

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

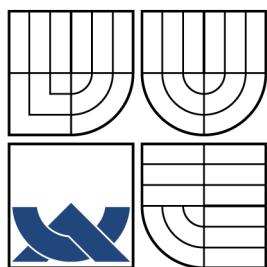
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

KVALITA SLUŽEB V OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH

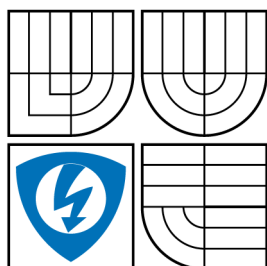
DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. RADIM ŠIFTA



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

KVALITA SLUŽEB V OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH QUALITY OF SERVICES IN OPTICAL ACCESS NETWORKS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. RADIM ŠIFTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2015

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na optické přístupové sítě. Zabývá se problematikou přenosových parametrů fyzické vrstvy, jejich negativním dopadem na parametry kvality služeb a možnostmi redukce jejich vlivu pomocí polarizačního multiplexování. První a druhá kapitola obsahují teoretické podklady nezbytné pro pochopení navazující části práce. Třetí kapitola zahrnuje praktickou část, ve které jsou nejprve zhodnoceny optické trasy v České republice z hlediska polarizační vidové disperze, která spolu s vložitelným útlumem představuje hlavní limitující parametr vysokorychlostních optických sítí. V následující části práce je vyhodnoceno měření vlivu teploty na změny polarizační vidové disperze pasivních prvků optických přístupových sítí a také vliv teplotních změn na polarizačně multiplexovaný signál. Za účelem zdvojnásobení šířky přenosového pásma a redukce vlivu polarizační vidové disperze na kvalitu služeb byly vytvořeny dva simulační modely optických přístupových sítí využívající polarizačního multiplexování. Tyto teoretické výstupy byly ověřeny praktickým měřením v laboratoři a následně i na reálné trase. V závěrečné části práce byl na základě získaných poznatků vytvořen návrh širokopásmové optické přístupové sítě založené na vlnovém a polarizačním multiplexování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polarizace, polarizační multiplex, FTTx, PMD, PON, BER, PER, QoS

ABSTRACT

The thesis focuses on the optical access networks and deals with the issue of transmission parameters of the physical layer, their negative impact on the quality of the services parameters and the possibilities of reducing their effect using the polarization multiplexing. The first and second chapter describe the theoretical background necessary for understanding the subsequent parts. The third chapter contains the practical part of the thesis. At first the optical routes in the Czech Republic in terms of polarization mode dispersion, which is together with insertion loss the main limiting parameter of high-speed optical networks, are evaluated. In the following part the measuring of the temperature changes effects on the polarization mode dispersion of the passive components and the effect of temperature changes to the polarization multiplexed signal are evaluated. To double the bandwidth and reduce the influence of polarization mode dispersion on the quality of services, the two simulation models of optical access networks using polarization multiplexing were carried out. These theoretical outputs were verified by the practical measurements in the laboratory and subsequently on the real optical route. Finally, a draft of the broadband optical access network based on wavelength and polarization multiplexing was designed based on obtained knowledge.

KEYWORDS

Polarization, polarization multiplex, FTTx, PMD, PON, BER, PER, QoS

ŠIFTA, Radim *Kvalita služeb v optických přístupových sítích*: dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 143 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou doktorskou práci na téma „Kvalita služeb v optických přístupových sítích“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího doktorské 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 doktorské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této doktorské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Nejprve bych rád poděkoval svému vedoucímu dizertační práce panu prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. za odborné vedení v průběhu doktorského studia, podnětné návrhy, trpělivost a ochotu.

Velice rád bych poděkoval také sdružení CESNET, zejména panu Ing. Josefu Vojtěchovi, Ph.D. a panu Mgr. Karlu Slavíčkoví, Ph.D. za technickou podporu a konzultace při realizaci praktického měření.

Dále bych rád poděkoval společnosti PROFiber Networking CZ s. r. o. a panu Ing. Janu Broučkovi, CSc. za konzultace a iniciativní návrhy při řešení dizertační práce.

Děkuji manželce, dcerce, rodičům a celé rodině za podporu a trpělivost, kterou se mnou měli v průběhu doktorského studia.

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>

ACKNOWLEDGEMENT

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

Brno

.....

(author's signature)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OP Výzkum a vývoj
pro inovace

OBSAH

Úvod	12
1 Cíle dizertační práce	14
2 Významné vlastnosti a přenosové parametry optických vláken	15
2.1 Teorie přenosu optickým vláknem	15
2.1.1 Princip šíření signálu v optickém vlákně	17
2.1.2 Index lomu	20
2.1.3 Numerická apertura	20
2.1.4 Dvojlom v optickém vlákně	21
2.1.5 Polarizace světla	22
2.2 Typy optických vláken	25
2.2.1 Vícevidová vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště	26
2.2.2 Vícevidová vlákna s gradientní změnou indexu lomu	26
2.2.3 Jednovidová vlákna	27
2.2.4 Optická vlákna pro speciální účely	30
2.3 Lineární jevy v optických vláknech	31
2.3.1 Útlum optických vláken	31
2.3.2 Lineární rozptyl v optických vláknech	33
2.3.3 Disperze optických vláken	34
2.4 Disperze v optických vláknech	34
2.4.1 Polarizační vidová disperze	36
2.4.2 Chromatická disperze	38
2.5 Nelineární jevy v optických vláknech	40
2.5.1 Jevy druhého řádu	41
2.5.2 Jevy třetího řádu	43
2.5.3 Nelineární rozptyl světla	44
3 Optické přístupové sítě	46
3.1 Základní uspořádání optických přístupových sítí	46
3.1.1 Rozdělení optických přístupových sítí	48
3.2 Standardy optických přístupových sítí	49
3.2.1 Standardy dle ITU-T	50
3.2.2 Standardy dle IEEE	50
3.2.3 NG-PON2	51
3.2.4 WDM-PON	53

3.3	Multiplexní techniky používané v optických přístupových sítích	54
3.3.1	Časový multiplex TDM	55
3.3.2	Vlnový multiplex WDM	56
3.3.3	Ostatní multiplexní techniky	57
3.4	Polarizační multiplex	58
3.4.1	Významné prvky POL-MUX systému	60
3.4.2	Specifické parametry	61
3.5	Parametry QoS v optických přístupových sítích	61
3.5.1	Standards pro měření QoS	61
3.5.2	Q-faktor	62
3.5.3	Bitová chybovost	62
4	Výsledky dizertační práce	63
4.1	Stav optických vláken v ČR z hlediska PMD	63
4.1.1	Vyhodnocení tras	64
4.2	Závislost PMD na teplotě	66
4.2.1	Měření pasivních prvků	66
4.2.2	Analýza naměřených závislostí	67
4.3	Měření vlivu teploty na polarizačně multiplexovaný signál	71
4.3.1	Princip měření	71
4.3.2	Analýza naměřených závislostí	72
4.4	Simulace polarizačního multiplexu	74
4.4.1	Přenos dat a šumu s polarizačním oddělením	75
4.4.2	Oddělení směrů přenosu polarizačním multiplexem	78
4.5	Praktická realizace polarizačního multiplexu	81
4.5.1	Vliv vloženého útlumu na BER	82
4.5.2	Odolnost systému vůči PMD a PDL	84
4.5.3	Odolnost systému vůči jiným vlnovým délkám	86
4.5.4	Částečný polarizační multiplex	88
4.5.5	Přenos dat a šumu využitím polarizačního multiplexu	90
4.5.6	Polarizační multiplex pro oddělení směrů přenosu	93
4.5.7	Porovnání simulací a praktického měření	97
4.5.8	Polarizační multiplex na reálné trase	98
4.6	Návrh širokopásmové optické přístupové sítě WDM-PDM-PON	100
4.6.1	Teoretický popis systému	100
4.6.2	Návrh dynamického polarizačního kontroléru DPC	102
4.6.3	Simulační model	106
4.6.4	Analýza výsledků simulace	110

5 Závěr	116
Seznam symbolů a zkratk	120
Literatura	126
Seznam příloh	132
A Vliv teploty na polarizačně multiplexovaný signál	133
A.1 Změna OSNR při ochlazování	133
A.2 Změna OSNR při oteplování	134
B Vliv útlumu na BER a Propustnost	135
C Polarizační multiplex	136
C.1 EtherSAM – dílčí směry	136
C.2 EtherSAM – obousměrně	137
D Seznam použitých přístrojů	138

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Odraz a lom světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí	18
2.2	Šíření světelných paprsků v optickém vlákně – totální odraz	19
2.3	Šíření optického paprsku jako elektromagnetické vlny	19
2.4	Principiální průřez optickým vláknem	21
2.5	Změny stavu polarizace v optickém vlákně vlivem dvojlomu [61]	22
2.6	Křivka elipticky polarizovaného světla [10]	23
2.7	Poincarého koule [57]	25
2.8	Základní typy optických vláken.	26
2.9	PM vlákna – eliptické, panda, bow-tie [40],[61]	31
2.10	Útlumová charakteristika optického vlákna [8]	32
2.11	Rozdíl mezi lineárními rozptyly	34
2.12	Rozdíl mezi ideálním a reálným optickým vláknem z hlediska DGD [53]	37
2.13	Závislost PMD na délce vlákna a závislost materiálové disperze na vlnové délce	38
2.14	Chromatická disperze jednojáderného vlákna [8]	40
2.15	Chromatická disperze v konvenčním vlákně spolu s materiálovou a vl- novodnou disperzí [8]	40
3.1	Typy sítí FTTx	47
3.2	Základní funkční celky tvořící OAN	47
3.3	Obecné rozdělení optických přístupových sítí	48
3.4	Vývoj standardů PON	49
3.5	Schéma architektury NG-PON2 [23]	53
3.6	Princip časového multiplexu v PON sítích	55
3.7	Princip multiplexu OTDM a WDM	56
3.8	Princip polarizačního multiplexu	59
3.9	Polarizační kontrolér	60
4.1	Porovnání měrného útlumu a disperzního koeficientu pro různé trasy	65
4.2	Princip měření v termokomoře	67
4.3	Závislost PMD na teplotě pro konektorové spoje. Modrý průběh od- povídá ochlazování, červený průběh oteplování	68
4.4	Závislost PMD na teplotě pro vlákna, sváry a rozbočovač. Modrý průběh odpovídá ochlazování, červený průběh oteplování	69
4.5	Sloupcové zobrazení směrodatné odchylky pro měřené vzorky	71
4.6	Blokové schéma měření závislosti úhlu polarizace na teplotě	72
4.7	Spektra multiplexovaného a demultiplexovaného signálu	72
4.8	Prostorové zobrazení závislosti výkonu v polarizačních rovinách na teplotě	73

4.9	Porovnání vlivu ochlazování a oteplování vlákna na OSNR	74
4.10	Blokové schéma zapojení – přenos dat a šumu	75
4.11	Spektra obou signálů před multiplexací a po demultiplexaci	76
4.12	Závislost BER a Q-faktoru pro přenos datového signálu a šumu	77
4.13	Diagramy oka pro různé OSNR – přenos dat a šumu	78
4.14	Blokové schéma zapojení – obousměrný přenos	79
4.15	Spektra signál před a po multiplexaci pro sestupný směr	79
4.16	Závislost BER a Q-faktoru pro obousměrný přenos	81
4.17	Diagramy oka pro různé Δ – obousměrný přenos	81
4.18	Schéma pro měření závislosti vložného útlumu na BER	82
4.19	Závislost BER a propustnosti na vložném útlumu	83
4.20	Vliv PMD emulátoru na celkový útlum	85
4.21	Schéma měření – odolnost vůči jiné vlnové délce	86
4.22	Závislost BER a propustnosti T na spektrální poloze další vlnové délky	88
4.23	Schéma zapojení měření – částečný polarizační multiplex	88
4.24	Závislost BER a propustnosti T pro částečný polarizační multiplex	89
4.25	Schéma měření – přenos datového signálu a šumu	90
4.26	Spektra multiplexovaných a demultiplexovaných signálů	91
4.27	Závislost BER a propustnosti T pro přenos datového signálu a šumu	92
4.28	Schéma měření – polarizační multiplex pro oddělení směrů přenosu	93
4.29	Závislost BER a propustnosti T pro degradování signálu natáčením polarizačních rovin	95
4.30	Závislost datové ztrátovosti signálu na natáčení polarizačních rovin	96
4.31	Porovnání BER pro simulace a reálné měření	98
4.32	Schéma zapojení měření na reálné trase	99
4.33	Blokové schéma WDM-PDM-PON prvního typu	101
4.34	Blokové schéma WDM-PDM-PON druhého typu	102
4.35	Blokové schéma dynamického polarizačního kontroléru	103
4.36	Polarizační elipsa	105
4.37	Schéma simulačního modelu WDM-PDM-PON	106
4.38	Schéma vnitřního zapojení OLT jednotky	107
4.39	Spektra multiplexovaných signálů	108
4.40	Schéma vnitřního zapojení bloku RN2 a RN3	109
4.41	Spektra demultiplexovaných signálů	110
4.42	Diagramy oka pro různé nastavení PER	111
4.43	Vznik polarizačního přeslechu	112
4.44	Zobrazení stavu polarizace pomocí Poincarého koule před a po pola- rizačním multiplexem	113
4.45	Stav polarizace signálů před a po vlnovém demultiplexu	114

SEZNAM TABULEK

2.1	Přehled parametrů vícevidových vláken [8].	27
2.2	Pásma vlnových délek jednovidových vláken [8].	27
2.3	Norma ITU-T G.652 A, B, C a D – konvenční vlákna [54].	28
2.4	Norma ITU-T G.653 A a B – vlákna s posunutou nulovou disperzí [54]	29
2.5	Norma ITU-T G.654 A, B a C – vlákna s posunutou mezní vlnovou délkou [54].	29
2.6	Norma ITU-T G.655 C, D a F – vlákna s posunutou nenulovou disperzí [54].	29
2.7	Norma ITU-T G.656 – vlákna s posunutou nenulovou disperzí pro širokopásmový optický přenos [54].	30
2.8	Odolnost vláken G.657.A a B na makroohyby [54].	30
2.9	Obecné limity disperze [5].	36
2.10	Limitní hodnoty PMD dle ITU-T G.697 [17].	37
2.11	Limity CD dle ITU-T G.697 [17].	40
3.1	Porovnání parametrů PON standardů	51
4.1	PMD vybraných optických tras v ČR	64
4.2	Statistické zpracování měření PMD	70
4.3	Výsledky simulací pro BER a Q-faktor – přenos dat a šumu	77
4.4	Výsledky simulace pro BER a Q-faktor – obousměrný přenos	80
4.5	Nastavení služeb pro EtherSAM	83
4.6	Výsledky měření dle EtherSAM – vliv útlumu	84
4.7	Vliv PMD na chybovost	85
4.8	Tabulka naměřených hodnot – vliv spektrální polohy další vlnové délky	87
4.9	Tabulka naměřených hodnot pro částečný polarizační multiplex	89
4.10	Tabulka naměřených hodnot – přenos datového signálu a šumu s vy- užitím polarizačního multiplexu	91
4.11	Výsledky měření dle EtherSAM pro různé OSNR	92
4.12	Naměřené parametry pro dílčí směry přenosu	94
4.13	Naměřené parametry pro současnou změnu polarizace v obou směrech	96

ÚVOD

Od dob, kdy proběhly první úspěšné datové přenosy, uplynulo již mnoho desítek let a komunikační technologie se dostaly do zcela jiných rozměrů. Po celou dobu vývoje komunikačních systémů se řeší neustále stejný problém a tím je nedostačující přenosová kapacita. Požadavky na šířku přenosového pásma a s tím spojené vysoké přenosové rychlosti neustále rostou a lze říci, že lidská populace je v dnešní době na internetové konektivitě závislá. To je dáno především využíváním nejmodernějších služeb triple play (datové, hlasové a video služby), jejichž kvalita se neustále zvyšuje. Nutné je zabývat se detailně parametry, které jsou pro tyto služby limitující.

Aplikace optických technologií do oblasti přístupových sítí je velice pozvolná, což je dáno především vysokými počátečními investicemi na vybudování těchto sítí. Aktivní i pasivní prvky sice jsou již cenově relativně dostupné, největší položkou realizace jsou stále výkopové práce a pokládka optických vláken. Proto je snaha využít již stávající optické trasy co nejefektivněji. Hlavními limitujícími parametry optických sítí je vložný útlum a disperze, které nežádoucím způsobem degradují parametry kvality služeb na vyšších vrstvách. Optické přístupové sítě nabízejí přenosovou rychlost 10 Gbit/s. Taková přenosová rychlost je pro dnešní potřeby koncových uživatelů dostačující a ještě několik let bude. Lze však počítat s tím, že nároky těchto sítí neustále porostou a je tedy nezbytné věnovat se výzkumu a vývoji nových technologií pro zajištění dostatečné přenosové kapacity.

Tato dizertační práce se věnuje optickým přístupovým sítím a možnostem redukce negativního vlivu polarizační vidové disperze na parametry kvality služeb při současném zdvojnásobení šířky přenosového pásma pomocí technologie polarizačního multiplexování, která patří mezi progresivní technologie v optických sítích. Cíle dizertační práce jsou shrnuty v první kapitole.

Vzhledem k zaměření práce bylo nutné nejprve dostatečně popsat alespoň základy teorie přenosu optickým vláknem. To je obsahem druhé kapitoly, kde jsou rovněž popsány přenosové parametry na fyzické vrstvě, typy optických vláken, lineární a nelineární jevy. Větší pozornost je vzhledem k zaměření práce věnována polarizaci světla a polarizační vidové disperzi.

