



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH NOVÝCH LABORATORNÍCH ÚLOH PRO VÝUKU PRINCIPŮ MĚŘENÍ OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SÍTÍ

CREATION OF NEW LABORATORY EXERCISES EXPLAINING THE PRINCIPLES OF MEASUREMENT OF OPTICAL FIBRE NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Havlíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Filip Havlíček

ID: 214952

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh nových laboratorních úloh pro výuku principů měření optických vláknových sítí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je rozbor problematiky měření optických sítí z pohledu fyzické vrstvy. Teoretická část práce bude zaměřena na popis základních parametrů optických sítí a metod jejich měření. V rámci praktické části práce budou navrženy 2 laboratorní úlohy pro měření vybraných parametrů optických sítí. Návrh bude proveden s ohledem na současné technické vybavení laboratoře.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DERIKSON, Dennis. Fiber Optic Test and Measurement. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. ISBN 978-0135343302.

[2] FILKA, Miloslav, 2017. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol. ISBN 978-80-86785-29-5.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

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

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je návrh dvou laboratorních úloh pro měření parametrů optických sítí. Práce se v teoretické části věnuje základům optiky, optickým vláknům, optickým konektorům a standardům podle ITU-T. Dále jsou v práci rozebrány jednotlivé parametry optických vláken a metody pro jejich měření. V praktické části jsou návrhy dvou laboratorních úloh pro měření útlumu, chromatické disperze a polarizační vidové disperze.

KLÍČOVÁ SLOVA

optická síť, optické vlákno, optický konektor, ITU-T, útlum, chromatická disperze, polarizační vidová disperze.

ABSTRACT

The aim of bachelor thesis is the design of two laboratory exercises for measuring the parameters of optical networks. The teoretical part deal with the basics of optics, optical fibers, optical connectors and standards according to ITU-T. Furthermore, the individual parameters of optical fibers and methods for their measurement are analyzed. In practical part there are proposals of two laboratory exercises for measuring attenuation, chromatic dispersion and polarization mode dispersion.

KEYWORDS

optical network, optical fiber, optical connector, ITU-T, attenuation, chromatic dispersion, polarization mode dispersion.

HAVLÍČEK, Filip. *Návrh nových laboratorních úloh pro výuku principů měření optických vláknových sítí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 62 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Filip Havlíček
VUT ID autora: 214952
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Návrh nových laboratorních úloh pro výuku principů měření optických vláknových sítí

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Petru Münstroví, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Základy fotoniky a optiky	12
1.1 Šíření světla	12
1.2 Fotony	12
1.3 Optická vlákna	13
1.3.1 Jednovidová vlákna	13
1.3.2 Mnohavidová vlákna	13
1.4 Druhy optických vláken dle doporučení ITU-T	14
1.5 Optické konektory	16
2 Parametry optických vláken	18
2.1 Útlum	18
2.2 Disperze	19
2.2.1 Vidová disperze	20
2.2.2 Chromatická disperze	20
2.2.3 Polarizační vidová disperze	21
3 Optické sítě a jejich měření	24
4 Měření útlumu	27
4.1 Metoda dvou délek	27
4.2 Metoda vložných ztrát	28
4.3 Reflektometrická metoda	29
5 Měření chromatické disperze	31
5.1 Metoda fázového a diferenciálního posuvu	31
5.2 Metoda zpoždění impulsů v časové oblasti	32
5.3 Metoda interferometrická	33
6 Měření polarizační vidové disperze	34
6.1 Metoda skenování vlnové délky	34
6.2 Metoda interferometrická	35
6.2.1 Metoda TINTY	35
6.2.2 Metoda GINTY	36
6.3 Metoda polarimetrická	37

7 Praktická část	38
7.1 Měření útlumu přímou a reflektometrickou metodou	38
7.1.1 Zadání	38
7.1.2 Úvod	38
7.1.3 Postup měření	41
7.1.4 Výsledky měření	43
7.1.5 Použité měřicí přístroje	47
7.2 Měření disperzí analyzátozem FTB-5700	47
7.2.1 Zadání	47
7.2.2 Úvod	48
7.2.3 Postup měření	50
7.2.4 Výsledky měření	52
7.2.5 Použité měřicí přístroje	55
Závěr	56
Literatura	57
Seznam symbolů a zkratek	59
A Obsah elektronické přílohy	62

Seznam obrázků

1.1	Jednovidové vlákno	13
1.2	Mnohavidové vlákno s gradientním indexem lomu	14
1.3	Mnohavidové vlákno se skokovým indexem lomu	14
1.4	Přehled některých optických konektorů	16
1.5	Tvary čel ferulí	17
2.1	Útlumová charakteristika optických vláken	19
2.2	Vidová disperze optického vlákna	20
2.3	Chromatická disperze jednoho optického pulsu	20
2.4	Polarizační vidová disperze pro ideální a reálné vlákno	22
3.1	Hierarchie páteřní, distribuční, přístupové a lokální sítě	24
3.2	Blokové schéma přístupové sítě	25
4.1	Měření útlumu metodou dvou délek	27
4.2	Měření útlumu metodou vložných ztrát	28
4.3	Měření útlumu metodou OTDR	29
4.4	Reflektogram zpětného rozptylu optického vlákna	30
5.1	Měření CD metodou fázového a diferenciálního posuvu	31
5.2	Měření CD metodou zpoždění impulsů v časové oblasti	32
5.3	Měření CD metodou interferometrickou	33
6.1	Měření PMD metodou skenování vlnové délky	34
6.2	Měření PMD metodou interferometrickou	35
6.3	PMD analyzátor pro metodu TINTY	36
6.4	PMD analyzátor pro metodu GINTY	37
7.1	Sestavená trasa pro měření útlumu přímou metodou	39
7.2	Sestavená trasa pro měření útlumu reflektometrickou metodou	40
7.3	Reflektogram útlumových ztrát pro OTDR	40
7.4	Aproximace dvoubodovou metodou a metodou nejmenších čtverců	41
7.5	Pracoviště pro měření útlumu metodou vložných ztrát	43
7.6	Pracoviště pro měření útlumu metodou reflektometrickou	45
7.7	Chromatická disperze v optickém vláknu	48
7.8	Polarizační vidová disperze v optickém vláknu	49
7.9	Disperzní analyzátor FTB-5700	50
7.10	Testovací jednotka FTB-200	51
7.11	Trasy na přípravku pro měření CD a PMD	52
7.12	Pracoviště pro měření CD a PMD delší trasy	53
7.13	Pracoviště pro měření CD a PMD kratší trasy	53

Seznam tabulek

1.1	Přenosová pásma optických vláken o vlnové délce	15
2.1	Typické hodnoty útlumu pro ITU-T G.652	18
2.2	Limitní hodnoty CD pro ITU-T G.652	21
2.3	Limitní hodnoty CD pro různé přenosové rychlosti	21
2.4	Limitní hodnoty PMD podle ITU-T G.697	22
7.1	Hodnoty útlumových ztrát	38
7.2	Parametry pro nastavení reflektometru	42
7.3	Naměřené hodnoty výkonu přímou metodou	44
7.4	Vypočítané hodnoty útlumu pro přímou metodu	44
7.5	Naměřené hodnoty útlumu reflektometrickou metodou	46
7.6	Hodnoty skutečného útlumu měřené trasy pro obě metody	47
7.7	Limitní hodnoty CD a PMD	48
7.8	Tabulka hodnot CD pro měřenou trasu	54
7.9	Vypočtené hodnoty koeficientu CD pro 1550 nm	54
7.10	Tabulka hodnot PMD pro měřenou trasu	55
7.11	Vypočtené hodnoty koeficientu PMD	55

Úvod

Práce je zaměřena na rozbor problematiky optických vláken a jejich parametrů pro měření optických sítí. Cílem práce je návrh dvou laboratorních úloh pro měření jednotlivých parametrů na fyzické vrstvě. Práce je rozdělena do sedmi kapitol, z nichž jedna je věnována praktické části.

V první kapitole jsou rozebrány základy fotoniky a optiky. Práce se v první kapitole věnuje podrobněji optickým vláknům a jejím standardům podle doporučení ITU-T. Dále jsou v kapitole rozebrány optické konektory a jejich broušení.

Druhá kapitola práce popisuje základní parametry v optických vláknech. Podrobněji popisuje ztráty způsobené útlumem a jeho základní charakteristiky. Dále potom vidovou, chromatickou a polarizační vidovou disperzi a její vlivy na přenos optického signálu.

Třetí kapitola se věnuje optickým sítím a jejich měřením. V kapitole je rozebráno jednotlivé dělení sítí a následný rozbor sítě z pohledu přístupu k uživateli. Poslední část kapitoly je věnována obecnému měření sítí z pohledu fyzické vrstvy.

Čtvrtá až šestá kapitola se věnuje útlumu a metodám pro jeho měření. Dále pak chromatické a polarizační vidové disperzi a jejím metodám. Ve všech třech kapitolách jsou jednotlivé metody a měřící postupy detailně rozebrány.

Poslední kapitola se zabývá návrhem dvou laboratorních úloh. První navržená úloha je pro měření útlumu přímou a reflektometrickou metodou. Druhá úloha je navržena pro měření disperzí.

1 Základy fotoniky a optiky

Fotonika se zabývá generováním, zesilováním, modulací, detekcí a analýzou světla. Jedná se tedy o vědu a technologii o světle, která klade důraz na využití v aplikacích. Světlo je vysokofrekvenční elektromagnetické záření, které je důležitým faktorem ve fotonice. Světlo může být infračervené, ultrafialové a viditelné. Fotonika má své uplatnění v laserových a zesilovacích systémech, optických modulátorech, fotodetektorech, optických vláknech a vlnovodech [1].

Optika je věda zabývající se vlastnostmi světla. Hraje důležitou roli ve fotonice, a to hlavně v šíření světla procházející optickými materiály. Šíření světla probíhá formou paprsků, které se šíří po přímkách v podobě vln. Každá vlna je definována svojí vlnovou délkou [2].

1.1 Šíření světla

Světlo se šíří v optických vláknech v podobě paprsků, neboli vidů. Paprsky se nejdříve ze zdroje světla navážou do optického vlákna a následně se vláknem šíří. Tyto paprsky se ve vlákně šíří v podobě infračerveného záření o dané vlnové délce λ . Infračervené záření je elektromagnetické vlnění, které tvoří vlny šířící se téměř přímočaře. Záleží v jakém prostředí či materiálu k šíření dochází, to tedy ovlivňuje celkovou trajektorii šíření paprsků [3].

1.2 Fotony

Jsou to nejmenší elementární částice, které vznikají z elektromagnetického záření. Fotony jsou částice světla a šíří se jeho rychlostí. Nemají žádnou hmotnost ani elektrický náboj, mají klidovou energii [4]. Protože jsou fotony částice, popisují své vlastnosti. Energie fotonů E je dána Planckovým vztahem

$$E = h \cdot f, \quad (1.1)$$

kde h je Planckova konstanta a f je frekvence. Dále určuje svojí hybnost p , která je dána vztahem

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (1.2)$$

Hybnost je dána podílem Planckovy konstanty h s vlnovou délkou λ . A jako poslední vlastnost určuje foton svojí hmotnost

$$m = \frac{h \cdot f}{c^2}, \quad (1.3)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, která je rovna $2,998 \cdot 10^8$ m/s [5].

1.3 Optická vlákna

Slouží pro přenos elektromagnetických vln o velmi vysokých kmitočtech v řádu stovek THz. Tyto elektromagnetické vlny jsou v podobě světla okolo 200 THz. Jako materiál se používá nejčastěji sklo, které se upravuje podle požadavků, aby bylo docíleno potřebných parametrů. Výhodou optických vláken je nízká ztráta při přenosu světelné energie, na vlnové délce 1550 nm je ztráta okolo 0,2 dB/km a na 1310 nm je to přibližně 0,35 dB/km. Světlo se v optických vláknech šíří pomocí paprsků. To jak se světlo šíří, je dáno indexem lomu daného materiálu, který je dán vztahem:

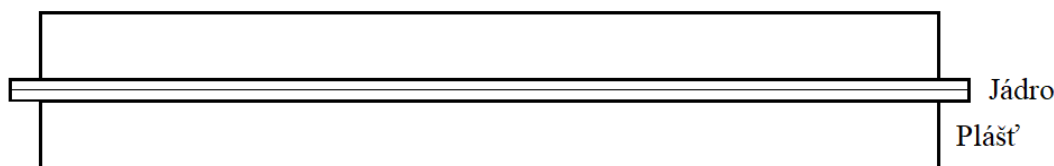
$$n = \frac{c}{v}. \quad (1.4)$$

Index lomu udává, kolikrát je menší rychlost šíření světla v daném prostředí oproti rychlosti světla ve vakuu [3].

Optická vlákna se dělí na vlákna jednovidová a mnohavidová. Rozdělení závisí i na konstrukci vlákna. Podle jeho indexu lomu a průměru jádra se mnohavidová vlákna dělí na vlákna se skokovou a gradientní změnou indexu lomu. Každé z vláken mají rozdílné parametry a jejich velikost se udává jako jádro/plášť [3].

1.3.1 Jednovidová vlákna

Šíří se pouze 1 světelný vid o vlnové délce 1310 nm a 1550 nm. Jednovidová vlákna (SM) mají vlákna s malým poloměrem, kde prochází základní vid. Mezi nejčastěji používanými jednovidovými vlákny je vlákno o velikosti $9/125 \mu m$. V závislosti na vlnové délce je možné z jednovidového vlákna udělat mnohavidové. To nastane, pokud vlákno překročí svojí mezní vlnovou délku λ_c [3].

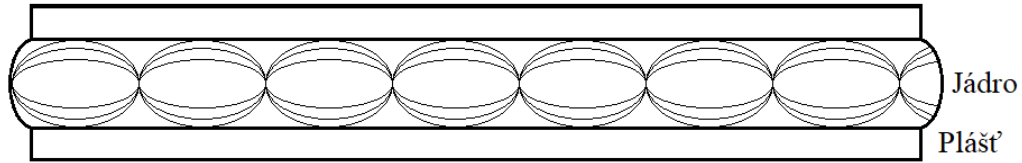


Obr. 1.1: Jednovidové vlákno [3]

1.3.2 Mnohavidová vlákna

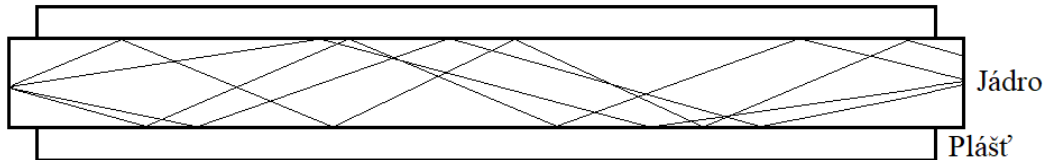
Šíří se více světelných vidů o vlnových délkách 850 nm a 1300 nm. Hlavním využitím jsou v sítích LAN. Mnohavidová vlákna (MM) se dále dělí podle toho, jestli mají gradientní, nebo skokový index lomu [3]. Jednotlivá mnohavidová vlákna jsou zobrazena na obr. 1.2 a 1.3, kde je vidět jednotlivé chování paprsků ve vláknech.

Mnohavidová vlákna s gradientním indexem lomu mají speciálně upravený index lomu materiálu. Struktura vlákna je nejčastěji o velikosti 50/125 μm [3].



Obr. 1.2: Mnohavidové vlákno s gradientním indexem lomu [3]

U mnohavidových vláken se skokovým indexem lomu je šíření světla založeno na úplném odrazu. Tento úplný odraz nastane na rozhraní jádra (n_1) a pláště (n_2) v případě, že platí $n_1 > n_2$. V případě mnohavidových vláken se skokovým indexem lomu se nejčastěji používají vlákna o velikosti 50/125 μm nebo 62,5/125 μm [3].



