Spomenuté zmeny sa v praxi premietli do vývoja ďalších typov vlákien, a to:

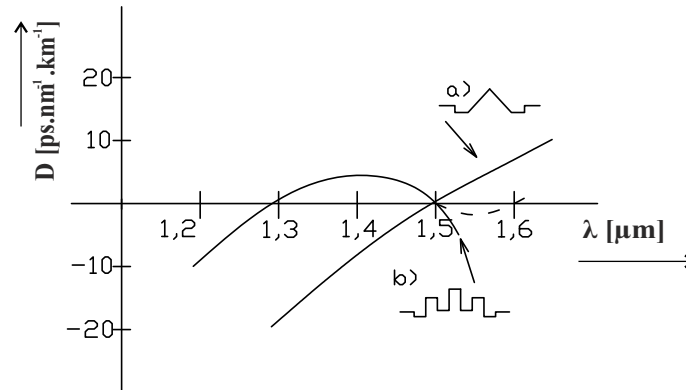
- G.653 DSF... vlákna s posunutou disperznou charakteristikou,
- G.654 DFF²¹... vlákna s plochou disperznou charakteristikou,
- G.655 NZ-DSF²²... vlákna podobné typu G.653, v oblasti $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ s nenulovou CD,
- G.656... podobné vláknam typu G.655, sú však optimalizované pre prenos v pásme (1,46–1,625) μm . Sú využívané v systémoch CWDM²³, DWDM [1, 22].

Na obr. 1.16 je zobrazený priebeh disperznej charakteristiky pre vlákna s posunutou disperz. charakteristikou a plochou disperz. charakteristikou.

²¹Dispersion Flattened Fiber

²²Non-zero Dispersion Shifted Fiber

²³Coarse Wavelength Division Multiplex



Obr. 1.16: Disperzná charakteristika pre a) DSF, b) DFF [1].

1.6.2 Limitné hodnoty CD

Typická hodnota D_{ch} pre štandardné telekomunikačné vlákno je $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ na vlnovej dĺžke $\lambda = 1500 \text{ nm}$. V tab. 1.3 sú uvedené limitné hodnoty D_{ch} pre príslušné rozsahy vlnových dĺžok, podľa ITU-T G.695 [23].

Tab. 1.3: Limitné hodnoty koeficientu CD podľa odporúčania ITU-T G.695 [23].

Vlnová dĺžka λ [nm]	Koeficient chr. disp. $D_{ch}(\lambda)$ [ps/(nm · km)]
1291–1351	5,7
1311–1371	6,8
1391–1451	11,5
1531–1591	19,9
1471–1611	21,1

Za limitnú hodnotu možno považovať i nulovú CD, ktorá sa vyskytuje na rôznych vlnových dĺžkach – vid' disperznú charakteristiku.

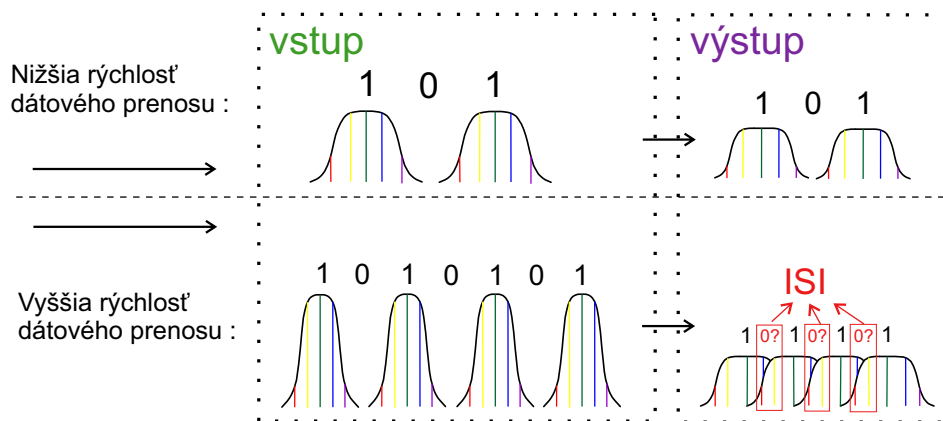
Nulová hodnota CD je nežiaduca z hľadiska vzniku nelineárnych javov, predovšetkým však FWM pri nasadení technológie DWDM na optickú trasu [22].

1.6.3 Dôsledky CD

Svetelný pulz sa šíri optickým vláknom v balíku vlnových dĺžok rozložených zvyčajne okolo centrálnej vlnovej dĺžky. Pulz sa postupne rozťahuje v dôsledku odlišných rýchlostí šírenia čiastkových vlnových dĺžok. Rýchlejšie zložky dorazia skorej k prijímaču, pomalšie s určitým oneskorením. Toto rezultuje v dočasné rozšírenie pulzu, avšak

na celkový efekt tohto javu má vplyv okrem dĺžky optickej trasy aj bitová rýchlosť. Možno konštatovať, že zásadný vplyv majú použité technológie a formát signálu na toleranciu pulzu k rozširovaniu [21].

Obr. 1.17 znázorňuje efekty CD na dátový prenos vzhľadom na rýchlosť dátového prenosu.



Obr. 1.17: Vznik medzisympolových interferencií ako dôsledok CD v závislosti na rýchlosti dátového prenosu [21].

Z obr. 1.17 možno pozorovať, že s vyššou vstupnou dátovou rýchlosťou sú pulzy kratšie a sú blízko pri sebe. Pôsobením disperzie sa každý z pulzov roztiahne a zasiahne do bitových periód vedľajších pulzov, vznikajú medzisympolové interferencie a prijímač nemusí byť schopný správne vyhodnotiť prijímané dáta [21].

1.6.4 Metódy kompenzácie CD

Predovšetkým u starších vlákien sa začala CD uplatňovať príchodom WDM systémov a prenosových rýchlostí nad $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$. CD možno vypočítať a podmienky pre jej vznik udáva samotná výroba vlákna. Pri nutnosti kompenzácie CD možno použiť tieto metódy tzv. pasívnej kompenzácie CD:

- **DCF²⁴ vlákna** disponujú zápornou hodnotou koeficientu CD. Pri zaradení DCF vlákien do trasy (na začiatok či koniec) prichádza k opačnému disperznému javu, nastáva kompenzácia CD. Nevýhodou je však vyššia hodnota merného útlmu vlákna (až $0,5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$). Ďalšou nevýhodou je nedostatočný sklon zápornej disperznej charakteristiky pre kompenzáciu disperzného sklonu klasických, či NZ-DSF vlákien. U DWDM systémov je žiaduca rovnaká kompenzácia všetkých spektrálnych kanálov. Dĺžka DCF vlákna je štandardne 1/6 dĺžky optickej trasy [1, 22].

²⁴Dispersion Compensating Fiber

- **HOM²⁵ vlákna** sú špeciálne viacvidové vlákna, ktoré majú 3 krát vyšší záporný koeficient CD ako DCF vlákna. Majú nižší merný útlm a sú odolnejšie k nelineárnym javom. Sú taktiež vhodné pre kompenzáciu CD klasických, či NZ-DSF vlákien [1, 22].
- **FBG²⁶ vlákna** sú kompenzačné vlákna, ktoré obsahujú Braggovskú mriežku. Zmenou indexu lomu možno vytvoriť tzv. dielektrické zrkadlo, ktoré odráža špecifickú λ . Čerpovaná mriežka vzniká úpravou indexu lomu v perióde mriežky tak, aby sa rýchlejšie λ odrážali neskôr v mriežke ako pomalšie λ . Výsledkom je časovo komprimovaný pulz [24]. Metóda FBG kompenzuje CD úzkej oblasti vlnových dĺžok, asi 6 nm. Pre kompenzáciu CD širšej spektrálnej oblasti nutno použiť kaskádu Braggovských mriežok, avšak v súčasnej dobe sa používajú aj širokospektrálne Braggove kompenzátory pre pásmo o šírke asi 35 nm [22].

1.6.5 Metódy merania CD

Chromatickú disperziu možno okrem výpočtu zmerať, a to niekoľkými spôsobmi. Nasleduje ich vymenovanie so stručnou charakteristikou.

- **Metóda fázového posunu** – Referenčný spôsob merania CD podľa ITU-T G.650. Využíva sa súvislosti doby šírenia sa signálov optickým vláknom s ich fázovým posunom vo frekvenčnej oblasti [22, 25]. Nevýhoda metódy tkvie v nutnosti použiť referenčné vlákno, kedy sa zo vstupu dostáva na výstup informácia o vstupnej fáze signálu [22].
- **Metóda diferenciálneho fázového posunu** – Princíp spočíva v meraní fázového rozdielu signálov o rozličných vlnových dĺžkach. Nie je nutné použiť referenčné vlákno. Výhodou je i možnosť ladenia, kedy sa pri použití komunikačného vlákna prenášajú informácie z výstupu na vstup a následne sa nastaví potrebná vlnová dĺžka, alebo modulačná frekvencia [22].
- **Metóda oneskorenia impulzov v časovej oblasti** – Metóda spočíva v sériovom vysielaní impulzov rôznych λ za sebou do optickej trasy pri presne definovaných rozstupoch medzi nimi. Z rozstupov na výstupe a vstupe sa určí rozšírenie spôsobené CD [1].
- **Interferometrická metóda** – Základ metódy je interferencia. Využíva sa Michelsonov alebo Mach-Zehnderov interferometer. Súčasťou meracej metódy je takisto referenčná trasa, preto sa Interferometrická metóda používa pre meranie krátkych optických trás (do 10 m). Z toho vyplýva vhodnosť metódy pre presné laboratórne merania CD, napríklad závislosti CD optického vlákna na teplote [22].

²⁵Higher Order Mode fiber

²⁶Fiber Bragg Grating

2 POLARIZAČNÁ VIDOVÁ DISPERZIA (PMD)

V jednovidových optických vláknach je dominantná chromatická disperzia, ktorej hodnota sa však dá určiť výpočtom, meraním a následne efektívne kompenzovať. So zvyšujúcimi sa prenosovými rýchlosťami nad $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ nadobúda svoj význam polarizačná vidová disperzia PMD. Ako z jej názvu vyplýva, jav polarizácie svetla tvorí základ tejto disperzie. V nasledujúcom texte budú uvedené detaily a súvislosti, ktoré načrtnú nutnosť jej merania a možnosti zníženia jej negatívnych vplyvov v moderných optických prenosových sieťach.

2.1 Svetlo ako vlnenie

James Clerk Maxwell prišiel na skutočnosť, že svetelný lúč je vlastne postupná vlna, tvorená elektrickým a magnetickým poľom, teda postupná elektromagnetická vlna [26].

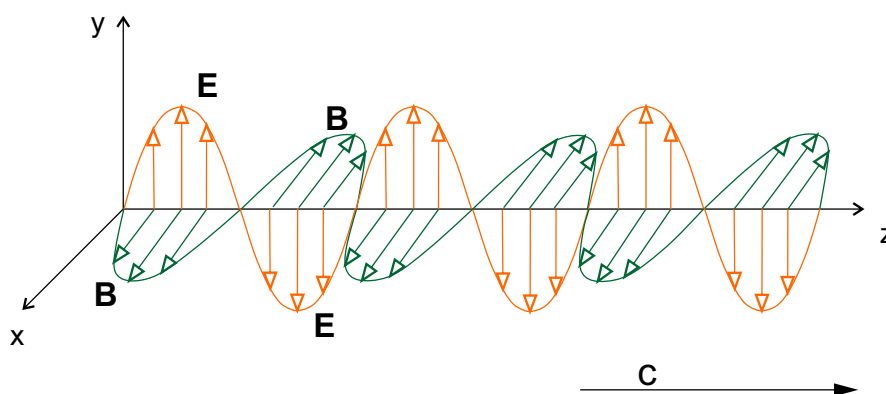
Fotón je častica poľa a jej úlohou je sprostredkovať elektromagnetickú interakciu. Má nulovú kludovú hmotnosť a konštantnú rýchlosť vo vákuu, nezávislú na voľbe súradnicovej sústavy. Louis de Broglie sformuloval princíp duality vlnenia a častíc, ktorý nám v skratke hovorí, že v prípade svetla možno svetelný lúč chápať ako prúd svetelných kvánt (fotónov), aj ako elektromagnetické vlnenie. Spojitosť vlnenia s časticou možno pozorovať zo vzťahu (2.1) [27].

$$\vec{p} = \hbar \cdot \vec{k} \text{ a } |\vec{k}| = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \implies p = \frac{\hbar}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} = \frac{\hbar}{\lambda}, \left[\frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right] \rightarrow \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right] \quad [27] \quad (2.1)$$

kde je:

- \vec{p} ... vektor hybnosti fotónu,
- \hbar ... redukovaná Planckova konštanta,
- $|\vec{k}|$... absolútna hodnota vlnového čísla,
- h ... Planckova konštanta $\cong 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,
- λ ... **vlnová dĺžka fotónu**, platí $\lambda = \frac{c}{\nu}$ [27].

Na obr. 2.1 je schematicky zobrazená EM vlna, kde \mathbf{E} predstavuje vektor intenzity elektrického poľa a \mathbf{B} vektor intenzity magnetického poľa. Veličiny \mathbf{E} a \mathbf{B} sú veľmi tesne prepojené, obvykle sa pracuje len s jednou z nich. Volí sa \mathbf{E} , pretože aj väčšina prístrojov, ktoré merajú EM pole, pracujú práve s jeho elektrickou zložkou [26].



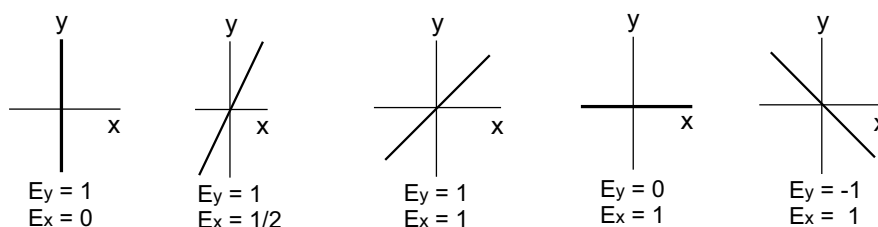
Obr. 2.1: Postup elektromagnetickej vlny [26].

2.2 Polarizácia – elektrický vektor svetla

Polarizácia svetla určuje smer oscilácií elektrického poľa [3]. Polarizáciu svetla môžeme dosiahnuť:

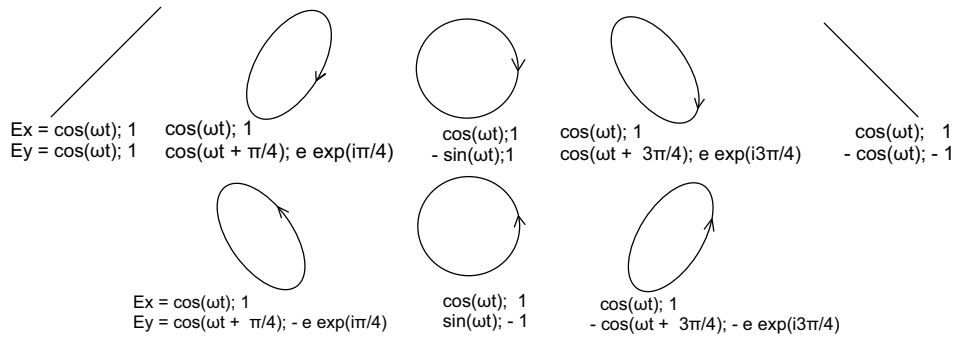
- Polarizačnou doštičkou, tzv. polaroidom,
- odrazom svetla pod Brewsterovým uhlom,
- rozptylom svetla,
- **priechodom svetla dvojlomným prostredím,**
- anomálnym lomom svetla (špeciálny prípad dvojlomu) [26, 3].

Vektor \mathbf{E} je tvorený dvomi vzájomne kolmými zložkami, zložka E_x a E_y . Pre ideálne monochromatické svetlo platí, že osciluje s presnou frekvenciou, no jeho zložky oscilujú nezávisle na sebe. Obrázok 2.2 znázorňuje prípady, kedy zložky „x“ a „y“ oscilujú vo fáze, no líšia sa hodnotou amplitúdy. Vzniká **lineárna polarizácia**, vektor \mathbf{E} osciluje po priamke v rovine XY [3].



Obr. 2.2: Superpozícia kmitov zložiek x a y vo fáze [3].

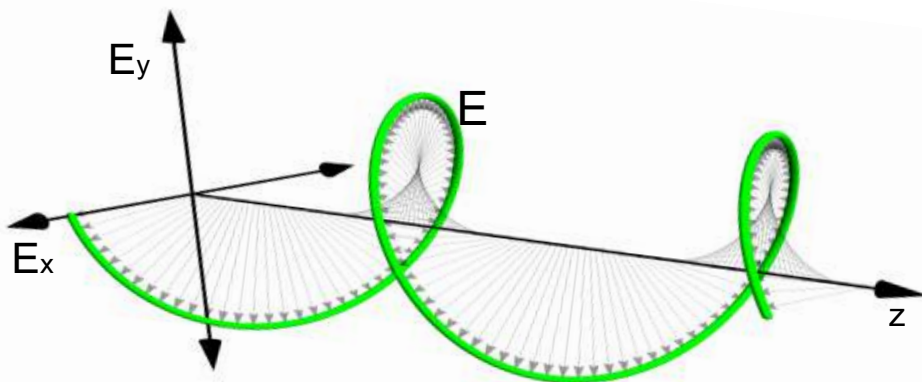
Ak nie sú kmity E_x a E_y vo fáze, potom vektor \mathbf{E} opisuje väčšinou elipsu a je to jeho najobecnejší pohyb. Na obr. 2.3 sú znázornené superpozície zložiek pre rovnaké amplitúdy, ale rôzne relatívne fázy [3].