Třetí kapitola je zaměřena na optické přístupové sítě, jejich základní uspořádání a dělení. Je zde popsán vývoj standardů pasivních optických sítí a jejich vzájemné porovnání. Dále jsou rozebrány používané multiplexační technologie, přičemž pozornost je zaměřena na polarizační multiplex. Závěrem kapitoly jsou popsány parametry kvality služeb a standardy pro jejich měření, které byly použity v praktické části práce.

Čtvrtá kapitola zahrnuje praktické výstupy dizertační práce a je rozdělena do šesti podkapitol. První podkapitola hodnotí stav reálných optických tras v České

republice z hlediska polarizační vidové disperze. Limity pro polarizační vidovou disperzi jsou pro vysoké přenosové rychlosti velice přísné, proto je nezbytné znát její hodnotu a možné následky pro budoucí využití. Polarizační vidová disperze se mění náhodným způsobem a jedním z ovlivňujících faktorů je změna teploty. Měření této závislosti pro pasivní prvky optické přístupové sítě je předmětem druhé podkapitoly. Praktická část práce je zaměřena zejména na polarizační multiplex, jehož stabilitu ovlivňuje mechanické namáhání a změna teploty. Třetí podkapitola je proto zaměřena na měření a analýzu vlivu teplotních změn na polarizačně multiplexovaný signál v optickém vlákne.

Před samotným praktickým sestavením a měřením polarizačního multiplexu byly nejprve vytvořeny dva simulační modely, jež jsou popsány ve čtvrté podkapitole. První model simuluje přenos datového signálu a šumu na stejné vlnové délce s polarizačním oddělením, druhý simuluje obousměrný přenos na stejné vlnové délce s polarizačním oddělením. Poznatky získané ze simulačních modelů byly následně ověřeny praktickým měřením, které je uvedeno v páté podkapitole. Je nejrozsáhlejší, protože zahrnuje měření a vyhodnocení celé řady parametrů, které bylo nezbytné před vlastní realizací polarizačního multiplexu prozkoumat. Závěrem páté podkapitoly byl systém polarizačního multiplexu ověřen i na reálné optické trase.

Poslední šestá podkapitola je věnována návrhu širokopásmové optické přístupové sítě využívající kombinaci vlnového a polarizačního multiplexu, která byla vytvořena na základě teoretických i praktických poznatků nabytých v průběhu řešení dizertační práce. Nejprve je systém popsán v teoretické rovině a následně doplněn o simulační model pro 64 koncových uživatelů s celkovou přenosovou rychlostí 640 Gbit/s. Nejproblémovější částí systému využívajícího polarizační multiplex je demultiplexační část. Za tímto účelem byl proveden návrh dynamického polarizačního kontroléru, který je rovněž uveden závěrem této kapitoly.

1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Vývoj optických přístupových sítí je směřován k vyšším přenosovým rychlostem při snaze současného zachování zpětné kompatibility se staršími standardy pasivních optických přístupových sítí a pokud možno využít stávající položené optické kabely na maximum. V současných optických přístupových sítích se uplatňuje zejména časový multiplex, připravovaný standard NG-PON2 navíc kombinuje časový multiplex s vlnovým. Přenosové rychlosti 10 Gbit/s mají přísné limity na polarizační vidovou disperzi (PMD) a rapidně rostou s dalším navyšováním přenosových rychlostí. Při porušení těchto limitů dochází k mezisymbolové interferenci a tím k celkovému zvýšení chybovosti přenosové soustavy.

Pro další vývoj optických přístupových sítí aplikovatelných na stávající optické trasy bude třeba zvolit technologie, které budou schopny odolávat negativním vlivům polarizační vidové disperze a navíc budou zpětně kompatibilní s předchozími standardy. Cílem dizertační práce proto bylo prozkoumat vliv přenosových parametrů na fyzické vrstvě na parametry kvality služeb a navrhnout model optické přístupové sítě, která bude schopna nabídnout větší šířku přenosového pásma a současně více odolávat negativním vlivům PMD.

Nabízí se celá řada multiplexních technologií, které jsou velice perspektivních pro budoucí využití. Jedná se většinou o multiplexy, které jsou již řadu let využívány v oblasti mobilních komunikací, bezdrátových sítí apod. Ve většině případů nejsou tyto technologie komerčně zaváděny do optických sítí z důvodu složité implementace a nutnosti zásahu do již používaných aktivních prvků. To neplatí pro polarizační multiplex, který nevyžaduje zásah do distribuční části optické přístupové sítě. Polarizační multiplex byl proto vybrán pro návrh modelu nové přístupové sítě, která díky jeho vlastnostem umožňuje zdvojnásobení šířky přenosového pásma a je do značné míry imunní vůči negativním vlivům polarizační vidové disperze.

Cílem dizertační práce je především:

- Posouzení stavu optických tras v ČR z hlediska PMD.
- Analýza závislosti PMD na změnách okolní teploty.
- Vliv teplotních změn na polarizačně multiplexovaný signál.
- Měření a vyhodnocení negativního vlivu přenosových parametrů fyzické vrstvy na parametry kvality služeb.
- Ověření funkce polarizačního multiplexu simulacemi i praktickým měřením.
- Návrh nové vysokorychlostní optické přístupové sítě založené na kombinaci vlnového a polarizačního multiplexu, která bude dostatečně odolná vůči PMD.
- Návrh a popis dynamického polarizačního kontroléru pro udržování optimálního stavu polarizace.

2 VÝZNAMNÉ VLASTNOSTI A PŘENOSOVÉ PARAMETRY OPTICKÝCH VLÁKEN

Optické vlákno je velice významné komunikační médium v porovnání s ostatními typy přenosových médií, jako např. metalické páry, rádiové systémy nebo bezvláknová optika. Umožňuje přenos signálu s velice malým vložným útlumem v širokém frekvenčním rozsahu více jak desítek THz.

S vývojem optických vláknových technologií, zvětšováním maximální překlenutelné vzdálenosti a zvyšováním přenosových rychlostí se začaly projevovat limitní faktory optických vláken. Mezi tyto faktory patří obecně jevy lineárního nebo nelineárního charakteru, kterým je věnována pozornost v této druhé kapitole. Dále je kapitola zaměřena na typy optických vláken a jejich popis.

2.1 Teorie přenosu optickým vláknem

V každém přenosovém médiu dochází ke zkreslení přenášeného signálu. Stejně tak je tomu i v optických vláknech. Zkreslení přenášeného signálu má zejména dvě základní příčiny. První z nich je způsobena nepravidelností kmitočtové odezvy na samotné vlákno, což způsobuje změnu spektra signálu a jeho časového průběhu. Druhá příčina zkreslení přenášeného signálu je dána šumem [8].

Úroveň šumu ve světlovodu je stanovena z výkonu na vstupu. Nejdůležitější je kvantový šum, velkou roli však hraje i termální šum. Analýza šíření optického signálu vlákny je dosti složitá a jejím cílem je stanovení kmitočtové charakteristiky, impulzní a přechodové funkce [8].

$$K(\omega) = |K(\omega)| \exp[j\varphi(\omega)] \quad (2.1)$$

Kmitočtová charakteristika je určena ve spektru modulačních kmitočtů [8]:

$$\omega = 2\pi f_m, \quad (2.2)$$

kde f_m je modulační kmitočet. Kmitočtová charakteristika je pak daná vztahem [8]:

$$K(\omega) = \frac{P_2(\omega) \exp[j\varphi_2(\omega)]}{P_1(\omega) \exp[j\varphi_1(\omega)]}, \quad (2.3)$$

kde $P_1(\omega)$ je vstupní a $P_2(\omega)$ výstupní výkon optického signálu. Absolutní hodnota pak určuje amplitudovou charakteristiku:

$$|K(\omega)| = \frac{P_2(\omega)}{P_1(\omega)} \quad (2.4)$$

a fázová charakteristika je dána vztahem:

$$\Psi(\omega) = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega). \quad (2.5)$$

Vztah mezi vstupním signálem a $P_1(t)$ a výstupním signálem $P_2(t)$ je určen:

$$P_2(\omega) = K(\omega)P_1(\omega), \quad (2.6)$$

kde $P_1(\omega)$ a $P_2(\omega)$ jsou Fourierovy obrazy vstupního a výstupního signálu $P_1(t)$ a $P_2(t)$. Platí, že:

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P(t)\exp[-j\omega t] dt. \quad (2.7)$$

Pro získání výstupního signálu $P_2(t)$ provedeme transformaci vstupního signálu $P_1(t)$. Tím získáme obraz vstupního signálu $P_1(\omega)$. Ten po té vynásobíme funkcí $K(\omega)$ a dostaneme obraz výstupního signálu $P_2(\omega)$. Výstupní signál $P_2(t)$ získáme zpětnou transformací dle vztahu [8]:

$$P(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega)\exp[j\omega t] d\omega. \quad (2.8)$$

Na základě charakteristiky odezvy na vstupní signál ve tvaru impulzu je možné vypočítat odezvu na vstupní signál libovolného tvaru. Pro určování přenosových vlastností světlovodů je vhodné použít vstupní impuls ve tvaru Gaussovy křivky nebo Diracův jednotkový impuls. Diracův impuls označujeme jako funkce δ . Z odezvy na Diracův impuls lze snadno určit šířku přenosového pásma. Pokud označíme vstupní Diracův impuls $P_{1i}(t)$, jeho Fourierův obraz má tvar [8]:

$$P_{1i}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{1i}(t)\exp(-j\omega t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \delta \exp(-j\omega t) dt = 1. \quad (2.9)$$

Obraz odezvy na diracův impuls je:

$$P_{2i}(\omega) = K(\omega)P_{1i}(\omega) = K(\omega). \quad (2.10)$$

Po provedení zpětné transformace má vstupní signál jako odezva na jednotkový impuls tvar:

$$P_{2i}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\omega)\exp[j\omega t] d\omega. \quad (2.11)$$

Odezvu na jednotkový impuls označujeme jako impulzní charakteristiku. Propustnost světlovodu je dána šířkou τ křivky $P_{2i}(t)$. Hodnocení impulzní charakteristiky se provádí při poloviční amplitudě. Čím je τ užší, tím je propustné pásmo S optického vlákna větší. Bylo dokázáno, že součin $S \cdot \tau$ je minimálně závislý na konkrétním tvaru kmitočtové charakteristiky a pohybuje se v mezích [8]:

$$0,45 < S \cdot \tau < 0,6. \quad (2.12)$$

Platí, že při přenosu binárních signálů je rychlost přenosu C (udávaná v b/s) přibližně rovna maximálnímu modulačnímu kmitočtu $f_{m,max}$, který se blíží šířce přenášeného pásma S . Platí tedy [8]:

$$C \cong f_{m,max} \cong S \quad [\text{b/s}]. \quad (2.13)$$

Po úpravě vztahu 2.12 dostaneme tvar:

$$\frac{0,45}{\tau} < C < \frac{0,6}{\tau}. \quad (2.14)$$

Tento vztah slouží ke snadnému určení přenosové rychlosti, za předpokladu znalosti šířky τ . Základním problémem však při určování přenosové rychlosti bývá přesné určení kmitočtové charakteristiky. Tu je možné změřit nebo vypočítat.

2.1.1 Princip šíření signálu v optickém vlákně

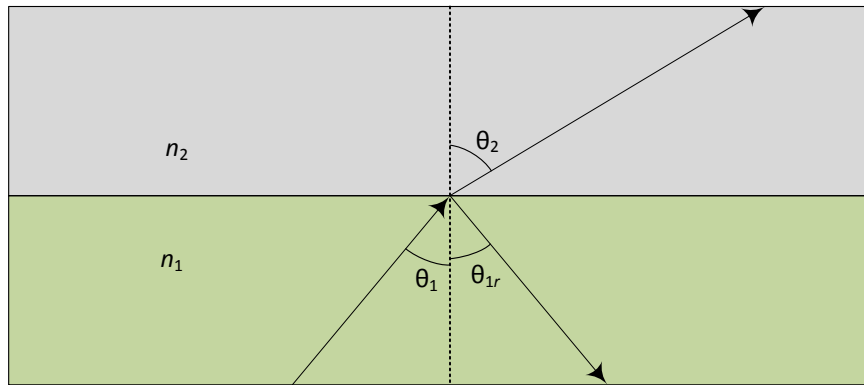
Šíření energie v optických vláknech lze popsat třemi způsoby – na základě geometrické, vlnové nebo kvantové optiky. Přičemž kvantová zahrnuje vlnovou i geometrickou optiku, vlnová optika zahrnuje geometrickou a kvantová optika se dá použít k popisu geometrické optiky. Nejčastěji se můžeme setkat s popisem pomocí vlnové a kvantové optiky současně – tento princip se označuje jako tzv. částicově-vlnový dualismus [8].

Geometrická optika nám dává názorné výsledky vhodné především pro více-vídná vlákna. Vychází se z předpokladu, že světelná energie se v určitém prostředí šíří podél jistých křivek – světelných paprsků mezi body A a B [47]. Současně se však předpokládá, že délka vlny záření je zanedbatelně krátká. Toto udává tzv. Fermatův princip, který je dán vztahem [42]:

$$\delta(A, B) = \delta \int_A^B n(x, y, z) ds = 0. \quad (2.15)$$

Matematický model vychází z ideálního vlákna, nemůže proto detailně vystihnout vliv na šíření energie. Obrázek 2.1 znázorňuje rozhraní dvou prostředí s různými indexy lomu n_1 a n_2 . Světelný paprsek z prostředí 1 dopadá na rozhraní prostředí 1 a prostředí 2. Úhel dopadu je úhel mezi dopadajícím paprskem a normálou k rozhraní mezi dvěma prostředími a označuje se θ_1 . Část energie se odrazí do prostředí 1 a zbývající část energie prochází do prostředí 2 jako lomený paprsek. Úhel odrazu θ_{1r} je úhel mezi odraženým paprskem a normálou rozhraní dvou prostředí. Obdobně úhel lomu θ_2 je úhel mezi lomeným paprskem a normálou. Zákon geometrické optiky říká, že [47]:

$$\theta_{1r} = \theta_1. \quad (2.16)$$



Obr. 2.1: Odraz a lom světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí

Vztah mezi úhlem lomu a dopadu je dán Snellovým zákonem [8]:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad (2.17)$$

Pokud se úhel dopadu θ_1 zvětší, zvětší se také úhel lomu θ_2 . Pokud bude platit, že $n_1 < n_2$, nastane při postupném zvyšování úhlu dopadu situace, kdy bude platit, že úhel lomu bude $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$ radiánu. To bude platit, když [47]:

$$\theta_2 = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.18)$$

Pro větší hodnoty úhlu dopadu již nevzniká žádný úhel lomu a veškerá energie z dopadajícího paprsku se odráží. Tento jev se nazývá totální odraz. K totálnímu odrazu dojde při $\theta_2 = 1$, z čehož vyplývá, že platí:

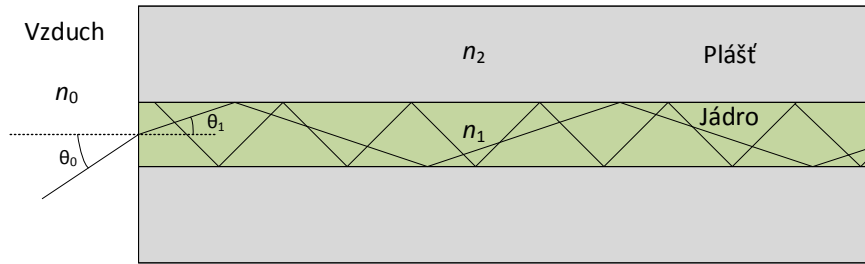
$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.19)$$

Maximální úhel, pod kterým můžou paprsky do optického vlákna vstoupit a šířit se v něm určuje numerická apertura definovaná vztahem 2.24.

Z hlediska geometrické optiky se světlo v optickém vlákne šíří v důsledku řady totálních odrazů, které se vyskytují na rozhraní jádra a pláště. Tento princip je zobrazen na obrázku 2.2. Ze Snellova zákona vyplývá, že šířit se mohou optickým vláknem pouze ty paprsky, jejichž úhel dopadu θ_0 je v rozmezí:

$$\theta_0 < \theta_0^{max} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}. \quad (2.20)$$

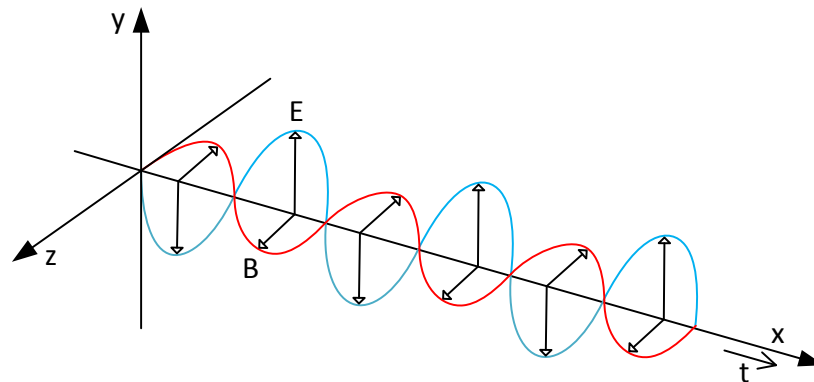
Vlnová optika dává na rozdíl od geometrické optiky exaktnější výsledky. Jejich fyzikální interpretace je však velice komplikovaná a odvozené vztahy jsou často neřešitelné [8]. Vychází z Maxwellových rovnic, jejichž řešení umožňuje najít prostorové uspořádání elektromagnetického pole. Základním principem je popis světla



Obr. 2.2: Šíření světelných paprsků v optickém vlákně – totální odraz

jako příčného vlnění. V současné době je známo přesné řešení Maxwellových rovnic, řešení za zjednodušení předpokladů a řešení se zavedením polarizovaných vidů. Maxwellovy rovnice ve své podstatě popisují elektrické i magnetické pole. Současně také dokazují, že elektromagnetické pole přenáší energii a šíří se prostorem [36].