Obr. 1.3: Mnohavidové vlákno se skokovým indexem lomu [3]

1.4 Druhy optických vláken dle doporučení ITU-T

Podkapitola pojednává o charakteristikách, definicích a doporučeních dle mezinárodní telekomunikační unie (ITU-T). Specifikace jednotlivých typů a kategorií optických vláken, ale také jejich měření, je standardizované a doporučeno dle řady G.65x. Jednotlivá doporučení jsou rozebrány níže.

G.650 – Definice a zkušební měřící metody pro příslušné parametry jednovidových optických vláken a kabelů.

G.651 – Charakteristiky optických kabelů 50/125 μm u mnohavidových optických vláken s gradientním indexem lomu.

G.652 – Standardní jednovidová optická vlákna typu 9/125 μm , která se vyrábí ve 4 variantách (A, B, C, D). Novým typem je varianta C, kde je možné provozovat vlákna na celém rozsahu vlnových délek a využít veškerá přenosová pásma (včetně pásma E) [6]. Varianta D má ještě lepší vlastnosti oproti variantě C a také je nejvíce používaná.

G.653 – Vlákna pro potlačení chromatické disperze na vlnové délce 1550 nm. Jsou využívány pro vyšší přenosové rychlosti na velké vzdálenosti s přenosem na jedné vlnové délce. Nejsou vhodné pro DWDM multiplexování s více vlnovými délkami, protože u nich dochází k překrývání vlnových délek. Také u nich dochází k parazitním jevům a přeslechům [6].

G.654 – Speciální varianta vláken pro doporučení G.652. Vlákna mají posunutou mezní vlnovou délku a jsou optimalizovaná pro pásma 1550 nm s co nejnižším vložným útlumem. Díky tomu se používají spíše jen v podmořských optických trasách, kde součástí optické trasy není zesilovač [6].

G.655 – Vlákna s posunutou nenulovou disperzí, která jsou optimalizována pro přenos v pásmu 1550 nm. Uplatnění mají v dálkových optických sítích. Nemají nulovou disperzi, jako tomu je u vláken typu G.653, tudíž se u nich příliš neprojevují nelineární jevy. Vlákna jsou především určena pro vysoké rychlosti a pro systém multiplexování DWDM [6].

G.656 – Vlákna s posunutou nenulovou disperzí, která jsou optimalizována pro přenos v pásmu 1460-1625 nm. Vlákna jsou určena pro systémy multiplexování DWDM a CWDM. U systému DWDM v pásmu S je možný provoz až na 40 kanálech [6].

G.657 – Vlákna pro optické přístupové sítě a vnitřní kabeláže. Mají nižší útlum způsobený mikroohybem. Jsou daleko méně náchylné na ohyby než předešlá rozebíraná vlákna [6].

Tab. 1.1: Přenosová pásma optických vláken o vlnové délce [6]

Přenosové pásmo	Název pásma	Vlnová délka [nm]
O	Original	1260-1360
E	Extended	1360-1460
S	Short	1460-1530
C	Conventional	1530-1565
L	Long	1565-1625
U	Ultra-long	1625-1675

1.5 Optické konektory

Konektory optických vláken jsou považovány za rozebíratelné spoje, které se používají ke spojení dvou optických vláken a také k propojení jiných prvků, které využívají optické konektory. Jsou navrženy tak, aby realizovaly připojení vlákna a světelný paprsek byl navázán mezi jednotlivými vlákny. Vlákna, která jsou v konektoru propojena, se navzájem nedotýkají. To řeší mechanická konstrukce optického konektoru, kde při napojení konektorů nedochází ke kontaktu zmíněných vláken a také nedochází k poškrábání čel u konektorů [6].



Obr. 1.4: Přehled některých optických konektorů převzato z [7]

Některé druhy konektorů jsou vidět na obr. 1.4. Mezi nejčastěji používané konektory ale patří: **konektory ST** (využití v AV zařízeních), **konektory FC** (využití

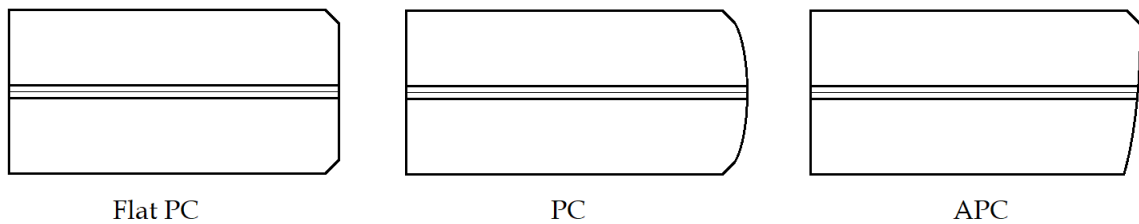
v telekomunikacích), **konektory SC** (využití v telekomunikacích, průmyslu, automatizaci a optických sítích) a **konektory LC** (využití v telekomunikacích, průmyslu, automatizaci a optických sítích) [8].

Optické konektory se dále rozdělují dle broušení čelních ploch, tzv. ferulí. Na obr. 1.5 jsou některé tvary ferulí vyznačeny a jsou to [9]:

Flat PC – Jde o ploché broušení, které se v praxi až tak často nepoužívá. Ferule je tedy zbroušena do roviny.

PC – Ferule PC je broušena do kulata o daném poloměru a jde o jedno z nejrozšířenějších broušení vůbec. Dále se dělí na UPC a SPC, což je broušení s lepšími parametry (U = ultra, S = super). U mnohavidového vlákna se používá jedině PC broušení a u jednovidového vlákna se využívá také.

APC – Ferule APC má čelo zbroušeno pod úhlem 8° . Jedná se taktéž o často používanou feruli a to hlavně kvůli vyššímu útlumu odrazu. Používá se pouze u jednovidových vláken.



Obr. 1.5: Tvary čel ferulí [9]

2 Parametry optických vláken

Mezi základní parametry optických vláken patří jejich útlum, vidová disperze, chromatická disperze, polarizační disperze, numerická apertura a šířka pásma.

2.1 Útlum

Útlum je ztrátová veličina, která je způsobena mnoha faktory. Může být způsobena absorpcí světla ve vlákne, rozptylem a také ohybem vlákna. Ztráta útlumem pro určitou vlnovou délku λ je ve vlákne dána vztahem:

$$u(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}, \quad (2.1)$$

kde útlum $u(\lambda)$ je v [dB] a je vyjádřen poměrem výstupního výkonu P_2 ku vstupnímu P_1 . Častější používanou veličinou v praxi je měrný útlum, který je vyjádřen na jednotku délky. Nejčastěji se vyjadřuje v [dB/km].

$$\alpha(\lambda) = \frac{u(\lambda)}{l} \quad (2.2)$$

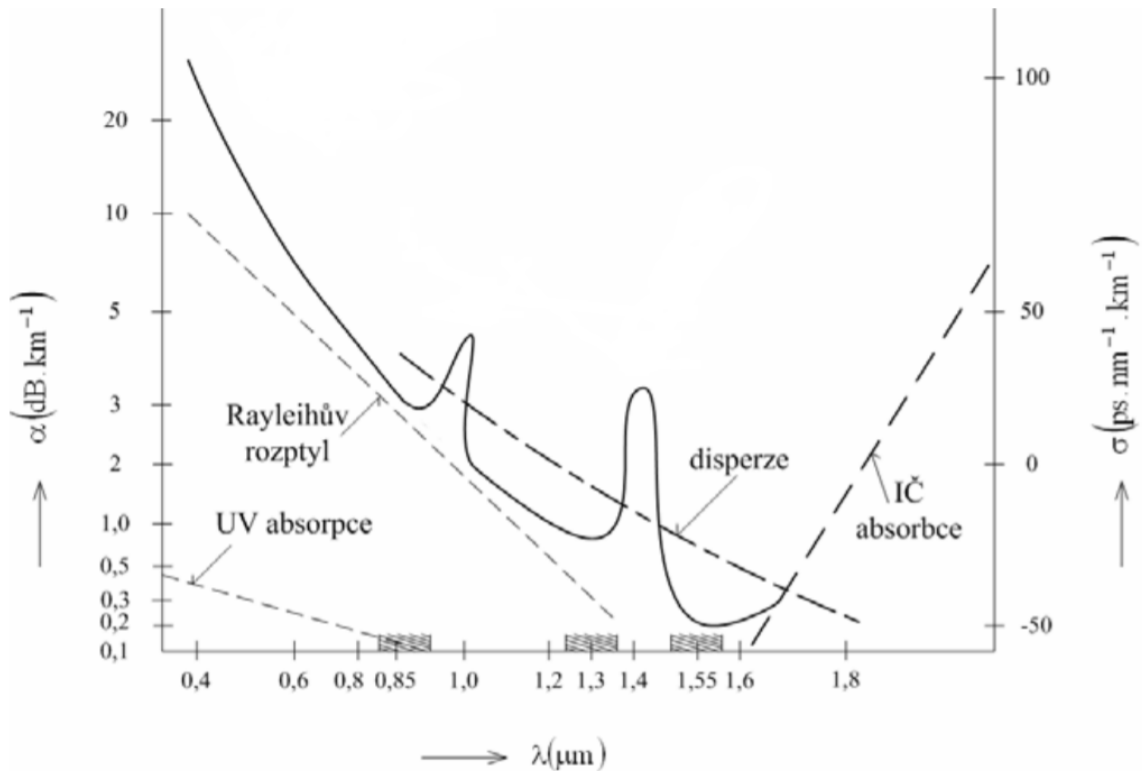
Útlum je tedy částečně způsoben absorpcí světla ve vlákne. Rychlost absorpce je závislá na daném druhu vlákna a vlnové délce. Je způsobena nečistotami ve vlákne, které v něm zůstaly po vyčištění. Při každém čištění i v těch nejlepších podmínkách se nějaká nečistota vždy najde [10].

Tab. 2.1: Typické hodnoty útlumu pro ITU-T G.652

Optické SM vlákno při 1310 nm	0,35 dB/km (max 0,5 dB/km)
Optické SM vlákno při 1550 nm	0,23 dB/km (max 0,4 dB/km)
Svár	0,05 dB (max 0,1 dB)
Spojka	0,2 dB (max 0,5 dB)
Konektor FC	0,2 dB (max 0,3 dB)
Konektor SC	0,2 dB (max 0,3 dB)
Konektor ST	0,4 dB (max 0,5 dB)
Konektor E2000	0,2 dB (max 0,3 dB)

Další útlumovou ztrátou je rozptyl, který je dán nedokonalostí vlákna a jeho strukturou. Tyto nedokonalosti jsou způsobeny vedlejšími produkty ve výrobě, nebo chybou ve výrobě. Rozptyl se dále dělí na Rayleighův rozptyl, který způsobuje nehomogenity ve vláknu a vzniká nepravidelný index lomu. Dále Mieův rozptyl, který způsobuje také nehomogenity, ale ještě celkovou geometrií vlákna [10].

Útlum způsobený ohybem je dán nepovoleným poloměrem ohybu vlákna nad svoje maximální vychýlení. Dochází tedy ke změně dopadajících a odražejících paprsků ve vláknu a může docházet k jeho úniku z vlákna. Ztráty jsou dále rozděleny na mikroohyby a makroohyby. Ztráty mikroohybem jsou způsobeny chybou v geometrii vlákna, nebo jeho deformací. A ztráty makroohybem jsou způsobeny příliš velkým poloměrem ohybu vlákna [3]. V obou případech dochází k opouštění paprsků ven z vlákna při dopadu na zdeformované místo.



Obr. 2.1: Útlumová charakteristika optických vláken převzato z [6]

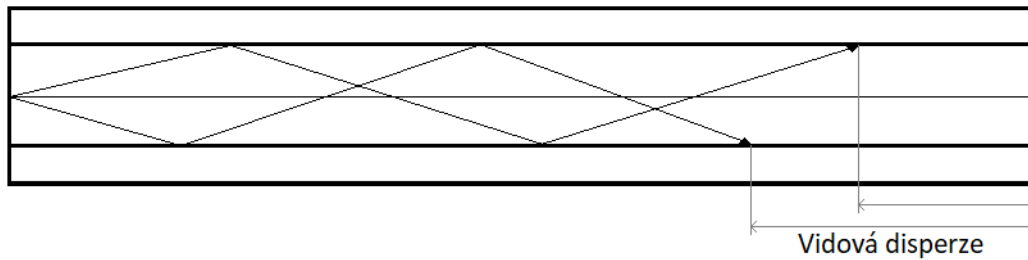
Graf závislosti měrného útlumu na vlnové délce je zobrazen na obr. 2.1. V grafu jsou také vyznačené některé ztráty, které jsou rozebrány v kapitole 2. Popis grafu je podrobněji rozebrán v knize [6].

2.2 Disperze

V optických vláknech je disperze definována rozdílným impulsem na začátku a na konci vlákna. Způsobuje zkreslení přenášeného signálu a jeho deformaci. Je to jeden z nejdůležitějších parametrů optického vlákna, který určuje přenosovou rychlost a šířku pásma [6]. Disperze se dále dělí na vidovou, chromatickou a polarizační.

2.2.1 Vidová disperze

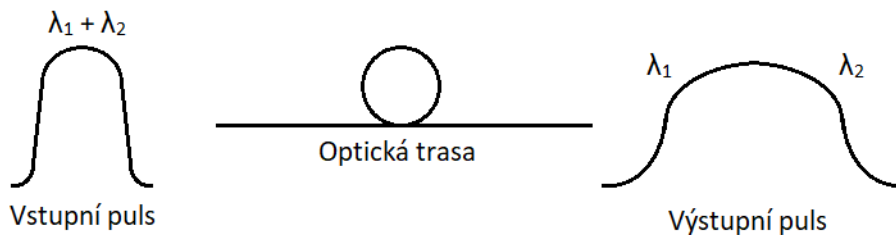
Vyskytuje se v mnohavidových vláknech, kde se současně šíří více paprsků, neboli vidů. Tyto paprsky se šíří v různých časech a v rozdílných úhlech dopadu a odrazu. Na konci vlákna tedy nedorazí všechny paprsky současně, ale s nějakým zpožděním. Toto zpoždění je úměrné délce vlákna a čím delší je vlákno, tím větší je zpoždění. Takovému zpoždění daných paprsků od sebe se tedy říká vidová disperze [11].



Obr. 2.2: Vidová disperze optického vlákna [3]

2.2.2 Chromatická disperze

Chromatická disperze CD je disperze, která je způsobena šířením spektrálních složek pulsů s rozdílnou rychlostí. Tato disperze je závislá na konkrétním materiálu a struktuře vlákna, nebo na vlnové délce šířeného pulsu. Světelné pulsy se tedy šíří rozdílnou rychlostí v závislosti na materiálu či vlnové délce [11]. Stejně jako u vidové disperze nedorazí paprsky současně, ale se zpožděním, což způsobuje deformaci výstupního pulsu.



Obr. 2.3: Chromatická disperze jednoho optického pulsu [12]

Jde o jev, kde dochází k nejsilnějším omezením přenosových rychlostí v jednovidových vláknech. Chromatická disperze je tvořena materiálovou, vlnovodovou a profilovou disperzí a lze jí vypočítat. Pro výpočet chromatické disperze optického

Tab. 2.2: Limitní hodnoty CD pro ITU-T G.652 [6]

Vlnová délka λ [nm]	Koeficient CD $D(\lambda)$ [$\frac{ps}{nm \cdot km}$]
1291-1351	5,7
1311-1371	6,8
1391-1451	11,5
1531-1591	19,9
1471-1611	21,1

vlákna existuje rovnice, která udává změnu skupinového zpoždění signálu t_g při průchodu vláknem o vlnové délce λ . Rovnice 2.3 charakterizuje koeficient chromatické disperze $D(\lambda)$ [$\frac{ps}{nm \cdot km}$] a udává rozšíření impulsu v ps při použití zdroje se spektrální pološířkou 1 nm a průchodem vlákna o délce 1 km [12].