Obr. 2.3: Skladanie kmitov v smere osi x a y, zložky E_x a E_y sú vyjadrené v reálnom i komplexnom tvare. [3].

Pohyb po priamke je špeciálny prípad pohybu po elipse, kedy je medzi zložkami vektoru \mathbf{E} nulový fázový rozdiel, alebo rozdiel o hodnote celočíselného násobku π rad. Pohyb opisujúci kružnicu vzniká v prípade rovnakých amplitúd a fázovom rozdiel $\frac{\pi}{2}$ rad, alebo v prípade nepárnych celočíselných násobkov $\frac{\pi}{2}$ rad [3].

Z predchádzajúcich obrázkov je evidentný význam pojmov lineárna, kruhová či eliptická polarizácia, takisto ako ľavotočivá a pravotočivá kruhová/eliptická polarizácia (vlna vystupuje z papiera). Priechodom svetelného lúča prostredím sa jeho polarizácia mení. Ak je zmena polarizácie rýchlejšia, než sme schopní ju identifikovať, hovoríme, že svetlo je nepolarizované [3]. Na obr. 2.4 je zobrazená pravotočivá kruhová polarizácia z bočného pohľadu.



Obr. 2.4: Znázornenie pravotočivej kruhovej polarizácie z bočného pohľadu [28].

2.2.1 Polarizácia a Jonesov vektor

Jonesov vektor \mathbf{J} predstavuje obecnú maticu typu $\begin{pmatrix} \dot{A}_x \\ \dot{A}_y \end{pmatrix}$, kedy

- $\dot{A}_{1x}, \dot{A}_{1y} \dots$ predstavujú komplexné súradnice intenzity elektrického poľa na vstupe optického systému a
- $\dot{A}_{2x}, \dot{A}_{2y} \dots$ predstavujú komplexné súradnice intenzity elektrického poľa na výstupe optického systému.

Optický systém možno popísať maticovým zápisom:

$$\begin{pmatrix} \dot{A}_{2x} \\ \dot{A}_{2y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{T}_{11} & \dot{T}_{12} \\ \dot{T}_{21} & \dot{T}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{A}_{1x} \\ \dot{A}_{1y} \end{pmatrix} \quad [27], \quad (2.2)$$

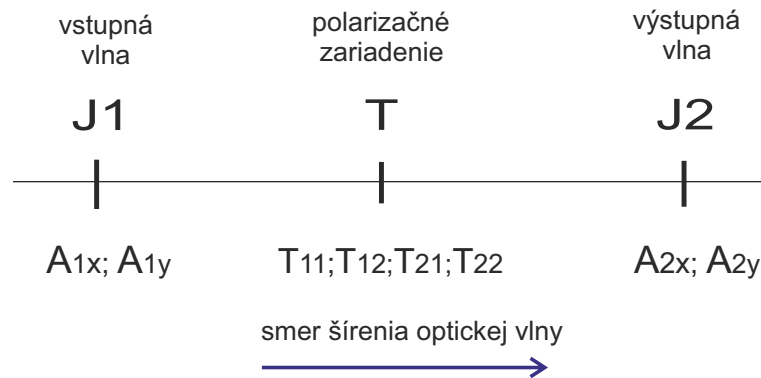
kde $\dot{T}_{11}, \dot{T}_{12}, \dot{T}_{21}$ a \dot{T}_{22} sú komplexné konštanty popisujúce systém (napr. polarizačné zariadenie) a tvoria tzv. **Jonesovu maticu T**. Ich voľbou sa mení polarizácia vstupnej vlny.

Možné podoby Jonesovho vektora znázorňujúceho polarizačné stavy sú uvedené na obr. 2.5.

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. 2.5: Základné tvary Jonesovho vektora [27].

Obr. 2.6 znázorňuje optický systém s polarizačným zariadením, ktoré je lineárne, zachováva rovinnú vlnu, no mení jej polarizáciu.



Obr. 2.6: Optický systém s polarizačným zariadením [27].

Zjednodušený tvar maticového zápisu (2.2), ktorý popisuje systém na obr. 2.6 je:

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{T} \cdot \mathbf{J}_1, \quad (2.3)$$

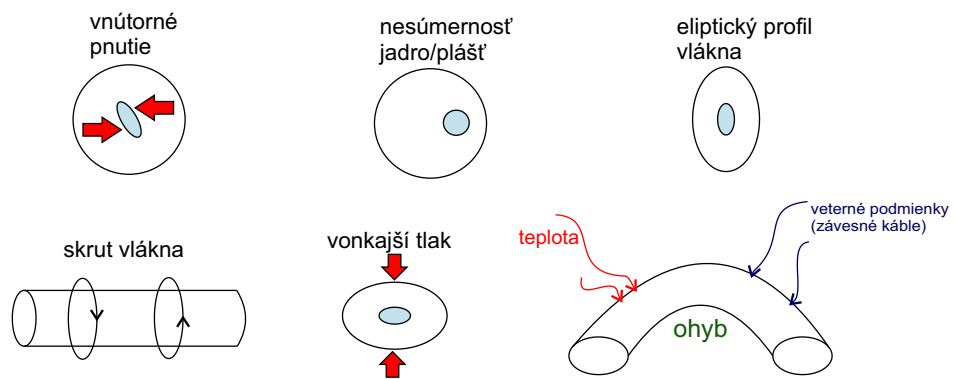
2.2.2 Dvojlom

Ako bolo uvedené v kapitole 2.2, svetlo sa polarizuje aj priechodom dvojlomným prostredím. Medzi takéto prostredia patrí napríklad islandský vápenec. Ide teda o polarizačné hranoly vybrúsené z opticky anizotropného materiálu. Svetlo dopadajúce na takýto hranol sa rozdelí na dva lúče, ktoré sú lineárne polarizované vo vzájomne kolmých rovinách. Známa aplikácia polarizačného hranolu je Nicolov hranol.

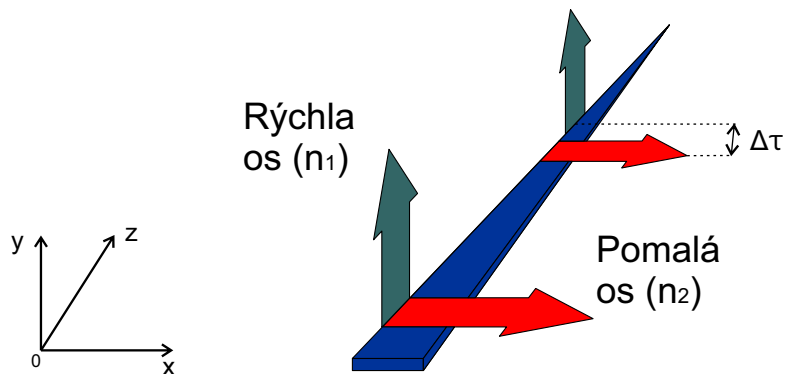
Dvojlom sa však vyskytuje i v materiáloch, ktoré sú pôvodne opticky izotropné. Anizotropia u nich vzniká pôsobením predovšetkým vonkajších vplyvov [29].

Optické vlákna nie sú konštrukčne dokonalé a homogénne. Lokálnu anizotropiu spôsobujú vnútorné faktory pri výrobe, ako aj vonkajšie faktory počas doby života daného vlákna. Obrázok 2.7 zobrazuje časté príčiny, ktoré spôsobujú dvojlom v optických vláknach.

Všeobecne platí, že ak vlákno vykazuje odlišné indexy lomu v závislosti na polarizačnom stave, hovoríme, že vlákno je dvojlomné [21]. Každý z dvoch polarizačných vidov, do ktorých sa rozdelí energia vstupnej EM vlny, sa šíri odlišnou rýchlosťou dôsledkom rôznych hodnôt indexu lomu. Polarizačné vidy sa šíria v polarizačných rovinách, teda sú vzájomne kolmé. V homogénnom vlákne ideálnych kruhových rozmerov sa tieto vidy šíria rovnakou rýchlosťou, no v reálnych vláknach vzniká medzi vidmi časové oneskorenie $\Delta\tau$. Situácia je znázornená na obr. 2.8 [21, 16].



Obr. 2.7: Vonkajšie a vnútorné vplyvy spôsobujúce anizotropiu optického vlákna [21, 30].



Obr. 2.8: Polarizačné vidy v dvojlomnom prostredí optického vlákna [21].

Existujú vlákna, ktoré sú zámerne navrhované tak, aby boli silno dvojlomné. Sú to polarizáciu udržiavajúce vlákna a rýchlosť svetla sa mení podstatne s polarizačným stavom vyslaného signálu [21]. Rýchla a pomalá os sa spoločne nazývajú hlavné stavy polarizácie PSP¹. Veličina $\Delta\tau$ sa nazýva aj diferenciálne skupinové oneskorenie DGD² [16].

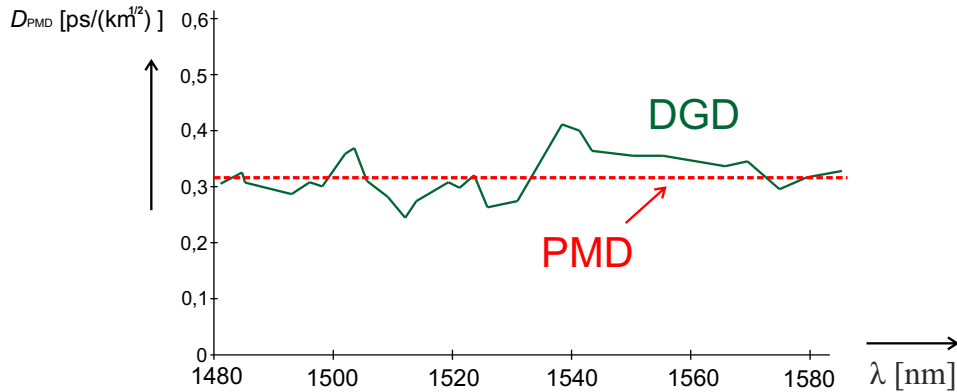
¹Principal States of Polarization

²Differential Group Delay

2.3 DGD

DGD predstavuje časový rozostup medzi polarizačnými vidmi, jeho jednotka je preto pikosekunda – ps. Tento parameter je závislý na vlnovej dĺžke, ale i na teplote vlákna, kedy sa hodnoty DGD často menia markantne s malou zmenou teploty vlákna. Takisto manuálne zaobchádzanie s vláknom má vplyv na tvorbu dvojlomu a v konečnom dôsledku zmenu DGD, vrátane jeho závislosti na λ . DGD sa mení v čase [21].

Na obr. 2.9 je znázornený príklad závislosti DGD na vlnovej dĺžke.



Obr. 2.9: Príklad priebehu DGD v závislosti na vlnovej dĺžke [30].

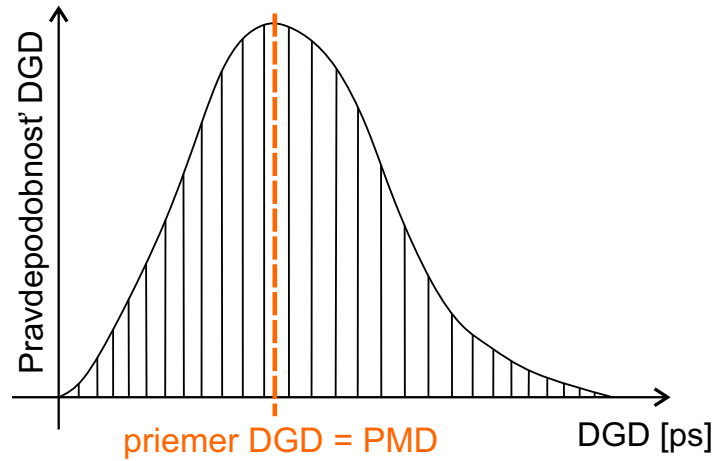
Ako vidno na obr. 2.9, priemernú hodnotu DGD predstavuje samostatná veličina PMD, ktorú popisuje koeficient polarizačnej vidovej disperzie D_{PMD} a jeho hodnota je nemenná.

V dlhých optických vláknach, ktoré vykazujú obzvlášť náhodný charakter zmeny hodnôt DGD v závislosti na vlnovej dĺžke či teplote, sa vyskytuje Maxwelllove pravdepodobnostné rozloženie hodnôt DGD – obr. 2.10 [21].

Funkcia hustoty pravdepodobnosti uvedeného rozdelenia (2.4):

$$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta\tau^2}{\alpha^3} \exp\left(-\frac{\Delta\tau^2}{2\alpha^2}\right), [21] \quad (2.4)$$

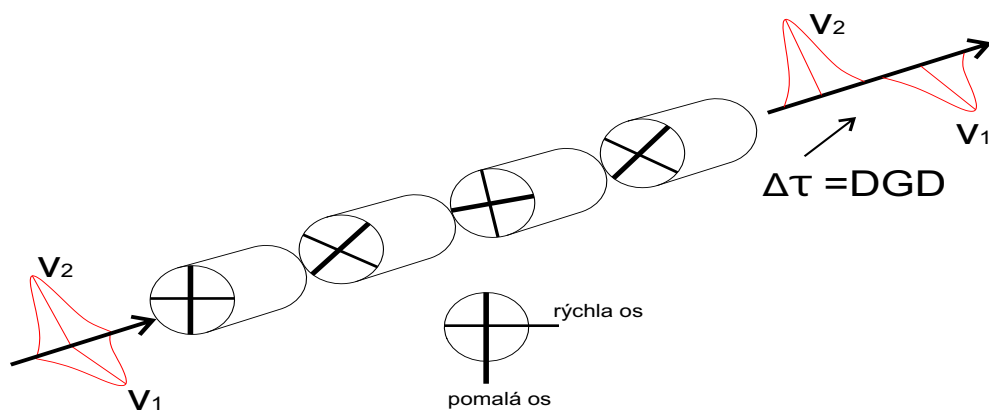
kde $\alpha = \sqrt{\frac{\pi}{8}}$ je úmerné priemernej hodnote DGD.



Obr. 2.10: Maxwelllove pravdepodobnostné rozloženie hodnôt DGD [21, 30].

2.4 Väzby medzi polarizačnými vidmi

Moderné konvenčné optické vlákna sú navrhované tak, aby obsahovali minimálny dvojlom. Napriek tomu sa v nich však často vyskytuje dvojlom v nezanedbateľnej miere. Na rozdiel od vysoko polarizáciu udržiavacích vlákien nie je dvojlomnosť spôsobujúca DGD jednotná v celej dĺžke, pretože pôsobia mikroohyby či skruty vlákien. Výsledkom je náhodná zmena orientácie polarizácie. Takéto vlákno je potom modelované ako súbor krátkych dvojlomných vlákien, ktorých rýchla a pomalá os sú náhodne orientované – obr. 2.11 [21].



Obr. 2.11: Silná väzba medzi vidmi v telekomunikačnom vlákne [21].

2.4.1 Slabá medzividová väzba

Slabú či žiadnu väzbu vykazujú vlákna najmä krátkych vzdialeností, ale aj komponenty ako napríklad spojky. Prejavuje sa to v malej, alebo žiadnej závislosti DGD na λ [21]. V takýchto prípadoch sa priemerné DGD mení lineárne podľa vzťahu (2.5):

$$D_{\text{PMD}}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{L}, \quad [\text{ps} \cdot \text{km}^{-1}] [1] \quad (2.5)$$

kde L je dĺžka vlákna a $D_{\text{PMD}}(\lambda)$ je koeficient PMD. Hodnota PMD je potom rovná DGD vzhľadom na dĺžku vlákna [31].

V krátkych vláknach sa nevyskytuje polarizačná nepravidelnosť, polarizácia sa mení z lineárnej cez elipsovitu po kruhovú, následne zasa elipsovitu a lineárnu – vid' obr. 2.3 [31].

2.4.2 Silná medzividová väzba

Prípád silnej väzby je typický pre štandardné telekomunikačné vlákna, využívané pre prenos na väčšie vzdialenosti. Obr. 2.11 ilustruje prípad silnej väzby, ktorá bola popísaná v kapitole 2.3 a v úvode kapitoly 2.4. DGD je teda funkciou vlnovej dĺžky, rozloženie polarizačných stavov je náhodné v každom segmente. Priemerné DGD sa nemení lineárne, ale s druhou odmocninou dĺžky vlákna – vzťah(2.6) [21, 31].

$$D_{\text{PMD}}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}}. \quad [\text{ps} \cdot \text{km}^{-\frac{1}{2}}] [1] \quad (2.6)$$

Ak by bola dĺžka vlákna skrátená na 25% pôvodnej dĺžky, priemerné DGD by kleslo len o 50% [21].

2.5 PMD druhého rádu

PMD druhého rádu vyjadruje závislosť DGD a PSP na vlnovej dĺžke [31, 21]. Je to rozšírenie PMD prvého rádu, jeho jednotka je ps^2 , alebo $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1}$. PMD druhého rádu charakterizuje vzťah (2.7):

$$\tau_{\omega} = \sqrt{\tau_{\omega\parallel}^2 + \tau_{\omega\perp}^2}, \quad (2.7)$$

kde:

- $\tau_{\omega\parallel}$ je úmerné prvej frekvenčnej derivácii DGD a
- $\tau_{\omega\perp}$ charakterizuje frekvenčnú závislosť prvého rádu hlavných stavov polarizácie PSP [21].