Princip šíření elektromagnetické vlny je zobrazen na obrázku 2.3. Vlna je tvořena dvěma navzájem kolnými složkami – elektrické složky \vec{E} a magnetické složky \vec{B} , které se šíří v čase t .



Obr. 2.3: Šíření optického paprsku jako elektromagnetické vlny

Kvantová optika – je součástí kvantové fyziky, která vznikla na základě kvantové hypotézy, kterou uveřejnil v roce 1900 německý fyzik Max Planck. Předpokládal, že záření má nespojitý (diskrétní) charakter, který se projeví na základě frekvence. K emisi elektromagnetického záření (tzn. i světelného) dochází ve formě malých, dále nedělitelných částí (kvant). Toto kvantum světla nazýváme foton. Záření tedy není spojité a každému kvantu náleží energie [31]:

$$E = h \cdot f \quad [\text{J}], \quad (2.21)$$

kde f je frekvence záření a h je Planckova konstanta. Dle Plancka a Einsteina je

elektromagnetické záření považováno za proud fotonů, který je vyzařován a šíří se prostorem přímočaře [31].

Rychlost šíření světla – světlo se ve vakuu šíří přímočaře, konečnou a velmi vysokou rychlostí. Dle Einsteinovy teorie relativity je rychlost světla ve vakuu stejná ve všech bodech prostoru a nezávislá na pohybovém stavu pozorovatele. Podle Maxwellovy teorie je fázová rychlost elektromagnetických vln ve vakuu (tudíž i světla) dána vztahem [11]:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = (2,997925 \pm 0,000003) \times 10^8 \quad [\text{m/s}], \quad (2.22)$$

kde ϵ_0 a μ_0 jsou elektrická permitivita a magnetická permeabilita vakua.

2.1.2 Index lomu

Index lomu je parametr, který svým profilem určuje vlastnosti jednovidových i vícevidových optických vláken. Ze znalosti profilu indexu lomu je možné získat informace o průměru jádra a pláště, dále pak o jejich soustřednosti, ovalitě a numerické aperturně NA (Numerical Aperture). Kromě těchto vlastností je také možné vypočítat průměr vidového pole, mezní vlnovou délku a chromatickou disperzi. Pro určování profilu indexu lomu se používá metoda lomených paprsků [60]. Index lomu je definován jako poměr rychlosti světla ve vakuu c ku rychlosti světla v materiálu v , ve kterém se optické záření šíří [40][25].

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \geq 1 \quad [-], \quad (2.23)$$

kde ϵ_r a μ_r je relativní elektrická permitivita a magnetická permeabilita.

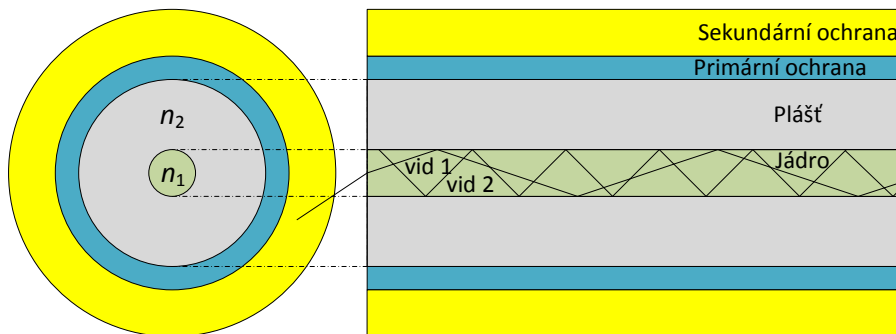
Optické vlákno se skládá z kruhového jádra, které je obklopeno pláštěm. Průřez optickým vláknem je znázorněn na obrázku 2.4. Jádro i plášť jsou vyráběny zejména z oxidu křemíku SiO_2 , který má index lomu přibližně 1,45. V průběhu výroby vlákna je díky dopantům dosaženo nepatrně vyššího indexu lomu jádra [47].

2.1.3 Numerická apertura

Numerická apertura je důležitou charakteristikou optického vlákna. Vyjadřuje nám maximální úhel, pod kterým budou světelné paprsky navázány do jádra vlákna a šířit se v něm. Paprsky, které vstupují do jádra pod větším úhlem již navázány nebudou. Numerická apertura je dána vztahem [8]:

$$NA = \sin\theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad [-], \quad (2.24)$$

kde θ_{max} je maximální úhel, pod kterým budou optické paprsky navázány do jádra, n_1 je index lomu jádra a n_2 je index lomu pláště.



Obr. 2.4: Principiální průřez optickým vláknem

Numerickou aperturu je možné vypočítat také z měření podle vztahu [36]:

$$NA = \sqrt{\frac{P_{in}}{P_{out}}} \quad [-], \quad (2.25)$$

kde P_{in} je optický výkon na vstupu vlákna a P_{out} je optický výkon na výstupu vlákna.

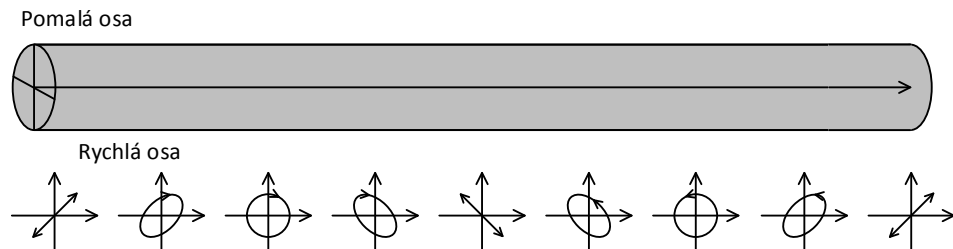
2.1.4 Dvojlom v optickém vlákně

Obecně platí, že index lomu je v izotropních optických prostředích ve všech směrech stejný. U anizotropních látek je však index lomu v různých směrech jiný. Z tohoto pohledu je možné pohlížet i na optické vlákno. Pokud by bylo optické vlákno ideálně kruhově symetrické v celé délce, pak by zde dvojlom nebyl přítomen. Optická vlna by se šířila ideálně ve dvou ortogonálních rovinách. Index lomu v jedné polarizační rovině by byl shodný s indexem lomu v druhé $n_x = n_y$, tudíž i konstanty šíření by byly shodné pro obě polarizační roviny $\beta_x = \beta_y$. V reálných optických vláknech tomu ale tak není. Na optické vlákno je nutné pohlížet jako na optické přenosové médium s dvojlomem. Konstanty šíření jsou tak pro obě polarizační roviny odlišné a platí $\beta_x \neq \beta_y$. Označíme-li dvojlom jako $\Delta\beta$, je možné ho vyjádřit pomocí vztahu [25]:

$$\Delta\beta = \beta_y - \beta_x = \frac{2\pi}{\lambda} (n_y - n_x) = \frac{\omega}{c} \cdot \Delta n, \quad (2.26)$$

kde ω je úhlový kmitočet, n je index lomu a c je rychlost šíření světla. Dvojlom přítomný v optickém vlákně způsobuje, že dochází k různým změnám stavu polarizace (SOP) podél optického vlákna, jak je znázorněno na obrázku 2.5.

Ve vlákně mohou být přítomny dva druhy dvojlomu – lineární, který vzniká elipticitou jádra, ohyby, tlakem a přítomností elektrického pole, dále pak kruhový dvojlom, který vzniká kroucením a přítomností magnetického pole [61]. Pokud jsou přítomny oba druhy dvojlomu, označuje se celkový dvojlom jako eliptický.



Obr. 2.5: Změny stavu polarizace v optickém vlákně vlivem dvojlomu [61]

2.1.5 Polarizace světla

Optická vlna popsaná na základě šíření elektrického pole je dána vektorovým součtem roviny ležící v ose x a y , která leží v rovině kolmé k ose šíření z . Tyto roviny x a y nemají pevnou polohu, ale nepravidelně se stáčí podél směru šíření. Existují však možnosti, jak oba vektory srovnat do jedné roviny – v tomto případě je světlo lineárně polarizované. Platí však, že základní stav polarizace je eliptický.

Budeme-li předpokládat, že se jistým směrem šíří dva lineárně polarizované paprsky, jejichž tzv. kmitoměry leží v navzájem kolmých rovinách x a y , E_{0x} a E_{0y} značí jejich amplitudy a φ je jejich vzájemný fázový rozdíl, pak můžeme jejich světelné stavy popsat rovnicemi [32]:

$$E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \varphi_x), \quad (2.27)$$

$$E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \varphi_y), \quad (2.28)$$

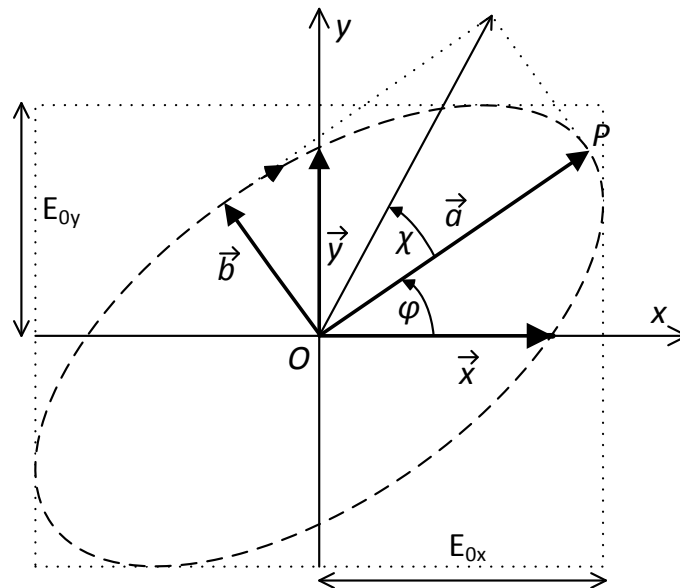
Pokud je fázový rozdíl stálý a časově nezávislý, pak se obě vlnění skládají a okamžitá výchylka a je rovna prostému vektorovému součtu x a y . Jak je znázorněno na obrázku 2.6, platí [10]:

$$a = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}, \quad (2.29)$$

$$\text{tg}\chi = \pm \frac{b}{a}, \quad (2.30)$$

kde kladná nebo záporná polarita určuje orientaci. Úhel elipticity přitom může nabývat hodnot $\chi \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right]$ [57].

Jak jde vidět z obrázku 2.6 a výše uvedených vztahů, úhel elipticity χ i odchylka a výsledného vlnění jsou závislé na čase t , tudíž toto výsledné vlnění není lineárně polarizované. Jak plyne z obrázku 2.6, bod P opisuje kolem bodu O jistou křivku. Pokud opisuje elipsu, nazýváme tento druh polarizace jako eliptický. Pokud nastane situace, že bude platit $E_x = E_y = E$ a $\varphi = (2k - 1)\frac{\pi}{2}$, přičemž $k = 1, 2, 3$, pak



Obr. 2.6: Křivka elipticky polarizovaného světla [10]

přejde elipsa v kružnici. Tento druh polarizace nazýváme kruhová. Pokud nastane stav, kdy bude platit $\varphi = k\pi$ pro $k = 1, 2, 3, \dots$, je výsledný stav polarizace opět lineární [32].

Přirozené světlo je nepolarizované a lidské oko není schopné rozeznat rozdíl mezi přirozeným a polarizovaným světlem. Existuje celá řada způsobů, jak lze z nepolarizovaného světla vytvořit světlo polarizované, např. odrazem, lomem, dvojlomem, selektivní absorpcí nebo rozptylem [32].

K popisu polarizace se používá Jonesův nebo Stokesův formalismus. Jonesův formalismus je matematický popis stavu ideálně polarizovaného světla, tzn. jeho intenzity a polarizačního stavu, a používá se pro výpočet stavu polarizace při průchodu optickým vláknem. Jonesův formalismus je však vhodný pouze pro plně polarizované světlo a nelze pomocí něj popsat nepolarizované nebo částečně polarizované světlo [9]. Jonesovy vektory popisují ideálně polarizované světlo pomocí komplexního vektoru [61]:

$$V = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x}e^{j\varphi_x} \\ E_{0y}e^{j\varphi_y} \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

- Pro lineární stav polarizace platí:

$$V = \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

pokud platí, že $\varphi = 0^\circ$ nebo $\varphi = 90^\circ$.

- Pro pravotočivý (R) a levotočivý (L) kruhový stav polarizace platí:

$$V_R = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}, \quad V_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}. \quad (2.33)$$

- Pro eliptický stav polarizace platí:

$$V = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\chi - j\sin\varphi\sin\chi \\ \sin\varphi\cos\chi + j\cos\varphi\sin\chi \end{bmatrix}. \quad (2.34)$$

Protože Jonesův formalismus nelze použít pro nepolarizované, respektive částečně polarizované světlo, je vhodné použít pro popis Stokesovy vektory a Müllerovy matice. Stokesův formalismus vyjadřuje stav polarizace pomocí výkonu, jedná se tudíž pouze o reálná čísla. Umožňuje tak reprezentovat částečně polarizované světlo. Stav polarizace je pomocí Stokesova formalismu možné popsat čtyřmi reálnými čísly, která reprezentují tzv. Stokesovy vektory [61]:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

Jednotlivé vektory představují:

- S_0 : Celkový výkon světla polarizovaného i nepolarizovaného.
- S_1 : Lineární složku při $\varphi = 0^\circ$ a $\varphi = 90^\circ$.
- S_2 : Lineární složku při $\varphi = 45^\circ$ a $\varphi = -45^\circ$.
- S_3 : Složku pravotočivě nebo levotočivě kruhově polarizovaného světla.

Pro normalizovaný vektor platí:

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

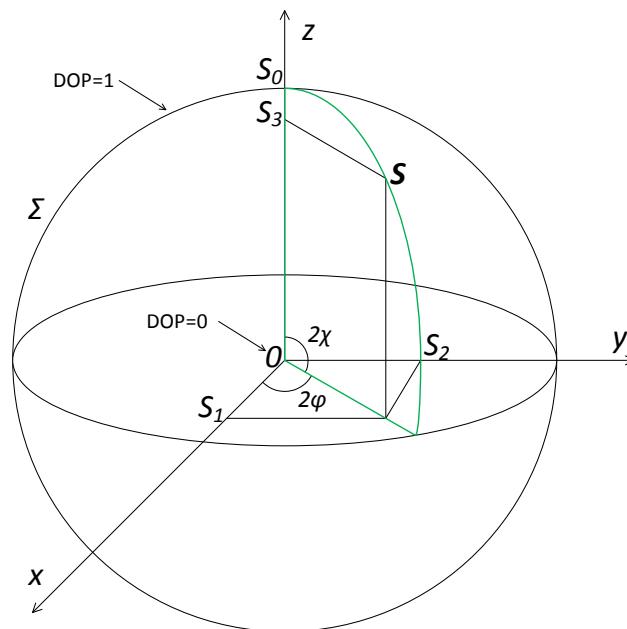
- Lineárně polarizované světlo lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\varphi \\ \sin 2\varphi \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

- Elipticky polarizované světlo lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\chi \cos 2\varphi \\ \cos 2\chi \sin 2\varphi \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

Rovnice pro výpočet Stokesových parametrů popisují parametrické vyjádření kulové plochy Σ v kartézské soustavě souřadnic. Tato plocha se nazývá Poincarého koule a je považována za velice důležitý vizualizační nástroj pro popis stavu polarizace. Zobrazena je na obrázku 2.7. Z jejího prostorového vyjádření lze určit charakter i stupeň polarizace DOP (Degree Of Polarization), jehož význam je popsán v podkapitole 3.4.2. V případě, že bod S se souřadnicemi $[S_1; S_2; S_3]$ leží na plášti koule, tak se jedná o zcela polarizovanou optickou vlnu a stupeň polarizace je maximální (DOP=1). Pokud bod S leží uvnitř koule, tak se jedná o částečně polarizovanou optickou vlnu. Pokud nastane stav, kdy se $S_3 = 0$, tj. bod S leží v rovině xy , tak je optická vlna lineárně polarizovaná. Když bod S leží na ose z , jedná se o kruhově polarizovanou optickou vlnu – pokud $z < 0$ je kruhová polarizace levotočivá, naopak pokud $z > 0$, je kruhová polarizace pravotočivá [61].



Obr. 2.7: Poincarého koule [57]

2.2 Typy optických vláken

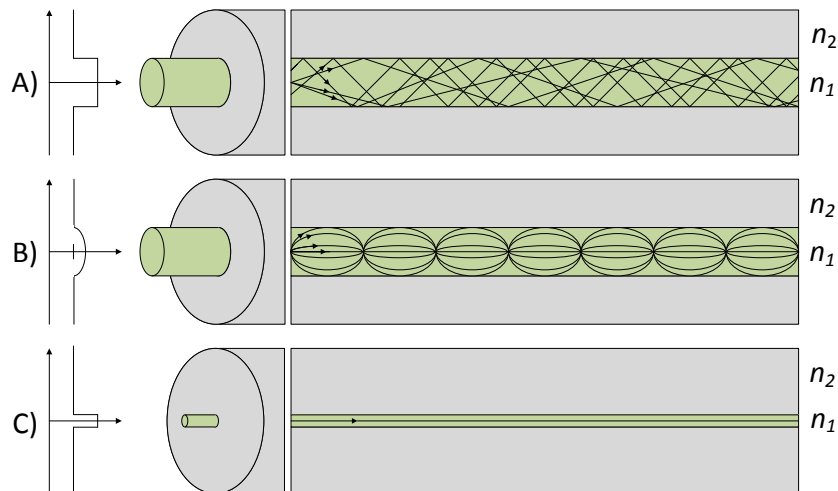
Již v polovině 60. let bylo prokázáno, že informace zakódované v optickém signálu mohou být přenášeny skrze skleněné vlnovody na velké vzdálenosti. Optické vlákno je ve své podstatě velmi tenký, cylindrický skleněný vlnovod sestávající z jádra a pláště. Základním materiálem pro výrobu optických vláken je oxid křemíku SiO_2 . Dalšími důležitými prvky jsou dopanty (GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3 aj.). Základní dělení optických vláken dle jejich konstrukce je na [8]:

- vícevidová vlákna s konstantním indexu lomu jádra,
- vícevidová vlákna s proměnným indexu lomu jádra,
- jednovidová optický vlákna s konstantním indexem lomu jádra.