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad (2.3)$$

Velikost koeficientu chromatické disperze $D(\lambda)$ je způsobena pouze výrobou optického vlákna, nikoliv montáží. Velikost roztažení výstupního impulsu je způsobena délkou optické trasy, spektrální šířkou zdroje a koeficientem chromatické disperze [12].

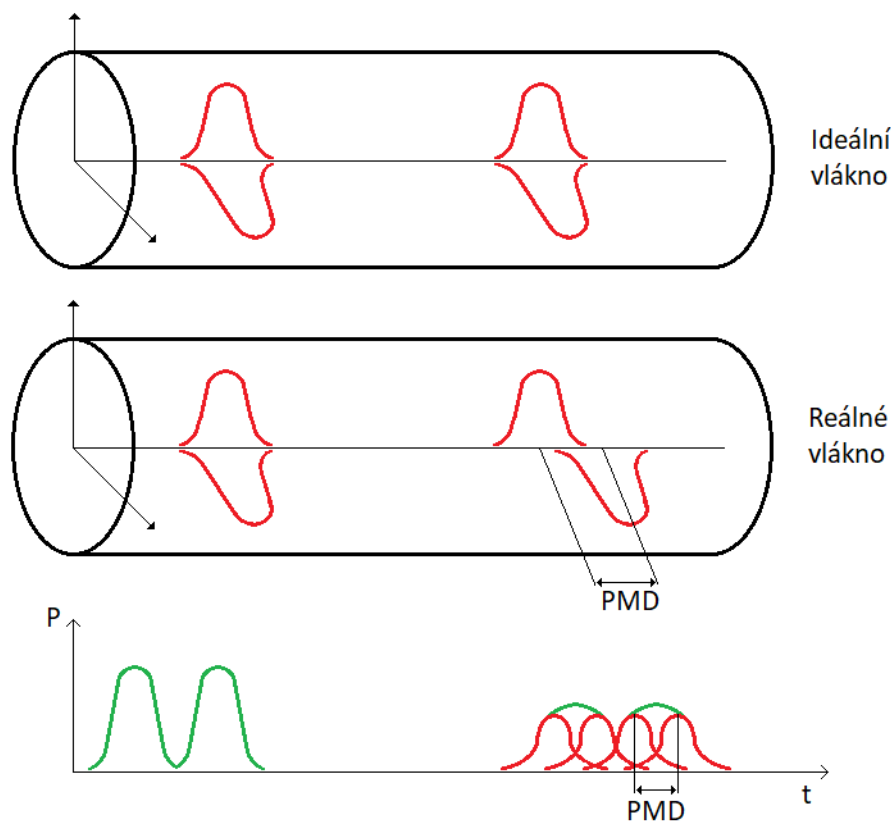
Tab. 2.3: Limitní hodnoty CD pro různé přenosové rychlosti [6]

Přenosová rychlost [Gbit/s]	Limit CD [ps/nm]
2,5	16 000
10	1 000
40	60

2.2.3 Polarizační vidová disperze

Polarizační disperze, nebo také polarizační vidová disperze PMD. Tato disperze nastává u optických vláken, kde se šíří paprsek v ose dvou polarizačních vzájemně kolmých rovinách. Z důvodu nesymetrie vlákna je tato PMD způsobena, protože se polarizační roviny začnou šířit odlišnou rychlostí. Rozdílné rychlosti mají za následek zkreslení analogového signálu, nebo rozšíření impulsu. U větších přenosových rychlostí, především nad 2,5 Gb/s, je tento parametr dosti důležitý [3, 11].

Na obrázku 2.4 je vyznačena PMD, kde dochází na konci trasy ke zpoždění dvou navzájem kolmých pulsů. Kvůli zpoždění dochází i k jeho deformaci a roztažení.



Obr. 2.4: Polarizační vidová disperze pro ideální a reálné vlákno [3, 12]

Důsledkem roztažení dochází k omezení přenosové rychlosti, odstupu signálu od šumu (SNR) a ke snížení výkonové špičky pulsu. Oproti CD je PMD závislá i na celkové montáži optického vlákna. Některá část PMD může být způsobena při výrobě, ale montáž trasy a vnější vlivy tomu také přispívají. Jedná se o náhodné jevy a je potřeba k nim i tak přistupovat [12].

Tab. 2.4: Limitní hodnoty PMD podle ITU-T G.697 [6]

Bitrate [Gbit/s]	SDH	Trvání 1 bitu [ps]	PMD [ps]	PMD [ps/ \sqrt{km}]
0,622	STM-4	1610	160	<8
2,5	STM-16	401,88	40	<2
10	STM-64	100,47	10	<0,5
40	STM-256	25,12	2,5	<0,125

Pro výpočet PMD, kde se měří koeficient PMD na vláknech o velikosti do 10 km, je dána rovnice:

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l}. \quad (2.4)$$

A pro delší vlákna, kde PMD není lineární, je dána rovnice:

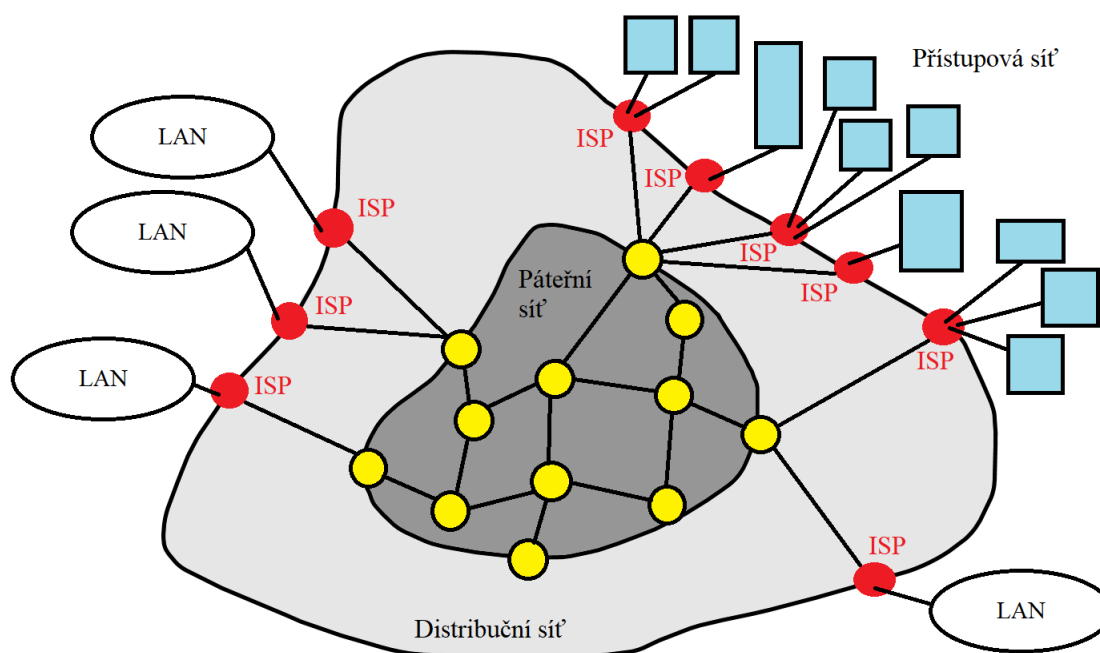
$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}}. \quad (2.5)$$

Rovnice 2.4 a 7.11 udávají velikost koeficientu PMD [$\frac{ps}{km}$] v závislosti na zpoždění signálu $\Delta\tau$ ku délce trasy l [6].

3 Optické sítě a jejich měření

Obecně se optické sítě dělí, jak je vyznačeno na obr. 3.1, do 4 druhů. Síť, která propojuje centrální páteřní uzly na dlouhé vzdálenosti (i tisíce km), se nazývá **páteřní** [13].

Dále síť **distribuční** (ODN), která vykonává přenos mezi optickými linkovými zakončeními (OLT) a jednotkami ONU či ONT [3]. Svojí funkci tu plní provozovatelé internetového připojení (ISP), kteří poskytují internetové připojení koncovým uživatelům v síti přístupové či lokální.



Obr. 3.1: Hierarchie páteřní, distribuční, přístupové a lokální sítě [14]

Síť **přístupová** (OAN), která slouží k připojení koncových uživatelů nebo připojení uživatele k nejbližšímu možnému uzlu. To místo, kde se může koncový uživatel připojit, se dělí dle přípojek FTTx [13]:

FTTD/U (Fiber To The Desk/User) – Obě varianty realizují připojení hned u koncového uživatele. Optické vlákno je taženo až do síťových zásuvek.

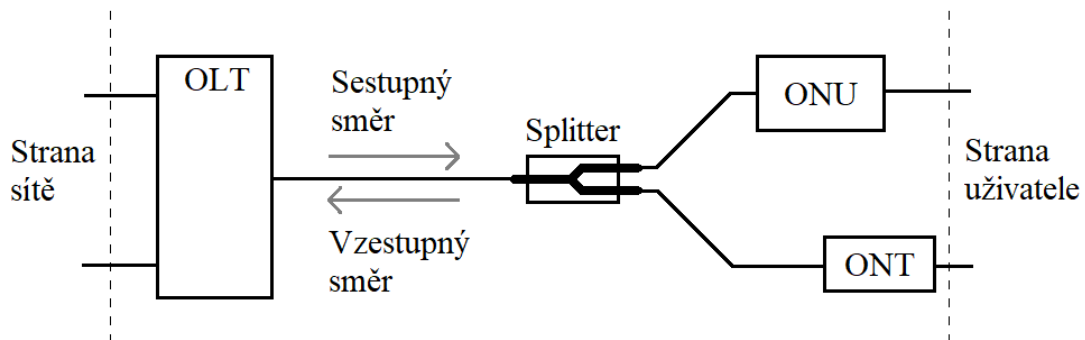
FTTH (Fiber To The Home) – Optické vlákno je taženo k jednotlivým koncovým uživatelům do domu.

FTTO (Fiber To The Office) – Stejné připojení jako u FTTH, pouze s tím rozdílem, že se jedná o firemní a průmyslové prostory (kanceláře, úřady, atd.).

FTTB (Fiber To The Building) – Kombinace metalického a optického vedení, kde je optické vlákno taženo do obytných/průmyslových objektů a koncoví účastníci se následně připojí metalickým vedením přes místní síť. Tato síť je realizována pomocí síťové jednotky ONU, nebo síťové jednotky zakončení ONT.

FTTC (Fiber To The Cabinet) - Optické vlákno je zakončeno ve vzdálenosti do 300 m od koncového uživatele, kde je síťová jednotka ONU. V síťové jednotce jsou instalovány přípojky xDSL a také je k ní připojen digitální multiplexor DSLAM pro připojení koncových uživatelů metalickým vedením.

FTTN (Fiber To The Node) - Stejně jako u FTTC s tím rozdílem, že síťová jednotka je ve vzdálenosti nad 300 m od koncového uživatele.



Obr. 3.2: Blokové schéma přístupové sítě [6]

Přístupová síť musí umět poskytnout přenos transportních služeb v obousměrném režimu. Zajištění přenosu oběma směry může být zajištěno několika způsoby [3, 6]:

Simplexně s dělením SDM - přenos je pro každý směr realizován v samostatném optickém vláknu.

Duplexně s dělením WDM - přenos je pro oba směry realizován v jednom optickém vláknu. Pro sestupný směr na vlnové délce $\lambda = 1550$ nm a pro vzestupný směr na vlnové délce $\lambda = 1310$ nm.

Duplexně s dělením FDM - přenos je pro oba směry realizován v jednom optickém vláknu a na jediné vlnové délce λ . Pro přenos je v každém směru určen jiný kmitočet.

Dále se přístupová síť dělí dle optické infrastruktury na síť **aktivní (AON)** (obsahuje v distribuční síti ODN alespoň 1 aktivní prvek) a síť **pasivní (PON)** (obsahuje v distribuční síti ODN pouze pasivní prvky). A také podle toho, jestli se jedná o síť mnohabodové (P2MP), nebo síť typu bod-bod (P2P) [13].

A poslední sítí je síť **lokální (LAN)**, která propojuje lokální uzly a její fungování je založené především na Ethernetu [13].

Ve všech výše zmíněných optických sítích, díky vyšším požadavkům na přenosové rychlosti, je měření téměř nezbytné. Optické sítě totiž musí splňovat určité přenosové parametry a bezchybný datový přenos. Optické sítě je tedy lepší měřit ve všech oblastech, zejména v sítích přístupových a měření provádět co nejefektivněji. Konkrétní měření se vykonává podle předem stanovených norem a měří se v následujících případech [6]:

- při montáži a budování optické sítě
- při přejímce
- za provozu a při údržbě
- při poruše
- při renovaci optické sítě na novější technologii

4 Měření útlumu

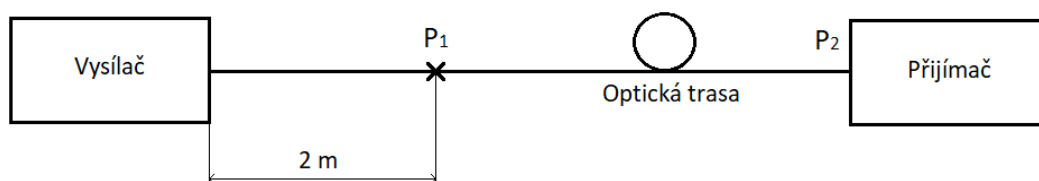
V optických sítích se používají pro měření útlumu 3 metody. Měření přímých metod probíhá především na vlnových délkách o velikosti $\lambda = 1310$ nm, 1490 nm, 1550 nm a 1625 nm. A u metody reflektometrické se útlum měří nejčastěji na vlnových délkách $\lambda = 1310$ nm, 1383 nm, 1490 nm, 1550 nm a někdy také na 1625 nm [6]. Tyto metody se nazývají:

- **Metoda dvou délek (cut-back)**
- **Metoda vložných ztrát (insertion loss)**
- **Reflektometrická metoda OTDR (Optical Time Domain Reflectometry)**

4.1 Metoda dvou délek

Jedná se o velmi přesnou metodu, která je doporučována jako metoda referenční (porovnávací), přestože se jedná o metodu destruktivní [6].

Měření útlumu metou dvou délek je vyznačeno na obr. 4.1. Postup měření touto metodou je založen na měření výkonů ve dvou bodech. Na konci vedení se měří výkon P_2 a na začátku vedení (přibližně po 2 metrech) se měří výkon P_1 . Nejdříve se tedy změří výstupní výkon na celé optické kabelové trase. Poté se trasa zlomí na 2 metrech a změří se vstupní výkon. U měření obou výkonů musí být zachovány stejné měřicí i parametrické podmínky.



Obr. 4.1: Měření útlumu metodou dvou délek

Celkový útlum kabelové trasy se z výkonových hodnot dá vypočítat pomocí vztahu 2.1. Měrný útlum, který je závislý na délce optické kabelové trasy o velikosti l , se dá vypočítat následně pomocí vztahu 2.2.

Nevýhodou u měření pomocí metody dvou délek je měření pouze celkové optické trasy, nikoliv měření v určitém bodě, místě nebo na konkrétním úseku optické trasy.

4.2 Metoda vložných ztrát

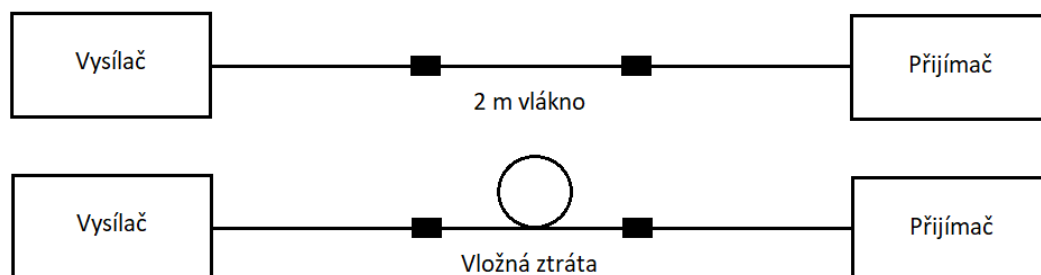
Jde o metodu s dvoustupňovým měřením, podobně jako tomu je u metody dvou délek. Využívá se pro měření vláken a kabelů s osazenými konektory na koncích [6]. Nejedná se o metodu destruktivní a využívá se pro měření optických vláken, modulů, konektorů a jiných optoelektronických součástek [3].