Tak ako DGD, aj druhý rád PMD sa mení náhodne s vlnovou dĺžkou a teplotou. Súvis DGD a PMD druhého rádu sa dá vyjadriť vzťahom (2.8):

$$\langle\tau_{\omega}\rangle \approx \frac{\langle\Delta\tau\rangle^2}{\sqrt{12}}. [21] \quad (2.8)$$

Význam PMD druhého rádu vzrastá v situácii, kedy je priemerné DGD $\langle \Delta\tau \rangle$ podstatne väčšie ako 15% bitovej periódy prenášaného optického signálu. Vtedy nastáva limit pre kompenzáciu PMD prvého rádu. Nadmerná hodnota PMD druhého rádu taktiež znižuje toleranciu prenášaného signálu k chromatickej disperzii. Účinky PMD druhého rádu na prenos optického signálu ešte neboli plne preskúmané [21].

2.6 Limitné hodnoty PMD

Norma ITU-T G.697 uvádza limitné hodnoty PMD, platné pre systémy STM a rôzne prenosové rýchlosti – tab. 2.1.

Tab. 2.1: 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
$D_{\text{PMD}}(\lambda)$ na 400 km [ps/ $\sqrt{\text{km}}$]	< 32,000	< 8,000	< 2,000	< 0,500	< 0,125

Rôzne druhy vlákien definujú garantované hodnoty PMD. Sú to hodnoty $D_{\text{PMD}}(\lambda)$ podľa ITU a združuje ich tabuľka 2.2.

Tab. 2.2: Garantované hodnoty PMD pre rôzne vlákna, ITU [30].

Druh vlákna podľa ITU-T	Hodnota $D_{\text{PMD}}(\lambda)$
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	$\leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$

Odporúčanie ITU-T G.959-1 špecifikuje prepočetný vzťah (2.9) medzi maximálnou hodnotou DGD a hodnotou PMD vzhľadom na stabilitu prenosu, kedy sa očakáva, že v 99,9954 % nebude problém pri prenose v dôsledku PMD. Prepočet je platný pre SDH prenosy a platí Maxwelllove pravdepodobnostné rozloženie hodnôt DGD [32].

$$\max \text{DGD [ps]} = 3 \cdot \text{PMD [ps]} \quad [32]. \quad (2.9)$$

Odporúčanie IEEE-802.3ae definuje maximálne DGD pre 10 Gbit Ethernet na hodnotu 19 ps s pravdepodobnosťou 99,999987%, že PHD neohrozí prenos dát (viď Maxwelllove pravdepodobnostné rozloženie). Potom platí vzťah (2.10).

$$\max \text{DGD} [\text{ps}] = 3,73 \cdot \text{PMD} [\text{ps}] [32]. \quad (2.10)$$

Dôvod týchto limitov spočíva v určitej istote pre inštitúcie typu banky, firmy a podobne [32].

Odporúčanie ITU-T G.959-1 definuje limit DGD platný pre systém STM-64 (10 Gbit · s⁻¹) na 30 ps. Podľa vzťahu (2.9) je odvodená hodnota PMD 10 ps na trasu, čo potvrdí tabuľka 2.2.

V tabuľke 2.2 je uvedená garantovaná hodnota koeficientu PMD vlákna typu G.652.D, a to $D_{\text{PMD}}(\lambda) \leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Táto hodnota je vhodná pre systémy s prenosovou rýchlosťou 2,5 Gbit · s⁻¹ a 10 Gbit · s⁻¹, nie však 40 Gbit · s⁻¹ a viac. V takom prípade je vhodné zvoliť optické vlákno s $D_{\text{PMD}} \leq 0,06 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ [31].

2.6.1 PMD a rozšírenie pulzu

Riadok tabuľky 2.1 limit PMD deklarácia 1/10 ps predstavuje typickú PMD ako desatinu bitového času, teda maximálne 10% rozšírenie pulzu, podľa ITU. Uvedenú skutočnosť možno zapísať matematicky ako:

$$\Delta\tau_{\max} \leq 0,1 \cdot T_s \quad [\text{ps}] \quad (2.11)$$

kde je:

- $\Delta\tau_{\max}$... maximálna hodnota diferenčného skupinového oneskorenia,
- T_s ... doba trvania jedného signálového prvku (často bitu) v sekundách, a platí $T_s = \frac{1}{B}$, kde B je bitová rýchlosť.

Kombináciou vzťahu (2.11) a vzťahu pre výpočet koeficientu PMD vlákien dlhých vzdialeností (2.6) vzniká vzťah (2.12):

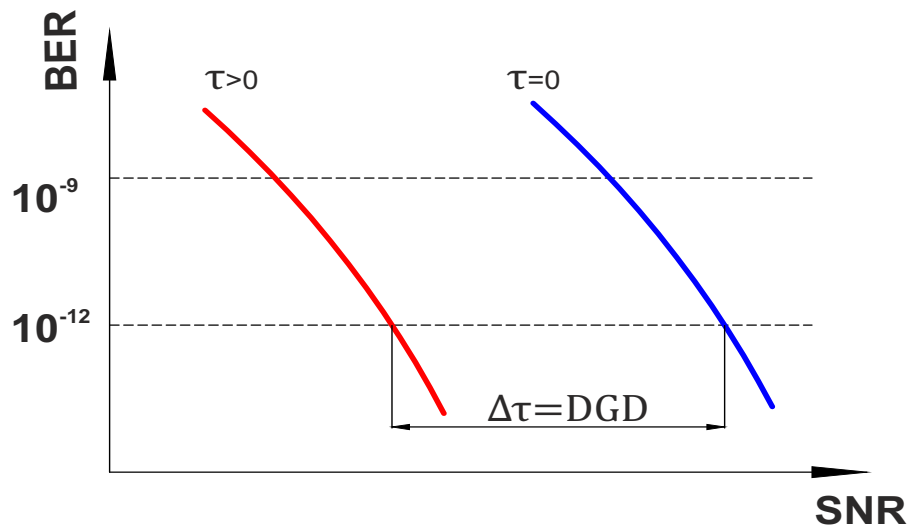
$$D_{\text{PMD}}(\lambda) \cdot \sqrt{L} \leq \frac{0,1}{B} \quad [\text{ps}] \quad (2.12)$$

Dostávame vzťah, ktorý spája do závislosti koeficient PMD, dĺžku vlákna a bitovú rýchlosť, s ohľadom na 10%-né rozšírenie pulzu. V kapitole 2.6.1 bolo čerpané z [33].

2.7 Vplyv PMD na prenosový kanál

Pre zaistenie vyhovujúcej kvality prenosu sa sledujú a vyhodnocujú parametre ako bitová chybovosť BER, či odstup signálu od šumu SNR³. Pri náraste DGD klesá SNR a prenos je následne náchylnejší na vznik BER, viď obr. 2.12.

³Signal to Noise Ratio



Obr. 2.12: Súvislosť parametrov BER a SNR [33].

Vzťah BER a SNR možno popísať matematicky:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\text{SNR}}{2}}. \quad [-] [33] \quad (2.13)$$

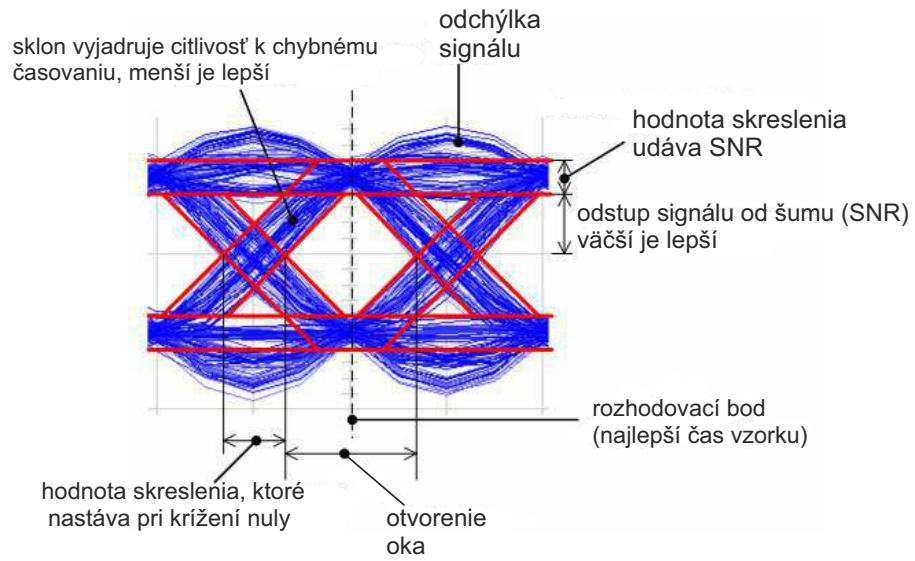
Na SNR ako parameter prenosového kanálu možno nazerať z pohľadu diagramu oka, ktorý sa často využíva na kvalitatívnu analýzu signálov digitálnych prenosov. Diagram oka umožňuje odhaliť kanálové chyby [33].

Na pokles SNR reaguje diagram oka tým, že sa uzatvára v horizontálnom i vertikálnom smere. Miera poklesu diagramu oka sa nazýva **power penalty**, teda určitý výkonový pokles. Následkom je chybné vyhodnotenie stavových hodnôt signálu v prijímači.

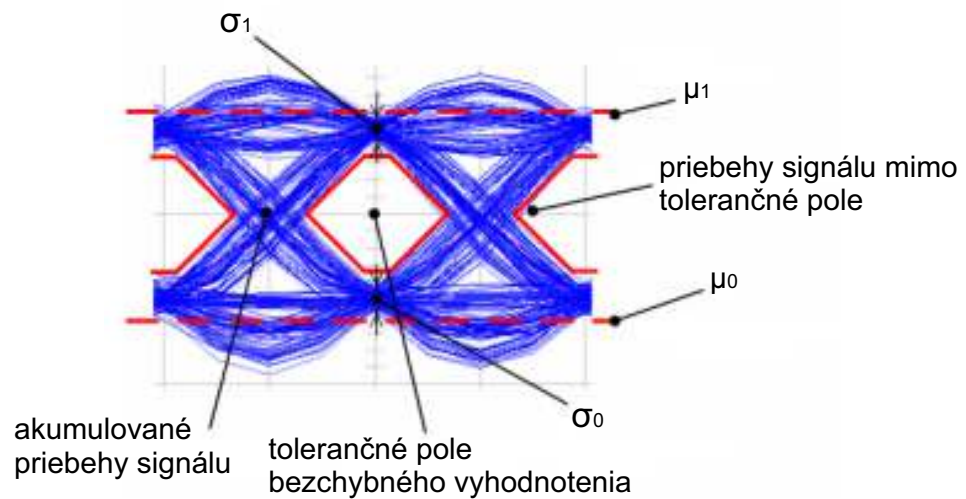
Na obr. 2.13 je znázornený príklad diagramu oka s popisom. Kvalitu oka popisuje tzv. Q -faktor, ktoré hodnota je určená vzťahom (2.14):

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}. \quad (2.14)$$

Uvedené hodnoty μ a σ tvoria spomínaný Q -faktor a jeho súvislosť s diagramom oka znázorňuje obr. 2.14.



Obr. 2.13: Diagram oka a SNR, prevzaté z [33].



Obr. 2.14: Diagram oka a Q -faktor, prevzaté z [33].

kde je:

- μ_1 ...stredná hodnota úrovne logickej 1,
- μ_0 ...stredná hodnota úrovne logickej 0,

- σ_1 ... rozptyl hodnôt úrovně logická 1,
- σ_0 ... rozptyl hodnôt úrovně logická 0 [33].

2.7.1 Odolnosť modulačných formátov voči PMD

Literatúra [34] uvádza simuláciu, v ktorej bolo porovnávaných niekoľko modulačných formátov z hľadiska odolnosti voči PMD. Konkrétne sa sledovala závislosť power penalty na pomere DGD/T_b , teda pomere DGD a bitového času. Bolo uvažované len skreslenie signálu spôsobené vplyvom polarizačnej vidovej disperzie, skreslenia vplyvom útlmu, chromatickej disperzie a iných javov boli zanedbané.

Vstupné parametre simulácie boli nasledovné:

- bitová rýchlosť... 40 Gbit · s⁻¹,
- BER... 10⁻¹² [-],
- dĺžka vlákna L ... 1000 m,
- typ vlákna... G.652.D ($D_{PMD} \leq 0,2 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$).

Pri zvolenej rýchlosti je limit PMD podľa ITU 2,5 ps. Prekročenie tejto hranice vyvolá uzavretie diagramu oka a ukončenie prenosu.

Výstup simulácie ukázal, že modulácie s najvyššou mierou tolerancie k PMD sú RZ–DQPSK a NRZ–DQPSK⁴. Ich výhoda je možnosť použitia pri veľkých vzdialenostiach, no zložitosť realizácie a cena sú nevýhodou.

Najhorší prípad z hľadiska tolerancie k PMD vykazovali modulácie NRZ–DBPSK⁵ a NRZ–OOK⁶. Výhody sú jednoduchosť realizácie a nižšia cena, nevýhoda spočíva v nutnosti nasadenia modulácií na kratšie vzdialenosti.

Kompromis predstavujú modulácie RZ–DBPSK a RZ–OOK z pohľadu ceny, vzdialenosti a zložitosti realizácie.

2.8 Metódy kompenzácie PMD

Z podstaty PMD stáby náhodného javu plynie zložitosť kompenzácie. Boli vyvinuté určité kompenzačné techniky, ktoré možno zhrnúť do troch hlavných kategórií.

- Elektrické znižovanie PMD v prijímačoch s priamym smerom detekcie,
- elektrická PMD kompenzácia v koherentných prijímačoch,
- optická PMD kompenzácia pred prijímačom.

V systémoch využívajúcich nekoherentnú detekciu obálky možno zmierniť skreslenie vplyvom PMD indukované v prijatom signále v elektrickej podobe, a to využitím

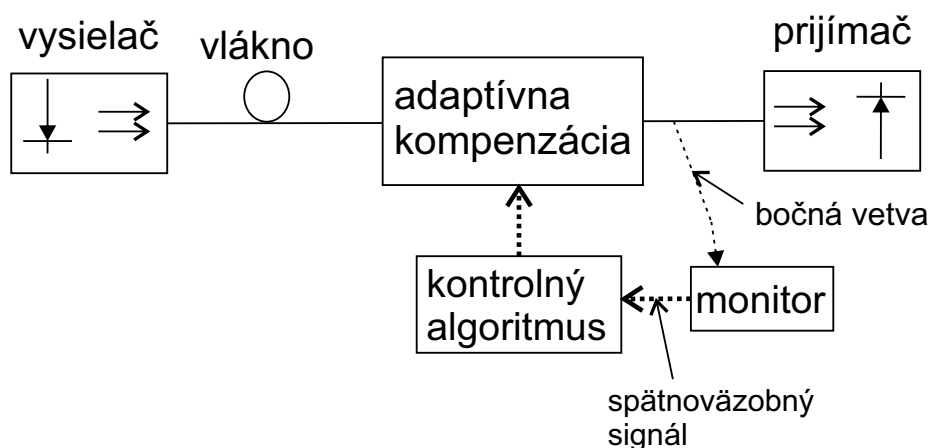
⁴Non Return to Zero–Differential Quadrature Phase Shift Keying

⁵Non Return to Zero–Differential Binary Phase Shift Keying

⁶Non Return to Zero–On Off Keying

transverzálnych elektrických filtrov (TEF⁷), dopredných ekvalizérov (FFE⁸) alebo nelineárnych spätnoväzobných ekvalizérov (DFE⁹). Využíva sa i blok MLSE¹⁰, ktorý predstavuje matematickú funkciu pre najviac pravdepodobný odhad prijímaného signálu za účelom správnej interpretácie. Tieto elektrické ekvalizéry sa používajú i pre potlačenie iných prenosových porúch, sú relatívne lacné a robustné. Nevýhoda je taká, že ich účinnosť rapídne klesá s nárastom PMD [21].

Pre kompenzáciu veľkých hodnôt PMD je vhodná optická kompenzácia, ktorej blokové schéma je na obr. 2.15.



Obr. 2.15: Blokové schéma optickej PMD kompenzácie [21].

Blok adaptívnej kompenzácie obsahuje nastaviteľný polarizačný menič a laditeľnú linku z pohľadu diferenčného oneskorenia pre vyrovnanie náhodných zmien v PSP a DGD vlákna. Spoľahlivá kompenzácia prostredníctvom týchto kompenzátorov je však zložitá úloha, ktorá nebola zatiaľ zvládnutá v plnej miere [21].

Tzv. koherentná detekcia spočíva vo využití lokálneho oscilátora (laser) v prijímači. Signál z tohto oscilátora sa zmiešava s prijímaným signálom, vo výsledku je vyššia odolnosť voči CD a PMD. Koherentná detekcia je však drahá pre 10 Gbit · s⁻¹ prenosy a stále i pre 40 Gbit · s⁻¹ prenosy [32].

⁷Transversal Electrical Filter

⁸Feed Forward Equalizer

⁹Decision Feedback Equalizer

¹⁰Maximum Likelihood Sequence Estimation

Ďalšie metódy zníženia PMD spočívajú napríklad v:

- použitie opakovačov na trase – detekcia signálu pred rizikovým úsekom, nevýhoda spočíva pri nasadení systémom WDM (regenerácia každého kanálu),
- prenos na inej λ – najekonomickejšia varianta,
- výber iného vlákna z optického kábla,
- výmena úseku optickej trasy, alebo celej trasy – hraničné riešenie, zároveň finančne nákladné [30].
- použitie FEC¹¹ kódovania,
- redundancia vlnových dĺžok vo WDM [19].

2.9 Metódy merania PMD

PMD tvorí hlavnú prekážku v prenosoch prostredníctvom optického vlákna, preto je dôležité určiť hodnotu PMD pre správne posúdenie vhodnosti vlákna pre danú prenosovú rýchlosť. PMD sa prejavuje citelne pri rýchlostiach vyšších ako $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$, no v analógových prenosových systémoch, či pri nasadení vlákien vyrobených pred rokom 1996 sú typické vyššie hodnoty PMD i pri podstatne nižších prenosových rýchlostiach.