2.2.1 Vícevidová vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště

Vývojově nejstarší optická vlákna, často označovaná jako mnohovidová nebo multimódová (MM – Multi Mode) vlákna. Mají průměr jádra 50–200 μm . Princip přenosu optického signálu tímto typem vlákna je na obrázku 2.4. Optický paprsek (vid) se odráží na rozhraní jádra a pláště. Signál sestává z mnoha vidů, každý přitom urazí nepatrně odlišnou dráhu, tzn. šíří se odlišnou rychlostí. Tento princip je předurčen k velkým hodnotám vidové disperze, která patří k hlavním limitujícím faktorů MM vláken.

Tato vlákna se vyznačují velkým vložným útlumem, velkou disperzí, malou přenosovou kapacitou a velkými průměry jádra a pláště. Průřez tímto vláknem je na obrázku 2.8 A). Parametry těchto vláken jsou uvedeny v tabulce 2.1 pod označením MM vlákno 1 [8].



Obr. 2.8: Základní typy optických vláken.

2.2.2 Vícevidová vlákna s gradientní změnou indexu lomu

Tento druh vícevidových vláken má již lepší přenosové parametry v porovnání s předchozím typem. Mají menší disperzi a vložný útlum, jsou však náročnější na výrobu [29]. Průřez tímto vláknem je na obrázku 2.8 B). Parametry těchto vláken jsou uvedeny v tabulce 2.1 pod označením MM vlákno 2 [8].

Pro buzení MM vláken se používaly nejčastěji LED (Light Emiting Diode) diody a později i polovodičové lasery, které umožnily prodloužení vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. MM vlákna se používají pro přenos na vlnových délkách 850 nm a 1 300 nm. Vzhledem k vysokým hodnotám disperze, v porovnání s jednovidovými vlákny, byla tato vlákna používána pouze na krátké vzdálenosti [47]. V dnešní době již použití těchto vláken upadá. Uplatnění můžeme najít např. v propojování síťových prvků v rámci blízkých objektů, v nenáročných průmyslových aplikacích nebo pro sensorické účely (měření teploty).

Tab. 2.1: Přehled parametrů vícevidových vláken [8].

	MM vlákno (1)	MM vlákno (2)
Průměr jádra [μm]	50–200	50
Průměr pláště [μm]	120–300	125
Disperze [ns/km]	50	1 (při 850 nm)
Vložný útlum [dB/km]	5–20	2,5–5
Šířka pásma [MHz]	60	600

2.2.3 Jednovidová vlákna

Používání těchto optických vláken se historicky datuje od roku 1984 [47]. Nejvýznamnější výhodou je absence mezividové disperze, která je u MM vláken hlavním limitujícím přenosovým parametrem. Jednovidová optická vlákna se začínala používat v pásmu kolem vlnových délek 1 300 nm spolu s FP (Fabry-Perrot) lasery pracujícími v MLM (Multi Longitudal Mode) módu. Později se využití jednovidových optických vláken rozšířilo přes všechna použitelná pásma, jejichž rozdělení je v tabulce 2.3. Průřez tímto vláknem je na obrázku 2.8 C).

Tab. 2.2: Pásma vlnových délek jednovidových vláken [8].

Pásmo	Název	Rozsah [nm]
O	Original	1 260–1 360
O	Extended	1 360–1 460
S	Short	1 460–1 530
C	Conventional	1 530–1 565
L	Long	1 565–1 625
U	Ultra-long	1 625–1 675

Jednovidová vlákna mají relativně malý průměr jádra (7–10 μm). Díky tomu je optický signál přenášen prostřednictvím jednoho vidu, který se šíří ve směru osy. Nasazení jednovidových optických vláken umožnilo dramatické zvýšení přenosových

rychlostí a celkové šířky přenosového pásma. Rovněž díky malému vloženému útlumu (0,25 dB při 1 550 nm) je možné dosahovat podstatně delších vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem v porovnání s MM vlákny [29]. Podle ITU-T byla standardizována celá řada jednovidových optických vláken [27]:

- G.652.A, B, C, D – konvenční vlákna,
- G.653.A a B – vlákna s posunutou disperzí,
- G.654.A, B a C – vlákna s posunutou mezní vlnovou délkou,
- G.655.A, B, C, D a E – vlákna s posunutou nenulovou disperzí,
- G.656 – vlákna s posunutou nenulovou disperzí pro širokopásmový přenos,
- G.657.A a B – vlákna méně citlivá na makro-ohyby pro přístupové sítě.

G.652

První optická jednovidová vlákna byla uvedena pod doporučením ITU-T G.652 a označují se jako standardní SSMF (Standard Single Mode Fiber) nebo také konvenční vlákna. Vlákna typu G.652 byla jako první masivně nasazovaná do veřejných sítí a dodnes představují většinu položených vláken. Mají nulovou chromatickou disperzi okolo vlnové délky 1 310 nm. Přehled parametrů je v tabulce 2.3. Parametr MFD (Mode Field Diameter) udává průměr vidového pole a parametr PMD (Polarization Mode Dispersion) udává polarizační vidovou disperzi [8].

Tab. 2.3: Norma ITU-T G.652 A, B, C a D – konvenční vlákna [54]

Parameter	G.652.A	G.652.B	G.652.C	G.652.D
MFD–1 310 nm [μm]	8,6–9,5	8,6–9,5	8,6–9,5	8,6–9,5
Mezní vlnová délka [nm]	1 260	1 260	1 260	1 260
Koeficient útlumu 1 550 nm [dB/km]	0,4	0,35	0,3	0,3
Koeficient útlumu 1 383 nm [dB/km]	–	–	0,4	0,4
Nulová chromatická disperze [nm]	1 300–1 324	1 300–1 324	1 300–1 324	1 300–1 324
PMD [ps√km]	0,5	0,2	0,5	0,2

G.653

Optická vlákna s nulovou disperzí okolo vlnové délky 1 550 nm. Byla vyvinuta pro použití v jednokanálových systémech s vysokou přenosovou rychlostí a na dlouhé vzdálenosti. Jak plyne z posunutí nulové disperze, jsou optimalizovaná pro použití okolo vlnové délky 1 550 nm. Tato vlákna byla vyvíjena s cílem potlačit vliv chromatické disperze (CD – Chromatic Dispersion). Označují se také jako DSF (Dispersion Shifted Fiber). Přehled parametrů je v tabulce 2.4.

G.654

Hlavní vlastností těchto optických vláken je jejich odlišná mezní vlnová délka (vlnová délka, do které fungují jako jednovidová) a menší vložený útlum v oblasti 1 550 nm. Jsou nákladné na výrobu a používají se výhradně na extrémní dálkové podmorské přenosy bez zesilovače na trase [8]. Přehled parametrů je v tabulce 2.5.

Tab. 2.4: Norma ITU-T G.653 A a B – vlákna s posunutou nulovou disperzí [54]

Parameter	G.653.A	G.653.B
MFD–1 550 nm [μm]	7,8–8,5	7,8–8,5
Mezní vlnová délka [nm]	1 270	1 270
Koef. útlumu 1 550 nm [dB/km]	0,35	0,35
Nulová CD [nm]	1 500–1 600	–
$D_{\max} - 3,5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$	1 525–1 575	1 525–1 575
D_{\min} a D_{\max} (1 460–1 625 nm)	–	od –9 po +7,75
PMD [ps/√km]	0,5	0,2

Tab. 2.5: Norma ITU-T G.654 A, B a C – vlákna s posunutou mezní vlnovou délkou [54]

Parameter	G.654.A	G.654.B	G.654.C	AllWave Ocean
MFD–1 550 nm [μm]	9,5–10,5	9,5–10,5	9,5–10,5	10,4
Mezní vlnová délka [nm]	1 530	1 530	1 530	1 260
Koeficient útlumu 1 500 nm [dB/km]	0,22	0,22	0,22	0,2
Koeficient útlumu 1 383 nm [dB/km]	–	–	–	0,31
Disperze 1 550 nm [ps/nm·km]	20	22	20	16,6
PMD [ps√km]	0,5	0,2	0,2	0,02

G.655

Optická vlákna vyznačující se nenulovou posunutou disperzí. Mají absolutní hodnotu disperzního koeficientu vyšší jak jakoukoliv hodnotu v rozsahu 1 530–1 565 nm. Jak bylo zjištěno, disperze snižuje růst nelineárních jevů, které se negativně projevují zejména v DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) systémech. Používají se primárně pro vysokorychlostní DWDM přenosy. Přehled parametrů je v tabulce 2.5.

Tab. 2.6: Norma ITU-T G.655 C, D a F – vlákna s posunutou nenulovou disperzí [54]

Parameter	G.655.A	G.655.B	G.655.C	G.655.D	G.655.E
MFD–1 550 nm [m]	8–11	8–11	8–11	8–11	8–11
Mezní vlnová délka [nm]	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450
Koeficient útlumu 1 550 nm [dB/km]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Koeficient útlumu 1 383 nm [dB/km]	–	–	–	–	–
Disperze 1 530–1 560 nm [ps/nm·km]	0,1–6	1–10	1–10	–	–
Disperze 1 460 nm [ps/nm·km]	–	–	–	-4,2–3,29	0,64–4,66
Disperze 1 625 nm [ps/nm·km]	–	–	–	5,77–11,26	9,36–13,43
PMD [ps√km]	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2

G.656

Tato vlákna mají absolutní hodnotu disperzního koeficientu vyšší jak jakoukoliv hodnotu v celém rozsahu vlnových délek 1 460–1 625 nm. Mohou být využita pro CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) a DWDM systémy v celé šířce vlnových délek mezi 1 460–1 625 nm [8].

Tab. 2.7: Norma ITU-T G.656 – vlákna s posunutou nenulovou disperzí pro širokopásmový optický přenos [54]

Parameter	G.656	TrueWave REACH
MFD–1 550 nm [μm]	7–11	8,6
Mezní vlnová délka [nm]	1 450	1 310
Koef. útlumu 1 550 nm [dB/km]	0,35	Max. 0,25
Koef. útlumu 1 383 nm [dB/km]	–	Max. 0,4
Disperze 1 460 nm [ps/nm·km]	1–4,6	Min. 2
Disperze 1 625 nm [ps/nm·km]	4,58–14	Max. 11,4
PMD [ps/√km]	0,2	0,04

G.657

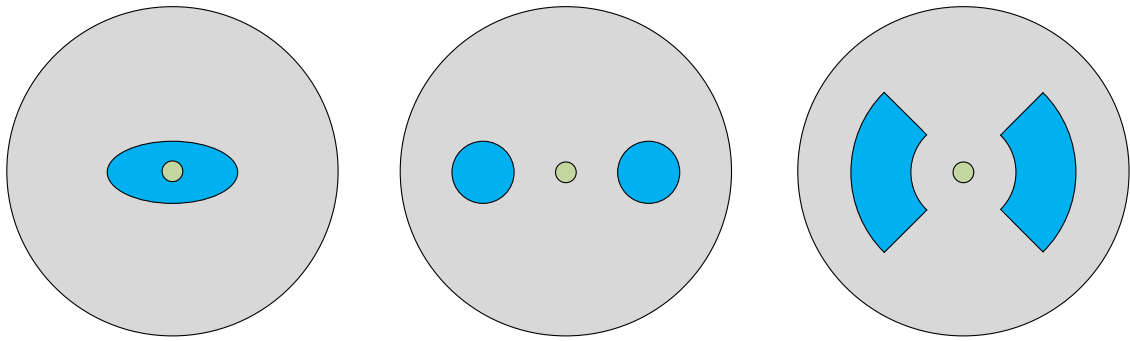
Specifické použití optických vláken v optických přístupových sítích klade různé požadavky na samotná vlákna a kabely obecně. Z tohoto důvodu byla speciálně konstruovaná vlákna G.657, která jsou optimalizována pro nižší citlivost na ohyby. Tato vlákna patří do podkategorie vláken G.652.D a mají stejné přenosové vlastnosti. Hlavní rozdíl je v odolnosti vůči makroohybům, které jsou popsány v tabulce 2.8.

Tab. 2.8: Odolnost vláken G.657.A a B na makroohyby [54]

Makroohybové ztráty	A	B	A	B	A	B
Poloměr [mm]	15		10		7,5	
Počet závitů	10	10	1	1	1	1
Max. útlum na 1 550 nm [dB/km]	0,25	0,03	0,75	0,1	–	0,5
Max. útlum na 1 625 nm [dB/km]	1	0,1	1,5	0,2	–	1

2.2.4 Optická vlákna pro speciální účely

Významný typ speciálních vláken tvoří tzv. polarizaci zachovávající PM (Polarization Maintaining) vlákna. Umožňují díky svojí konstrukci udržovat stejný stav polarizace v celé svojí délce. Uplatnění najdou zejména v oblasti koherentních systémů, sensorických systémů a všude tam, kde je potřeba aby výkon navázaný do jedné polarizace zůstal stejný i na výstupu vlákna v téže polarizaci. Prakticky se tato vlákna používají jako pigtaily (konektor s vláknem) pro různé specifické prvky, jako jsou lasery, modulátory, polarizátory nebo i jako patchordy (propojovací kabely). Důvodem je jejich vysoká cena a také velký vložný útlum. Existují tři možnosti, jak jejich vlastnosti docílit, a to buď odstraněním kruhové symetrie, např. eliptickým průřezem jádra, častěji však pomocí mechanického pnutí a tím způsobené anizotropie [33]. V tomto případě se jedná o vlákna typu „panda“ nebo „bow-tie“, které se liší profilem tahových prvků [50]. PM vlákna mají na rozdíl od běžných vláken úmyslně vytvořený silný dvojlom. Stav polarizace se proto v průběhu šíření optické vlny vláknem nemění.



Obr. 2.9: PM vlákna – eliptické, panda, bow-tie [40],[61]

Kromě výše popsaných vláken, patří do kategorie speciálních v neposlední řadě jednovidová vlákna dopovaná prvky vzácných zemin, např. erbiem, yterbiem, praseodyem, thuliem apod. Tato vlákna se nejčastěji používají ve vláknových zesilovačích a vláknových laserech. V oblasti fotonických vysokorychlostních sítí se můžeme také setkat s nelineárními vlákny, případně vysoce nelineárními vlákny.

2.3 Lineární jevy v optických vláknech

Pro lineární optické prostředí platí princip superpozice, což znamená, že se paprsky vzájemně neovlivňují a nejde tedy řídit jeden svazek paprsků tím druhým, v nelineárním prostředí to neplatí. Pokud není v lineárním optickém prostředí použito příliš velké elektrické pole, tak elektrická polarizace je přímo úměrná intenzitě elektrického pole [7].

$$P = \epsilon_0 \chi E, \quad (2.39)$$

kde P je elektrická polarizace, ϵ_0 je permitivita vakua, χ je dielektrická susceptibilita prostředí a E je intenzita elektrického pole.

2.3.1 Útlum optických vláken

Útlum optických vláken je nežádoucím jevem, který snižuje výkon přenášeného signálu. Z historického hlediska došlo k výraznému snížení útlumu optických vláken, kdy se původní hodnoty útlumu pohybovaly řádově v desítkách dB/km. V dnešní době dosahují běžná telekomunikační vlákna útlumu 0,2 dB/km na vlnové délce 1 550 nm. Útlum optických vláken je dán především [8]:

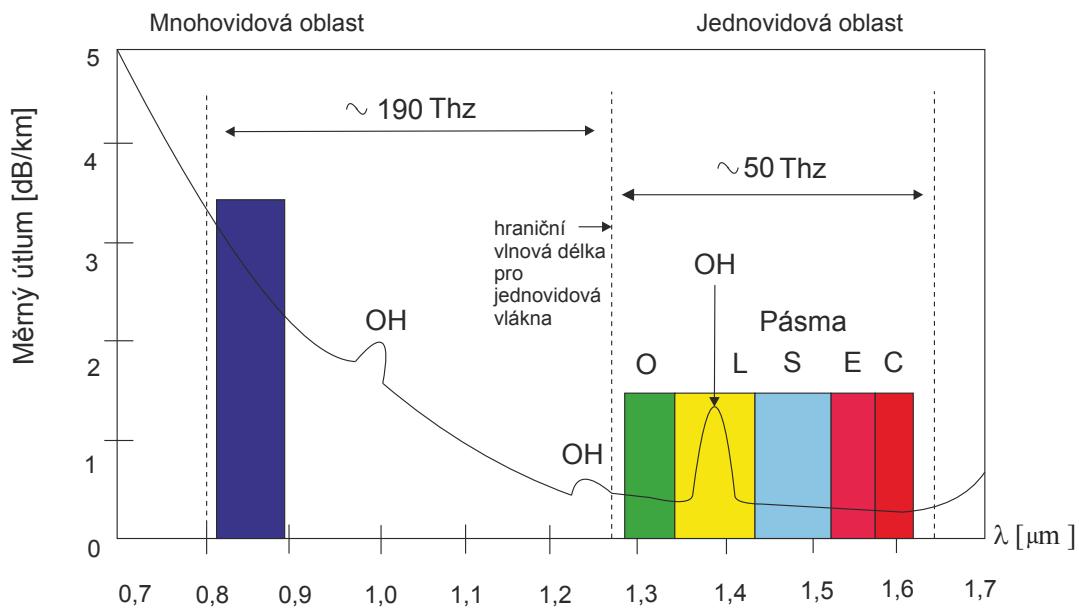
- absorpcí prostředí, v němž se záření šíří,
- vyzařováním z vlákna,
- rozptylem na nehomogenitách.