Měření se v prvním kroku provádí přímým propojením mezi vysílačem a přijímačem. Následně se měřící souprava zkalibruje a může se změřit. Tato souprava je následně změřena o velikosti výkonu P_1 [dBm]. Poté se místo přímého propojení vloží optická trasa (vložná ztráta) a změří se druhá hodnota výkonu P_2 [dBm] [6].

Pro výpočet útlumu $u(\lambda)$ [dB] vložné ztráty se využívá následující rovnice, která udává úroveň výkonu v jednotkách decibel vztažené na jeden miliwatt:

$$u(\lambda) = P_1 - P_2. \quad (4.1)$$

Z naměřených hodnot výkonů P_1 a P_2 je možné vypočítat útlum pomocí vzorce 2.1 a měrný útlum potom z rovnice 2.2. Výsledný útlum je složen z útlumu jednotlivých konektorů a dané vložné ztráty [6].



Obr. 4.2: Měření útlumu metodou vložných ztrát

V praxi se také uplatňuje metoda čtyřstupňová, kde je na každé straně měřící přístroj, který pracuje jako zdroj záření i jako měřič optického výkonu. Měření probíhá kalibrací, poté se změří výkon P_1 na obou stranách. A pro změření výkonu P_2 se použije vložná ztráta. Vlákna jsou propojena v obou směrech a všechny naměřené výkony jsou následně dosazeny do provozní útlumové rovnice [6]:

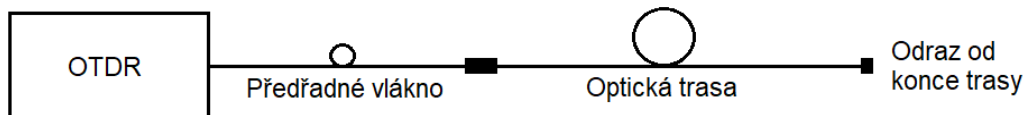
$$u = \sqrt{\frac{P_{12} \cdot P_{21}}{P_{11} \cdot P_{22}}}. \quad (4.2)$$

Provozní útlum vlákna u je bezparametrická veličina a zahrnuje do výsledku provozní útlum optického vlákna v obou směrech.

4.3 Reflektometrická metoda

Reflektometrická metoda OTDR se výrazně liší od ostatních metod pro měření útlumu. Tato metoda je totiž závislá na čase. Jedná se o metodu, která se využívá pro měření spojek, konektorů a optických vláken. Princip je založen na časovém zpoždění zpětně rozptýleného optického výkonu P při šíření impulsu v optickém vlákně. Proto je vyhovující, aby bylo vlákno homogenní a nedocházelo ke zbytečným ztrátám [3, 6].

Metoda OTDR využívá Rayleighův rozptyl v optických vláknech a také Fresnelův odraz na koncích vláken, spojkách a konektorech. Rayleighův zpětný rozptyl vzniká na celé optické trase vlákna, který je způsoben vzájemným působením rozptylů ve vlákně. Tento rozptýlený signál se na konci vlákna odráží zpět kvůli nehomogenitě na optické trase. Zpětně odražený rozptýlený signál dorazí do reflektometru a vyhodnotí se. Rayleighův rozptyl je přímo úměrný šířce impulsu a vlnové délce, což při větší šířce impulsu je i větší zpětný rozptyl. Při vyšší vlnové délce bude Rayleighův zpětný rozptyl menší, ale kvůli infračervené absorpci se zvýší útlum. Fresnelovy odrazy slouží k vyhodnocení odraženého signálu zpět na začátek. Vzniká způsobením změny vlákna a indexu lomu. Reflektometr vypočítá vzdálenost, kde dané vlákno končí a také kde jsou vlákna propojena. Slouží k vyměření vzdálenosti konců vlákna, konektorů, propojek, svárů a poškození [3].



Obr. 4.3: Měření útlumu metodou OTDR

Měření optické trasy metodou OTDR je vyznačeno na obr. 4.3. Skládá se z optického reflektometru OTDR, předřadného vlákna a optické měřené trasy. Důležité je, aby bylo vlákno stejného charakteru jak pro měřenou trasu, tak i pro předřadné vlákno. Po sestavení samotné měřené optické trasy je potřeba v reflektometru nastavit některé parametry pro měření: šířka impulsu, délkový rozsah, efektivní index lomu a efektivní index doby průměrování. Potom se už přechází na samostatné měření, které je plně automatické [15]. Po vyhodnocení měření optické trasy se na displeji reflektometru vykreslí reflektogram, který ukazuje útlumové ztráty v konkrétní vzdálenosti vlákna. Reflektogram je popsán a vyznačen na obr. 4.4.

Pro vyhodnocení vzdálenosti, kde došlo k odrazu či rozptylu vysílaného signálu, je využíván vztah:

$$l = \frac{c \cdot t}{2 \cdot n}, \quad (4.3)$$

kde vzdálenost l závisí na rychlosti světla ve vakuu c , indexu lomu n a celkovém čase t od vyslání k přijetí odraženého signálu. Tento odraz v určité vzdálenosti vyhodnotí, co se v daném bodě nachází. Slouží k vyhodnocení konce trasy, propoje, konektoru, spojky, sváru či závady.

Pro výpočet výkonu, odraženého impulsu zpět do reflektometru ve vzdálenosti l , je dán vztah:

$$P(l) = 0,5 \cdot P_0 \cdot \Delta t \cdot S \cdot \alpha_r \cdot v_{sk} \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot l}. \quad (4.4)$$

Rovnice výkonu $P(l)$, která udává výkon signálu odraženého od bodu ve vzdálenosti l , má parametry [3]:

P_0 - vstupní výkon

Δt - šířka optického impulsu

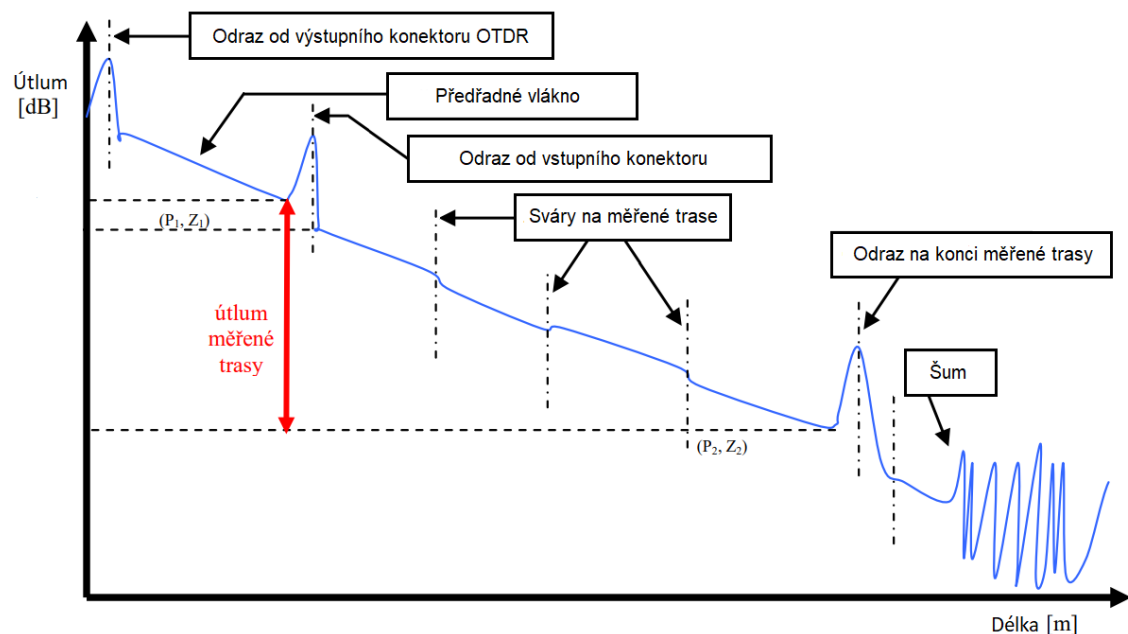
S - koeficient zpětného rozptylu

α_r - činitel ztrát Rayleighovým rozptylem

v_{sk} - skupinová rychlost šíření signálu

α - střední hodnota koeficientu vlákna

l - vzdálenost vlákna v dopředném i zpětném směru



Obr. 4.4: Reflektogram zpětného rozptylu optického vlákna převzato z [15]

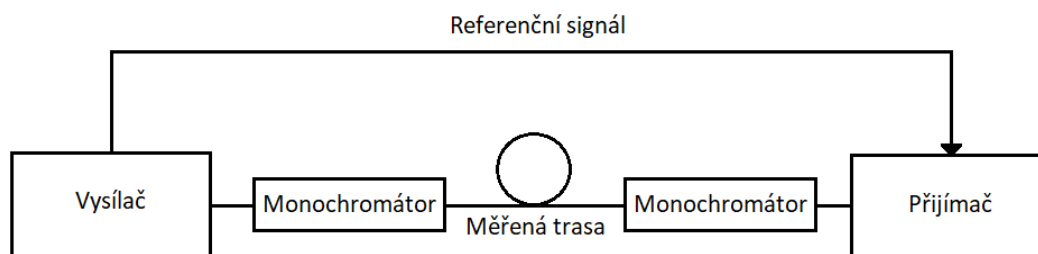
5 Měření chromatické disperze

Měření chromatické disperze bylo dříve opomíjené téma a příliš se na tento parametr nehledělo. S narůstající přenosovou rychlostí a rozsahem technologií vlnových multiplexů (WDM) začala poptávka po měření chromatické disperze růst. Metody pro měření chromatické disperze jsou velmi přesné a jedná se o tyto metody:

- Metoda fázového a diferenciálního posuvu
- Metoda zpoždění impulsů v časové oblasti
- Metoda interferometrická

5.1 Metoda fázového a diferenciálního posuvu

Jedná se o metodu fázového posuvu, která se dle doporučení ITU-T G.650 považuje za metodu referenční. Schéma měření chromatické disperze metodou fázového a diferenciálního posuvu je na obr. 5.1. K měření posuvů se využívá modulovaný zdroj záření, který vysílá na více vlnových délkách. Na přijímači je při měření měřena fáze signálu. Pomocí vektorvoltmetru je možné tuto fázi signálu změřit [6, 12].



Obr. 5.1: Měření CD metodou fázového a diferenciálního posuvu

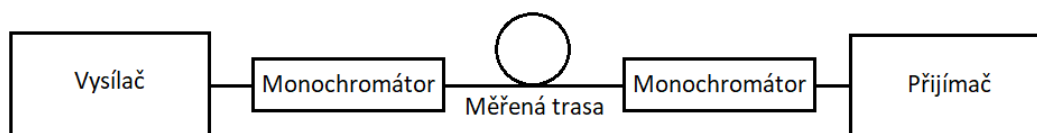
Při měření metodou fázového posuvu je změřena fáze signálu na přijímači a následně je porovnána s fází signálu na vysílači. Z rozdílu těchto dvou fází se následně určí změna fáze signálu po průchodu měřenou optickou trasou. Pro změření vstupní fáze na vysílači je potřeba použít referenční trasu, aby bylo možné vstupní fázi signálu změřit. K tomu se využívá např. jiné optické vlákno v kabelu [12].

Měření metodou diferenciálního posuvu se využívá na více vlnových délkách. Stejně jako u metody fázového posuvu se měří vstupní a výstupní fáze signálu, ale na více vlnových délkách. Není tedy nutné používat referenční trasy, stačí pouze na

monochromátoru vybrat, na jaké vlnové délce dojde k měření. V praxi se ale někdy referenční vlákno využívá pro komunikaci s vysílačem. Některé měřicí aparatury dvě vlákna používají [12].

5.2 Metoda zpoždění impulsů v časové oblasti

Tato metoda je považována za velmi rychlou a spolehlivou. Spočívá na vysílání optických impulsů v jednom optickém vláknu o různých vlnových délkách. Optické impulsy mají stejnou velikost a stejné rozestupy, které mají jasně stanoveny. Z rozestupů optických impulsů, které jsou porovnány s vysílacími a přijímacími rozestupy, se určuje zpoždění [6, 12].



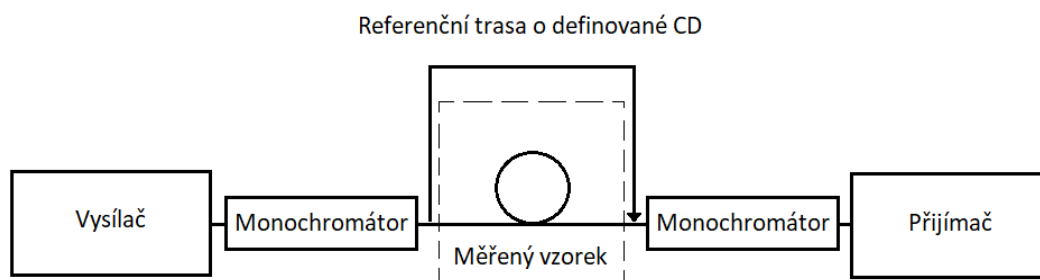
Obr. 5.2: Měření CD metodou zpoždění impulsů v časové oblasti

Při měření chromatické disperze metodou zpoždění impulsů v časové oblasti se využívá pouze jedno optické vlákno. Jedná se o přímo měřenou optickou trasu a není potřeba užití referenčního vlákna. Přesnost měřeného zpoždění závisí na konkrétních měřicích soustavách, které jsou podobné jako u metod pro měření fázového a diferenciálního posuvu. Přesnost může být také ovlivněna chromatickou disperzí, kde se impulsy navzájem roztahují a vzdalují. Roztahování impulsů dále způsobuje špatné výsledky časových poloh [12].

Metoda také využívá principu OTDR, který slouží i k měření útlumu optických tras. Jedná se o metodu zpětného rozptylu a pro měření chromatické disperze se využívá při měření na více vlnových délkách. Často se využívají vlnové délky, které pokrývají celé spektrální pásmo u jednoivodových vláken. Jde tedy o vlnové délky v rozmezí 1310 - 1625 nm. Výhodou ale je, že při měření pomocí OTDR je možné měřit jak útlum trasy, tak i chromatickou disperzi pro více vlnových délek. Pro měření útlumu metodou OTDR je ale potřebný odraz na druhém konci vedení, čehož lze docílit připojením přídatného modulu. Tímhle ale metoda ztrácí výhodu pro měření chromatické disperze [12].

5.3 Metoda interferometrická

Jde o metodu, která se využívá pouze pro laboratorní měření. Není totiž vhodná k měření optických sítí, protože umí měřit jen krátké optické trasy z jednoho místa. K měření se využívá Michelsonův, nebo Mach-Zehnderův interferometr. Využívá interferenci mezi zářením měřeného a referenčního vlákna, kde zjišťuje fázový rozdíl obou signálů [12].



Obr. 5.3: Měření CD metodou interferometrickou

Měřený vzorek tvoří dvě ramena, kde jedno rameno využívá referenční trasu s definovanou chromatickou disperzí a druhé rameno je samostatný interferometr. Na přijímači se střetávají dva signály z obou ramen a dochází u nich k interferenci. Pokud se referenční trasa změní, tak se změní i interference vzájemně fázově rozdílných signálů z obou ramen [16].