Hodnoty polarizačnej vidovej disperzie sa zisťujú meraním typicky v situáciách, ako sú:

- modernizácia existujúcej optickej trasy na vyššiu prenosovú rýchlosť,
- inštalácia novej diaľkovej trasy s prenosovou rýchlosťou $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ a viac,
- kvalifikácia vlákna v priebehu výroby,
- kvalifikácia vlákien počas inštalácie trasy a po nej.

PMD je štatistický jav, preto je nutné opakovať merania v istých časových intervaloch, aby sa sledoval trend pohybu hodnôt PMD z dlhodobejšieho hľadiska [21].

V nasledujúcom texte budú popísané metódy merania PMD (DGD).

2.9.1 Metóda s fixným analyzátorom

Táto metóda je známa aj pod názvom metóda skenovania vlnovej dĺžky. Metóda je štandardizovaná podľa IEC 60793-1-48, ITU-T G.650.2 a TIA (FOTP¹²)-113 [21].

Základnou myšlienkou je sledovanie závislosti optického výkonu naviazaného do optického vlákna na vlnovej dĺžke [1]. Závislosť PMD na vlnovej dĺžke spôsobí, že sa rôzne λ vyslaného polarizovaného svetla širokopásmového zdroja žiarenia transformujú do rôznych polarizačných stavov na výstupe vlákna. Výsledkom je náhodná zmena optického výkonu s λ za polarizačným filtrom. Priemerná hodnota DGD

¹¹Forward Error Correction

¹²Fiber Optic Test Procedure

môže byť vypočítaná z počtu extrémov N_e , vyskytujúcich sa v danom frekvenčnom rozsahu, podľa vzťahu [21]:

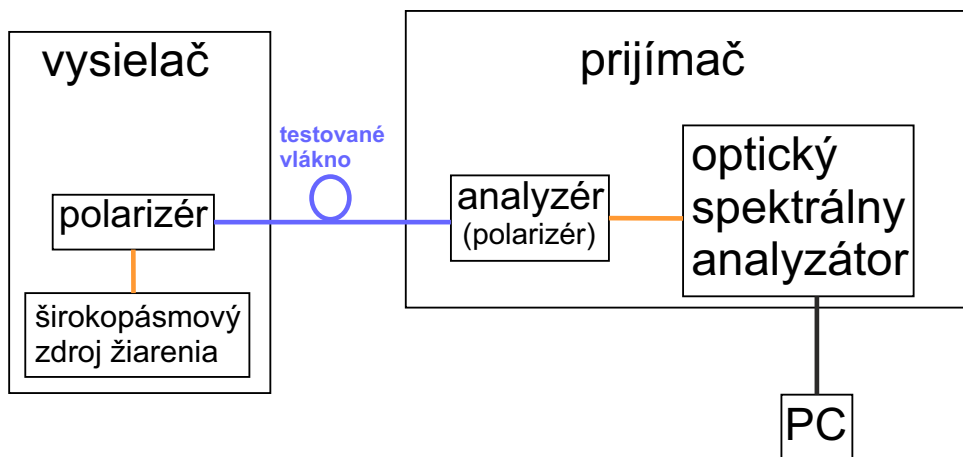
$$\Delta\tau = \frac{k_2 \cdot \pi \cdot N_e}{\Delta\omega}, \quad [\text{ps}] \quad (2.15)$$

kde je:

- k_2 ... konštanta o hodnote 0,82 pre dlhé vlákna a 1 pre krátke vlákna,
- $\Delta\omega$... frekvenčný rozsah [21].

Druhý spôsob získania hodnoty PMD je využitie rýchlej Fourierovej transformácie (FFT¹³), ktorá transformuje zmerané spektrum vlnových dĺžok do časovej oblasti a výsledné dáta preloží Gaussovskou funkciou. Výhoda tohto postupu je grafický výstup zobrazujúci väzby polarizačných vidov daného vzorku. Ďalej ponúka možnosť odfiltrovania vysokofrekvenčných zložiek, vzniknutých pôsobením vibrácií, ktoré by boli považované za maximá a minimá v metóde počtu extrémov [21].

Blokové schéma metódy znázorňuje obr. 2.16.



Obr. 2.16: Blokové schéma metódy s fixným analyzátorom [21, 1].

Namiesto širokopásmového zdroja žiarenia (LED) možno použiť i laditeľný laser. Polarizér (polarizátor) vo vysielačnej časti je nutné začleniť v takom prípade, kedy by emitovaný svetelný lúč nebol polarizovaný. Uhlová orientácia polarizátorov nie je rozhodujúca, no ich poloha by mala byť nemenná počas merania. V prípade slabšej medzividovej väzby môže byť určitá manipulácia s polarizérom, za účelom zvýšenia amplitúdy oscilácií, žiaduca. Podobného efektu možno dosiahnuť pootočením vlákna v spojkách, či konektoroch [35].

¹³Fast Fourier Transform

Vzťah (2.15) možno upraviť na tvar:

$$\Delta\tau = \frac{k_2 \cdot N_e \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{2 \cdot c \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)}, \quad [\text{ps}] \quad (2.16)$$

ktorý uvádza aj odporúčanie ITU-T G.650.2 pre metódu merania PMD fixným analyzátorom. Treba si však uvedomiť, že za N_e sa v tomto prípade dosádza počet extrémov (maxím a miním) **mínus 1**.

Detekčný systém môže zobrazovať závislosť $R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{TOT}(\lambda)}$ na vlnovej dĺžke, kedy čitateľ zlomku značí optický výkon zmeraný so zaradeným analyzéróm a menovateľ zasa výkon bez analyzéra. Takto sa dosiahne bezrozmerná veličina $R(\lambda)$, teda spektrálna závislosť zmeny polarizácie výstupného žiarenia [35, 36].

Alternatívnym postupom je ponechanie analyzéra v trase, no jeho pootočením o 90° vzhľadom na jeho pôvodnú polohu. Vyššie uvedený pomer má následne tvar $R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_{TOT}(\lambda)}$ [35].

Niektoré optické spektrálne analyzátory zobrazujú priamo závislosť výstupného výkonu v dBm na λ . Vždy je dôležité uvážiť, či pre výpočet $\Delta\tau$ uvažujú počet extrémov (miním a maxím), alebo počet tzv. peaks, teda maxím zobrazeného priebehu.

Medzi výhody metódy patrí napríklad dobrá absolútna neistota merania, možnosť merania pri začlenení niekoľkých EDFA¹⁴ zosilňovačov, rýchlosť a jednoduchosť merania a podobne. Nevýhoda je napríklad možný limit metódy v prípade vysokých hodnôt PMD, avšak je vhodná pre meranie telekomunikačných vlákien. Ďalej je to citlivosť na vstupnú polarizáciu. Tiež PMD druhého rádu nie je meraná priamo, ale určená výpočtom [21].

Táto metóda je vhodná na meranie PMD optických vlákien pri využití vlnových dĺžok, ktoré sú typické pre jednovidové prenosy. Okrem optických vlákien možno merať aj diskkrétne komponenty, kedy je PMD koeficient irelevantný [35].

2.9.2 Tradičná interferometrická metóda, TINTY

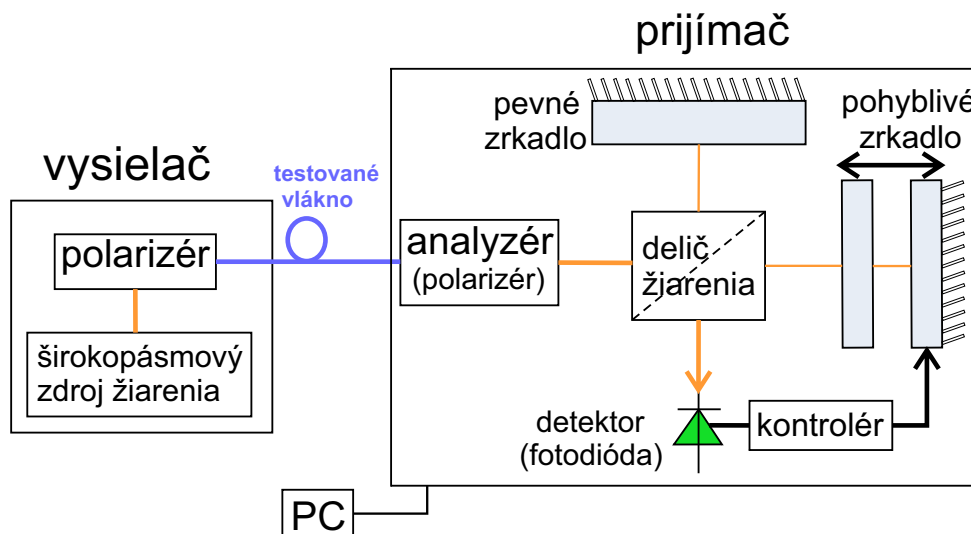
Metóda je štandardizovaná podľa IEC 60793-1-48, ITU-T G.650.2 a TIA (FOTP)-124A [21].

Základná myšlienka metódy TINTY¹⁵ je interferencia nízko koherentného optického žiarenia. Koherencia značí optickú čistotu, lasery produkujú vysoko koherentné žiarenie. Tradičný nízko koherentný zdroj je napríklad širokospektrálna LED dióda [1, 37].

Zapojenie metódy zobrazuje obr. 2.17. Optické žiarenie je polarizované po priechode polarizéróm, následne čoho je naviazané do testovaného optického vlákna.

¹⁴Erbium Doped Fibre Amplifier

¹⁵Traditional Interferometry Analysis



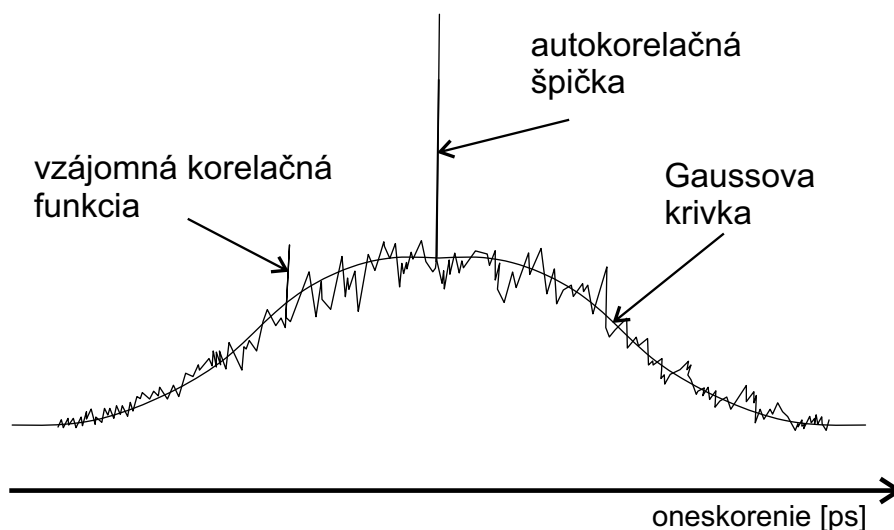
Obr. 2.17: Metóda TINTY [21].

Úlohou prijímača je analyzovať PMD, skladá sa z analyzéra a hlavnej časti – interferometra. Najčastejšie to je Michelsonov interferometer, no používa sa i Mach-Zehnderov interferometer [37, 21].

Žiarenie je interferometrom rozdelené do dvoch ramien, a to s pevným a posuvným zrkadlom (premenlivé časové oneskorenie). Nastáva odraz od zrkadiel späť. Pohybom zrkadla sa mení časový posun medzi signálmi. Interferencia signálov z oboch ramien vzniká rekombináciou týchto signálov ešte pred ich zacielením na detektor. Vzniká interferogram. Z neho sa určí oneskorenie, ktoré spôsobilo PMD, a to priamo vďaka použitiu širokospektrálneho zdroja žiarenia. V prípade štandardných telekomunikačných vlákien sa interferogram preloží Gaussovou krivkou, potom je PMD úmerné smerodajnej odchýlke krivky [37, 21].

Na obrázku 2.18 je zobrazený príklad interferogramu, ktorý pozostáva z viacerých častí. PMD údaj sa získava zo vzájomnej korelačnej funkcie ortogonálnych polarizačných vidov. Silná väzba medzi vidmi (telekomunikačné vlákna) spôsobuje drobné špičky, či náhodné fáze. Hlavná špička je dôsledkom situácie, kedy sú obe zrkadlá v takej polohe, že obe ramená interferometra majú rovnakú dĺžku. Jedná sa o autokorelačnú špičku, ktorá je Fourierovou transformáciou spektra zdroja žiarenia. Pre odstránenie autokorelačnej špičky, ktorá neposkytuje údaj o PMD, sa používa algoritmus [21].

Metóda TINTY je vhodná pre merania v teréne pre jej relatívnu jednoduchosť a rýchlosť merania. Neurčuje sa žiadna referenčná hodnota a je pomerne odolná voči vibráciám vlákna. Metóda je často používaná v praxi [37].



Obr. 2.18: Interferogram – námer metódy TINTY [21, 37].

Platí vzťah (2.17):

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot \sigma, \quad [\text{ps}] \quad (2.17)$$

kde σ značí smerodajnú odchýlku krivky [21].

2.9.3 Obmedzenia metódy TINTY

Prítomnosť autokorelačnej špičky v interferograme negatívne vplyva na výsledok svojou veľkosťou a tvarom. Použitý zdroj žiarenia definuje tvar spektra meracieho signálu, ktorý zasa určuje šírku a tvar autokorelačnej špičky. Na autokorelačnú špičku ďalej vplyvajú spektrálne závislé prvky, ktoré sa vyskytujú v optických trasách, napríklad vláknové zosilňovače EDFA, či add-drop multiplexery OADM¹⁶ a iné. Zámerom je maximálne zúžiť autokorelačnú špičku a vyhladiť ju. To sa dosiahne:

- použitím zdroja žiarenia so spektrálnym priebehom blížiacim sa tvaru Gaussovej krivky,
- zaistením malého vplyvu meranej trasy na tvar spektra meracieho signálu.

Metóda TINTY nie je vhodná pre merania trás, ktoré obsahujú spomenuté spektrálne závislé prvky. Trasu s EDFA zosilňovačmi je nutné merať po úsekoch.

Autokorelačná špička a prekladanie interferogramu Gaussovou krivkou (predpokladá nekonečnú medzividovú väzbu na trase) znižuje presnosť vyhodnotenia PMD, pri meraní nízkych hodnôt sa neistota merania pohybuje v desiatkach percent [37].

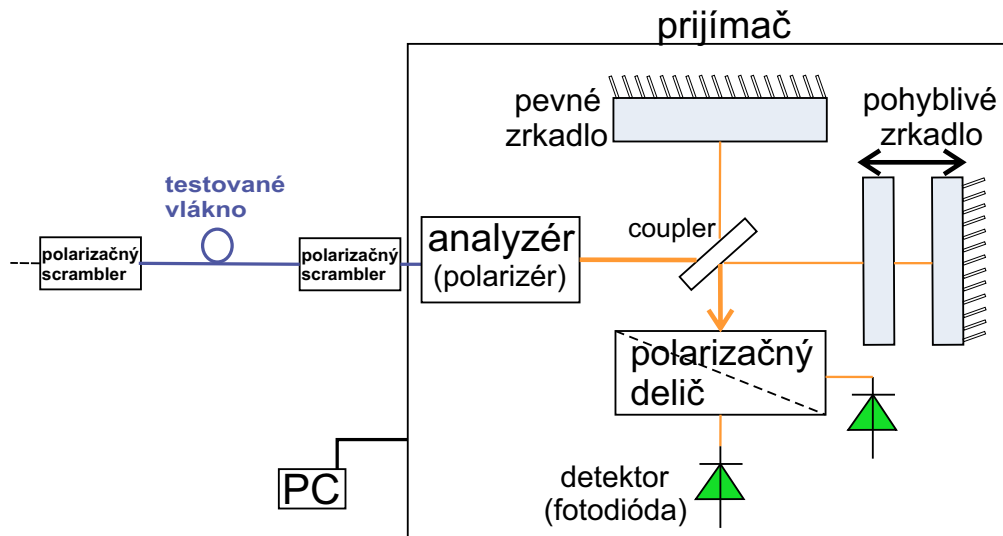
¹⁶Optical Add-Drop Multiplexer

2.9.4 Všeobecná interferometrická metóda, GINTY

GINTY¹⁷ je metóda merania PMD, ktorá odstraňuje obmedzenia plynúce z metódy TINTY, teda potláča vplyv autokorelačnej špičky interferogramu [37].

Táto metóda je štandardizovaná podľa IEC 60793-1-48, ITU-T G.650.2 a TIA (FOTP)-124A [21].

Na obr. 2.19 je zobrazené blokové usporiadanie metódy GINTY, v ktorom možno pozorovať modifikácie oproti TINTY.



Obr. 2.19: Metóda GINTY [21].

Polarizačné skramblery nie sú typickou súčasťou zapojenia GINTY umožňujú výber vstupných a výstupných polarizačných stavov testovaného vlákna. Analyzázér musí byť schopný rotácie, teda nastavenia ortogonálnej polohy voči pôvodnej konfigurácii [21].

V metóde GINTY sa výsledný signál z ramien interferometra delí polarizačným deličom na dve polarizované zložky, ktoré sú vzájomne kolmé. Každú z nich spracováva samostatný detektor, na ktorých dochádza k interferencii. Interferogramy obsahujú aj autokorelačné zložky. Odčítaním interferogramov vzniká samostatná zložka vzájomnej korelácie, ich sčítaním vzniká zasa samostatná autokorelačná zložka.

Hodnota PMD je potom vyhodnotená priamo zo zložky vzájomnej korelácie, odpadá potreba prekladania interferogramu Gaussovou krivkou. Z bodov interferogramu sa vypočíta stredná kvadratická hodnota RMS¹⁸ (údaj o PMD).