Útlum optického vlákna je parametr, který udává kolik energie navázané na začátku optické trasy se přenese k přijímači. Je definován jako [50]:

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{dB}], \quad (2.40)$$

kde P_1 je výkon vstupující do vlákna a P_2 je výkon na konci vlákna, přičemž oba výkony se nejčastěji udávají v jednotce mW, případně dBm. Pro optická vlákna je důležité zavedení měrného útlumu α , tj. útlumu vztaheného k určité délce vlákna.

Ztráty absorpcí – jedná se o jev, kdy jsou fotony průběžně pohlcovány atomy materiálu jádra. Problémová oblast vlnových délek bývala kolem 1,39 μm a 0,94 μm . Pro výrobu vláken s nízkým měrným útlumem je zapotřebí zajistit nízkou koncentraci OH iontů vody a iontů kovů. Běžná telekomunikační vlákna G.652.D již nevykazují zvýšený útlum v oblasti kolem 1,39 μm . Jako problémové jsou z tohoto hlediska vlákna staršího data výroby typu G.652.A [8].



Obr. 2.10: Útlumová charakteristika optického vlákna [8]

Ztráty vyzařováním jsou způsobeny lomem šířících se paprsků na rozhraní dvou dielektrických prostředí s různými vlastnostmi, přičemž část energie proniká z jádra ven [8].

Ztráty rozptylem tvoří převážnou část útlumu. K těmto ztrátám dochází tím, že molekuly v amorfním materiálu jsou náhodně rozloženy a tvoří mikronehomogenity indexu lomu daného materiálu. Pokud jsou tyto nehomogenity rozměrově malé proti vlnové délce, pak jsou vzniklé ztráty dány Rayleighovým rozptylem.

Tyto ztráty jsou přímo úměrné čtvrté mocnině vlnové délky [8]. Další ztráty vznikají mikro a makro ohyby vlákna, porušením geometrie vlákna, trhlínkami v materiálu apod.

2.3.2 Lineární rozptyl v optických vláknech

Lineární rozptylové jevy tvoří hlavní část ztrát tvořících útlum optického vlákna. Je důležité poznamenat, že u lineárních rozptylových jevů nedochází ke změně původního kmitočtu dopředného signálu. Lineární rozptyly se dělí na dva základní typy [7].

- Rayleighův rozptyl.
- Mieův rozptyl.

Rayleighův rozptyl můžeme definovat jako hlavní typ lineárního rozptylu. Je nazván po britském fyzikovi lordu Rayleigh a je způsobený malými nehomogenitami v materiálu optického vlákna. Množství těchto nehomogenit lze účinně redukovat zlepšením technologie výroby optických vláken. Rayleighův rozptyl představuje přibližně 96 % útlumu optického vlákna [63].

Záření prochází jádrem vlákna a interaguje v něm s molekulami oxidu křemičitého. Tyto pružné kolize mezi světelnými vlnami a molekulami oxidu křemičitého mají za následek rozptyl. Pokud je paprsek rozptýlen pod takovým úhlem, že pokračuje v dopředném směru, tak nedochází k žádnému útlumu. Pokud je však paprsek rozptýlen pod takovým úhlem, že paprsek nepostupuje vpřed, tak je vychýlen z jádra a nastává útlum. Rozptýlený signál se odrazí zpět směrem ke zdroji záření. Této vlastnosti se využívá v systémech OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) [27]. Útlum způsobený Rayleighovým rozptylem je daný vztahem [63]:

$$\alpha_{TR} = 10 \cdot \log \frac{1}{L_{TR}} \quad [\text{dB}], \quad (2.41)$$

kde L_{TR} je příspěvek Rayleighova rozptylu k celkovému tlumení optického vlákna definovaného délkou L :

$$L_{TR} = \exp\{-\gamma_R L\}, \quad (2.42)$$

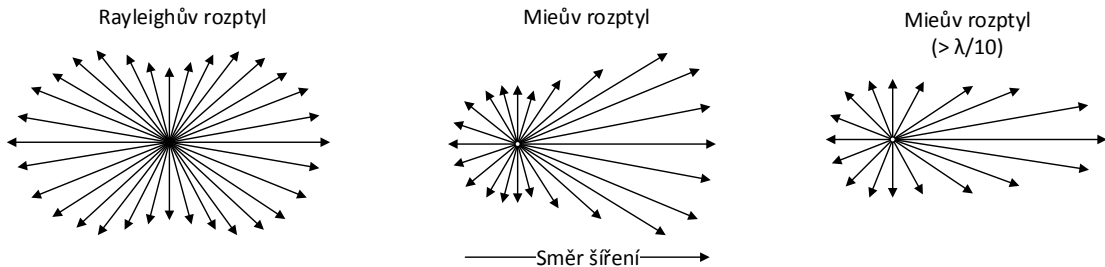
kde γ_R je koeficient Rayleighova rozptylu:

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_c K T_F, \quad (2.43)$$

kde λ je vlnová délka, n je index lomu prostředí, p je střední hodnota foto-elastického koeficientu, β_c je koeficient izotermální stlačitelnosti při fiktivní teplotě T_F a K je Boltzmanova konstanta [36].

Mieův rozptyl je způsoben nehomogenitami, jejichž rozměry jsou srovnatelné nebo i větší, než je vlnová délka přenášeného signálu. Tyto nehomogenity jsou výsledkem nedokonalé válcové struktury vlnovodu a mohou být způsobeny zejména

nedokonalostmi vláken jako jsou např. poruchy rozhraní jádro-plášť, změnami průměru jádra, trhlinami a bublinami v optických vláknech. Pokud je velikost rozptylu nehomogenit vyšší než $\lambda/10$, rozptýlená intenzita je příliš velká. Mieův rozptyl může způsobovat značné ztráty [50].



Obr. 2.11: Rozdíl mezi lineárními rozptyly

2.3.3 Disperze optických vláken

Disperze má za následek zkreslení signálu. Rozeznáváme několik typů disperzí – u mnohavidových vláken je to vidová disperze, která je způsobena tím, že různé vidy se šíří různou rychlostí, a tím dochází k roztažení pulzu v čase. To má za následek mezisymbolovou interferenci a nemožnost detektoru rozpoznat přijímaný signál. U jednovidových vláken se vyskytuje chromatická disperze a polarizační vidová disperze. Jejich podrobný popis je v kapitole 2.4.

2.4 Disperze v optických vláknech

Obecný základ disperzí je spojen s fázovou a skupinovou rychlostí šíření. Fázová a skupinová rychlost šíření se mění v závislosti na změně geometrie a indexu lomu, který vyvolá jejich změnu frekvenční závislosti [8].

Fázová rychlost

Fázovou rychlost je možné vyjádřit vztahem [8]:

$$v_F = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k}, \quad (2.44)$$

kde v_F je fázová rychlost, se kterou se posouvá místo, kde je fáze vlny konstantní, t je čas, ω je úhlová frekvence, k je vlnový vektor a z je souřadnice místa. Pokud platí, že $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $n = \frac{c}{v}$ a fázová rychlost je funkcí vlnové délky, potom platí, že index lomu n je funkcí vlnové délky λ .

$$n = f(\lambda), \quad (2.45)$$

kde c je rychlost světla v materiálovém médiu a v je rychlost šíření. Tento jev se nazývá disperze. Fázová rychlost může mít větší rychlost, než světlo ve vakuu [8].

Skupinová rychlost šíření

Skupinová (grupová) rychlost je ve své podstatě přenos energie vlněním. Při přenosu energie se vlnou můžou šířit signály, tudíž skupinová rychlost nemůže být větší než rychlost světla ve vakuu [27]. Pokud se vlna skládá z více harmonických vln, tzn. není monochromatická, pak vlny vytvářejí tzv. skupiny, nebo-li grupy. Skupinová rychlost v_G pro disperzní prostředí je dána vztahem [40]:

$$v_G = \frac{d\omega}{dk}. \quad (2.46)$$

Pro nedisperzní prostředí platí [40]:

$$v_G = v_F. \quad (2.47)$$

Úvod do disperzí

Harmonický signál se šíří rychlostí v prostředí, jehož fázová konstanta je $\beta(\omega)$.

$$v = \frac{\omega}{\beta(\omega)} \quad [\text{m/s}], \quad (2.48)$$

kde v je rychlost šíření, ω je uhlová frekvence a $\beta(\omega)$ je fázová konstanta. Pro rychlost v homogenním optickém prostředí platí:

$$v = \frac{c}{n} \quad [\text{m/s}], \quad (2.49)$$

potom můžeme zapsat [8]:

$$\beta = n \cdot \frac{\omega}{c} \quad [\text{rad/m}], \quad (2.50)$$

kde β je konstanta šíření. Při přenášení signálu určitou skupinou vln vzniká skupinová rychlost šíření:

$$v_{\text{sk}} = \left. \frac{\partial \omega}{\partial \beta} \right|_{\omega_0} \quad [\text{m/s}], \quad (2.51)$$

kde v_{sk} je skupinová rychlost a ω_0 je nosná frekvence. Potom můžeme určit dobu skupinového zpoždění vztahem:

$$\tau_{\text{sk}} = \frac{1}{v_{\text{sk}}} \cdot L \quad [\text{s}], \quad (2.52)$$

kde τ_{sk} je skupinové zpoždění a L je délka optického vlákna. Disperze je důležitým parametrem optických vláken a určuje šířku přenášeného pásma a také přenosovou rychlost. Rozšiřování pulzů v optických přenosech způsobují tyto nezávislé jevy [8]:

- materiálová disperze,
- vlnovodná disperze,
- vidová disperze,
- polarizační vidová disperze.

V jednovidových optických vláknech vzniká polarizační vidová a chromatická disperze. Ta vznikne kombinací materiálové a vlnovodné disperze. Vidová (módová) disperze se v jednovidových vláknech samozřejmě nevyskytuje. Obecné limity pro různé přenosové rychlosti jsou uvedeny v tabulce 2.9. K nárůstu bitové chybovosti dochází již při 10 % šířky bitového intervalu.

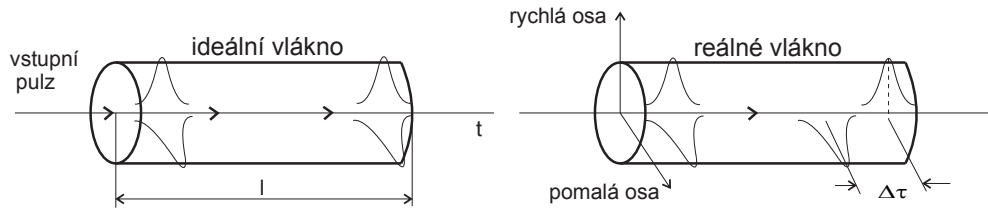
Tab. 2.9: Obecné limity disperze [5]

Přenosová rychlost [Gbit/s]	Délka bitového intervalu T [ps]	Limit = 10 % T [ps]
2,5 (STM16)	400	40
10 (STM64)	100	10
10 (GE)	100	10
40 (STM256)	25	2,5

2.4.1 Polarizační vidová disperze

Polarizační vidovou disperzi způsobují anizotropní vlastnosti optického vlákna, tzn. že index lomu není v celém průřezu vlákna stejný, což způsobují okolní jevy jako jsou tlak, teplota, tah atd. Jednotlivé složky světla se šíří různou rychlostí, a tak vzniká polarizační vidová disperze PMD. Je to náhodná veličina, která se s časem mění. Pro vysokorychlostní přenosy představuje jeden z hlavních problémů, který ovlivňuje přenos dat.

Světelný signál, který je navázán jednovidovým optickým vláknem je šířen ve dvou navzájem kolmých polarizačních rovinách. Signál se tedy šíří přes dva polarizační vidy. Na konci trasy mají polarizační vidy mezi sebou časovou prodlevu Δ_{τ} , označovanou jako DGD (Differential Group Delay). Velikost DGD se mění velmi pomalu v časové oblasti, ale jeho změna v závislosti na vlnové délce je podstatně rychlejší. Hodnota polarizační vidové disperze je vyjádřena v piko sekundách (ps). Prakticky se PMD projeví tak, že pulz přenášející informaci je tvořen oběma polarizačními vidy a dochází tím k jeho roztahování. Rozdíl mezi reálným a ideálním vláknem je na obrázku 2.12. Jelikož se impulz časově roztahuje, dochází ke snižování výkonové špičky signálu a tím se zhoršuje odstup signálu od šumu (OSNR – Optical Signal to Noise Ratio). Navíc může dojít k mezisymbolové interferenci. Příčinou polarizační vidové disperze je zejména podélná kruhová nesymetrie vlákna a nehomogenity v materiálu. Říkáme, že ve vláknech je přítomen dvojlom [59].



Obr. 2.12: Rozdíl mezi ideálním a reálným optickým vláknem z hlediska DGD [53]

Další faktory, které ovlivňují polarizační vidovou disperzi jsou kvalita montáže trasy a vliv okolního prostředí, zejména teplotní změny při sezónním zahřívání a ochlazování optického vlákna. Všechny tyto faktory ovlivňují PMD náhodným způsobem, proto je těžké ji kompenzovat. Musíme k ní přistupovat jako k náhodnému jevu, protože její hodnota se nedá přesně stanovit výpočtem jako u chromatické disperze. Parametr DGD nebo $\Delta\tau$ patří k základnímu měřítku PMD a měří se v [ps] [47].

Polarizační vidová disperze PMD je na krátkých délkách vlákna (do 10 km) téměř lineární a lze ji vyjádřit jako [8]:

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l} \quad [\text{ps/km}], \quad (2.53)$$

kde $\Delta\tau$ je diferenciální skupinové zpoždění a l je délka optického vlákna. Pro délky vlákna nad 10 km se šíří PMD s druhou mocninou vzdálenosti [8]:

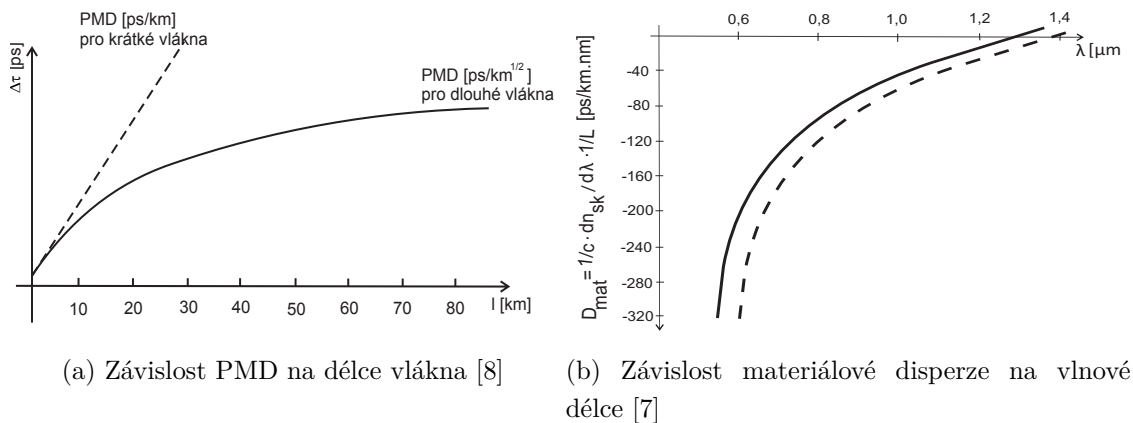
$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} \quad [\text{ps}/\sqrt{\text{km}}]. \quad (2.54)$$

Závislost PMD na délce vlákna je zobrazena na obrázku 2.13a. Limitní hodnoty pro PMD dle standardu ITU-T G.697 jsou uvedeny v tabulce 2.10. Polarizační vidová disperze se nejčastěji počítá z koeficientu PMD_{KOEf} :

$$PMD_{\text{TOTAL}} = PMD_{\text{KOEf}} \cdot \sqrt{L} \quad [\text{ps}]. \quad (2.55)$$

Tab. 2.10: Limitní hodnoty PMD dle ITU-T G.697 [17]

Přenosová rychlost [Gbit/s]	0,155	0,622	2,5	10	40
SDH	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64	STM-256
Trvání 1 bitu [ps]	6 430	1 610	401,88	100,47	25,12
Limit PMD [ps]	640	160	40	10	2,5
Limit PMD deklarace 1/10 [ps]	643	161	40,1	10	2,51
PMD koef na 400 km [ps/√km]	>32	>8	>2	0,5	<0,125



Obr. 2.13: Závislost PMD na délce vlákna a závislost materiálové disperze na vlnové délce

PMD limity pro SDH (Synchronní Digitální Hierarchie) jsou dle doporučení ITU-T G.959.1 stanoveny dle vztahu [16]:

$$DGD_{MAX} = 3 \cdot PMD \quad [\text{ps}]. \quad (2.56)$$

Prakticky to znamená, že hranice DGD_{MAX} je nastavena tak, aby v 99.9954 % nebyly problémy s přenosem kvůli PMD (z Maxwellova rozložení).

PMD limity pro 10G Ethernet jsou dle doporučení IEEE 802.3ae stanoveny na $DGD_{MAX} = 19 \text{ ps}$ s jistotou že v 99.999987 % případů nebudou problémy s přenosem kvůli PMD (z Maxwellova rozložení). V takovém případě platí [5]:

$$DGD_{MAX} = 3,73 \cdot PMD \quad [\text{ps}]. \quad (2.57)$$

2.4.2 Chromatická disperze

V jednovidových optických vláknech vzniká kromě polarizační vidové rovněž chromatická disperze. Skládá se ze dvou dílčích složek – materiálové disperze a vlnovodné disperze.