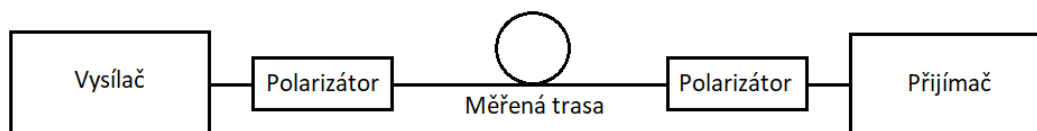
6 Měření polarizační vidové disperze

Měření PMD je také často měřenou veličinou. Měření se provádí už při výrobě, po montáži kabelové trasy a také při běžné kontrole optické trasy. PMD se nejčastěji měří u vyšších přenosových rychlostí, které jsou vyšší jak 10 Gbit/s, protože se u nižších rychlostí neprojevuje. Nejčastější metody pro měření PMD jsou rozebrány níže a jde o tyto metody:

- **Metoda skenování vlnové délky (metoda s fixním analyzátozem)**
- **Metoda interferometrická**
- **Metoda polarimetrická**

6.1 Metoda skenování vlnové délky

Metoda skenování vlnové délky spočívá na měřeném optickém výkonu, který prochází měřenou optickou trasou v závislosti na vlnové délce. Na obr. 6.1 je vysílač, který může být v podobě širokospektrální LED diody, nebo laditelného laseru. Mezi měřenou optickou trasou jsou polarizátory, které slouží k polarizaci elektromagnetického záření. Jako přijímač je použit detekční prvek pro měření výkonu v závislosti na vlnové délce. Detekční prvek se volí podle vysílaného zdroje, aby docházelo ke kompatibilitě těchto zařízení [12].



Obr. 6.1: Měření PMD metodou skenování vlnové délky

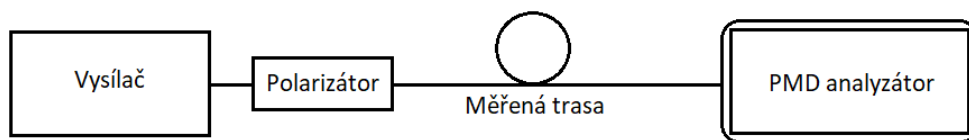
Metoda je časově náročnější a je náchylná na vibrace optických vláken. Měření metodou skenování vlnové délky totiž probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku je měřicí soustava sestavena tak, jak je naznačeno na obr. 6.1. Tedy oba polarizátory mezi měřenou trasou. Změří se spektrální závislost složky výkonu o dané polarizaci $P(\lambda)$. V druhém kroku se odstraní polarizátor na detekční straně před přijímačem. Změří se referenční hodnota $P_{\text{tot}}(\lambda)$ (spektrální závislost celkového výkonu) a z obou

naměřených hodnot lze vypočítat, pomocí vztahu 6.1, spektrální závislost změny polarizace $R(\lambda)$. S pomocí FFT je potom možné spektrální výsledky převést do časové oblasti a následně odečíst hodnotu PMD [12].

$$R(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{P_{\text{tot}}(\lambda)} \quad (6.1)$$

6.2 Metoda interferometrická

Interferometrická metoda (zkráceně INTY) je nejčastější metoda pro měření PMD na optické trase. Je založena na interferenci nízko-koherentního optického záření. Měření je velmi rychlé a snadné. Měří se samostatné vlákno bez nutnosti komunikace PMD analyzátoru se zdrojem. Jako vysílač je použita širokopásmová polarizovaná LED dioda, která je zdrojem nízko-koherentního záření. PMD analyzátor je konstruován z Michelsonova interferometru, který slouží k získání autokorelační funkce přicházejícího záření [12].



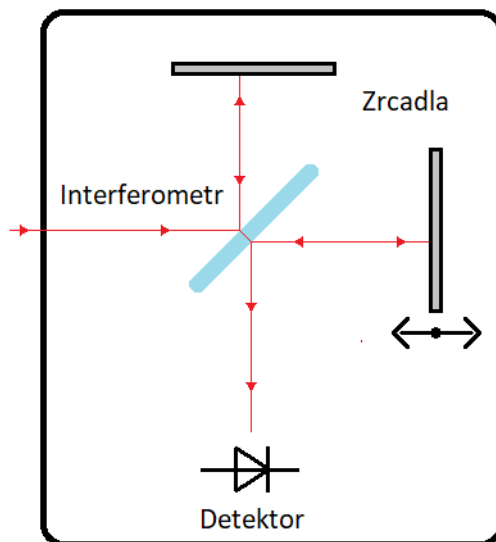
Obr. 6.2: Měření PMD metodou interferometrickou

Měření PMD interferometrickou metodou se provádí pouze v jednom kroku. Není potřeba nastavování referenčních hodnot, ale pouze zadání potřebných vstupních údajů na analyzátoru. Měření je dostatečně rychlé a přesné i pro delší optické trasy v terénu. Zpoždění PMD je možné měřit od 0,1 ps až po stovky ps [12]. Interferometrická metoda se dále dělí podle PMD analyzátoru na metodu TINTY a GINTY.

6.2.1 Metoda TINTY

Tradiční interferometrická metoda pro měření PMD, neboli TINTY. Metoda je založena na interferenci nízko-koherentního optického záření, kde se jako širokospektrální zdroj používá většinou LED dioda. Na obr. 6.3 je konstrukce PMD analyzátoru, kde dochází k měření. Jádrem analyzátoru je Michelsonův interferometr. Polarizované záření vstupující do interferometru je následně rozděleno do dvou ramen, jedno rameno je zakončené pohyblivým zrcadlem a druhé pevným. Záření se od zrcadel odráží zpět do interferometru, na něm se signály slučují a šíří k detektoru. Na detektoru nastává

interference sloučeného signálu. Pohyblivým zrcadlem se mění vzájemný časový posun mezi signály šířícími se z obou ramen. Tím je získán interferogram, který slouží ke stanovení zpoždění vlivem PMD [17].

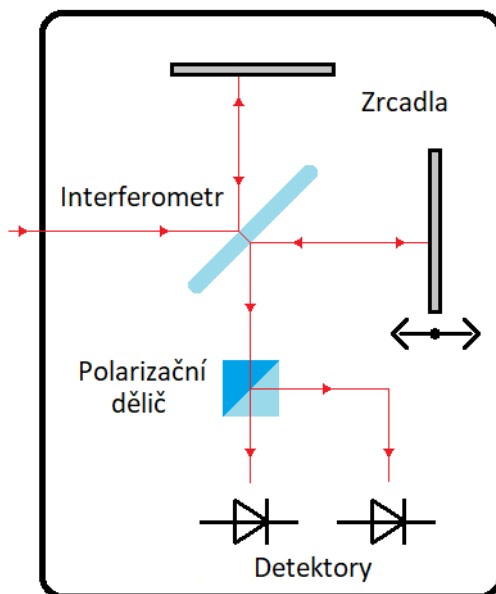


Obr. 6.3: PMD analyzátor pro metodu TINTY

Interferogram se skládá ze dvou složek. Jedna složka je výsledkem vzájemné korelační funkce dvou na sebe kolmých polarizačních rovin. Druhá složka pak z autokorelační funkce měřícího signálu. Výsledkem je tedy složka ukazující vliv zpoždění PMD. Metoda TINTY ale způsobuje některá omezení, obsahuje totiž velké autokorelační špičky, což může dané měření ovlivnit. Metoda tedy není příliš vhodná pro měření optických tras se spektrálně závislými prvky [17].

6.2.2 Metoda GINTY

Obecná interferenční metoda pro měření PMD, neboli GINTY. Je to obdobná metoda jako metoda TINTY, ovšem s drobnými rozdíly. Rozdíl je patrný na obr. 6.4, kde je ještě sloučený signál rozdělen v polarizačním děliči na dvě vzájemně kolmé polarizované složky. Obě vzájemně kolmé polarizované složky dopadají na svůj detektor, kde dochází k interferenci. Interferenční obrazce, v každém z detektorů, obsahují také obě korelační složky. Pomocí matematických operací je ale možné dané složky od sebe oddělit, sečíst či odečíst. Hlavní výhodou je tedy oproti TINTY odstranění autokorelační špičky z interferogramu, což umožňuje vyhodnocení PMD na samostatné korelační funkci. Není tedy nutné prokládat interferogram Gaussovou křivkou, ale hodnoty přímo z interferogramu odečíst [17].



Obr. 6.4: PMD analyzátor pro metodu GINTY

6.3 Metoda polarimetrická

Jedná se o referenční metodu pro měření PMD, dle doporučení ITU. Polarimetrická metoda se dále dělí na další podobné metody, které jsou postavené na podobném základu. Metody slouží k zjišťování komplexních informací o polarizačním stavu na optické trase. Dokáží měřit polarizační stav na vstupu a konci optické trasy, což jiné metody nedokáží [12].

Mezi polarimetrické metody pro měření PMD patří:

- metoda analýzy Jonesovy matice
- metoda Poincarého koule
- metoda polarizačních stavů (SOP)

Polarimetrické metody pro měření PMD jsou považovány za jedny z nejpřesnějších metod. Dokáží naměřit hodnoty s vysokou reprodukovatelností, protože mají k dispozici informace o vstupní a výstupní polarizaci zařízení. Díky přesnosti měření se používají pro měření velmi malých hodnot, například pro měření optických součástí. Pro měření optických tras nejsou příliš vhodné, protože jsou příliš časově náročné, složité a náchylné na vibrace optických vláken [12].

7 Praktická část

Praktická část se zabývá návrhem dvou laboratorních úloh. První laboratorní úloha je navržena pro měření útlumu s porovnáním mezi metodou přímou a metodou reflektometrickou. Druhá laboratorní úloha je navržena pro měření disperzí pomocí analyzátoru FTB-5700.

7.1 Měření útlumu přímou a reflektometrickou metodou

7.1.1 Zadání

- 1) Seznamte se a prostudujte si jednotlivé metody pro měření útlumu.
- 2) Změřte výkony metodou vložných ztrát a metodou reflektometrickou. Z naměřených hodnot následně vypočtete jednotlivé útlumy.
- 3) Porovnejte jednotlivé metody měření a zhodnoťte jejich výsledky.

7.1.2 Úvod

Útlum je ztrátová veličina, která je definována ztrátou optické energie v optickém vláknu. Může být způsoben absorpcí světla, rozptylem světelných paprsků, ohybem, optickými prvky na trase a také různými nehomogenitami vlákna. Je to jeden z hlavních, a také dost často měřených, parametrů v optických sítích. Metody pro měření útlumu jsou dány dvěma způsoby. Dá se totiž měřit přímou, nebo reflektometrickou metodou. Mezi přímé metody patří metoda dvou délek a metoda vložných ztrát. U reflektometrické metody jde o metodu OTDR.

Tab. 7.1: Hodnoty útlumových ztrát

Optický prvek	Průměrná hodnota	Maximální hodnota
SM kabel při 1310nm	0,35 dB	0,5 dB/km
SM kabel při 1550nm	0,23 dB	0,4 dB/km
Konektor/Spojka	0,2 - 0,3 dB	0,5 dB
Svár	0,02 - 0,05 dB	0,1 dB

Rovnice 7.1 pro výpočet útlumu, pro určitou vlnovou délku λ , je v optickém vláknu definována jako výstupní výkon P_2 ku vstupnímu výkonu P_1 .

$$u(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} [dB] \quad (7.1)$$

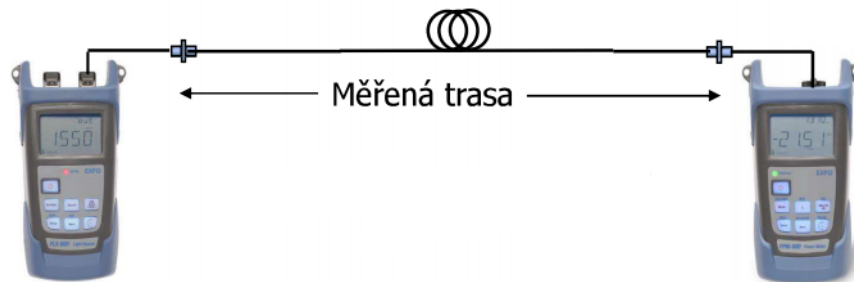
A pro výpočet měrného útlumu, který udává útlum optického vlákna na jednotku délky, je rovnice 7.2.

$$\alpha(\lambda) = \frac{u(\lambda)}{l} [dB/m] \quad (7.2)$$

Metoda vložných ztrát je tedy přímá metoda a je založena na měření výkonu ve dvou krocích. V prvním kroku je vysílač a přijímač přímo propojen přes referenční vlákno a je změřen referenční výkon P_1 . Ve druhém kroku je mezi vysílač a přijímač vložena měřená trasa, kde se měří výkon celé optické trasy P_2 . Měření útlumu přímou metodou se realizuje zejména pro oba směry a výsledkem je jejich aritmetický průměr. Naměřené hodnoty jsou v jednotkách dbm, tedy úroveň výkonu vztažený na jeden miliwatt. Útlum optické trasy pro měření útlumu přímou metodou je potom možné vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$u(\lambda) = (P_1 - P_2) [dB]. \quad (7.3)$$

Pro měření se v praxi často využívají měřicí soupravy, které jsou konstruované pro oba režimy. Fungují jako zdroje záření i jako měřiče výkonu. Není tedy nutné přejíždět mezi konci měřené trasy, stačí pouze změnit režim a změřit trasu z druhého konce.

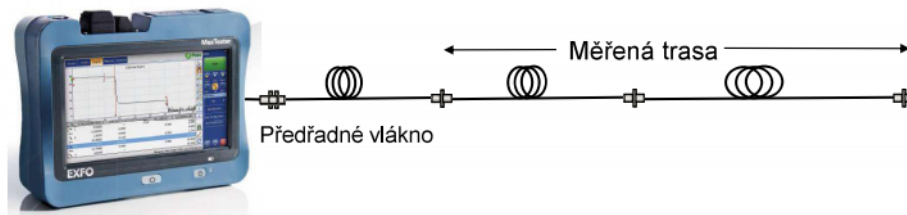


Obr. 7.1: Sestavená trasa pro měření útlumu přímou metodou [18]

Reflektometrická metoda OTDR je více používanou metodou, protože je díky ní možné měřit konkrétní útlumové ztráty a poruchy na trase. Metoda je založena na zpětné reflektometrii, kde měření probíhá pouze v jednom kroku, ale musí se pro měření nastavit několik parametrů. Při měření jsou optické impulsy vysílány do měřené trasy a po cestě dochází k jejich odrazům. Vyslané paprsky se tedy po odrazu vrací zpět do měřicího přístroje OTDR, kde dochází k vyhodnocení měřené trasy.

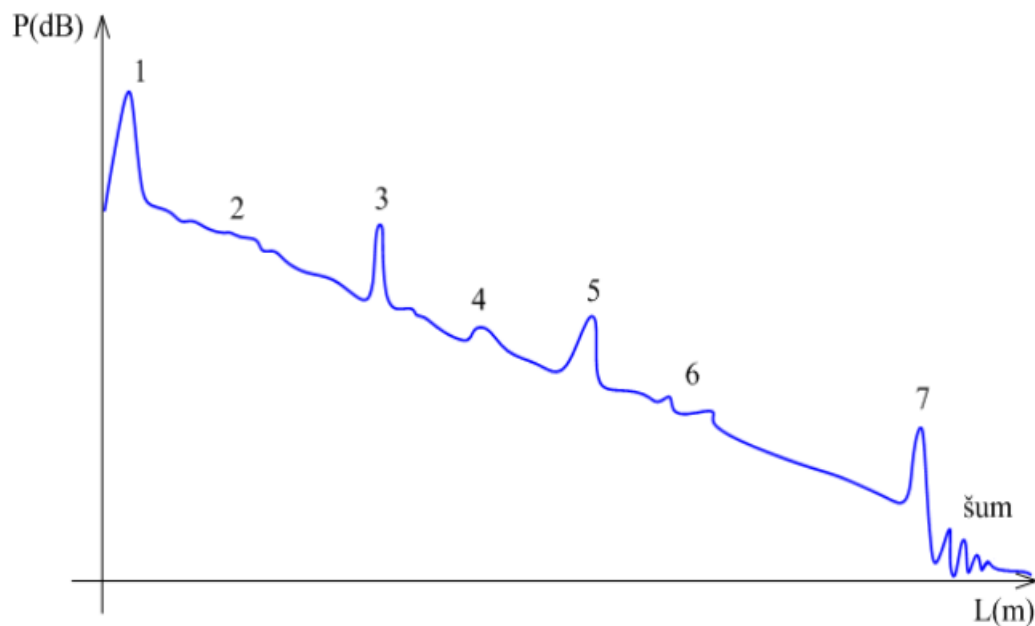
Měření reflektometrickou metodou se provádí z obou směrů, a to kvůli lepší detekci útlumových ztrát. Výsledkem je aritmetický průměr naměřených hodnot pro

oba směry. Některé měřicí přístroje mají funkci pro měření útlumu oběma směry z jednoho místa. Pro měření obou směrů z jednoho místa se musí ještě za měřenou trasu připojit zařadné vlákno a následně je toto měření možné provést.