¹⁷General Interferometry Analysis

¹⁸Root Mean Square

Aj metóda GINTY vykazuje isté obmedzenie, ktoré spočíva v tom, že pri meraní nízkych hodnôt PMD sú polarizačné vidy po priechode polarizačným deličom prakticky totožné. Zložka vzájomnej korelácie je potom prakticky tiež autokorelácia. V takomto prípade však možno s výhodou použiť údaj o autokorelácii (súčet interferogramov z detektorov) za účelom korekcie hodnoty PMD. Konkrétne sa to realizuje tak, že sa od RMS zo vzájomnej korelácie odpočíta RMS získaná z autokorelácie [37].

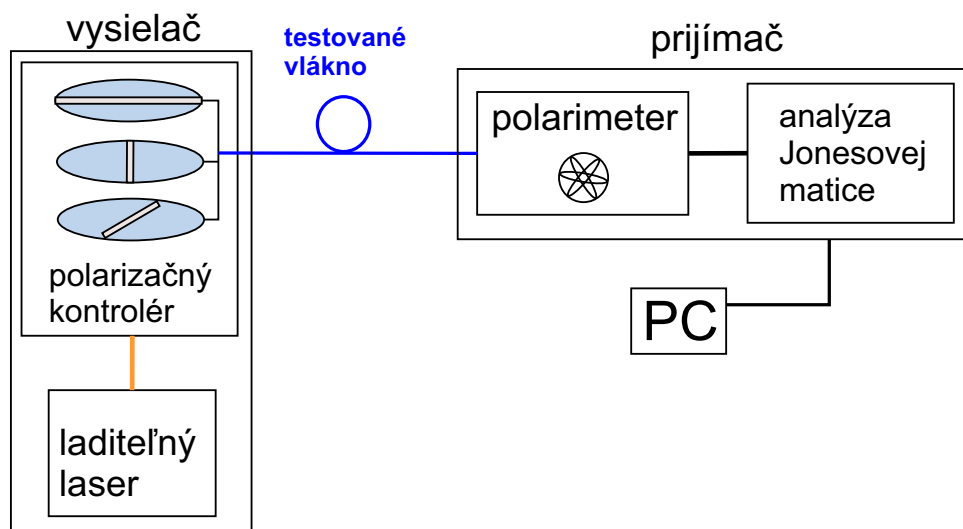
Všeobecná interferometrická metóda je vhodná pre meranie trás so spektrálne citlivými prvkami. Nie je nutné deliť meranie na úseky, z toho plynie vyššia presnosť hodnoty konečnej PMD. Z nezávislosti metódy na tvare a šírke spektra signálu plynie možnosť merania PMD samotných spektrálne závislých prvkov trasy.

GINTY je univerzálna metóda, rýchla, vhodná pre merania v teréne (odolnosť voči vibráciám). Je tiež vhodná pre meranie nízkych hodnôt PMD [37, 30].

2.9.5 Polarimetrická metóda

Polarimetrická metóda, alebo metóda Eigenovej analýzy Jonesovej matice je štandardizovaná v IEC 60793-1-48, ITU-T G.650.2 a TIA (FOTP)-122A [21].

Schéma zapojenia metódy je uvedené na obr. 2.20.



Obr. 2.20: Polarimetrická metóda [21, 25].

Metóda skúma závislosť vektoru PMD na vlnovej dĺžke. Veľkosť tohto vektoru je DGD a jeho orientácia odkazuje na PSP testovaného vlákna.

Laditeľný laser vysiela postupne žiarenie rôznych vlnových dĺžok, pričom polarizačný kontrolér nastaví polarizačné filtre tak, aby vo výsledku vznikli tri rôzne polarizačné stavy pre každú vlnovú dĺžku. Ide o lineárne polarizácie pod uhlom

0°, 45° a 90°, alebo 0°, 60° a 120°. Prijaté polarizačné stavy analyzuje polarimeter [21].

Polarimetrickú metódu možno použiť pri meraní trás s EDFA zosilňovačmi. Metóda vykazuje dobrú hodnotu absolútnej neistoty, nie je citlivá na vstupnú polarizáciu, ani na medzividovú väzbu. PMD druhého rádu je meraná priamo [21].

Medzi nevýhody možno zaradiť dlhý merací cyklus a citlivosť metódy na teplotné zmeny, či vibrácie vlákna. Ďalej sa jedná o drahé riešenie pre merania v teréne. Limit PMD polarimetrickej metódy stanovený na ≤ 50 ps. Z uvedených faktov plynie skutočnosť, že polarimetrická metóda je vhodnejšia pre laboratórne merania [25, 21].

2.9.6 Metóda POTDR

POTDR¹⁹ kombinuje meranie PMD s technológiou OTDR. Táto metóda merania sa využíva s výhodou v prípadoch, kedy je žiaduce lokalizovať problematické úseky trasy z hľadiska vyšších hodnôt PMD. Interferogram POTDR je vyhodnocovaný polarizovane, POTDR, podobne ako OTDR využíva princíp spätného rozptylu²⁰.

Do vlákna sú vyslané sledy krátkych impulzov, zo spätného rozptylu sa získava informácia o PMD v jednotlivých úsekoch trasy. Výpočet PMD sa riadi vzťahom (2.18):

$$\text{PMD} \approx \beta \cdot \sqrt{L \cdot h}, \quad [\text{ps}] [1] \quad (2.18)$$

kde je:

- β ... rozdiel rýchlosti šírenia polarizačných vidov (veľkosť dvojlomu vlákna), jednotka $\text{ps} \cdot \text{km}^{-1}$,
- L ... dĺžka vlákna,
- h ... tzv. väzobná dĺžka, ktorá predstavuje charakter väzby medzi vidmi.

Väzobná dĺžka h predstavuje dĺžku vlákna, na ktorej sa výrazne zmení tvar dvojlomu vlákna, kedy dochádza k značnej výmene energie medzi polarizačnými vidmi.

Vyššie uvedené parametre možno získať zo spätného rozptylu, konkrétne metódami DOP²¹ (vyhodnocuje stupeň polarizácie) a SOP²² (vyhodnocuje stav polarizácie).

Analýza SOP

Zmena stavu polarizácie je zapríčinená dvojlomom a medzividovou väzbou. Meraním na viacerých vlnových dĺžkach možno získať obraz o spektrálnej závislosti SOP úsekov

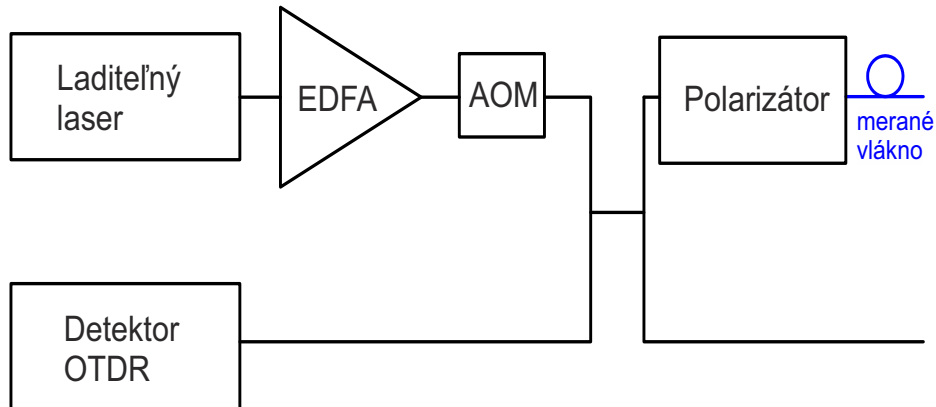
¹⁹Polarization Optical Time Domain Reflectometry

²⁰Rayleighov rozptyl

²¹Degree of Polarization

²²State of Polarization

optickej trasy a následne vyhodnotiť PMD. Na obr. 2.21 je znázornené blokové usporiadanie metódy analýzy SOP.



Obr. 2.21: Metóda analýzy SOP [36, 30].

Vysielač pozostáva z laditeľného laseru malej spektrálnej šírky, ktorého výstup je naviazaný do vláknového EDFA zosilňovača a následne bloku AOM. Tento blok je akusticko-optický modulátor, ktorého výstup je vo forme úzkych impulzov putujúcich cez polarizátor do meranej optickej trasy. Spätne rozptýlené žiarenie prechádza polarizátorom k detektoru OTDR.

Metóda analýzy SOP je vhodná predovšetkým pre nasadenie na kratšie trasy o hodnote $\text{PMD} \leq 0,7 \text{ ps} \cdot (\text{km})^{-\frac{1}{2}}$ [30].

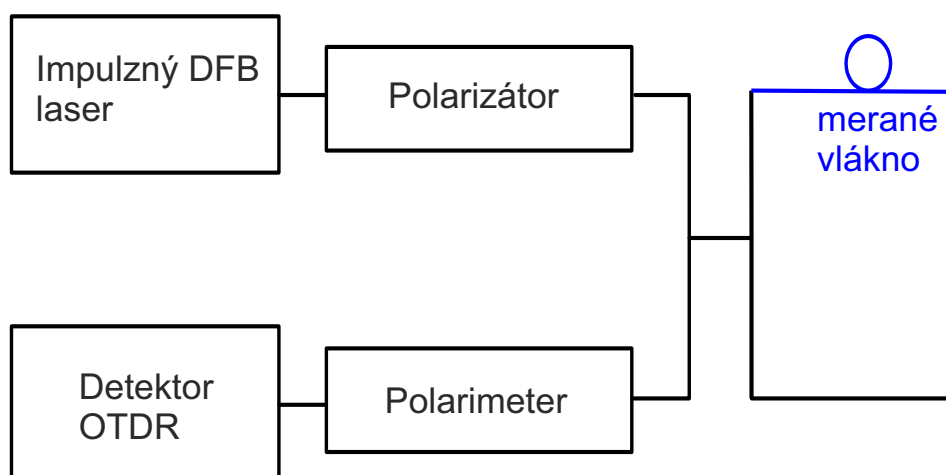
Analýza DOP

Metóda analýzy DOP je blokovo znázornená na obr. 2.22.

DFB laser ako zdroj žiarenia je značne úzkospektrálny z dôvodu vyvarovania sa neskoršej depolarizácie vyslaných pulzov. Polarizované optické žiarenie je naviazané do meranej trasy, spätne rozptýlené žiarenie je podrobené analýze polarimetrom a detektorom OTDR, skúma sa DOP z jednotlivých úsekov trasy.

Metóda analýzy DOP poskytuje možnosť merať trasy väčších vzdialeností. Možno uviesť, že pre:

- impulz zhodne polarizovaný po celej dĺžke platí $\text{DOP} = 1$,
- pre úplne depolarizovaný impulz platí $\text{DOP} = 0$,
- pre spätne rozptýlené žiarenie z úplne depolarizovaného impulzu platí $\text{DOP} \approx \frac{1}{3}$.



Obr. 2.22: Metóda analýzy DOP [1, 30].

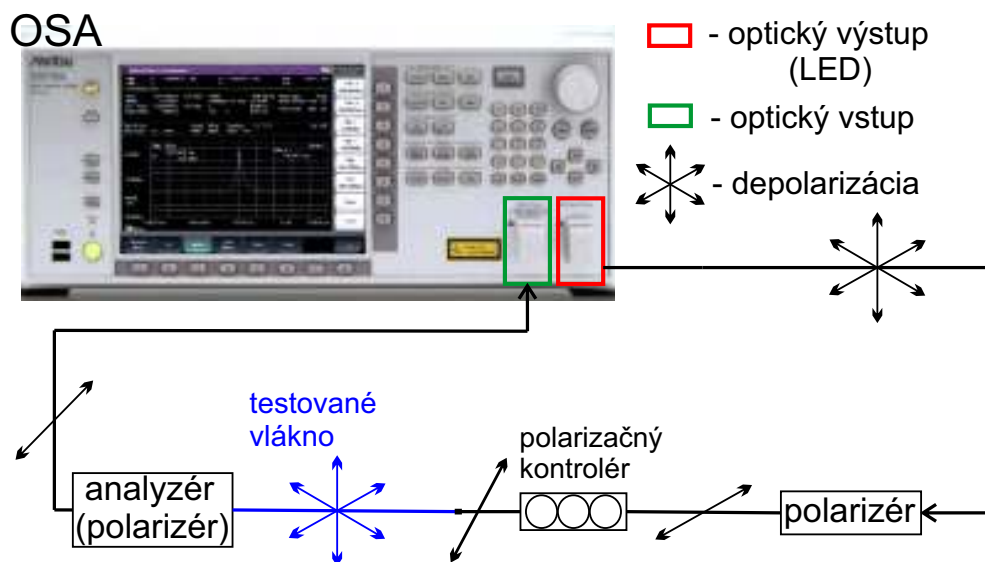
Detailnejšie informácie o metódach analýzy SOP a DOP uvádza [1, 30].

3 NÁVRH PRAKTICKÉHO MERANIA DGD S OSA MS9740A

V nasledujúcom texte bude popísaný návrh na praktické meranie PMD, ktoré bude realizované v laboratóriu prenosových médií na FEKT VUT Brno. Ide predovšetkým o meranie PMD využitím optického spektrálneho analyzátoru MS9740A (OSA) a porovnanie nameraných hodnôt získaných referenčným meraním pomocou modulárnej meracej platformy EXFO FTB-200, pri využití modulu CD/PMD EXFO FTB-5700.

3.1 Metóda s fixným analyzátorom – MS9740A

Z obr. 3.1 vidno zapojenie, ktoré umožní zistiť hodnoty DGD skúmanej trasy a následne vyhodnotiť PMD.



Obr. 3.1: Blokové zapojenie merania (OSA prevzaté z [38]).

Jadrom celého meracieho reťazca je optický spektrálny analyzátor MS9740A. Metóda si vyžaduje použitie širokospektrálneho zdroja žiarenia, kedy je s výhodou použitá zabudovaná LED, označená ako optický výstup OSA.

Blok označený ako polarizér je tvorený polarizátorom, ktorého úloha je polarizovať žiarenie emitované LED svetelným zdrojom do známeho polarizačného stavu, tým pádom definovať počiatkové podmienky z hľadiska polarizačného stavu, ktorý vstupuje do optického vlákna.

Polarizačný kontrolér je zaradený ako voliteľný, avšak vhodný blok, ktorý poskytuje možnosť upraviť vstupnú polarizáciu tak, aby bol výsledný rozkmit medzi extrémami postačujúci pre výpočet DGD (viď kapitola 2.9.1).

Analyzér značí druhý polarizátor, ktorého úlohou je zafixovať zmeny polarizačných stavov vyvolaných vláknom, a tým pripraviť signál, ktorý vstupuje do OSA. Optická intenzita (výkon) tohoto signálu sa mení podľa spektrálnej závislosti zmeny polarizácie vyvolanej vláknom. Výsledkom sú spomínané výkonové extrémy vo výslednej spektrálnej závislosti, z ktorých OSA určí DGD. Z predchádzajúceho textu je evidentné, že meranie DGD pomocou OSA MS9740A využíva metódu skenovania vlnovej dĺžky.

3.2 Referenčné meranie – EXFO FTB–200

Modulárnu meraciu platformu EXFO FTB–200 dopĺňa CD/PMD modul EXFO FTB–5700. Táto kombinácia umožňuje rýchle a presné meranie chromatickej a polarizačnej vidovej disperzie optických trás ako v laboratóriách, tak i v teréne.

Meranie prebieha z jedného konca trasy o celkovej dĺžke až 150 km, kedy je nutné použiť odrazné zrkadlo ako ukončenie trasy. Prístroj využíva Fresnelov odraz a poskytuje údaj priamo o PMD danej trasy.

Parametre merania PMD:

- merací rozsah... (0–20) ps s presnosťou $\pm 0,2$ ps,
- doba meracieho cyklu ≤ 180 s [30].

Zapojenie referenčného merania je znázornené na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Referenčné meranie PMD (EXFO prevzaté z www.profiber.eu).

3.3 In-line vláknový polarizér

V praktickom meraní PMD pomocou metódy skenovania vlnovej dĺžky je nutné použitie polarizérov. V nasledujúcom texte bude v krátkosti popísaný princíp cielenej polarizácie svetla viazaného v optickom vlákne.

3.3.1 Princíp in-line polarizéru

In-line polarizér sa s výhodou používa v optických komponentoch, napríklad v optických vláknových kompenzátoroch, optických deličoch, Faradayových rotátoroch a filtroch.

Štruktúra optického vláknového polarizéru zjednodušene spočíva v nanosení kryštalickej vrstvy k jadrú optického vlákna, alebo v použití iných, tenkých vrstiev, ktoré obklopujú jadro vlákna.

V starších typoch je nanosený dvojlomný kryštál v dĺžke vlákna, na ktorej bol odleštený (tzv. side-polished vlákno), či úplne odstránený plášť. Pole, ktoré unikne z jadra optického vlákna pri prenose svetelnej vlny, interaguje s dvojlomným kryštálom. To má za následok, že svetlo s neželanou polarizáciou je vylúčené z ďalšieho prenosu. Svetlo s vyhovujúcou polarizáciou sa šíri ďalej bezo zmeny. V polarizéroch kryštálového typu je dôležité vhodne zvoliť indexy lomu. Pre povolený polarizačný stav bude index lomu kryštálu pre šíriace sa svetlo nízky, pre kolmý polarizačný stav (vid) bude naopak index lomu nadobúdať veľkej hodnoty a daný polarizačný vid sa utlmí. Medzi povrch polished vlákna a povlak (overlay) je nanosený materiál totožného indexu lomu (často tekutina, gél), aby sa zabránilo odrazom a lomom svetla na rozhraní.