Materiálová disperze

K materiálové disperzi dochází proto, že šíření světelného impulzu je závislé na interakci vlnových délek s indexem lomu jádra vlákna. Různé vlnové délky se v optickém materiálu šíří rozdílnou rychlostí. Různé vlnové délky světelného impulzu, které vstoupí do vlákna současně pak opustí vlákno v různých časech. Materiálová disperze je funkce zdrojové spektrální šířky. Spektrální šířka specifikuje rozsah vlnových délek, které se mohou šířit ve vlákne. Odlišnost zpoždění dvou skupinových

signálů, které se přenášejí na společném vidu s různou vlnovou délkou ve vzdálenosti mezi sebou o Δt je daný rozvojem řady [6]:

$$\Delta\tau'_{\text{sk}} = \frac{d\tau_{\text{sk}}}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2\tau_{\text{sk}}}{d\lambda^2} \cdot (\Delta\lambda^2) + \dots \quad [\text{s}], \quad (2.58)$$

kde τ'_{sk} je fázové zpoždění, τ_{sk} je skupinového zpoždění, λ je vlnová délka a $\Delta\lambda$ je šířka pásma. Z grafu na obrázku 2.13b je patrné, že materiálová disperze je pro klasické telekomunikační vlákno nulová okolo $\lambda = 1\,300\text{ nm}$. Materiálovou disperzi můžeme popsat druhou derivací indexu lomu n podle kruhové frekvence ω , nebo disperzním koeficientem $D(\lambda)$ definovaným jako [7]:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad [\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})], \quad (2.59)$$

kde n je indexu lomu prostředí a c je rychlost světla v materiálovém médiu.

Vlnovodná disperze

Příčinou vlnovodné disperze je, že konstanta šíření je různá pro každý vid, což způsobuje změnu kmitočtu a to má za následek změnu rychlosti šíření [8]. Vlnovodná disperze je způsobena tím, že část světla se pohybuje v plášti vlákna, na rozdíl od většiny světla, které se šíří jádrem optického vlákna. Vzhledem k tomu, že plášť je vyrobený z materiálu, který má nižší index lomu jak jádro vlákna, světelný paprsek, který se pohybuje v plášti se šíří rychleji než v jádru optického vlákna. Rozdíly indexu lomu jádra a pláště v jednom optickém vlákne jsou nepatrné, ale na větší vzdálenosti se mohou stát ovlivňujícím faktorem [62]. Pro skupinovou rychlost disperze definujeme parametr D jako [8]:

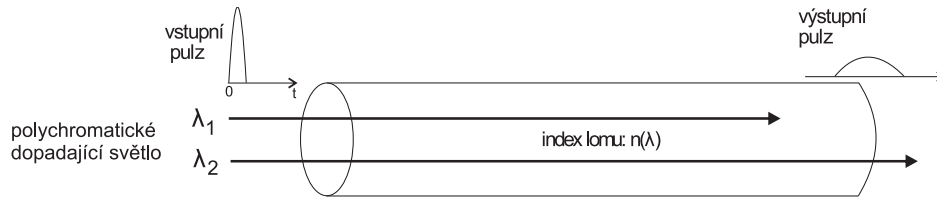
$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = \frac{2\pi c}{v_g^2 \lambda^2} \cdot \frac{dv_g}{d\omega} \quad [\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})], \quad (2.60)$$

kde $\lambda = 2\pi c/\omega$ je vlnová délka ve vakuu a $v_g = d\omega/d\beta$ je skupinová rychlost. Chromatická disperze není náhodný jev a dá se vypočítat a hlavně kompenzovat. Vliv kabelu, okolního prostředí a instalace trasy je na chromatickou disperzi zanedbatelný [7]. Koeficient chromatické disperze je [8]:

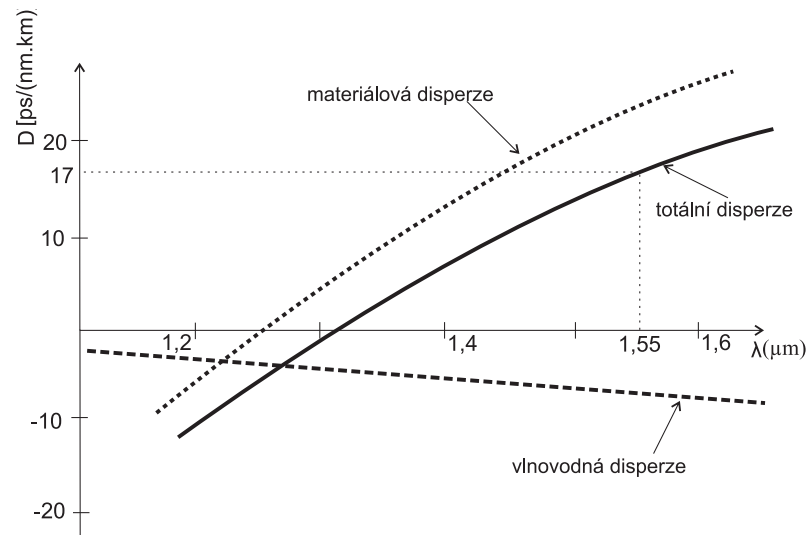
$$D_{\text{chr}} = c_0 \cdot f \cdot \frac{dt_s}{df} \quad [\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})], \quad (2.61)$$

kde c_0 je rychlost světla ve vakuu, t_s je skupinového zpoždění a f je frekvence.

Průběh chromatické disperze je zobrazený na obrázku 2.15. V tabulce 2.11 jsou uvedené maximální hodnoty koeficientu CD dle normy ITU-T G.697. Koeficient nám udává rozšíření pulzu v ps, při využití zdroje se spektrální pološířkou 1 nm při průchodu optickým vlákem délky 1 km [8]. Typická hodnota koeficientu CD je 16–17 ps/(nm·km) pro vlnovou délku 1 550 nm [5].



Obr. 2.14: Chromatická disperze jednovodového vlákna [8]



Obr. 2.15: Chromatická disperze v konvenčním vlákne spolu s materiálovou a vlnovodnou disperzí [8]

Tab. 2.11: Limity CD dle ITU-T G.697 [17]

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

2.5 Nelineární jevy v optických vláknech

V nelineárním optickém prostředí platí, že elektrická polarizace atomů v dielektrických prostředí není vždy úměrná intenzitě elektrického pole. V přítomnosti silného elektrického pole E , odezva vázaných elektronů do aplikovaného pole není lineární. Celková elektrická polarizace musí být vyjádřena ve formě [43]:

$$\vec{P} = \epsilon_0(\chi^1 \vec{E} + \chi^2 \vec{E}\vec{E} + \chi^3 \vec{E}\vec{E}\vec{E}) \quad (2.62)$$

kde χ^1 představuje lineární susceptibilitu, vyšší řády χ^2 a χ^3 označujeme jako kvadratickou a kubickou susceptibilitu. Šíření světla v tomto nelineárním prostředí popíšeme nelineární vlnovou rovnicí 2.63, ve které vycházíme z Maxwellových rovnic.

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2}, \quad (2.63)$$

kde polarizaci \vec{P} můžeme rozepsat do lineární a nelineární části [43]:

$$\vec{P}(t) = \vec{P}^L(t) + \vec{P}^{NL}(t). \quad (2.64)$$

Dosazením vztahu 2.64 do nelineární vlnové rovnice 2.63 dostaneme vztah:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial^2 \vec{P}^L}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial^2 \vec{P}^{NL}}{\partial t^2}. \quad (2.65)$$

Předpokládáme-li, že se elektrické pole skládá z monochromatického pole, můžeme ho zapsat pomocí vztahu [43]:

$$\vec{E} = \frac{1}{2} \sum [E_m e^{i(k_j z - \omega_m t)}], \quad (2.66)$$

kde směr polarizace m -tého pole odpovídá ω_m . Pokud dosadíme do rovnice 2.66 termín nelineární polarizace $\vec{P}^{NL} = \chi^3 \vec{E} \vec{E} \vec{E}$, dostaneme tvar:

$$\vec{P}^{NL} = \frac{1}{2} \sum_{m=1} [\vec{P}_m^{NL} e^{i(k_j z - \omega_m t)}]. \quad (2.67)$$

Nelineární optické jevy jsou výsledkem vzájemného působení několika optických polí současně mezi sebou, které jsou ve vlákně a mohou také zahrnovat akustické vlny nebo molekulové vibrace. Rozlišujeme je na několik základních typů:

- jevy druhého řádu,
- jevy třetího řádu,
- nelineární rozptyly.

2.5.1 Jevy druhého řádu

Nelineární jevy druhého řádu jsou popsány v druhém koeficientu rovnice 2.62, který je daný vztahem:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi^2 \vec{E} \vec{E}. \quad (2.68)$$

Generování druhé harmonické (SHG)

Jedná se o speciální případ generace součtové frekvence (SHG – Second Harmonic Generation). Generování druhé harmonické si můžeme představit následujícím způsobem – laser bude emitovat světlo vlnové délky λ na nelineárním krystalu. Když se krystal otáčí, v určitém úhlu mezi směrem laserového paprsku a optickou osou, tak se výstupní laserový paprsek skládá ze dvou složek: λ a $\lambda/2$. Na rozdíl od základní složky λ se objeví další složka, jejíž druhá harmonická frekvence je dvakrát vyšší než základní harmonická [1].

Pokud předpokládáme, že na nelineární prostředí dopadá světelná vlna, jejíž intenzitu elektrického pole můžeme vyjádřit vztahem [7]:

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kz), \quad (2.69)$$

kde E_0 je amplituda intenzity elektrického pole, pak polarizaci vyjádříme jako [7]:

$$\vec{P} = \epsilon_0(\chi^1 \vec{E} + \chi^2 \vec{E}\vec{E}). \quad (2.70)$$

Pokud do rovnice 2.70 dosadíme rovnici 2.69, pak po nutných úpravách dostaneme vztah [7]:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi^1 E_0 \cos(\omega t - kz) + \frac{\epsilon_0 \chi^2 E_0^2}{2} + \frac{\epsilon_0 \chi^2 E_0^2}{2} \cos[2(\omega t - k'z)]. \quad (2.71)$$

Poslední člen rovnice 2.71 popisuje generování 2. harmonické vlny, kde 2ω je úhlový kmitočet a k' je funkcí druhé harmonické [1].

Generování součtové (SFG) a rozdílové (DFG) frekvence

Tento jev se využívá při směšování dvou optických vln rozdílných frekvencí do jedné výsledné optické vlny. Pokud je prostředí současně vystaveno dvěma intenzitám elektrického pole, pak vstupní pole zapíšeme [43]:

$$\vec{E}(\omega_3) = \frac{1}{2} \left(\vec{E}_1 e^{-i\omega_1 t} + \vec{E}_2 e^{-i\omega_2 t} \right). \quad (2.72)$$

Nelineární polarizaci zapíšeme v komplexním tvaru jako:

$$\vec{P}^{(2)}(\omega_3) = \frac{1}{2} \vec{P}^{(2)} e^{-i\omega_3 t}. \quad (2.73)$$

Součtová frekvence (SFG – Sum Frequency Generation) zahrnuje signálovou vlnu ω_2 s původní vlnou ω_1 , čímž získáme harmonické kmitání [43]:

$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2, \quad (2.74)$$

a pro rozdílovou frekvenci (DFG – Difference Frequency Generation) platí vztah:

$$\omega_3 = \omega_1 - \omega_2, \quad (2.75)$$

DFG je doprovázena zesílením jednoho vstupního pole na úkor druhého, proto se často označuje jako optické parametrické zesílení. .

Kvazi-fázové přizpůsobení (QPM)

QPM (Quasi Phase Matching) je technika fázového přizpůsobení optických interakcí, v nichž je relativní fáze upravena v pravidelných intervalech. Tento jev je založen na periodicky pólovaném lithium niob (PPLN), který je vysoce efektivním materiálem využívaným pro SHG, SFG a DFG procesy. Hlavní myšlenka je ta, aby bylo možné povolit fázový nesoulad na určitou vzdálenost, ale zároveň narušit nelineární interakce v místech, kde by jinak tato interakce probíhala špatným směrem [48].

2.5.2 Jevy třetího řádu

Nelineární jevy třetího řádu jsou popsány třetím koeficientem rovnice 2.62, který je daný:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi^3 \vec{E} \vec{E} \vec{E}. \quad (2.76)$$

Jevy probíhají v tzv. Kerrově prostředí, protože se v tomto prostředí uplatňuje tzv. Kerrův jev. Tento jev je popisován jako závislost indexu lomu prostředí na intenzitě světelného paprsku vstupujícího právě do tohoto prostředí:

$$\Delta n = n_2 I, \quad (2.77)$$

kde n je index lomu a I je intenzita světelného paprsku. Změna indexu lomu, která je různá v různých částech impulsu, významně ovlivňuje změny tvaru a polarizace impulsu šíření [40].

Vlastní fázová modulace (SPM – Self Phase Modulation)

Při tomto jevu dochází k modulaci fáze paprsku, který prochází nelineárním prostředím 3. řádu. Signál ovlivňuje sám sebe a mění se velikost vlastní fáze $\Delta\varphi$. Fázové posunutí může být zapsáno jako:

$$\Delta\varphi = -2\pi n_2 \frac{L}{\lambda_0 A} P, \quad (2.78)$$

kde n_2 je index lomu, L je uražená vzdálenost, A je průřez optického prostředí a P je výkon impulsu [1]. Velikost vlastní fáze je závislá na rychlých změnách hran impulsů vzrůstajícího a klesajícího výkonu. Dochází tak k celkovému rozšíření spektra. Změna energie mezi náběžnou a sestupnou hranou impulsu se nazývá „chirp“. Náběžná hrana způsobuje posuv vlnových délek nahoru, sestupná hrana posun vlnových délek dolů.

Autofokusace (Self-Focusing)

Paprsek procházející nelineárním prostředím třetího řádu můžeme při správném rozložení indexu lomu zaměřit do jednoho bodu. Funkce tohoto prostředí je pak obdobná optické čočce. Ohnisková vzdálenost je závislá na intenzitě světelného paprsku. Tento nelineární jev je vyvolán laserovým paprskem z prostorově nerovnoměrného rozložení intenzity $I(r)$:

$$n(r) = n_0 + n_2 I(r), \quad (2.79)$$

kde n_2 je tzv. nelineární index. Při zvyšování indexu lomu v prostředí jsou paprsky vychýlené ve směru velké intenzity pole [28].

Křížová fázová modulace (XPM)

Podobně jako SPM tak i XPM (Cross Phase Modulation) je založena na Kerrově jevu. Když se dva a více optických impulzů šíří současně, XPM je vždy doprovázena SPM, protože nelineární index lomu optického paprsku závisí nejen na jeho intenzitě, ale i na intenzitě druhého šířícího se paprsku [30]. Křížová fázová modulace je tedy optická změna fáze paprsku světla v důsledku interakcí s jiným světlem v nelineárním prostředí. Toto můžeme popsat jako změnu indexu lomu:

$$\Delta n^{(2)} = 2n_2 I^{(1)}, \quad (2.80)$$

kde n^2 je nelineární index index lomu, $I^{(1)}$ je intenzita paprsku 1 a způsobí změnu indexu lomu pro paprsek 2. XPM provází kolísání úrovně na určité vlnové délce kanálu na fázové kolísání ostatních šířených kanálů. XPM je dvakrát více účinná než SPM pro stejné množství výkonu [49].

Čtyřvlnné směšování(FWM)

FWM (Four Wave Mixing) je druh optického Kerrova jevu, který nastává, když navážeme do optického vlákna 3 signály rozdílných vlnových délek, které vedou ke vzniku nového signálu na vlnové délce, která se neshoduje s ostatními. FWM je druh optického kmitání. Nejvíce se tento nelineární jev může vyskytovat v systémech hustého vlnového multiplexu DWDM, kde jsou jednotlivé nosné vlnové délky velice těsně u sebe (až 0,2 nm). Čím jsou nosné vlnové délky blíže u sebe, a čím je jejich výkon vyšší, tím vyšší je riziko vzniku FWM. Vznik nového signálu f_{FWM} z frekvencí f_1, f_2 a f_3 je dán vztahem [3]:

$$f_{FWM} = f_1 + f_2 - f_3 \quad [\text{Hz}]. \quad (2.81)$$

Počet nově vzniklých signálů M z N vstupních signálů je vyjádřen jako [3]:

$$M = \frac{N^2}{2} \cdot (N - 1). \quad (2.82)$$

Účinnost FWM na DWDM přenos je kriticky závislá také na hodnotě chromatické disperze. Nulová chromatická disperze je absolutně nevhodná, proto při uplatňování tohoto jevu byla vyvinuta vlákna s nenulovou hodnotou této disperze (NZ-DSF), jejichž popis je v podkapitole 2.2.3.

2.5.3 Nelineární rozptyl světla

Nelineární rozptyl můžeme klasifikovat jako přímou přeměnu fotonu z jedné vlnové délky do jiné, nebo jiných vlnových délek. Rozptyl světla je v optických vláknech přítomen vždy, i při malých výkonech. Hlavní formy nelineárního elektromagnetického rozptylu jsou Ramanův a Brillouinův rozptyl. Jsou to spontánní rozptyly, které

předpokládají, že elektrické pole neovlivňuje současné vlastnosti optického vlákna. Stimulovaný rozptyl je jev, při kterém dochází k rozptylu světelné vlny vlivem srážek s tepelně nebo akusticky kmitajícími atomy vlákna [8].

Stimulovaný Ramanův rozptyl (SRS)

SRS (Stimulated Raman Scattering) je jev, který vzniká při interakci optického záření (fotonů) s vibračními složkami prostředí (molekulami křemenného skla). Při srážce fotonu s energií $E_1 = h \cdot f_p$ s molekulou o vibrační frekvenci f_m , molekula absorbuje část energie fotonu. Foton bude mít pak energii s novou frekvencí f_s . Takto nově modifikovaný foton se nazývá Stokesův [8]. Kritický výkon P_{cr} čerpacího laseru (Ramanovy pumpy), při kterém dojde ke stimulovanému Ramanovu rozptylu je dán vztahem [58]:

$$P_{cr} \approx \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}}, \quad (2.83)$$

kde A_{eff} je efektivní plocha, g_R je Ramanův zisk a L_{eff} je efektivní délka vlákna.