Obr. 7.2: Sestavená trasa pro měření útlumu reflektometrickou metodou [19]

Pro vyhodnocení útlumových ztrát a poruch na trase slouží reflektogram, který je po dokončeném měření vykreslen na displeji optického reflektometru. Jeho průběh je na obr. 7.3, kde jsou vyobrazeny různé události.



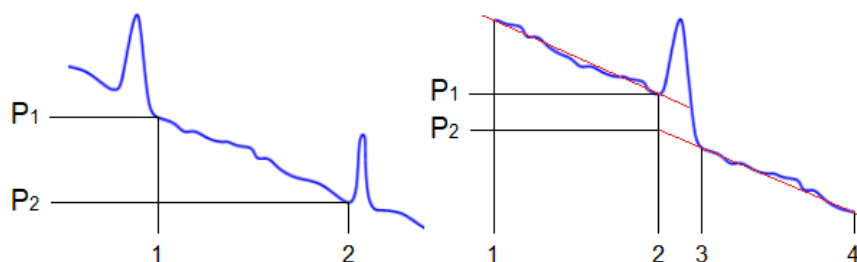
Obr. 7.3: Reflektogram útlumových ztrát pro OTDR převzato z [6]

Jednotlivé události na optické trase pro OTDR [6]:

- 1) Odraz od výstupního konektoru měřícího přístroje OTDR.
- 2) Mírný útlum způsobený nehomogenitou vlákna (svár, bodový tlak, nebo defekt struktury vlákna)

- 3) Odraz od konektoru, nebo spojky.
- 4) Zesílení způsobené rozdílným vidovým polem v konkrétním úseku optické trasy.
- 5) Mnohonásobný odraz způsobený nesprávně zvoleným délkovým rozsahem pro měření.
- 6) Zvlnění křivky způsobené polarizačními efekty, fluktuacemi, nebo měřícím přístrojem.
- 7) Odraz od konce měřené trasy.

Pro konkrétní měření jednotlivých událostí na reflektogramu měřícího přístroje OTDR se používají kurzory. K tomu se využívají dvě aproximační metody. Jedná se o metodu dvoubodovou a metodu čtyřbodovou (metoda nejmenších čtverců). Jednotlivé aproximace jsou vyznačené na obr. 7.4. Rozdíl mezi jednotlivými metodami je výsledný útlum měřené ztráty. Pro dvoubodovou metodu jsou kurzory 1 a 2 nastaveny na počátek a konec měřené trasy. U metody nejmenších čtverců jsou kurzory 1 a 4 umístěny na lineárním úseku vlákna a to v co největší vzdálenosti od měřené útlumové ztráty. Další kurzory 2 a 3 jsou umístěny před a za měřenou útlumovou ztrátou (svár, spoj, konektor atd.). Někdy se používá i 5. kurzor, který definuje střed nehomogenity (útlumové ztráty).



Obr. 7.4: Aproximace dvoubodovou metodou a metodou nejmenších čtverců

7.1.3 Postup měření

Při měření je velice důležité dbát na čistotu a především dodržovat bezpečnost. Se všemi měřícími přístroji a optickými prvky zacházejte opatrně a řiďte se pokyny podle postupu měření. Pokud dojde k znečištění některých optických prvků, tak budou naměřené hodnoty nepřesné. Bude tedy potřeba prvky očistit pomocí isopropylalkoholu a hadříku, který nepouští vlákna.

Měření přímou metodou:

- 1) Zdroj záření a měřič optického výkonu propojte referenčním vláknem a stanovte jeho referenční výkon (při přepojování optických kabelů dávejte pozor, aby nebyl aktivovaný světelný impuls).

- 2) Na zdroji záření nastavte vlnovou délku $\lambda = 1310$ nm a přepněte měření na jednotky dBm.
- 3) Následně mezi zdroj záření a měřič optického výkonu vložte měřenou trasu a změřte výkon této trasy.
- 4) Pomocí přípravků simulujte ohyb na měřené trase a změřte útlum pro jednotlivé průměry ohybu (2 cm, 1,5 cm a 1 cm).
- 5) Trasu změřte i z druhého směru.
- 6) Vypočítejte celkový a měrný útlum optické měřené trasy (měrný útlum pouze pro trasu bez ohybu).
- 7) Hodnoty porovnejte s teoretickými a zhodnoťte do závěru.
- 8) Měření realizujte i pro vlnovou délku $\lambda = 1550$ nm.

Měření reflektometrickou metodou:

- 1) Spusťte program OTDR a v nastavení reflektometru nastavte vlnovou délku o velikosti $\lambda = 1310$ nm.
- 2) Dále nastavte délku měřené trasy (větší než je celková sestavená trasa), dobu průměrování (určuje, jak dlouho se bude trasa měřit) a další potřebné parametry podle tabulky 7.2. Především dbejte zřetel na velikost mrtvé zóny, aby vám nepřekrývala měřené komponenty.

Tab. 7.2: Parametry pro nastavení reflektometru [6, 19]

Šířka pulsů [ns]	Délka měřícího pulsů [m]	Mrtvá zóna [m]
5	0,5	0,75
10	1	1,5
20	2	3
50	5	7,5
100	10	15

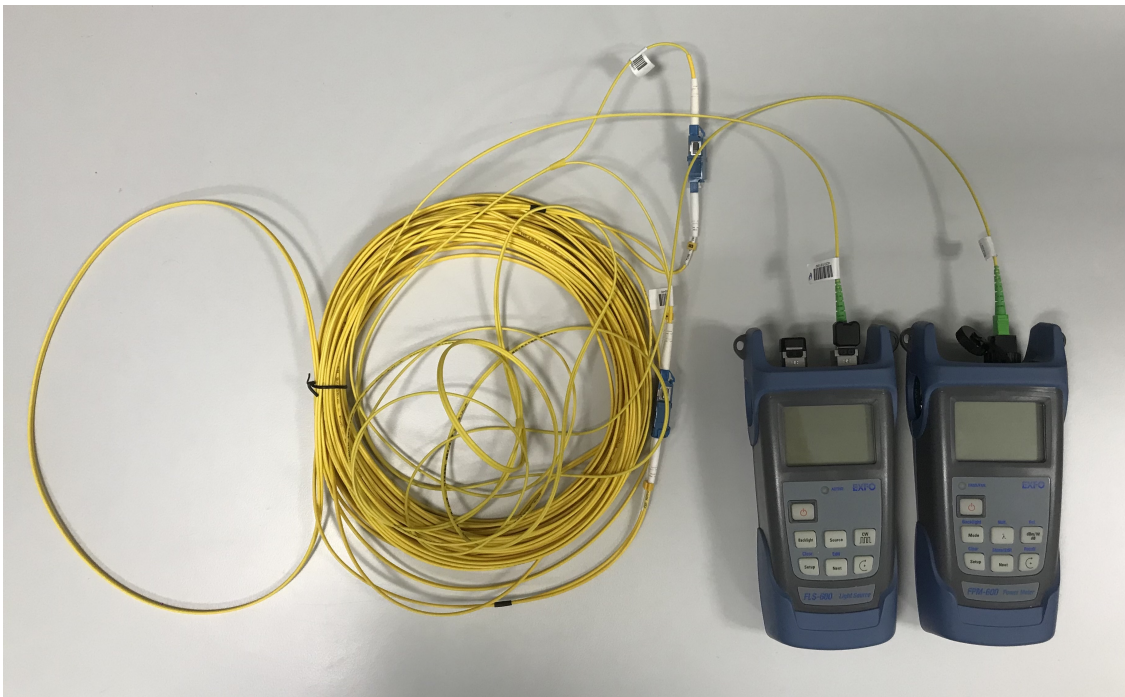
Poznámka: Šířku vysílaných pulsů volte tak, aby nebyl pulz příliš dlouhý/krátký a nedošlo tak ke zkreslenému měření! Parametry nastavte tak, aby byla měřená trasa co nejlépe viditelná a detekovatelná.

- 3) K reflektometru připojte předřadné vlákno a za něj měřenou optickou trasu.
- 4) Měření optické trasy proveďte z obou směrů a také změřte útlumové ztráty pro ohyby jako u přímé metody (v nastavení si spusťte měření v reálném čase a vyzkoušejte si pokles útlumu při ohnutí kabelu v konkrétním bodě na trase. Na křivce reflektogramu nastane pokles a bude identifikovatelné, v jakém úseku ohyb nastal).

- 5) Na reflektogramu jednotlivé události analyzujte a zhodnoťte do závěru. Je nutné, abyste si z událostí na měřené trase vypočítali délku měřené trasy, je to potřebné k výpočtu měrného útlumu.
- 6) Optickou trasu změřte i pro vlnovou délku $\lambda = 1550$ nm.
- 7) Vypočítejte měrný útlum optické měřené trasy (pouze pro trasu bez ohybu).
- 8) Do závěru zhodnoťte jednotlivá měření a porovnejte použité metody pro měření útlumu.

7.1.4 Výsledky měření

Sestavená trasa (obr. 7.5), pro **měření útlumu přímou metodou (metoda vložených ztrát)**, se skládá ze zdroje záření, měřice optického výkonu a měřené optické trasy. Měřená optická trasa obsahuje 44 metrů optického kabelu s 6 konektory LC a 2 konektory SC. Na trase je přibližně uprostřed smyčka pro simulaci ohybu. K tomu byly vymodelovány přípravky o velikosti 1-4 cm, vytištěné na 3D tiskárně. Pro stanovení reference byl použit optický kabel s délkou 2 m.



Obr. 7.5: Pracoviště pro měření útlumu metodou vložených ztrát

Stanovení referenčních výkonů:

Referenční výkon P_1 pro 1310 nm: **0,22 dBm**

Referenční výkon P_1 pro 1550 nm: **0,55 dBm**

Pro měření metodou vložných ztrát byl stanoven referenční výkon P_1 pro obě vlnové délky. Měřená optická trasa byla změřena pro oba směry (pro směr A - B a B - A) a její hodnoty jsou v tabulce 7.3.

Tab. 7.3: Naměřené hodnoty výkonu přímou metodou

Ohyb	Měření pro trasu A - B		Měření pro trasu B - A	
	1310 nm [dBm]	1550 nm [dBm]	1310 nm [dBm]	1550 nm [dBm]
Žádný	-0,04	0,34	-0,16	0,28
4 cm	-0,04	0,34	-0,16	0,28
3 cm	-0,04	0,34	-0,16	0,28
2 cm	-0,05	0,19	-0,16	0,12
1,5 cm	-0,79	-5,68	-1,44	-5,97
1 cm	-0,84	-9,27	-1,51	-9,4

Naměřené hodnoty jsou v tabulce 7.3 i pro simulované ohyby 4 cm a 3 cm. Tyto ohyby ale nevyžadují žádné zvýšení útlumu, nemají vliv na přenos optického impulsu a nejsou tedy součástí úlohy.

Z referenčních výkonů a výkonů měřené trasy se vypočítá zdánlivý útlum měřené trasy pro každý směr. Výpočet, pro metodu vložných ztrát, je dán:

$$u(1310) = P_1 - P_2 = 0,22 + 0,04 = 0,26dB. \quad (7.4)$$

Tab. 7.4: Vypočítané hodnoty útlumu pro přímou metodu

Ohyb	Výpočet pro trasu A - B		Výpočet pro trasu B - A	
	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]
Žádný	0,26	0,21	0,38	0,27
4 cm	0,26	0,21	0,38	0,27
3 cm	0,26	0,21	0,38	0,27
2 cm	0,27	0,36	0,38	0,43
1,5 cm	1,01	6,23	1,68	6,52
1 cm	1,06	9,82	1,73	9,95

Hodnoty zdánlivých útlumů jsou pro různé ohyby vypočítané v tabulce 7.4. Dle tabulky 7.4 jde vidět, že zvýšení útlumu nastává až při ohybu 2 cm a menším. Vyšší ohyby nemají na přenos vliv a nejsou tedy zásadní pro měřenou trasu. Dále je i vidět, že vlnová délka 1550 nm je daleko citlivější na ohyby, dochází u ní totiž při ohybu k daleko vyšším útlumovým ztrátám, než při vlnové délce 1310 nm.

Útlum způsobený ohybem při $\lambda = 1310$ nm:

Ohyb 2 cm = 0,005 dB

Ohyb 1,5 cm = 1,025 dB

Ohyb 1 cm = 1,075 dB

Útlum způsobený ohybem při $\lambda = 1550$ nm:

Ohyb 2 cm = 0,155 dB

Ohyb 1,5 cm = 6,135 dB

Ohyb 1 cm = 9,645 dB

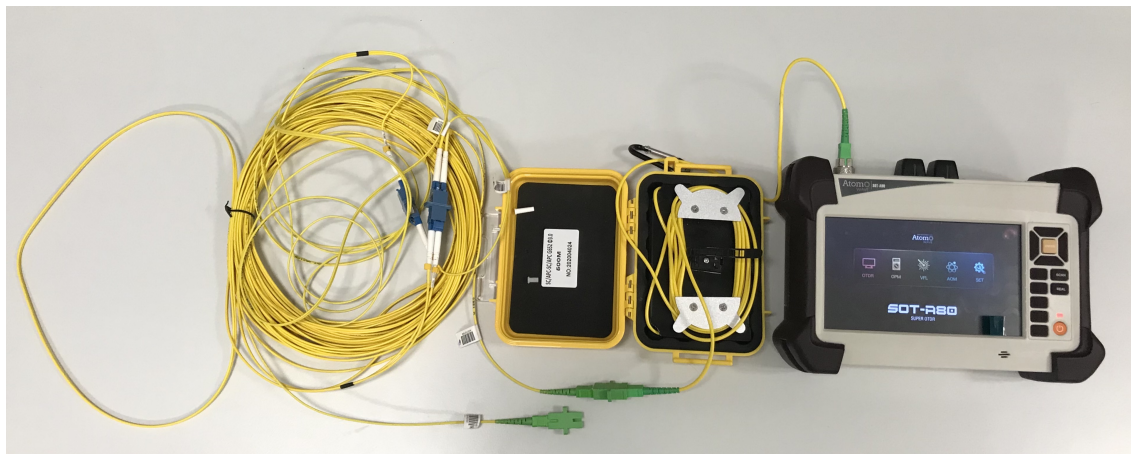
Pro výpočet měrného útlumu měřené optické trasy při vlnové délce $\lambda = 1310$ nm, bez simulace ohybu na trase, použijeme výpočet:

$$\alpha(1310) = \frac{u(1310)}{l} = \frac{0,32}{44} = 7,273 \cdot 10^{-3} dB/m, \quad (7.5)$$

a pro výpočet při vlnové délce $\lambda = 1550$ nm:

$$\alpha(1550) = \frac{u(1550)}{l} = \frac{0,24}{44} = 5,455 \cdot 10^{-3} dB/m. \quad (7.6)$$

Další sestavená trasa (obr. 7.6) je pro **měření útlumu reflektometrickou metodou (OTDR)**. Trasa obsahuje měřící přístroj OTDR, předřadné vlákno (500 m) a měřenou optickou trasu jako u přímé metody.