Kovová vrstva (fólia) väčšej hrúbky, ktorá sa používala v konštrukcii polarizéru, spôsobovala vysoký vložený útlm. Preto sa začali konštruovať polarizéry s tenkou kovovou vrstvou. Takéto zariadenia sú založené na produkovanií vysoko polarizovanej povrchovej plazmovej vlny na rozhraní vlákno – kovová vrstva.

Vyššie spomenutá plazmová vlna (surface plasmon) je elektromagnetická vlna, ktorá sa šíri pozdĺž rozhrania dvoch materiálov, z ktorých jeden má negatívnu dielektrickú konštantu. Táto vlna je tvorená osciláciami elektrónov, ktoré sa vyskytujú v pevných materiáloch obsahujúcich voľné elektróny. Prítomnosť vonkajšieho elektrického poľa spôsobí generovanie plazmy na povrchu vodiča.

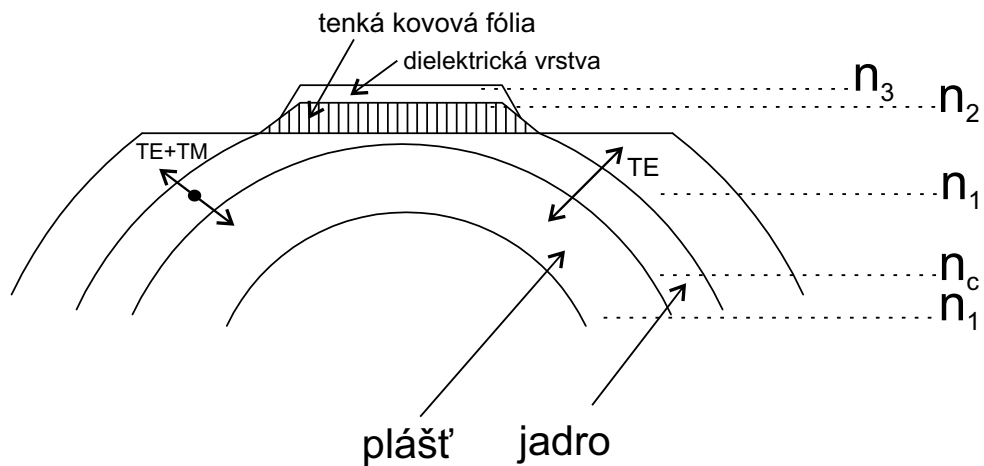
Povrchová plazmatická rezonancia závisí na naviazaní svetla dopadajúceho na tenkú kovovú fóliu, do povrchových módo, vybudených skupinovú osciláciou elektrónov kovovej fólie. Konkrétnejšie sa jedná o väzbu tzv. TM^1 módu, obsiahnutom v prítomnom poli, s povrchovým, tzv. plazmatickým módom kovovej fólie. Väzba je závislá

¹Transverse magnetic: v smere šírenia vlny je prítomný len vektor elektrického poľa \vec{E} .

od indexov lomu dielektrického materiálu na oboch stranách kovovej fólie. Rezonančné podmienky závisia od optických vlastností fólie, jej hrúbky, indexu lomu dielektrika na oboch stranách fólie a na uhle dopadu svetla na fóliu.

Vzniknutý efekt vykazuje silný TM charakter, čo vysvetľuje, prečo je zo svetelného lúča naviazaný len TM polarizačný vid, pričom TE² polar. vid je nezasiahnutý.

Schéma vláknového polarizéru je znázornená na obr. 3.3.



Obr. 3.3: In-line polarizér [39].

Obrázok 3.4 znázorňuje in-line vláknový polarizér pre vlnovú dĺžku 1550 nm.



Obr. 3.4: In-line polarizér (1550 nm).

V kapitole 3.3.1 bolo čerpané z [39].

²Transverse electric: v smere šírenia vlny je prítomný len vektor magnetického poľa \vec{H} .

3.4 PMD emulátor

V praktickom i referenčnom meraní bol využitý aj emulátor PMD EM 550, ktorý umelo navyšuje hodnotu PMD trasy, a to o tri etalónové hodnoty (1, 5 a 10) ps. PMD emulátor je znázornený na obr. 3.5.



Obr. 3.5: PMD emulátor s oneskorením (1, 5 a 10) ps.

Presnosť, v ktorej sa pohybujú jednotlivé hodnoty emulátoru PMD je uvedená v tab. 3.1. **Hodnoty boli testované na $\lambda = 1550$ nm.**

Tab. 3.1: Presnosť 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

3.5 Referenčné meranie – námer

Náplňou referenčného merania bolo určenie hodnoty PMD optickej trasy dĺžky **20 kilometrov**, vlákna typu **G.652.D**, podľa schémy 3.2. Po získaní tejto hodnoty sa medzi CD/PMD tester a optickú trasu zaradil PMD emulátor. Následne boli premerané všetky etalónové hodnoty PMD emulátoru spolu s trasou trikrát. Usporiadanie meracieho pracoviska je vidno na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Meranie hodnoty PMD referenčnou metódou so zaradeným PMD emulátorom.

Tab. 3.2 zahŕňa namerané hodnoty, konkrétne celkovú PMD optickej trasy, koeficient PMD, PMD 2. rádu a detekovanú dĺžku trasy.

Tab. 3.2: Námer referenčnej metódy CD/PMD testerom EXFO FTB-200

EXFO FTB-200	PMD	$D_{\text{PMD}}(\lambda)$	PMD 2. rádu	Dĺžka
	[ps]	$\left[\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}\right]$	$\left[\frac{\text{ps}}{\text{nm}}\right]$	[km]
Trasa [ps]	0,29	0,0659	0,0394	20,012
PMD _{emul.} 1 [ps]	1,00	0,2245	0,4576	20,019
PMD _{emul.} 1 [ps]	0,90	0,2022	0,3715	20,019
PMD _{emul.} 1 [ps]	0,94	0,2102	0,4013	20,019
priemer PMD _{emul.} 1 [ps]	0,95	0,2123	0,4101	20,019
PMD _{emul.} 5 [ps]	5,19	1,1604	12,2315	20,027
PMD _{emul.} 5 [ps]	5,11	1,1414	11,8336	20,027
PMD _{emul.} 5 [ps]	5,11	1,1419	11,8443	20,027
priemer PMD _{emul.} 5 [ps]	5,14	1,1479	11,9698	20,027
PMD _{emul.} 10 [ps]	11,41	2,5490	59,0215	20,039
PMD _{emul.} 10 [ps]	10,72	2,3949	52,1254	20,039
PMD _{emul.} 10 [ps]	12,32	2,7528	68,8703	20,039
priemer PMD _{emul.} 10 [ps]	11,48	2,5656	60,0057	20,039

Jeden merací cyklus trval priemerne 100 sekúnd, meranie bolo plne automatizované, v priebehu merania sa nemanipulovalo s optickou trasou, ani s CD/PMD testerom EXFO.

Po dokončení merania prístroj zobrazil tzv. report, ktorého obsahom boli hodnoty aktuálnej konfigurácie optickej trasy. Pre správnu funkciu bolo potrebné zaistiť dostatočný odraz na konci vlákna, nenechať zakončenie trasy do prázdna.

3.6 Metóda s fixným analyzátorom – námer

V praktickom meraní bol polarizér zaradený priamo za optickým výstupom OSA – vid' obr. 3.1, nahradený aktívnym prvkom, konkrétne zariadením **Agilent N7786B**. Jedná sa o polarizačný syntetizér, ktorý disponuje funkciami:

- **Stabilizátor polarizácie**. . . poskytuje stabilný výstup z hľadiska polarizačného stavu (SOP), dokonca aj vtedy, keď sa vyskytujú zmeny a fluktuácie polarizácie na optickom vstupe zariadenia. Výstupný SOP môže byť definovaný týmito spôsobmi:
 - **Set-and-forget** – uloží a udržiava aktuálny polarizačný stav, ktorý sa vyskytoval na výstupe v momente voľby aj napriek potenciálnym zmenám polarizácie na vstupe zariadenia.
 - **Stokesove parametre** – Cieľový výstupný SOP je definovaný týmito parametrami.
 - **Synchrónny scrambler** – zariadenie prepína náhodne výstupný SOP.
- **Polarizačný analyzér**. . . poskytuje vysoko-rýchlostné vzorkovanie, viac ako 500 000 vzoriek za sekundu.
- **Rýchlo-prepínajúci polarizačný controllér**.

Polarizačný syntetizér je znázornený na obr. 3.7

Ďalšia zmena oproti návrhu merania z kapitoly 3.1 je vynechanie polarizačného kontroléru, ktorý je tiež z hľadiska normy považovaný za dobrovoľný prvok. Pre meranie nemal signifikantný význam.

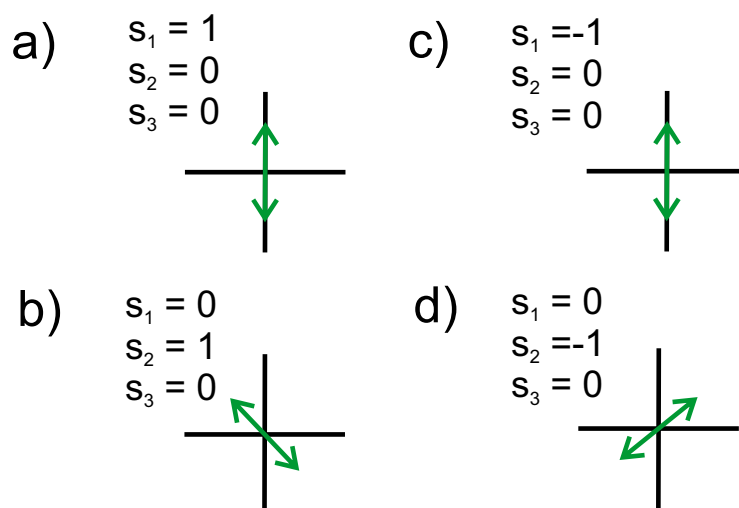
Z **programovej výbavy** bol dôležitý ovládací program **Polarization Navigator (N7786B)**, ktorý obsahoval preddefinované polarizačné stavy lineárnej polarizácie pomocou Stokesových parametrov a možnosť ich voľby. Zvolený stav sa zapamätal a udržiaval, čiže polarizačný syntetizér plnil funkciu polarizéru. Spomenuté možnosti voľby SOP ilustruje obr. 3.8.

Program Polarization Navigator ponúkal možnosť voľby Ortho., ktorá spôsobila ortogonálnu orientáciu SOP oproti aktuálne zvolenému.

Prepnutie SOP na iný, alebo voľba Ortho. mala okamžitý vplyv na hodnoty DGD danej trasy, avšak dané zmeny sa javili ako dočasné. Po uplynutí niekoľkých,



Obr. 3.7: Polarizačný syntetizér Agilent N7786B [40].



Obr. 3.8: Stokesove parametre definujúce polarizačné stavy lineárnej polarizácie.

veľmi rýchlych meracích cyklov sa DGD stabilizovalo a prípadné rozdiely oproti predchádzajúcim hodnotám neboli markantného významu.

V tomto meraní sa nemanipulovalo so zmenou SOP, ale zámerne sa menil parameter Span. Tento parameter určuje rozteč vlnových dĺžok, ktoré sú brané v úvahu v OSA pri zobrazení výkonových extrémov. Jeho zmenou sa docielilo lepšej schopnosti rozoznať extrémny a tým pádom spresniť výsledok.

Oproti referenčnému meraniu, kde sa prakticky nastavoval len druh merania (PMD), sa okrem parametru Span nastavili tiež:

- centrálna vlnová dĺžka... (aby korešpondovala s vlnovou dĺžkou uvedenou v programe Polarization navigator), ďalej
- rozlíšenie,
- Mode Cpl Factor, teda väzobný faktor... nastavený na hodnotu 0,82 (silná väzba, platí pre vlákna dĺžky ≥ 10 km).

Obrázok 3.9 znázorňuje zapojenie metódy s fixným analyzátorom.



Obr. 3.9: Usporiadanie meracieho pracoviska, metóda s fixným analyzátorom.

3.6.1 Namerané hodnoty

Nasledujúci text bude obsahovať namerané hodnoty, pričom z každej konfigurácie sa zaznamenalo po 10 hodnôt, z ktorých bola vypočítaná priemerná hodnota. Tab. 3.3 obsahuje výsledky merania optickej trasy 20 km bez PMD emulátoru.

Tabuľka 3.4 združuje výsledky merania totožnej optickej trasy, tentokrát však so zaradeným PMD emulátorom, pre etalónovú hodnotu 1 ps. V tab. 3.5 sú uvedené hodnoty pre etalón 5 ps, následne v tab. 3.6 hodnoty pre etalón 10 ps. Vždy posledný, **tučne zvýraznený** riadok tabuliek, značí **hodnotu PMD**.

Na obr. 3.10 je zobrazený príklad námeru trasy so zaradeným PMD emulátorom o hodnote etalónu 10 ps a hodnote parametru Span 5 nm. Obr. 3.11 ilustruje tú istú situáciu, avšak pri hodnote parametru Span 20 nm. Za povšimnutie stojí typický nepravidelný rozvlnený priebeh závislosti výkonu na vlnovej dĺžke, čo je podľa ITU-T G.650.2 typickým prejavom silnej medzividovej väzby.

Tab. 3.3: Námer optickej trasy 20 km bez PMD emulátoru.

	Span 100 [nm]	Span 200 [nm]	Span 500 [nm]
	DGD [fs]	DGD [fs]	DGD [fs]
	379,41	384,07	356,69
	376,43	348,73	359,60
	378,58	334,31	351,71
	376,93	382,96	288,44
	378,77	359,35	344,42
	380,34	337,39	273,29
	377,75	354,36	315,97
	377,65	381,33	278,16
	379,50	339,66	357,63
	378,58	356,72	323,63
PMD [fs]	378,39	357,89	324,95
Extrémov	6	10–12	13–15

Tab. 3.4: Námer trasy so zaradeným PMD emulátorom 1 [ps].

PMD emul. 1 [ps]	PMD emul. 1 [ps]
DGD [fs]	DGD [fs]
Span 50 [nm]	Span 100 [nm]
849,17	843,16
855,86	841,09
853,51	917,54
855,86	834,24
868,63	917,78
878,70	842,45
884,67	935,29
880,60	824,99
878,70	845,17
874,69	839,54
868,04	864,13

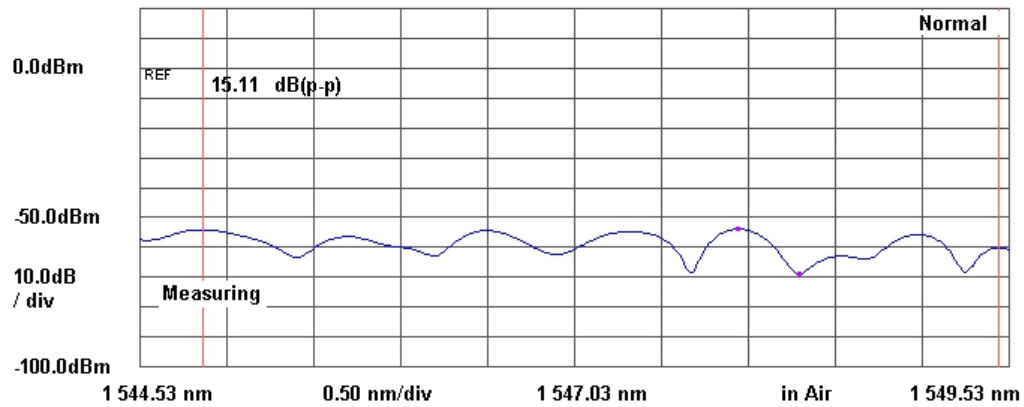
Tab. 3.5: Námer trasy so zaradeným PMD emulátorom 5 [ps].

PMD emul. 5 [ps]	PMD emul. 5 [ps]
DGD [fs]	DGD [fs]
Span 5 [nm]	Span 20 [nm]
6075,61	5709,20
6117,59	5695,63
6118,03	5682,60
6161,10	5722,19
6146,63	5695,64
6161,02	5673,63
6161,11	5708,74
6204,78	5695,34
6204,78	5721,90
6160,94	5708,44
6151,16	5701,33

Tab. 3.6: Námer trasy so zaradeným PMD emulátorom 10 [ps].

PMD emul. 10 [ps]	PMD emul. 10 [ps]
DGD [fs]	DGD [fs]
Span 5 [nm]	Span 20 [nm]
10051,60	10019,32
10051,73	10039,55
9985,80	9704,39
10007,58	10039,55
10029,40	9704,90
9985,70	10463,56
10029,41	10327,82
10007,45	9808,46
10029,28	10438,52
10007,58	10122,36
10018,55	10066,84

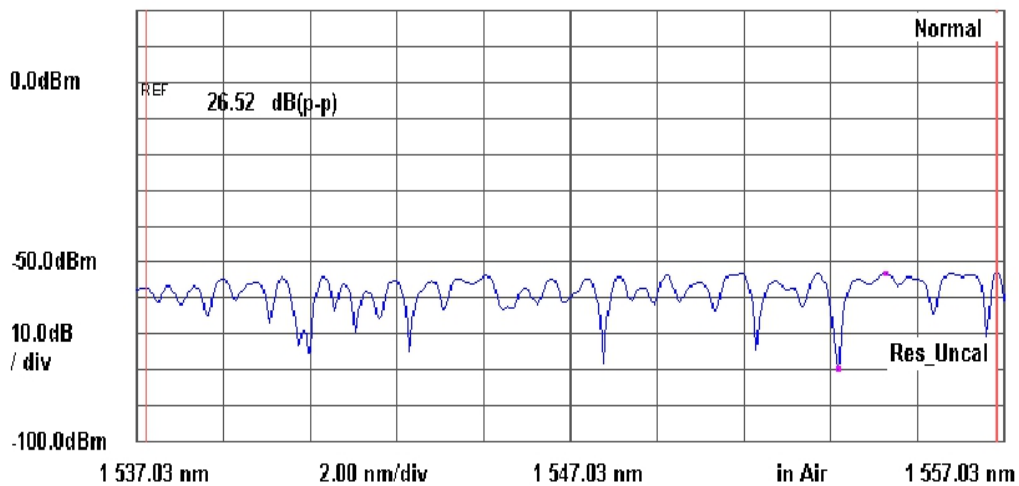
—PMD Test		Auto	
Diff Group Delay	10 007.06 fs	Mode Coupling Factor	0.82
1st Peak Wl	1 544.890 nm		
Last Peak Wl	1 549.470 nm		
Peak Count	8		
Res : 0.03nm (Actual : 0.031 nm) Smplg : 501pt SwpAvg : 1 [****]			
VBW : 100Hz Sm : Off Intvl : Off			



Obr. 3.10: Príklad námeru; 20 km, 5 nm Span.