Stimulovaný Ramanův rozptyl se využívá v Ramanovských zesilovačích a distribuovaných sensorových systémech pro měření teploty. Ramanův rozptyl se šíří oběma směry a je oproti dopřednému užitečnému signálu spektrálně posunut přibližně o 10 THz [1].

Stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS)

Tento nelineární proces může nastávat v optickém vlákne při vstupních výkonech mnohem nižších, než jsou potřebné pro SRS. Zatímco v SRS se Stokesova vlna může šířit v obou směrech, v SBS (Stimulated Brillouin Scattering) se šíří pouze ve zpětném směru [1].

Stimulovaný Brillouinův rozptyl vzniká interakcí optického pole a akustického vlnění. Při dostatečně velkém vstupním výkonu se optická vlna rozptyluje na akustické vlně. Výsledně rozptýlená vlna se šíří ve zpětném směru a zeslabuje dopředně se šířící signál o určitou část energie, která byla rozptýlena na akustické vlně [43].

Intenzita Stokesovy vlny roste exponenciálně, pokud vstupní výkon překročí prahovou hodnotu P_{cr} . Pro úzkopásmové signály můžeme vyjádřit kritický výkon čerpacího laseru (Brillouinovy pumpy) odpovídajícímu prahu SBS efektu [58]:

$$P_{cr} \approx \frac{21bA_{eff}}{g_B L_{eff}}, \quad (2.84)$$

kde b je hodnota polarizace ležící mezi 1 a 2 v závislosti na relativní polarizaci čerpací a Stokesovy vlny, A_{eff} je efektivní plocha, g_B je Brillouinův zisk a L_{eff} je efektivní délka vlákna. Stimulovaný Brillouinův rozptyl se využívá v Brillouinových zesilovačích a v distribuovaných sensorových systémech. Oproti užitečnému signálu je spektrálně posunut přibližně o 10 GHz [1].

3 OPTICKÉ PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ

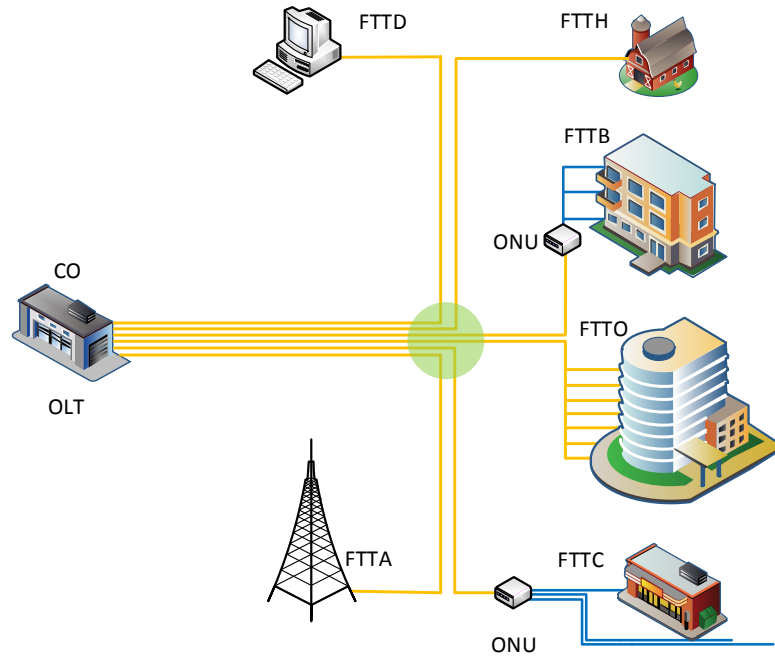
Je to již 17 let, kdy byla standardizována první optická přístupová síť OAN (Optical Access Network) typu APON (ATM Passive Optical Network). Za tuto dobu byla v rámci optických přístupových sítí standardizována celá řada technologií a systémů, přičemž na vrcholu této pomyslné pyramidy dnes stojí technologie NG-PON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2), využívající kombinaci zaběhnutých technologií časového multiplexu TDM (Time Division Multiplexing) a vlnového multiplexu WDM (Wavelength Division Multiplex). Nejnovější technologie využívané na páteřních a transportních sítích se postupně stávají cenově dostupnější a pomalu migrují do oblastí přístupových sítí.

Nástup optických technologií do oblasti přístupových sítí je velice pozvolný, což je dáno především vysokými počátečními investicemi na vybudování těchto sítí. Aktivní i pasivní prvky sice jsou již cenově relativně dostupné, největší položkou realizace jsou však stále výkopové práce a pokládka optických vláken. V České republice je zavádění těchto technologií ještě pozvolnější. I přes nespočetné výhody sítí FTTx jsou stále nejvíce využívány technologie VDSL (Very high bit rate Digital Subscriber Line) využívající již dlouhá léta instalované metalické páry dříve určené pro analogové telefonní služby. Situaci na trhu zlepšují menší poskytovatelé ISP (Internet Service Provider), kteří se snaží budovat sítě FTTH (Fiber To The Home) a FTTB (Fiber To The Building) i v menších městech a obcích.

I přes výše uvedené informace se však očekává, že do budoucna budou všechny ostatní technologie přístupových sítí vytlačeny optickými přístupovými sítěmi, které již dnes umožňují mnohonásobně větší šířku přenosového pásma. Výzkum a vývoj optických sítí je v této oblasti telekomunikací velice významný.

3.1 Základní uspořádání optických přístupových sítí

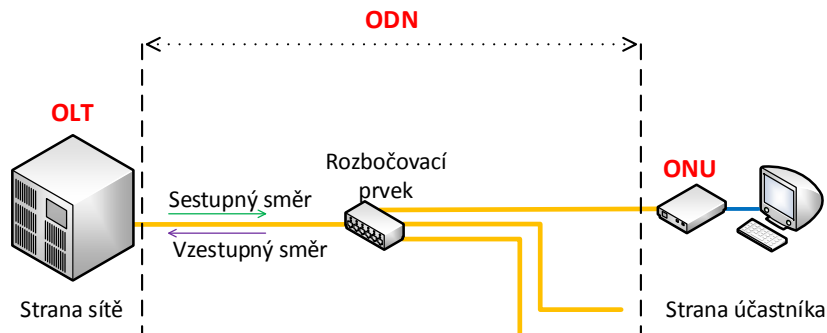
Optické přístupové sítě se obecně označují zkratkou FTTx (Fiber To The x), kde písmeno x udává, o jaký konkrétní typ se jedná. Ve své podstatě konkrétní typ sítě FTTx udává poměr optické/metalické části sítě, jak je znázorněno na obrázku 3.1. V prostředí České republiky se nejčastěji setkáme se sítěmi FTTB, kdy je optická část zakončena v rozvodném uzlu např. panelového domu a vnitřní rozvody jsou řešeny pomocí strukturované kabeláže. Méně často se setkáme se sítěmi FTTH, které vedou optický signál od poskytovatele služeb až do zákaznických přípojek. S rozvojem vysokorychlostních mobilních technologií LTE (Long Term Evolution) jsou také často využívány systémy FTTA (Fiber To The Anthenna), kde jsou optická vlákna



Obr. 3.1: Typy sítí FTTx

použita pro datovou konektivitu vysílacích stanic. Sítí FTTx je celá řada a jednotlivé typy nejsou standardizovány. V literatuře je tak možné setkat se s různými názvy. Mezi základní typy patří [12]:

- FTTC (Fiber To The Curb) – optická vlákna jsou zavedena do účastnického rozvaděče a odtud jsou koncový uživatelé připojeni strukturovanou kabeláží,
- FTTO (Fiber To The Office) – optická vlákna vytváří konektivitu koncovým účastníkům s velkými nároky na přenosovou kapacitu (business klienti),
- FTTD (Fiber To The Desk) – u této varianty je optické vlákno vedeno až do přístroje koncového uživatele.



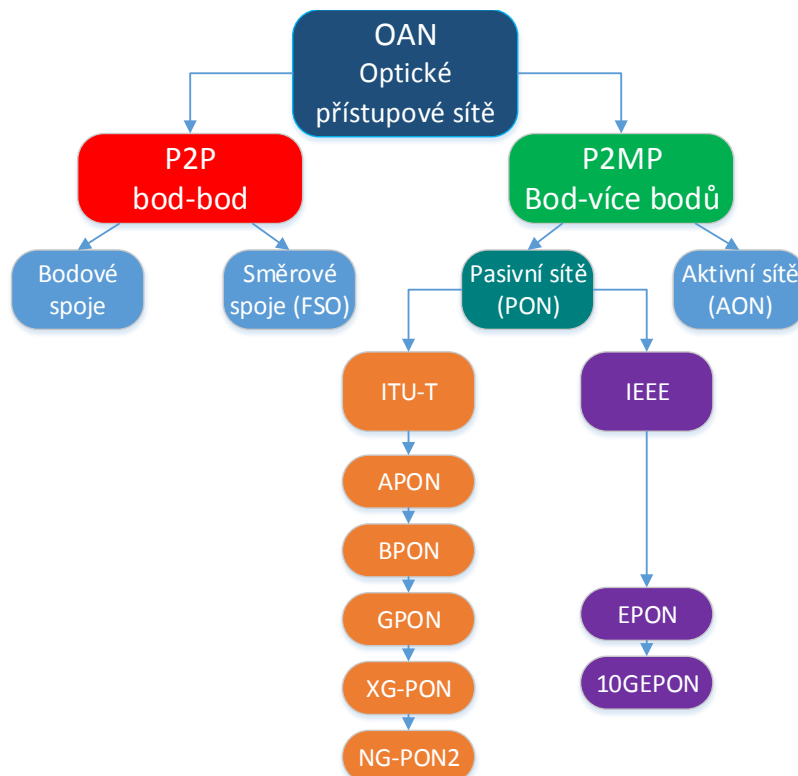
Obr. 3.2: Základní funkční celky tvořící OAN

Optická přístupová síť sestává ze tří základních funkčních celků [44]:

- OLT (Optical Line Terminal) – optické linkové zakončení, které zajišťuje funkci síťového rozhraní mezi sítí zajišťující telekomunikační služby a sítí přístupovou,
- ONU (Optical Network Unit) – optické síťové zakončení, zajišťující funkce na rozhraní mezi optickou a metalickou částí sítě,
- ODN (Optical Distribution Network) – optická distribuční síť, nebo-li soubor prostředků pro přenos signálu mezi OLT a ONU.

3.1.1 Rozdělení optických přístupových sítí

Optické přístupové sítě je možné dělit hned z několika hledisek – podle již výše zmíněného poměru optické a metalické části sítě, dále podle použité technologie na síť vytvářející spojení bod–bod (P2P), bod–více bodů (P2MP) a dle použitých prvků na aktivní nebo pasivní síť. V případě sítí P2MP pak dále můžeme síť dělit podle použitého multiplexu a v neposlední řadě dle standardů ITU-T a IEEE. Schématické rozdělení optických přístupových sítí je na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Obecné rozdělení optických přístupových sítí

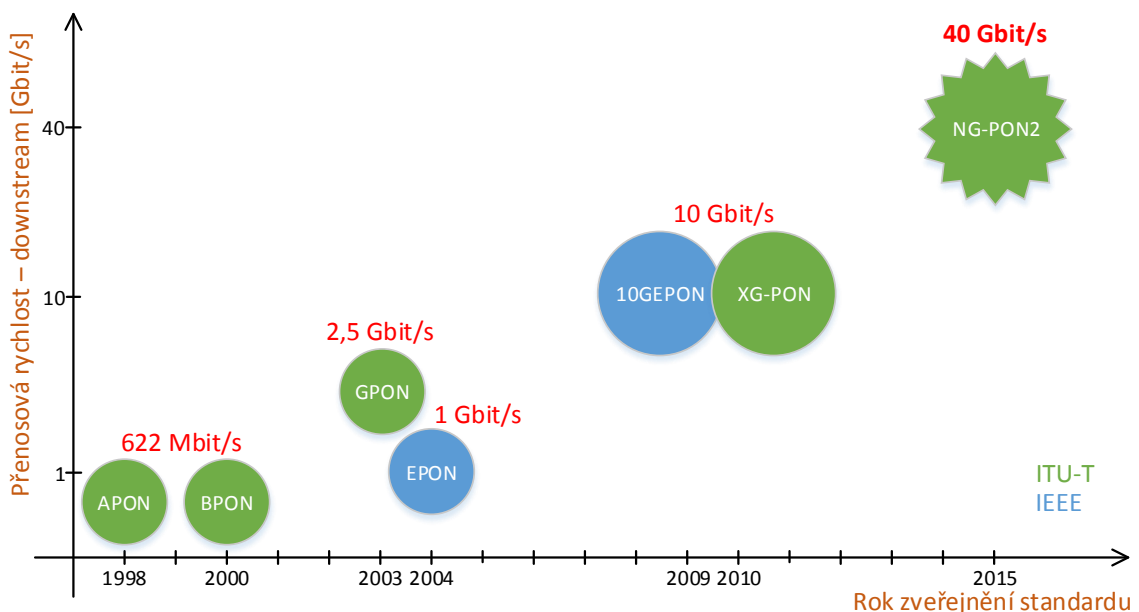
Vláknové spojení typu bod–bod vyžadují nejčastěji instituce, jejich požadavky na šířku přenosového pásma jsou vysoké a sdílení přenosových prostředků tak není

žadoucí. Dalším důvodem využívání těchto spojů je bezpečnost. I přes nejmodernější šifrovací mechanismy je zde jisté riziko nežádoucího odposlechu či jiného zneužití dat získaných ze sdíleného média třetí stranou. V praxi to znamená, že státní instituce, banky, úřady, vojenské instituce apod. využívají vláknové spojení bod–bod. Pro připojení k internetu běžných uživatelů se používá spojení vícebodové.

Vícebodová spojení je možné dělit na aktivní a pasivní. Aktivní přístupové sítě AON (Active Optical Network) obsahují v distribuční části sítě prvky, které vyžadují elektrické napájení. Jako příklad můžeme uvést aktivní rozbočovací prvky. Mnohem více jsou však rozšířeny pasivní optické sítě PON (Passive Optical Network), které mají distribuční sítě zcela pasivní. Rozbočování signálu je zde řešeno pasivními rozbočovači, tzv. splittersy, respektive pasivními multiplexery u nejnovějšího standardu NG-PON2, který využívá i vlnového multiplexu WDM.

3.2 Standardy optických přístupových sítí

Přenosová rychlost první pasivní optické přístupové sítě byla 622 Mbit/s v sestupném (downstream) směru. Za 17 let vývoje prodělaly přístupové sítě spoustu inovativních změn a přenosové rychlosti se dostaly až na hranici 40 Gbit/s. Tento typ sítí začal být standardizován ITU-T a později i IEEE. Mezi oběma typy standardů je zásadní rozdíl v přenášených datových jednotkách, kdy ITU-T využívá vlastní formát datových rámců (tzv. GEM rámce) a IEEE je založena na klasických ethernetovských rámcích. Postupný vývoj PON sítí je znázorněn na obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Vývoj standardů PON

3.2.1 Standardy dle ITU-T

APON byla první standardizovanou PON sítí ITU-T ve spolupráci s FSAN (Full Service Access Network) pod označením ITU-T G.983. Datový přenos byl tvořen pomocí ATM (Asynchronous Transfer Mode) buněk s celkovou přenosovou rychlostí 155 Mbit/s symetricky, nebo asymetricky s vyšší přenosovou rychlostí v sestupném směru 622,08 Mbit/s. V roce 2000 se zavedlo nové označení BPON (Broadband PON), které ze standardu APON přímo vycházelo. Oproti předchozí variantě bylo možné využít separace směru pomocí vlnového multiplexu. Přenosová rychlost byla doplněna o symetrickou variantu 622,08 Mbit/s [18].

GPON (Gigabit Passive Optical Network) představuje dalšího nástupce pasivní optické sítě, standardizované dle ITU-T G.984 v roce 2003. Přenosové rychlosti se u asynchronního přenosu zvýšily na 1,244 Gbit/s nebo 2,488 Gbit/s v sestupném směru, respektive 1,244 Gbit/s ve vzestupném směru, se zachováním zpětné kompatibility přenosových rychlostí APON/BPON. Pro symetrickou variantu je možná přenosová rychlost 1,244 Gbit/s nebo 2,488 Gbit/s. Pro přenos dat je využito opět ATM buněk, nebo je možné nově využít GEM (GPON Encapsulation Method) rámců s pevnou délkou 125 μ s. Standard využívá mechanismu DBA (Dynamic Bandwidth Assignment) pro dynamické přidělování šířky přenosového pásma. Maximální fyzický dosah sítě je 20 km při maximálním dělicím poměru 1:64 [19].

XG-PON (X Gigabit PON) byla představena v roce 2010 pod označením ITU-T G.987. Tato varianta je také občas označována jako NG-PON1 (Next Generation PON), nebo-li první varianta sítě další generace. Přenosová rychlost se zvýšila na 9,953 Gbit/s v sestupném směru, pro vzestupný směr zůstala přenosová rychlost 2,455 Gbit/s shodná jako u GPON. Uspořádání přenosových rychlostí je u tohoto standardu pouze asymetrické, což je hlavní rozdíl oproti standardu 10GEPON (10 Gigabit EPON). Maximální dělicí poměr byl stanoven na 1:256 při maximálním fyzickém dosahu sítě 20 km. Oproti standardu GPON je nově silnější systém zabezpečení, kdy jsou šifrována data nejen v sestupném směru, jako tomu bylo u předchozích standardů, ale i ve vzestupném směru. Standard XG-PON je zpětně kompatibilní s GPON [22]. Vzájemná koexistence GPON a XG-PON variant je řešena separací vlnových délek pomocí WDM.