Obr. 7.6: Pracoviště pro měření útlumu metodou reflektometrickou

Pro měření útlumu metodou reflektometrickou byl použit reflektometr OTDR. Na reflektometru byly pro obě vlnové délky nastaveny hodnoty:

- Délka měřeného vlákna (rozsahu) **1 km**.
- Šířka měřícího pulsu **5 ns**.
- Doba průměrování (měření) **30 s**.

Měření bylo provedeno pro obě vlnové délky a pro oba směry optické trasy (A - B i B - A). Pro měření byly využity kurzory a dvoubodová aproximační metoda. Měřením se rovnou naměřil zdánlivý útlum celé měřené trasy (bez předřadného vlákna) a hodnoty jednotlivých tras jsou v tabulce 7.5.

Pro měření byly použity přípravky pro simulaci ohybu už jen o velikosti 2 cm, 1,5 cm a 1 cm, protože větší průměry nemají na trasu vliv. Nedochází u nich ke zvýšení útlumu a nejsou tedy znatelné na reflektogramu. Pro jednotlivá měření ohybu byly taktéž použity kurzory a dvoubodová aproximační metoda.

Tab. 7.5: Naměřené hodnoty útlumu reflektometrickou metodou

Ohyb	Měření pro trasu A - B		Měření pro trasu B - A	
	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]
Žádný	0,324	0,216	0,338	0,278
2 cm	0,364	0,349	0,383	0,428
1,5 cm	1,125	4,216	1,501	4,993
1 cm	1,301	4,79	1,727	7,264

Útlum způsobený ohybem při $\lambda = 1310$ nm:

Ohyb 2 cm = 0,043 dB

Ohyb 1,5 cm = 0,982 dB

Ohyb 1 cm = 1,183 dB

Útlum způsobený ohybem při $\lambda = 1550$ nm:

Ohyb 2 cm = 0,142 dB

Ohyb 1,5 cm = 4,358 dB

Ohyb 1 cm = 5,78 dB

Pro měření útlumu pro různé průměry ohybu došlo k znatelnému poklesu na křivce reflektogramu. Bylo jasně identifikovatelné, že v daném úseku na měřené trase došlo k nežádoucí nehomogenitě vlákna. Pro ohyb o velikosti 1,5 cm a 1 cm došlo k šumu a zbytek měřené trasy byl zkreslený.

Pro výpočet měrného útlumu měřené trasy, tedy pro metodu reflektometrickou, je výpočet pro vlnovou délku $\lambda = 1310$ nm:

$$\alpha(1310) = \frac{u(1310)}{l} = \frac{0,331}{44} = 7,523 \cdot 10^{-3} dB/m, \quad (7.7)$$

a pro výpočet pro vlnovou délku $\lambda = 1550$ nm:

$$\alpha(1550) = \frac{u(1550)}{l} = \frac{0,247}{44} = 5,614 \cdot 10^{-3} dB/m. \quad (7.8)$$

Tab. 7.6: Hodnoty skutečného útlumu měřené trasy pro obě metody

Ohyb	Přímá metoda		Reflektometrická metoda	
	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]
Žádný	0,32	0,24	0,331	0,247
2 cm	0,325	0,395	0,374	0,389
1,5 cm	1,345	6,375	1,313	4,605
1 cm	1,395	9,885	1,514	6,027

Naměřené hodnoty skutečného útlumu jsou v tabulce 7.6. Jedná se o aritmetické průměry z naměřených hodnot pro oba směry. Naměřené hodnoty jsou skoro totožné pro obě použité metody. V případě měření bez ohybu se od sebe hodnoty liší zanedbatelně. Při simulaci ohybu už jsou odchylky větší, což mohlo mít za následek nepřesný ohyb vlákna při měření. Nepřesné hodnoty mohly vzniknout také odchylkami měřících přístrojů, předřadným vláknem a dalšími prvky zvolenými k měření. Navíc se s měřenou trasou pohybovalo, což mohlo také ovlivnit výsledky měření.

7.1.5 Použité měřící přístroje

Zdroj záření – EXFO FLS-600

Měřič optického výkonu – EXFO FPM-600

Optický reflektometr OTDR – Atomo wave SOT-A80

7.2 Měření disperzí analyzátozem FTB-5700

7.2.1 Zadání

- 1) Seznamte se s teorií pro měření disperzí. Dále se seznamte s obsluhou testovací jednotky FTB-200 a analyzátozem FTB-5700.
- 2) Změřte analyzátozem chromatickou a polarizační vidovou disperzi pro jednotlivé trasy.
- 3) Výsledky zhodnoťte a odůvodněte do závěru.

7.2.2 Úvod

Disperze je ztráta v optických vláknech, kde vysílaný impuls na začátku vlákna se nerovná impulsu na konci vlákna. Dochází k jisté deformaci a zpoždění vysílaných impulsů v optickém vlákně. To, jak je přijatý impuls na konci vlákna, se disperze dělí na disperzi vidovou, chromatickou a polarizační vidovou.

Tab. 7.7: Limitní hodnoty CD a PMD

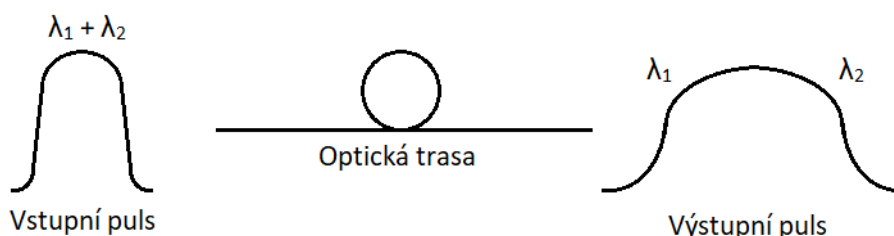
Bitrate [Gbit/s]	SDH	SONET	Limit CD [ps/nm]	Limit PMD [ps]
2,5	STM16	OC48	18 816	40
10	STM64	OC192	1 176	10
40	STM256	OC768	73,5	2,5

Vidová disperze nastává v mnohavidových vláknech a způsobuje zpoždění vysílaných impulsů (vidů) na konci vlákna. Dochází k rozdílným časům, kdy impulsy nedorazí současně do konce.

Chromatická disperze (CD) je způsobena rozdílnou rychlostí šířících spektrálních složek. Jedná se o koeficient optického vlákna, protože závisí na materiálu a celkové struktuře vlákna. Chromatická disperze je také závislá na vlnové délce vlákna, při které je uskutečněn přenos.

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad (7.9)$$

Koeficient chromatické disperze $D(\lambda)$ [$\frac{ps}{nm \cdot km}$] je dán skupinovým zpožděním signálu t_g při přenosu na vlnové délce λ .



Obr. 7.7: Chromatická disperze v optickém vláknu [12]

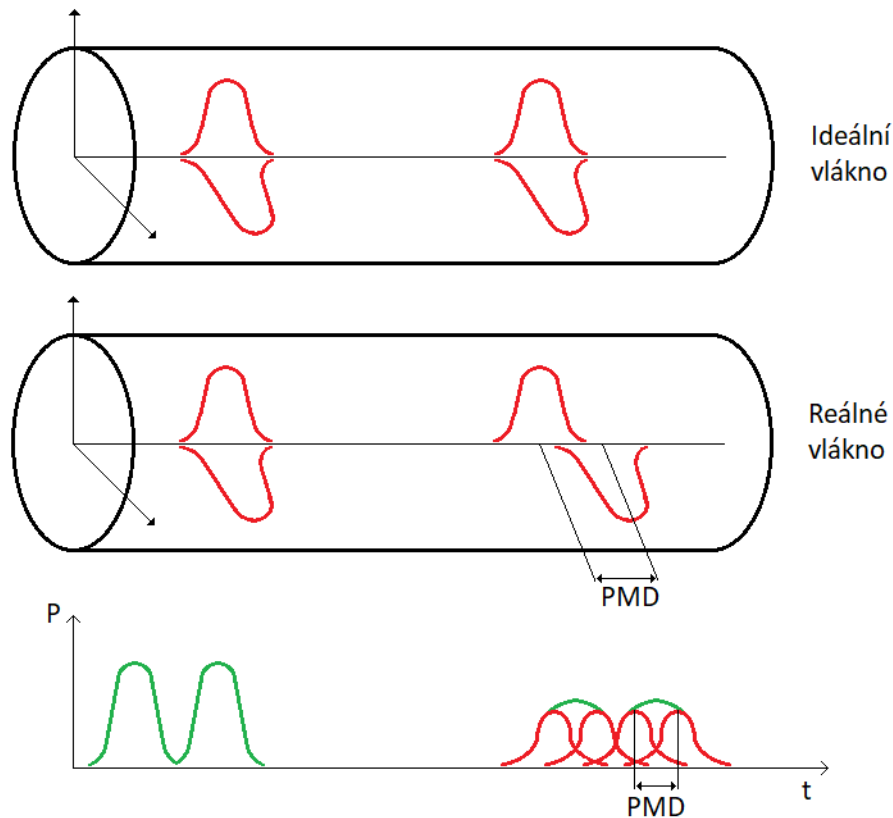
Polarizační vidová disperze (PMD) je určité zkreslení optického pulsu v optických vláknech a nastává kvůli rozlišným délkám trasy dvou navzájem kolmých polarizačních rovin. Jednotlivé impulsy se tedy nešíří současně a díky tomu vznikne zpoždění mezi nimi. Toto zpoždění vyjadřuje koeficient PMD, který udává zpoždění signálu $\Delta\tau$ ku délce měřené trasy l . Rovnice je použitelná pouze pro krátké trasy, přibližně do 10 km, kde je PMD téměř lineární.

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l} \quad (7.10)$$

Pro výpočet koeficientu PMD, kde je trasa delší jak 10 km, je dána rovnice:

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}}. \quad (7.11)$$

Polarizační vidová disperze je způsobená zejména výrobními nedokonalostmi, kde mohou vznikat různé asymetrie optického vlákna. PMD je také závislá na montáži optické trasy a na jejím namáhání.



Obr. 7.8: Polarizační vidová disperze v optickém vláknu [3, 12]

Úloha je připravena pro měření disperze chromatické (CD) a polarizační vidové (PMD). K měření je využit jednostranný kompaktní analyzátor FTB-5700, který je jedinečný na trhu. Je plně automatizovaný a dokáže měřit z jednoho konce obě námi měřené disperze v jednom kroku. Jeho funkce spočívá na Fresnelově odrazu od konce vlákna měřené trasy. Měří se jednovidová optická vlákna na vlnových délkách v rozmezí 1475-1626 nm. Velikost CD a PMD se vyhodnocuje v závislosti na přenosových rychlostech jako vyhovující nebo nevhovující. Analyzátor FTB-5700 je určen zejména pro testování optických vláken ITU-T G.65x podle standardu ITU-T G.650.3.



Obr. 7.9: Disperzní analyzátor FTB-5700 [20]

Testovací jednotka FTB-200 slouží jako rozhraní pro měření CD a PMD s pomocí analyzátoru FTB-5700 (modul). Je vybavena operačním systémem Windows CE s aplikací ToolBox CE, kde se dané měření provádí. Moduly se do testovací jednotky vkládají do slotů, které jsou na horní straně nad displejem. Jednotka FTB-200 je dotyková a k její obsluze se využívá dotykové pero (umístěno vedle slotů pro vkládání modulů).



Obr. 7.10: Testovací jednotka FTB-200 [20]

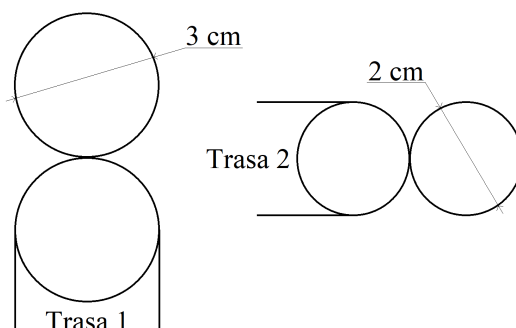
Požadavky pro měření s analyzátozem FTB-5700 [20]:

- Optické vlákno musí být zakončené konektorem UPC.
- Optické vlákno nesmí být delší než 120 km.
- Optické vlákno nesmí mít filtr na vlnové délce $\lambda = 1550$ nm.

7.2.3 Postup měření

Při měření je velice důležité dbát na čistotu a především dodržovat bezpečnost. Se všemi měřicími přístroji a optickými prvky zacházejte opatrně a řiďte se pokyny podle postupu měření. Pokud dojde k znečištění některých optických prvků, tak budou naměřené hodnoty nepřesné. Bude tedy potřeba prvky očistit pomocí isopropylalkoholu a hadříku, který nepouští vlákna.

- 1) Než zapnete testovací jednotku FTB-200, tak se ujistěte, že se v ní nachází modul pro měření. Modul se v žádném případě nesmí vytahovat/vkládat při zapnutém přístroji, nebo při měření.
- 2) Po zapnutí jednotky se spustí aplikace ToolBox a následně se zvolí modul FTB-5700 pro měření CD a PMD.
- 3) V nastavení si zkontrolujte nastavené parametry: měrné jednotky (kilometry), prahové hodnoty CD a PMD (výchozí), rozsah vlnových délek (výchozí) a typ optického vlákna, které měříte.
- 4) Po zkontrolování a nastavení veškerých parametrů změřte delší optickou trasu alespoň pro 40 km a ověřte, jestli je měřená trasa vyhovující pro přenosové rychlosti 2,5 Gbit/s, 10 Gbit/s a 40 Gbit/s. Při spuštění měření deformujte (způsobte fluktuace ve vláknu) koncové vlákno zakončené konektorem UPC. Přibližně po 30 vteřinách měření PMD vás přístroj bude varovat, že detekoval výkyvy polarizace na vláknu. Varování potvrďte a měření se přepne do komplexnějšího režimu pro měření PMD. Naměřené hodnoty zapište do tabulky.
- 5) Dále změřte kratší trasu dlouhou 20 km a také ověřte, jestli je vyhovující pro přenosové rychlosti 2,5 Gbit/s, 10 Gbit/s a 40 Gbit/s. Při měření způsobte taktéž fluktuace vlákna a proveďte stejný postup jako u měření delší trasy.
- 6) Na kratší trase si pomocí přípravku pro měření CD a PMD vyzkoušejte vlivy způsobené ohybem. Utvořte meandry pro trasu 1 (alespoň 2 smyčky) a změřte jí. To stejné proveďte i pro trasu 2 a hodnoty zapište do tabulky.



Obr. 7.11: Trasy na přípravku pro měření CD a PMD

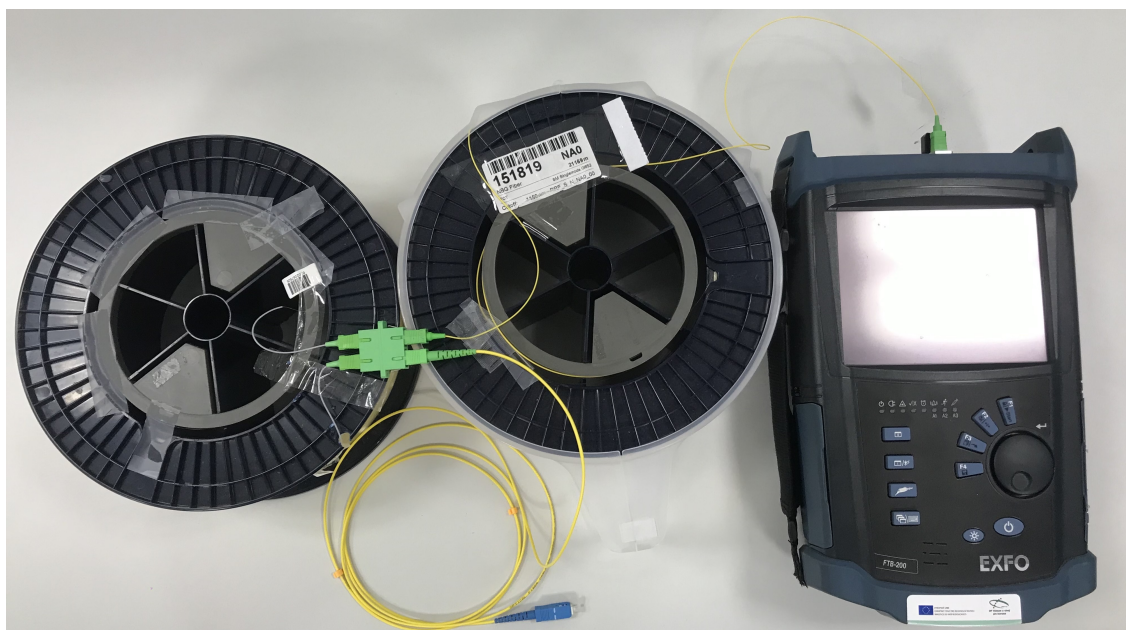
7) Určete, jak se jednotlivé parametry CD a PMD sčítají s narůstající trasou a jaký je jejich průběh. Dále vypočítejte koeficienty pro chromatickou a polarizační vidovou disperzi.