Diff Group Delay	10 332.48 fs	Mode Coupling Factor	0.82
1st Peak Wl	1 537.230 nm		
Last Peak Wl	1 556.870 nm		
Peak Count	32		

Res : 0.03nm (Actual : 0.031 nm) Smplg : 501pt SwpAvg : 1 [****]			
VBW : 100Hz Sm : Off Intvl : Off			



Obr. 3.11: Príklad námeru; 20 km, 20 nm Span.

OSA MS9740A používa na vyhodnotenie DGD meranej trasy vzťah (3.1), ktorý je podobný vzťahu (2.16) – význam jednotlivých členov ostáva. Rozdiel je v tom, že sa v tomto prípade dosadí počet vrcholov (maxím) **mínus 1**, namiesto počtu extrémov (mínus 1).

$$\Delta\tau = \frac{k \cdot (n - 1) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{c \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)}. \quad [\text{ps}] [41] \quad (3.1)$$

3.7 Vyhodnotenie meraní

Ako uvádza tabuľka 2.2, pre vlákno typu G.652.D je garantovaná hodnota koeficientu PMD: $D_{\text{PMD}} \leq 0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Vzťah (2.6) zasa definuje PMD optických trás vzdialeností $\geq 10 \text{ km}$ pomocou koeficientu D_{PMD} . Dosadením garantovanej hodnoty do spomenutého vzťahu získame prepočetný vzťah, limitnú hodnotu PMD pre konkrétnu dĺžku vlákna. Pre dĺžku vlákna 20 km má prepočetný vzťah (3.2) podobu:

$$\text{PMD}_{20 \text{ km}} \leq 0,2 \cdot \sqrt{20} \implies \text{PMD}_{20 \text{ km}} \leq 0,8944. \quad [\text{ps}] \quad (3.2)$$

V tab. 3.2 referenčného merania možno pozorovať, že ako koeficient D_{PMD} , tak i samotná hodnota PMD trasy bez emulátoru sú v norme. S vypočítaným výsledkom zo vzťahu (3.2) možno porovnať aj zvýraznené hodnoty PMD z tab. 3.3.

Tieto hodnoty takisto vyhovujú teoretickej limitnej hodnote podľa ITU.

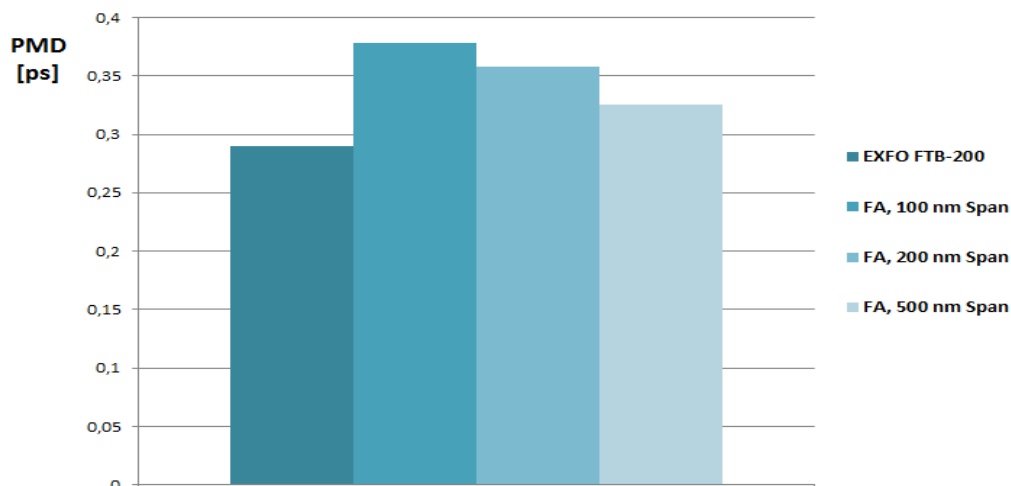
Z pohľadu výsledkov referenčného merania a merania metódou fixného analyzátoru pre samotnú trasu (prvý riadok tab. 3.2 a tabuľka 3.3) možno konštatovať, že namerané hodnoty sú si relatívne podobné a metóda fixného analyzátoru sa dá v tomto bode označiť za presnú. Obr. 3.12 graficky ilustruje porovnanie získaných hodnôt.

Pozornosť treba upriamiť na klesajúci trend PMD s rastúcim nastavením Span-u: $378,39 \text{ fs} \cong 0,38 \text{ ps} \implies 324,95 \text{ fs} \cong 0,32 \text{ ps}$.

V tab. 3.3 sa nenachádza údaj o koeficiente Polarizačnej vidovej disperzie. Tento údaj možno dostať výpočtom, opäť použitím vzťahu (2.6). Príklad výpočtu pre stĺpec označený Span 100 nm (3.3):

$$D_{\text{PMD}}(\lambda) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} = \frac{0,37839}{\sqrt{20}} = 0,0846. \quad [\text{ps} \cdot \text{km}^{-\frac{1}{2}}] \quad (3.3)$$

Súhrnná tab. 3.7 združuje koeficienty a hodnoty PMD získané meraním a výpočtom. Skratka FA značí Fixný Analyzátor. Všetky hodnoty v tabuľke splňajú normu.



Obr. 3.12: Grafické porovnanie hodnôt PMD optickej trasy dĺžky 20 km.

Tab. 3.7: Súhrnné výsledky koeficientov PMD a hodnôt PMD námeru samotnej trasy.

	EXFO FTB-200	FA Span 100 nm	FA Span 200 nm	FA Span 500 nm
$D_{\text{PMD}} \left[\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}} \right]$	0,0659	0,0846	0,0800	0,0727
PMD [ps]	0,29	0,38	0,36	0,32

3.8 Vyhodnotenie meraní trasy s PMD emulátorom

Z hodnôt nameraných pomocou CD/PMD testera EXFO, uvedených v tab. 3.2 možno pozorovať, že zaradením PMD emulátoru do optickej trasy sa predĺžila zistená dĺžka vlákna s rastúcou hodnotou etalónu PMD.

Keďže výsledná hodnota zahŕňa etalónovú hodnotu PMD + hodnotu PMD samotného vlákna, je možné zo znalosti hodnoty PMD vlákna vypočítať skutočnú hodnotu PMD emulátoru. Výsledok sa následne porovná s presnosťou PMD emulátoru, definovanou výrobcom.

Pre výpočet PMD emulátoru bude použitý vzťah (3.4):

$$PMD_{xy} = \sqrt{PMD_T^2 - PMD_V^2} \text{ [ps]}, \quad (3.4)$$

kde je:

- PMD_{xy} ... hľadaná hodnota PMD emulátoru,
- PMD_T ... známa hodnota PMD celej trasy,
- PMD_V ... známa hodnota PMD zaradného vlákna.

Príklad výpočtu PMD emulátoru pre priemernú hodnotu PMD trasy so zaradeným emulátorom 1 ps a pre hodnotu PMD samotného vlákna, uvedených v tabuľke 3.2:

$$PMD_{xy} = \sqrt{0,95^2 - 0,29^2} = 0,9047 \text{ [ps]}. \quad (3.5)$$

Keďže išlo o výpočet hodnoty z referenčného merania, bude daný výsledok uvedený v nasledujúcej tabuľke 3.8 pod označením PMD_{RE2} . Indexy 1 označujú PMD hodnotu celej trasy (emulátor + vlákno) referenčného merania i merania s fixným analyzátorom (označenie PMD_{e1}). Indexy 2 označujú výpočty hodnôt PMD emulátoru.

Posledný riadok tabuľky uvádza stav, kedy vypočítaná hodnota PMD emulátoru vyhovuje, či nevyhovuje. Hodnoty boli porovnané s tab. 3.1 združujúcou výrobcom definovanú presnosť PMD emulátoru. Treba však pripomenúť, že dané „referenčné“ hodnoty etalónov boli testované na vlnovej dĺžke $\lambda = 1550 \text{ nm}$, pričom v meraní s fixným analyzátorom bol použitý širokospektrálny svetelný zdroj (vlnové dĺžky v okolí 1550 nm). Referenčné meranie takisto postupovalo v rozsahu vlnových dĺžok, konkrétne (1478–1626) nm.

Tab. 3.8: Súhrnná tabuľka, namerané i vypočítané hodnoty pre etalón 1 ps.

PMD_{RE1}	PMD_{RE2}	PMD_{e1}	PMD_{e2}	PMD_{e1}	PMD_{e2}
[ps]	[ps]	[ps]	[ps]	[ps]	[ps]
–	–	Span 50 [nm]	Span 50 [nm]	Span 100 [nm]	Span 100 [nm]
0,95	0,90	0,87	0,78	0,86	0,77
–	OK	–	OK	–	OK

Nasledujú súhrnné tabuľky, tab. 3.9 pre etalón 5 ps a tab. 3.10 pre 10 ps, pričom ich systém je totožný s predchádzajúcou tabuľkou.

Tab. 3.9: Súhrnná tabuľka, namerané i vypočítané hodnoty pre etalón 5 ps.

PMD_{RE1}	PMD_{RE2}	PMD_{e1}	PMD_{e2}	PMD_{e1}	PMD_{e2}
[ps]	[ps]	[ps]	[ps]	[ps]	[ps]
–	–	Span 5 [nm]	Span 5 [nm]	Span 20 [nm]	Span 20 [nm]
5,14	5,13	6,15	6,13	5,70	5,69
–	OK	–	CHYBA	–	CHYBA

Tab. 3.10: Súhrnná tabuľka, namerané i vypočítané hodnoty pre etalón 10 ps.

PMD _{RE1}	PMD _{RE2}	PMD _{e1}	PMD _{e2}	PMD _{e1}	PMD _{e2}
[ps]	[ps]	[ps]	[ps]	[ps]	[ps]
–	–	Span 5 [nm]	Span 5 [nm]	Span 20 [nm]	Span 20 [nm]
11,48	11,476	10,02	10,01	10,07	10,06
–	OK	–	OK	–	OK

Z uvedeného pohľadu vyplýva, že referenčné meranie a meranie s fixným analyzátorom (FA) sú si výsledkovo podobné pri nízkych hodnotách Polarizačnej vidovej disperzie. Akonáhle sa do trasy emuluje 5 ps PMD, metóda s FA sa líši vo výsledku o cca 1 ps a vypočítané hodnoty emulátoru takisto presahujú povolený limit, aj keď hodnota 5,69 ps len o stotinu ps.

Z hodnôt uvedených v tab. 3.10 možno pozorovať situáciu opačnú, kedy po navedení emulovanej hodnoty 10 ps do trasy dáva referenčné meranie vyššiu hodnotu takmer o 1,5 ps. Hodnoty emulátoru sú však v povolenom rozsahu.

K určení, ktorá z metód RM/FA je presnejšia, je potrebná znalosť skutočnej hodnoty PMD emulátoru (1, 5 a 10) ps, získaná meraním tohoto prvku presnou metódou. V laboratóriu prenosových médií FEKT VUT Brno bolo vykonané v roku 2014 nezávislé meranie, ktorého súčasťou bolo premeranie hodnôt etalónov PMD emulátoru. Meranie pozostávalo z troch metód, konkrétne:

1. **Skenovanie vlnových dĺžok**... prístroj firmy JDSU,
2. **GINTY**... prístroj firmy Profiber,
3. **Skramblovanie polarizačných stavov**... prístroj na FEKT VUT.

Každá etalónová hodnota emulátoru bola premeraná trikrát každou z meracích metód uvedených vyššie.

Výsledky metódy 1) sú združené v tab. 3.11, výsledky metódy 2) sú v tab. 3.12 a hodnoty merania 3) v tabuľke 3.13.

Namerané vzdialenosti metódami 2) a 3) rezultujú z toho, že za PMD emulátor bolo nutné zaradiť krátke vlákno, aby sa hodnotu PMD emulátoru podarilo zistiť. Metóda skenovania vlnovej dĺžky tento údaj neposkytla.

Tab. 3.11: Meranie PMD emulátoru metódou Skenovania vlnovej dĺžky (FA).

Etalón	L [km]	PMD [ps]	$D_{\text{PMD}} [\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}]$	PMD 2. rád $[\frac{\text{ps}}{\text{nm}}]$
1 ps	–	0,8560	0,0760	0,3320
1 ps	–	0,8520	0,0760	0,3290
1 ps	–	0,8480	0,0760	0,3260
Priemer	–	0,8520	0,0760	0,3290
5 ps	–	4,6610	0,4150	9,8410
5 ps	–	4,6360	0,4130	9,7360
5 ps	–	4,6300	0,4120	9,7110
Priemer	–	4,6423	0,4133	9,7627
10 ps	–	10,4360	0,9300	49,3360
10 ps	–	10,6890	0,9520	51,7570
10 ps	–	–	–	–
Priemer	–	10,5625	0,9410	50,5465

Tab. 3.12: Meranie PMD emulátoru metódou GINTY.

Etalón	L [km]	PMD [ps]	$D_{\text{PMD}} [\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}]$	PMD 2. rád $[\frac{\text{ps}}{\text{nm}}]$
1 ps	0,01	0,9378	9,3781	0,3821
1 ps	0,01	0,9530	9,5303	0,3946
1 ps	0,01	0,9551	9,5514	0,3964
Priemer	0,01	0,9486	9,4866	0,3910
5 ps	0,01	4,8782	48,7818	10,4948
5 ps	0,01	4,9024	49,0238	10,5991
5 ps	0,01	4,9021	49,0214	10,5981
Priemer	0,01	4,8942	48,9423	10,5640
10 ps	0,01	11,1894	111,8935	54,1296
10 ps	0,01	11,2065	112,0648	54,2955
10 ps	0,01	11,2222	112,2224	54,4483
Priemer	0,01	11,2060	112,0602	54,2911

Tab. 3.13: Meranie PMD emulátoru metódou Skramblovania polarizačných stavov.

Etalón	L [km]	PMD [ps]	$D_{\text{PMD}} [\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}]$	PMD 2. rád $[\frac{\text{ps}}{\text{nm}}]$
1 ps	1,01	0,87	0,8632	0,3413
1 ps	1,01	0,88	0,8748	0,3505
1 ps	1,01	0,91	0,9056	0,3755
Priemer	1,01	0,89	0,8812	0,3558
5 ps	1,018	4,70	4,6569	10,0162
5 ps	1,018	5,32	5,2767	12,8596
5 ps	1,019	5,17	5,1188	12,1055
Priemer	1,018	5,06	5,0175	11,6604
10 ps	1,03	10,59	10,4355	50,8764
10 ps	1,03	9,82	9,6773	43,7522
10 ps	1,03	10,88	10,7181	53,6531
Priemer	1,03	10,43	10,2770	49,4272

Za referenčné hodnoty PMD emulátoru budú zvolené výsledky (priemerné hodnoty) metódy 3), teda skramblovania polarizačných stavov, pretože sú najbližšie k priemernej PMD emulátoru uvádzanej výrobcom – viď tab. 3.1. Vzťah (3.4) upravíme na tvar (3.6):

$$PMD_{\text{T}} = \sqrt{PMD_{\text{V}}^2 + PMD_{\text{XY}}^2} \text{ [ps]}, \quad (3.6)$$

kde je:

- PMD_{T} ... počítaná hodnota PMD celej trasy,
- PMD_{V} ... známa hodnota PMD zaradného vlákna,
- PMD_{xy} ... známa hodnota PMD emulátoru (z metódy skramblovania polar. stavov).

Príklad výpočtu pre referenčné meranie, pre **PMD samotného vlákna = 0,29 ps** a hodnoty etalónu PMD emulátora 1 ps \Rightarrow **hodnota 0,89 ps** z tab. 3.13:

$$PMD_{\text{T}} = \sqrt{0,29^2 + 0,89^2} = 0,9361 \cong 0,94 \text{ [ps]}. \quad (3.7)$$

V metóde FA bola za PMD samotného vlákna považovaná hodnota 378,39 fs = 0,37839 ps z tab. 3.3.

Porovnanie vypočítaných hodnôt PMD_{T} , s nameranými hodnotami v **referenčnom meraní**, uvádza tab. 3.14.

Súhrnná tab. 3.15 uvádza porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt PMD celkovej trasy, **metóda s fixným analyzátorom**.

Tab. 3.14: Porovnávací tabuľka – referenčné meranie, zaradený PMD emulátor.

PMD 1 [ps]	PMD _T 1 [ps]	PMD 5 [ps]	PMD _T 5 [ps]	PMD 10 [ps]	PMD _T 10 [ps]
0,95	0,94	5,14	5,07	11,48	10,43

Tab. 3.15: Porovnávací tabuľka – fixný analyzátor, zaradený PMD emulátor.

PMD 1 [ps]	PMD 1 [ps]	PMD _T 1 [ps]	max. Δ_{PMD}
Span 50 [nm]	Span 100 [nm]	[ps]	[ps]
0,87	0,86	0,97	0,10
PMD 5 [ps]	PMD 5 [ps]	PMD _T 5 [ps]	max. Δ_{PMD}
Span 5 [nm]	Span 20 [nm]	[ps]	[ps]
6,15	5,70	5,07	1,08
PMD 10 [ps]	PMD 10 [ps]	PMD _T 10 [ps]	max. Δ_{PMD}
Span 5 [nm]	Span 20 [nm]	[ps]	[ps]
10,02	10,07	10,44	0,42

Z pohľadu do porovnávacích tabuliek 3.14 a 3.15 možno konštatovať, že referenčné meranie prístrojom EXFO FTB-200 s modulárnou meracou platformou CD/PMD EXFO FTB-5700 je presné, hodnoty sa odlišujú výraznejšie len v meraní trasy 20 km so zaradeným PMD emulátorom 10 ps (rozdiel PMD 1,05 ps).

Metóda s fixným analyzátorom sa zdá byť pomerne presná v prípadoch merania trasy 20 km so zaradeným PMD emulátorom 1 ps a teoreticky aj 10 ps (rozdiel 0,42 ps). V prípade hodnoty PMD emulátoru 5 ps je nepresná, rozdiel PMD je až 1 ps. Toto môže byť zapríčinené teoretickým mechanickým pôsobením cudzieho elementu na vlákno, kedy v ňom vzniká prídavný dvojlom a výsledkom bola zvýšená PMD, alebo sa jednalo o hodnoty namerané tesne po prepojení hodnoty emulátoru z 1 ps na 5 ps v procese ustálenia.

Obecne možno skonštatovať, že tam, kde chybovalo referenčné meranie uspela metóda FA a opačne.

Za výhodu metódy fixného analyzátoru možno považovať rýchlosť meracieho cyklu, kedy sa dá v krátkom čase zaznamenať dostatočný počet hodnôt potrebných pre relevantné závery. Ďalšia výhoda spočíva v pomerne jasnej myšlienke, aký polarizačný stav sa nachádza v jednotlivých bodoch zapojenia, s výnimkou meranej trasy, kde sa polarizácia mení.

Nevýhoda môže spočívať vo variabilite nastavenia parametru Span, ktorý, ako už bolo spomenuté skôr, nastavuje rozteč vlnových dĺžok, z ktorých OSA analyzuje výkonový spektrálny priebeh. Toto vplýva na schopnosť OSA detekovať počet maxím. Užívateľ môže považovať niekoľko nastavení parametru za postačujúce, pričom výsledné hodnoty každého z nastavení sa môžu líšiť. Ďalšia nevýhoda sa týka tohto konkrétneho usporiadania, ktoré nie je vhodné do terénu, avšak metóda skenovania vlnovej dĺžky môže byť implementovaná do kompaktnějších rozmerov zariadenia.

Výhoda referenčného merania prístrojom EXFO je jednoduché užívateľské ovládanie prístroja s CD/PMD modulom. Jedná sa o meranie z jedného konca, kedy je potrebné na konci optickej trasy zaistiť dostatočný odraz (zrkadlo, zakončovací konektor). Tento prístroj je taktiež vhodný pre meranie v teréne, čomu nasvedčuje jeho vyhotovenie a kompaktnosť.

Nevýhoda merania s CD/PMD testerom EXFO môže byť taká, že pri meraní trás dĺžky napr. 125 km by nemusela postačovať dynamika prístroja – výrobcom stanovená na 25 dB. Útlm vlákna uvažujeme 0,2 dB/km, treba však počítať i s konektorovými spojeniami v trase, ktoré navyšujú hodnotu útlmu optickej trasy. Táto nevýhoda sa však v praktickom meraní neprejavila.

ZÁVER

Diplomová práca je rozdelená do teoretickej a praktickej časti. Teoretickú časť tvoria kapitoly 1 a 2, ktoré obsahujú popis javov vyskytujúcich sa v optických sieťach. Najmä kapitola 1 sa venuje širokej oblasti tém, kedy sa v jej úvode nachádzajú teoretické základy týkajúce sa indexu lomu, druhov rýchlostí v prenose optického signálu, či informácií o optickom prenose ako takom. Prostredníctvom strát v optickom prenose sa nadväzuje na disperzie, ktoré sú rozdelené podľa jednotlivých druhov, pričom zakaždým nasleduje ich stručný popis.

Zvýšená pozornosť je venovaná chromatickej disperzii z pohľadu charakteristiky, limitov, dôsledkov, či metód kompenzácie a metód merania. Chromatická disperzia sa však dá definovať i výpočtom a po overení meraním celkom efektívne kompenzovať. Nie je to náhodný jav, a preto po jeho eliminovaní predstavuje PMD hlavný problém z hľadiska disperzií.

Ako ťažisková kapitola teoretickej časti práce bola zvolená kapitola 2, ktorá pojednáva o polarizačnej vidovej disperzii od podstaty jej vzniku (polarizácia, dvojlom) cez vplyvy disperzie na optický prenosový kanál, po metódy kompenzácie, či detailný popis metód merania. Táto časť práce je dôležitá pre pochopenie širších súvislostí a mechanizmov PMD. Predovšetkým však informácie o metódach merania (metóda s fixným analyzátorom) poskytujú teoretický podklad pre praktickú realizáciu, ktorej sa venuje kapitola 3.

Do praktickej časti je zahrnutá kapitola 3, ktorá obsahuje návrhy pre praktické meranie PMD pomocou optického spektrálneho analyzátoru MS9740A a referenčného merania pomocou CD/PMD testera EXFO FTB-200 spolu s modulom CD/PMD EXFO FTB-5700.

Kapitola 3 obsahuje praktickú časť, kedy sa v jej úvode predstavuje teoretická konfigurácia merania optickej trasy pomocou referenčného merania (RM) a pomocou metódy s fixným analyzátorom (FA). Jadro RM pozostávalo z CD/PMD testera EXFO FTB-200 spolu s CD/PMD modulom EXFO FTB-5700, metóda FA obsahovala optický spektrálny analyzátor MS9740A, ďalej polarizačný syntetizér Agilent MS9740A, in-line vláknový polarizér a optické vlákno dĺžky 20 km.

Z porovnania nameraných a vypočítaných hodnôt možno konštatovať, že v prípade námeru samotnej trasy 20 km bola metóda FA dostatočne presná a výsledné hodnoty sa blížili k hodnote získanej referenčným meraním. Namerané hodnoty spĺňali normou definované limity.

Vypočítané hodnoty PMD emulátoru z námerov obomi metódami väčšinou spĺňali výrobcom definovaný rozsah povolených hodnôt. Chyby sa vyskytovali len v námere metódou FA pre trasu so zaradeným PMD emulátorom hodnoty 5 ps, pričom pre hodnotu parametru Span = 20 nm presahovala hodnota povolený limit len o stotinu ps.

V prípade vyhodnotenia meraní totožnej trasy so zaradeným PMD emulátorom o možných hodnotách (1, 5 a 10) ps pomohli údaje z presného a nezávislého merania etalónových hodnôt PMD emulátoru, metódou skramblovania polarizačných stavov. Tam, kde referenčné meranie vykazovalo nepresnosti (emulátor 10 ps), uspela metóda FA. To isté platí aj v obrátenom poradí, kedy nepresnosť metódy FA (emulátor 5 ps) vyváži prijateľnejší výsledok referenčného merania.

V závere kapitoly 3 sú uvedené výhody a nevýhody použitých metód merania. Jedna z výhod metódy FA je taká, že metóda poskytuje predstavu o polarizačnom stave v jednotlivých bodoch zapojenia. Toto ponúka možnosť pre výukové účely do budúcnosti formou laboratórnej úlohy, kedy by študenti porozumeli javu polarizácie a následne by realizovali sadu meraní metódou FA, pričom by výsledky overili referenčným meraním.

Ako návrh pre rozšírenie práce do budúcnosti môže slúžiť realizácia metódy TINTY. Jej blokové usporiadanie vychádza z metódy FA a vyžaduje si navyše pevné a pohyblivé zrkadlo, delič svetelného žiarenia, vhodný detektor.

LITERATÚRA

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Centa, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] DADO, Milan, Ivan TUREK, Július ŠTELINA, Ladislav BITTERER, Stanislav TUREK, Eduard GROMULUS a Patrick STIBOR. *Kapitoly z optiky*. 1998. vyd. Žilina: EDIS-Žilinská univerzita, 1998, 348 s. [cit. 2012-11-10]. ISBN 80-7100-390-5. Dostupné z: <http://katalog.utc.sk/e-books/books/pdf/Dado_Milan__Kapitoly_z_optiky/kapitoly_z_optiky.pdf>.
- [5] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. *Technická univerzita Ostrava*, verzia: 2.1.3, 2006. [cit. 2012-10-25]. 172 s. Dostupné z: <<http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>>.
- [6] LAFERRIÈRE, J., G. LIETAERT, R. TAWS a S. WOLSZCZAK. *Reference Guide to Fiber Optic Testing: Volume 1* [online]. 2. vyd. 2011 [cit. 2014-10-11]. Dostupné z: http://www.jdsu.com/en-us/test-and-measurement/products/details/pages/jdsu-reference-guides-to-fiber-optic-testing.aspx#.VDkODv1_tX_
- [7] DAVIS, Christopher C. FIBER OPTIC TECHNOLOGY AND ITS ROLE IN THE INFORMATION REVOLUTION. *University of Maryland: The Department of Electrical & Computer Engineering* [online]. 2014 [cit. 2014-10-27]. Dostupné z: <<http://www.ece.umd.edu/davis/optfib.html>>
- [8] KARÁSEK, Miroslav a Tomáš ZAHŘÁDKA. *Disperze signálu v optických vláknových vlnovodech*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1990, 130 p. Studie ČSAV, 1990, č. 8. ISBN 80-200-0216-2.
- [9] FILIP, Tomáš. *Disperzní vlivy na vysokorychlostní přenos optickou sítí*. Brno, 2010. Dostupné z: <<http://goo.gl/IF7Da6>>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. VLADIMÍR TEJKAL.

- [10] 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.
- [11] KOČÍ, Lukáš. *Vliv modulací v optických sítích založených na OTDM*. Brno, 2013. 91 l. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/27333>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Münster.
- [12] MAŇÁK, Roman. *Proč je obloha modrá a ne fialová?: ... aneb Rayleighův a Mieův rozptyl*. In: Česká astronomická společnost [online]. 2012, 2012-05-15 [cit. 2014-10-16]. Dostupné z: <http://ukazy.astro.cz/Rayleighuv-a-Mieuv-rozptyl.php>.
- [13] ITU-T G.657. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network*. Geneva - Switzerland: International Telecommunication Union, 2012. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.657-201210-I/en>.
- [14] SCHNEIDER, Thomas. *Nonlinear optics in telecommunications*. New York: Springer, c2004, xi, 415 p. ISBN 35-402-0195-5.
- [15] ŽÁČEK, Martin. *Nelineární charakter optického prostředí* [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. Dostupné z: <http://goo.gl/iQbp0M>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedúci práce Ing. Jiří Přinosil.
- [16] KYSELÁK, Martin. *Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy: the optical fibre dispersion effects on multiplex transmission systems ; zkrácená verze Ph.D. thesis*. Brno: Vysoké učení technické, 2009, 26 s. ISBN 978-80-214-3827-9.
- [17] GHATAK, Ajoy a K. THYAGARAJAN. Optical Waveguides and Fibers. In: ROYCHOUDHURI, Volume editor: Chandrasekhar. *Fundamentals of photonics*. Bellingham, Wash.: SPIE, 2008, s. 249-292. ISBN 9780819471284. Dostupné z: <https://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2007.pdf>.
- [18] 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].
- [19] ŠIFTA, Radim, Petr MÜNSTER a Tomáš HORVÁTH. Přesnost měření disperzí CD/PMD (Accuracy of CD/PMD dispersion measurement). *Elektrorevue* -

- Internetový časopis: Časopis pro elektrotechniku* [online]. 2013, roč. 15, č. 5, s. 333-338 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://goo.gl/Z47ZrZ>
- [20] International Telecommunication Union. *Handbook Optical fibres, cables and systems* [online]. 2009, posledná aktualizácia 2010-2-24 [cit. 2012-10-26]. Dostupné z: <<http://goo.gl/hj0kg> >.
- [21] COLLINGS, Brandon, Fred HEISMAN a Gregory LIETAERT. *Advanced Fiber Network Testing: High-Speed Fiber Link and Network Characterization* [online]. 2010 [cit. 2014-10-23]. sv. 2. Dostupné z URL: <<http://www.jdsu.com/en-us/test-and-measurement/products/details/pages/jdsu-reference-guides-to-fiber-optic-testing.aspx#.VEl4Cfnkcbv> >.
- [22] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *Chromatická disperze jednovidových optických vláken a její měření* [online]. 2003, posledná aktualizácia 2003-12-4 [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <<http://www.mikrokom.eu/sk/pdf/chrom-disperze.pdf> >.
- [23] MÜNSTER, P. *Parametry sítí FTTx*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 120 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc..
- [24] 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. 2014-10-25]. Dostupné z: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocianku=2010020001>>.
- [25] KUCHARSKI, Maciej a Pavel DUBSKÝ. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. Praha: Mikrokom, 1998, 141 s.
- [26] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. V Brně: VUTIU, 2000. sv. 4. ISBN 80-214-1868-0.
- [27] 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.
- [28] Questions. *Mathematica* [online]. 2014 [cit. 2014-10-27]. Dostupné z: <http://goo.gl/IwgAKB>
- [29] ČERVENĚ, Ivan. *Fyzika po kapitolách: Optika*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2007. zv. (12). ISBN 978-80-227-2674-0.

- [30] MOTÚZ, Rastislav. *Řešení problematiky CD a PMD v optických sítích*. Brno, 2013. 94 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce prof. Ing. Miloslav Filka, Csc.
- [31] CHRENŠČ, Martin. *Studium polarizační módové disperze*. Ostrava, 2013. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Martin Pápeš.
- [32] 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. 2014-11-02]. Dostupné z: <<http://goo.gl/JAINa>>.
- [33] 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.
- [34] ŤUPA Martin, Miloslav FILKA a Otto DOSTÁL. Polarizační vidová disperze – PMD (Polarizing mode dispersion PMD). *Elektrorevue - Internetový časopis: Časopis pro elektrotechniku* [online]. 2012, č. 2, [cit. 2014-11-06]. Dostupné z: <http://goo.gl/ea45et>
- [35] ITU-T G.650.2. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS: Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable*. Geneva - Switzerland: International Telecommunication Union, 2007. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.650.2-200707-I/en>
- [36] 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.
- [37] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. NOVÁ METODA MĚŘENÍ PMD OPTICKÝCH KABELOVÝCH TRAS. MIKROKOM S.R.O. *Mikrokom.eu* [online]. 2008-04-09, [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/pmd-mereni-tras.pdf>
- [38] *Custom-Cal: Custom Calibration Solutions, LLC* [online]. 2014 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://goo.gl/QEo9qN>

- [39] PERUMALSAMY, Priya. *In-line Fiber Polarizer*. Blacksburg, Virginia, 1998. etd-71198-221348. Dostupné z: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-71198-221348/>. Master's Thesis. State University, The faculty of the Virginia Polytechnic Institute. Vedúci práce: Dr. Richard O. Claus, Chair Dr. Anbo Wang, Dr. Marten de Vries.
- [40] N7786B Benchtop Polarization Synthesizer. KEYSIGHT TECHNOLOGIES. *Keysight technologies* [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.keysight.com/>
- [41] MS9740A Optical Spectrum Analyzer Operation Manual. ANRITSU. *Anritsu: envision:ensure* [online]. 2015 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://goo.gl/LsBwK8>

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

BER	Bit Error Rate
BR	Bit Rate – bitová rýchlosť
CD	Chromatic dispersion
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DFE	Decision Feedback Equalizer
DFF	Dispersion Flattened Fiber
DGD	Differential Group Delay
DOP	Degree of Polarization
DSF	Dispersion Shifted Fiber: ITU-T G.653
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
EDFA	Erbium Doped Fibre Amplifier
EM	Electromagnetic
FBG	Fiber Bragg Grating
FEC	Forward Error Correction
FFE	Feed Forward Equalizer
FFT	Fast Fourier Transformation
FOTP	Fiber Optic Test Procedure
GI	Graded Index – postupná zmena indexu lomu
GINTY	General Interferometry Analysis
HDWDM	High Density Wavelength Division Multiplex
HOM	Higher Order Mode fiber
ISI	Intersymbol Interference – medzisymbolová interferencia
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunications

MLSE	Maximum Likelihood Sequence Estimation
NA	– maximálny uhol, pod ktorým je možné naviazať vedené vidy do vlákna
NZ-DSF	Non-zero Dispersion Shifted Fiber
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
OSA	optical spectrum analyzer
PMD	Polarisation Mode Dispersion
POTDR	Polarization Optical Time Domain Reflectometry
PSP	Principal States of Polarization
RMS	Root Mean Square
SHG	Second Harmonic Generation
SI	Step Index – skoková zmena indexu lomu
SNR	Signal to Noise Ratio
SOP	State of Polarization
SPM	Self-phase Modulation
STL	Standard Telecommunications Laboratories
TE mode	Transverse electric: v smere šírenia vlny je prítomný len vektor magnetického poľa \vec{H} .
TEF	Transversal Electrical Filter
TINTY	Traditional Interferometry Analysis
TM mode	Transverse magnetic: v smere šírenia vlny je prítomný len vektor elektrického poľa \vec{E} .
TWM	Three Wave Mixing
WDM	Wavelength Division Multiplex
XPM	Cross-phase Modulation