8) Každou měřenou trasu zhodnoťte do závěru a uveďte jednotlivé vlivy na parametry CD a PMD.

7.2.4 Výsledky měření

Sestavená trasa pro měření chromatické disperze (CD) a polarizační vidové disperze (PMD) pro delší trasu je na obr. 7.12. Je sestavena z měřicí soupravy EXFO FTB-200, dvou 20 kilometrových cívek a dvoumetrového koncového kabelu s konektorem UPC na konci trasy. Parametry pro měření CD a PMD byly nastaveny:

- Měrné jednotky nastaveny na **kilometry**.
- Prahové hodnoty podle tabulky 7.7 nastaveny na **výchozí**.
- Rozsah vlnových délek nastaven na **1475-1626 nm (výchozí)**.
- Měřený kabel nastaven na **standardní G.652 NDSF**.



Obr. 7.12: Pracoviště pro měření CD a PMD delší trasy

Sestavená trasa pro měření chromatické disperze (CD) a polarizační vidové disperze (PMD) pro kratší trasu je na obr. 7.12. Je sestavena z měřicí soupravy EXFO FTB-200, jedné 20 kilometrové cívky a dvoumetrového koncového kabelu s konektorem

UPC na konci vedení. K tomuhle měření byl vytvořen a vytisknut přípravek pro simulaci ohybů (tvoření meandrů), který je konstruován pro ohyby 3 cm a 2 cm. Nastavené parametry byly u měření CD a PMD pro kratší trasu totožné jako u delší trasy.



Obr. 7.13: Pracoviště pro měření CD a PMD kratší trasy

V tabulce 7.8 jsou naměřené hodnoty pro chromatickou disperzi jednotlivých tras. Z naměřených hodnot je patrné, že měřená trasa nemá příliš velký vliv na ohyby trasy. Ani při deformování trasy nevykazovala chromatická disperze výkyvy a měření proběhlo v pořádku. Tabulka 7.8 dále obsahuje vyhodnocení limitních hodnot CD pro jednotlivé rychlosti (V = vyhovující, N = nevhovující). Pro přenosové rychlosti 40 Gbit/s a vyšší jsou námi měřené trasy nevhovující.

Tab. 7.8: Tabulka hodnot CD pro měřenou trasu

Měřená trasa	CD [ps/nm]	2,5 Gbit/s	10 Gbit/s	40 Gbit/s
Delší trasa (42,179 km)	684,85	V	V	N
Kratší trasa (21,153 km)	346,35	V	V	N
Kratší trasa + trasa 1	346,45	V	V	N
Kratší trasa + trasa 2	346,80	V	V	N

Pro stanovení koeficientu CD, který je určen skupinovým zpožděním při přenosu na vlnové délce 1550 nm vztažený na 1 km měřené trasy, je výpočet:

$$D(1550) = \frac{dt_g(1550)}{d(1550)} = \frac{684,85}{42,179} = 16,24ps/(nm \cdot km). \quad (7.12)$$

Tab. 7.9: Vypočtené hodnoty koeficientu CD pro 1550 nm

Měřená trasa	$D(1550) [\frac{ps}{nm \cdot km}]$
Delší trasa (42,179 km)	16,24
Kratší trasa (21,153 km)	16,37
Kratší trasa + trasa 1	16,38
Kratší trasa + trasa 2	16,4

V tabulce 7.10 jsou naměřené hodnoty pro polarizační vidovou disperzi jednotlivých tras. Z naměřených hodnot je vidět, že vlivem ohybů na trase dochází ke zpoždění mezi jednotlivými impulsy a hodnota PMD roste. Má totiž vliv na montáž trasy a ohyby tedy způsobují větší zpoždění mezi jednotlivými impulsy. Při deformaci kabelové trasy došlo během měření k výkyvům polarizace a měření bylo následně přepnuto do komplexnějšího měření na 10 minut. Hodnota PMD je tedy háklivá na veškeré materiálové asymetrie optického vlákna. V tabulce 7.10 jsou také vyhodnoceny limity pro jednotlivé přenosové rychlosti. Ve všech případech jsou hodnoty PMD vyhovující (V).

Tab. 7.10: Tabulka hodnot PMD pro měřenou trasu

Měřená trasa	PMD [ps]	2,5 Gbit/s	10 Gbit/s	40 Gbit/s
Delší trasa (42,179 km)	0,44	V	V	V
Kratší trasa (21,153 km)	0,22	V	V	V
Kratší trasa + trasa 1	0,24	V	V	V
Kratší trasa + trasa 2	0,25	V	V	V

Pro stanovení koeficientu PMD pro větší vzdálenosti, kde jsou trasy dlouhé desítky kilometrů, je stanoven výpočet:

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} = \frac{0,44}{\sqrt{42,179}} = 0,0678ps/\sqrt{km}, \quad (7.13)$$

kde koeficient udává zpoždění přenášeného impulsu ku 1 km měřené trasy. Délka l je pod odmocninou, protože při delší trase není PMD v optickém vláknu lineární.

Tab. 7.11: Vypočtené hodnoty koeficientu PMD

Měřená trasa	PMD [ps/ \sqrt{km}]
Delší trasa (42,179 km)	0,0678
Kratší trasa (21,153 km)	0,478
Kratší trasa + trasa 1	0,0522
Kratší trasa + trasa 2	0,0544

7.2.5 Použité měřicí přístroje

Testovací jednotka – EXFO FTB-200

Disperzní analyzátor – EXFO FTB-5700 (modul)

Závěr

V práci jsou shrnuty a nastíněny základy optiky a parametry pro přenos optického signálu. Dále pak jednotlivé pasivní prvky, které se pro něj využívají. Jedná se o optická vlákna, přes která je přenos uskutečněn v podobě elektromagnetických vln o velmi vysokých kmitočtech. Rozebrány jsou i jednotlivé optické sítě, jejich měření a základní parametry optických sítí z pohledu fyzické vrstvy. Teoretická část práce se věnuje rozбором problematiky jednotlivých metod pro měření konkrétních parametrů a jednotlivým postupům k docílení výsledků.

Praktická část se zabývá návrhem dvou laboratorních úloh pro měření útlumu a disperzí. První laboratorní úloha je navržena pro měření útlumu přímou a reflektometrickou metodou. Pro úlohu byly vymodelovány a vytisknuty přípravky na 3D tiskárně k simulaci ohybu na měřené optické trase. Měření útlumu je realizováno pro měření na vlnových délkách 1310 a 1550 nm. Laboratorní úloha slouží k celkovému měření útlumu a porovnání jednotlivých výsledků mezi použitými metodami. Druhá laboratorní úloha pojednává o disperzích a součástí je i jejich měření. Pro úlohu byly taktéž vytisknuty přípravky pro simulaci ohybu a také jeden přípravek pro vytvoření meandrů. U měření disperzí byl využit analyzátor FTB-5700, který je jedinečný svými vlastnostmi, protože umí měřit CD a PMD současně. Úlohy jsou koncipovány pro rozšíření znalostí a lepší pochopení dané problematiky.

Literatura

- [1] PASCHOTTA, Rüdiger. Photonics. In: *RP-photonics* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <<https://www.rp-photonics.com>>.
- [2] PASCHOTTA, Rüdiger. Optics. In: *RP-photonics* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <<https://www.rp-photonics.com>>.
- [3] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. Brno: Code Creator, 2015 [cit. 2021-03-01]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <<https://publi.cz/books/185/Impresum.html>>.
- [4] PUIU, Tibi. Home Other Feature Post What exactly is a photon? Definition, properties, facts. In: *Zmescience* [online]. 2017 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <<https://www.zmescience.com/science/>>.
- [5] Fotony. In: *Kof.zcu.cz* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <<https://kof.zcu.cz/st/dp/horsky/html/2fotony.html>>.
- [6] FILKA, Miloslav, 2017. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [7] DAGHK. *daghk.cz* [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <<http://www.daghk.cz/opticke-site>>.
- [8] Jak funguje optický konektor? *FOCC* [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <<http://cz.opticalpatchcable.com/info/>>.
- [9] Optické konektory, jejich typy a možnosti instalace na vlákno - 2020. In: *YouTube* [online]. 14. 5. 2020 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <<https://www.youtube.com/watch?v=9cF4g9ioSRY>>. Kanál uživatele alternetivo1.
- [10] TRICKER, Ray. *Optoelectronic and Fiber Optic Technology*. Oxford, 2002. ISBN 0 7506 5370 1.
- [11] LARRY. Types of Optical Fiber Dispersion and Compensation Strategies. *FS community* [online]. 2020 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <<https://community.fs.com/blog/>>.
- [12] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMČEK. *Měření chromatické a polarizační vidové disperze jednovidových optických tras* [online]. 5 s. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <<https://adoc.pub/>>.

- [13] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. *Optické přístupové sítě a přípojky FTTx*. Praha: ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05463-5.
- [14] ŠVECOVÁ, Miroslava. *Počítačové sítě Základní pojmy* [online]. 16. slajd. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <<https://slideplayer.cz/slide/5632321/>>.
- [15] FILKA, Miloslav. *Přenosová média*. Brno: Vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-214-4444-7.
- [16] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMČEK. *Chromatická disperze jednovlákenných optických vláken a její měření* [online]. 5 s. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <<https://adoc.pub/>>.
- [17] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMČEK. *Nová metoda měření PMD optických kabelových tras* [online]. 3 s. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <<https://doczz.cz/doc/268173/>>.
- [18] KOSOUR, Pavel. *Měření optických kabelových tras - přímá metoda*. PROFiber Networking s.r.o. Trnava. Dostupné z: <<https://www.profiber.eu/cz/>>.
- [19] KOSOUR, Pavel. *Měření optických kabelových tras - reflektometr*. PROFiber Networking s.r.o. Trnava. Dostupné z: <<https://www.profiber.eu/cz/>>.
- [20] BULL, Stephen. *Uživatelská příručka EXFO FTB-5700 pro FTB-200*. Kanada. W02007/036051. Zapsáno 9.1.2009.

Seznam symbolů a zkratek

AON	aktivní optická síť – Active Optical Network
APC	úhlový fyzický kontakt – Angled Physical Contact
CD	chromatická disperze – Chromatic Dispersion
CWDM	hrubé multiplexování vlnové délky – Coarse Wavelength-Division Multiplexing
c	rychlost světla ve vakuu
DSLAM	digitální účastnický multiplexor – Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DWDM	husté multiplexování vlnové délky – Dense Wavelength-Division Multiplexing
$D(\lambda)$	koeficient chromatické disperze
E	energie fotonů
FDM	frekvenční multiplex – Frequency Division Multiplex
FFT	rychlá Fourierova transformace – Fast Fourier Transform
FTTB	vlákno do budovy – Fiber To The Building
FTTC	vlákno do skříně – Fiber To The Cabinet
FTTD/U	vlákno ke stolu/uživateli – Fiber To The Desk/User
FTTH	vlákno do domácnosti – Fiber To The Home
FTTN	vlákno do uzlu – Fiber To The Node
FTTO	vlákno do kanceláře – Fiber To The Office
FTTx	vlákno do x – Fiber To The x
f	frekvence
GINTY	obecná interferometrická metoda měření PMD – General Interferometric Analysis
h	Planckova konstanta

INTY	interferometrická metoda měření PMD – Interferometry Analysis
ISP	poskytovatel internetového připojení – Internet Service Provider
ITU-T	mezinárodní telekomunikační unie – International Telecommunication Union
LAN	lokální datová síť – Local Area Network
LED	elektroluminiscenční dioda – Light-Emitting Diode
<i>l</i>	délka
MM	mnohavidová optická vlákna – Multi-Mode
<i>m</i>	hmotnost fotonů
<i>n</i>	index lomu
OAN	optická přístupová síť – Optical Access Network
ODN	optická distribuční síť – Optical Distribution Network
OLT	optické linkové zakončení – Optical Line Termination
ONU	optická síťová jednotka – Optical Network Unit
ONT	optické síťové zakončení – Optical Network Termination
OTDR	reflektometrická metoda zpětného rozptylu – Optical Time Domain Reflectometry
PC	fyzický kontakt – Physical Contact
PMD	polarizační vidová disperze – Polarization Mode Dispersion
PON	pasivní optická síť – Passive Optical Network
P2MP	mnohabodové – Point-to-MultiPoint
P2P	bod-bod – Point-to-Point
<i>P</i>	výkon
<i>P₀</i>	vstupní výkon
<i>P_{tot}(λ)</i>	spektrální závislost celkového výkonu
<i>P(λ)</i>	výkon o dané polarizaci

p	hybnost fotonů
$R(\lambda)$	spektrální závislost změny polarizace
S	koeficient zpětného rozptylu
SDH	synchronní digitální hierarchie – Synchronous Digital Hierarchy
SDM	prostorový multiplex – Space Division Multiplex
SM	jednovidová optická vlákna – Single-Mode
SNR	odstup signálu od šumu – Signal to Noise Ratio
SONET	synchronní optická síť – Synchronous Optical Network
STM	synchronní transportní modul – Synchronous Transport Module
TINTY	tradiční interferometrická metoda měření PMD – Traditional Interferometry Analysis
t_g	skupinové zpoždění signálu
$u(\lambda)$	útlum
v	rychlost světla v daném prostředí
v_{sk}	skupinová rychlost šíření signálu
WDM	vlnový multiplex – Wavelength Division Multiplex
xDSL	digitální účastnické přípojky – Digital Subscriber Line
α	střední hodnota koeficientu vlákna
α_r	činitel ztrát Rayleighovým rozptylem
$\Delta\tau$	zpoždění signálu
λ	vlnová délka

A Obsah elektronické přílohy

V elektronické příloze jsou dva protokoly v pdf a dvě složky obsahující šablonu v latexu pro případnou úpravu protokolů. První protokol je laboratorní úloha pro měření útlumu přímou a reflektometrickou metodou. Druhý protokol je laboratorní úloha pro měření disperzí analyzátozem FTB-5700. Obsahem složek jsou ve většině nepotřebné soubory a jiné složky. Jsou ale potřebné pro správnou funkci šablony, ale nejsou zásadní pro případnou úpravu. Součástí uvedeného kořenového adresáře jsou uvedeny pouze potřebné soubory.

/Protokoly	kořenový adresář přiloženého archivu
├── Disperze	složka se šablonou
│ ├── sablona.tex	šablona pro spuštění protokolu
│ ├── text	složka se souborem k editaci protokolu
│ │ └── protokol.tex	soubor k editaci protokolu
│ └── obrazky	
├── Utlum	složka se šablonou
│ ├── sablona.tex	šablona pro spuštění protokolu
│ ├── text	složka se souborem k editaci protokolu
│ │ └── protokol.tex	soubor k editaci protokolu
│ └── obrazky	
├── Lab-utlum	laboratorní úloha v pdf
└── Lab-disperze	laboratorní úloha v pdf