3.2.2 Standardy dle IEEE

EPON je standard pro pasivní optickou síť vydaný IEEE v roce 2004, pod označením IEEE 802.3ah. Jak již plyne ze zkratky EPON, pro přenos dat se u tohoto standardu využívají standardní rámce protokolu Ethernet. Často je také tento typ sítě označován jako GEPON (Gigabit Ethernet PON). Standard 802.3ah definuje dva typy, a to EPON1 (1000BASE-PX10) a EPON2 (1000BASE-PX20). Rozdíl

mezi oběma typy je v maximálním fyzickém dosahu a dělicím poměru, kde první typ umožňuje 10 km a dělicí poměr 1:16 a druhý typ 20 km a dělicí poměr 1:32. Přenosové rychlosti byly stanoveny symetricky 1,25 Gbit/s [14]. Pro řízení dynamického přidělování šířky pásma jsou použity i zde obdobné mechanismy jako je DBA. Použité vlnové délky jsou v podobném rozsahu jako u GPON, jejich porovnání je v tabulce 3.1. Parametr λ_d udává vlnovou délku pro sestupný směr, λ_u pro vzestupný směr, P_s přenosovou rychlost v symetrickém režimu a P_a v asymetrickém režimu. Později se objevila i verze s přenosovými rychlostmi 2,5 Gbit/s symetricky. Tato varianta označovaná jako „Turbo EPON“ však nebyla standardizována a ujala se zejména v Číně.

10GEPON – standard IEEE 802.3av vydaný v roce 2009. Navazuje na EPON, z čehož plyne zpětná kompatibilita. 10GEPON je stejně jako EPON založen na přenosu rámců Ethernet. Nový standard nabízí dvě možnosti přenosových rychlostí – symetrickou s přenosovou rychlostí 10,3125 Gbit/s na fyzické vrstvě a asymetrickou s přenosovou rychlostí 10,3125 Gbit/s v sestupném směru a 1,25 Gbit/s ve vzestupném směru. Maximální rozbočovací poměr zůstal 1:32, tato hodnota je však pouze doporučena a lze ji měnit v závislosti na dosahu sítě, tak aby byla dodržena maximální hodnota překlenutelného útlumu. Vzájemná koexistence s EPON je zajištěna časovým multiplexem TDM ve vzestupném směru, kde zůstaly vlnové délky stejné, v sestupném směru využívá 10GEPON 1 575–1 580 nm zatímco EPON 1 480–1 500 nm [55].

Tab. 3.1: Porovnání parametrů PON standardů

Standard	APON/BPON	GPON	XG-PON	EPON	10GEPON	NG-PON2
Označení	ITU-T G.983	ITU-T G.984	ITU-T G.987	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av	ITU-T G.989
Vznik	1998	2003	2010	2004	2009	2015
P_s [Gbit/s]	0,155/0,622	1,224/2,488	–	1,25	10,3125	10
P_a [Gbit/s]	0,622/0,155	2,488/1,224	9,953/2,455	–	10,3125/1,25	40/10
λ_d [nm]	1 480–1 500	1 480–1 500	1 575–1 580	1 480–1 500	1 570–1 600	1 596–1 603
λ_u [nm]	1 260–1 360	1 260–1 360	1 260–1 280	1 260–1 360	1 260–1 360	1 524–1 544
Dělicí poměr	1:16	1:64	1:256	1:32	1:32	1:256
Dosah [km]	20	20	20	20	20	60

3.2.3 NG-PON2

Zveřejněním standardů 10GEPON a XG-PON samozřejmě vývoj optických přístupových sítí neskončil. Úlohou skupiny „Study Group 15“, která se zabývá návrhy standardů pro optické sítě, bylo vybrat vhodnou technologii, která by umožňovala přenosové rychlosti až 40 Gbit/s, fyzický dosah systému až 40 km bez použití zesilovačů s dělicím poměrem minimálně 1:64 a to se zachováním zpětné kompatibility se stávajícími PON sítěmi standardizovanými dle ITU-T. Pro nový standard NG-PON2

přicházela v úvahu celá řada technologií, zejména multiplexačních technik a jejich kombinací. Zvažováno bylo využití již používaných technologií časového multiplexu TDM, vlnového multiplexu WDM, ale také i celá řada progresivních technologií, jako ortogonální kmitočtový multiplex OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), kódový multiplex OCDM (Optical Code Division Multiplexing), polarizační multiplex PDM (Polarization Division Multiplex) a jejich různé kombinace a modifikace [68].

Většina uvedených technologií by však vyžadovala zásah do stávajících zařízení v PON sítích, proto byla v roce 2012 zasedáním skupiny FSAN zvolena pro NG-PON2 kombinace technologií časového a hustého vlnového multiplexu, označované nejčastěji jako TWDM-PON nebo TDM-WDM-PON [68]. V současné době je standard ITU G.989 stále ve fázi tzv. „draftu“. Systémová architektura NG-PON2 udává [23]:

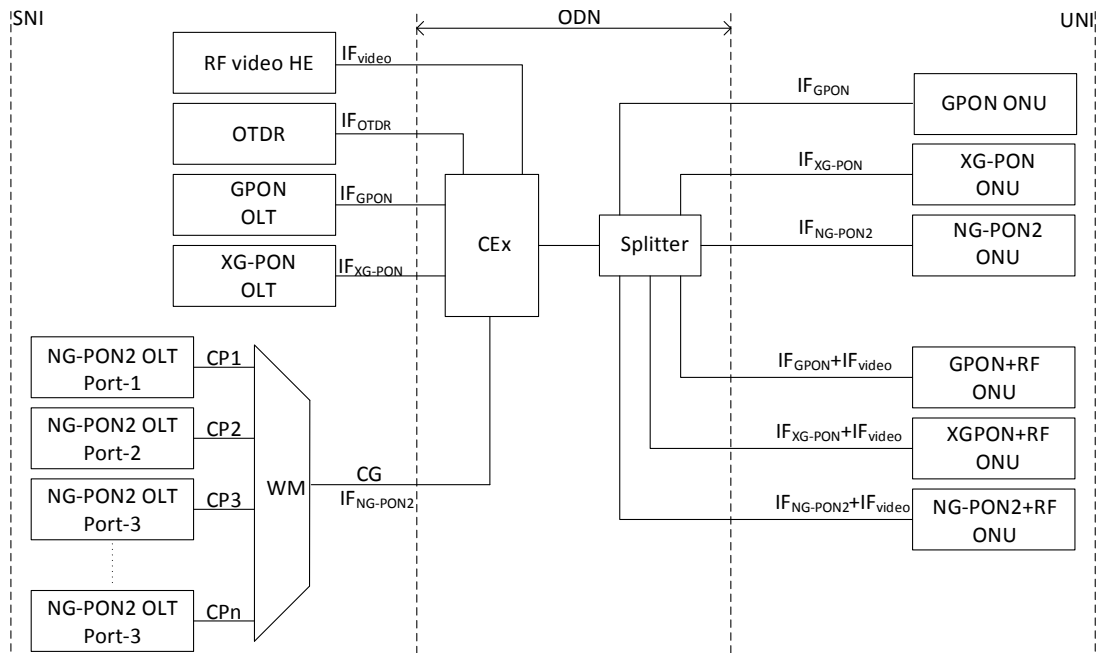
- použití 4–8 párů vlnových délek pro TWDM kanál s možností rozšíření o více vlnových délek do budoucna,
- dosah systému 40 km,
- dělicí poměr až 1:256 i více.

Přenosové rychlosti pro sestupný a vzestupný směr na jeden kanál byly stanoveny [23]:

- 2,5 Gbit/s pro sestupný a 2,5 Gbit/s pro vzestupný směr,
- 10 Gbit/s pro sestupný a 2,5 Gbit/s pro vzestupný směr,
- 10 Gbit/s pro sestupný a 10 Gbit/s pro vzestupný směr.

Na obrázku 3.5 je schématicky zobrazena architektura NG-PON2 s možností zpětné kompatibility se staršími standardy PON sítí. V případě, že bude nutná zpětná koexistence, je třeba počítat s vyššími investičními náklady, které plynou z nutnosti použití laditelných vlnových filtrů v OLT jednotkách. Popis jednotlivých částí je následovný:

- CG – Channel Group (skupina vlnových kanálů).
- CP – Channel Pair (pár vlnových délek).
- Cex – Co-existence Element (koexistenční prvek).
- HE – Head End (koncová stanice).
- WN – Wavelength multiplexer (vlnový multiplexer).
- RF video – analogové video.
- IF – Interface (rozhraní).
- ODN – Optical Distribution Network (optická distribuční síť).
- Splitter – rozbočovač.
- SNI – Service Node Interface (síťové rozhraní poskytovatele služeb).
- UNI – User Network Interface (síťové rozhraní uživatele).



Obr. 3.5: Schéma architektury NG-PON2 [23]

V porovnání s předchozím standardem XG-PON byly pro sestupný směr vybrány vlnové délky 1596–1603 nm a pro vzestupný směr 1524–1544 nm tak, aby bylo možné provozovat jednu OLT jednotku NG-PON2 i se staršími standardy na stejné distribuční síti. Rovněž byla tato volba dána příznivým měrným útlumem optických vláken v těchto pásmech (L a C) a průběhem chromatické disperze [24]. Další změnou je implementace vlnových filtrů, a to jak na straně OLT tak i ONU.

3.2.4 WDM-PON

Pasivní optické přístupové sítě využívající multiplexu DWDM, označované jako WDM-PON patří do zvláštní kategorie pasivních optických přístupových sítí. Tyto sítě měly v době jejich vzniku předpovězenou velkou budoucnost, bohužel se tak nestalo a částečné uplatnění našly až v sítích další generace NG-PON2. Existuje celá řada topologií WDM-PON, žádná však nebyla nikdy standardizována. Nejznámějším výrobcem byl LG-Nortel, později LG-Ericson. V době svého vzniku v roce 2010 byl tento systém velice ojedinělý a nabízel šířku pásma jednotek až desítek Gbit/s. Bohužel vysoké finanční nároky tento systém odsoudily ke komerčnímu neúspěchu.

WDM-PON sítě jsou zvláštní tím, že byť fyzicky představují mnohobodovou síť P2MP, z hlediska logické topologie se jedná o spojení typu bod–bod, protože každý koncový uživatel je prostřednictvím ONU jednotky spojen vlastní vlnovou délkou s OLT jednotkou.

WDM-PON s pevně přidělenými vlnovými délkami – tato varianta uvažuje pevně přidělené vlnové délky koncovým jednotkám. V distribuční části sítě je použit běžný rozbočovač a v sestupném směru se signál šíří všesměrově. ONU jednotky obsahují vlnový filtr pro konkrétní vlnovou délku. Ve vzestupném směru ONU jednotka vysílá opět na konkrétní vlnové délce. Vzhledem k všesměrovému šíření signálu je nutné stejně jako v PON sítích data šifrovat. Další nevýhodou je nepružnost na změny a nevhodné nakládání s přenosovými prostředky. ONU jednotky jsou v tomto případě označovány jako tzv. „barevné“ a není možné je přeladit na jinou vlnovou délku [34].

WDM-PON využívající směrovou odbočnici AWG – používá namísto rozbočovače multiplexer AWG (Arrayed Waveguide Grating). V sestupném směru se signál šíří pouze konkrétními vlnovými délkami ke konkrétním uživatelům. Ve vzestupném směru je princip stejný jako u předchozí varianty. Hlavní výhodou této varianty je nižší vložný útlum AWG multiplexeru v porovnání s běžným rozbočovačem. Útlum AWG multiplexerů se pohybuje do 5 dB nezávisle na počtu výstupních portů. Další výhodou je snížení útlumu odstraněním vlnových filtrů v ONU jednotkách [34].

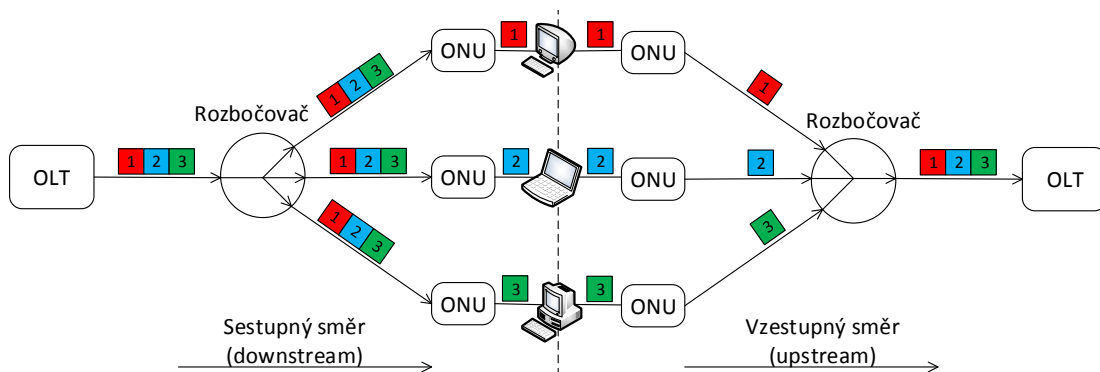
WDM-PON využívající AWG a FP lasery – další možnost realizace WDM-PON systému je založená opět na použití směrové odbočnice AWG. Rozdíl je však v použitých ONU jednotkách, ve kterých je namísto DFB (Distributed feedback laser) laserů využito FP (Fabry Perrot) laseru opticky zavěšeného na stimulační vlnové délce přicházející od AWG. Příchozí světelný paprsek prochází filtrem, kde se pro příchozí směr oddělí signál a pokračuje dále do přijímací části ONU. Zbylá část světelného paprsku prochází přes vlnový filtr dále na FP laser. Zavěšením FP laseru na stimulační vlnovou délku dojde ke změně spektra FP laseru, které bylo původně tvořeno periodickými vlnami na spektrum tvořené úzkou spektrální čarou, díky čemuž je možné FP laser použít jako vysílač pro WDM-PON systém. Na tomto principu jsou založené výše uvedené systémy LG-Ericson [46].

3.3 Multiplexní techniky používané v optických přístupových sítích

Již v prvních pasivních optických sítích APON bylo využito časového multiplexu TDM. Tento multiplex je nadále hojně využíván, a to z důvodu jeho rozšíření a snadné implementace. Na druhou stranu vlnový multiplex je používán dlouhá léta v páteřních a metropolitních sítích. Nový připravovaný standard NG-PON2 slučuje výhody obou nejpoužívanějších multiplexů do tzv. hybridní topologie a umožňuje tak velice efektivně využít šířku pásma sdíleného média.

3.3.1 Časový multiplex TDM

Díky vysoké nadbytečnosti přenosové kapacity spojů a časové různorodosti jejího využívání je možné tuto přenosovou kapacitu rozdělit na časové intervaly (sloty) a ty postupně přiřazovat koncovým uživatelům. Následné rozeznání začátků a konců jednotlivých časových intervalů je možné za pomoci přídatných hlaviček jednotlivých rámců, nebo pokud jsou všechny časové intervaly stejně dlouhé, je možné synchronizovat multiplexer a demultiplexer pomocí speciálního synchronizačního intervalu [67]. Ve své podstatě se jedná o kódování jednotlivých kanálů na sled elektrických impulzů, které jsou následně převedeny do optické oblasti. Jednotlivé datové toky od koncových uživatelů se skládají do vymezených časových intervalů, které tvoří výsledný datový tok směrem k OLT jednotce. Schématické znázornění je na obrázku 3.6. Aby nedocházelo ke vzájemným kolizím, OLT jednotka na základě znalostí zpoždění, vzniklého při šíření optického signálu od jednotlivých ONU jednotek, odesílá v sestupném směru informační buňky o přiděleném vysílacím okamžiku pro každou ONU jednotku, která má v tento okamžik garantováno, že nebude žádná další jednotka vysílat. Mezi buňkami je navíc umístěn tzv. ochranný interval, který je součástí rozšířeného záhlaví [19].



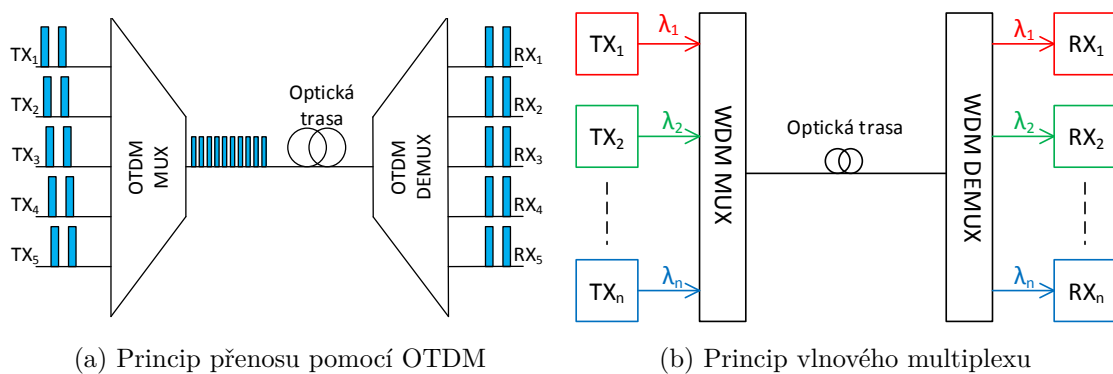
Obr. 3.6: Princip časového multiplexu v PON sítích

Kromě běžného časového multiplexu v elektrické oblasti existuje také plně optický časový multiplex OTDM (Optical Time Division Multiplex). Jak již plyne z názvu, jedná se o plně optickou technologii, která ji předurčuje k vysokým přenosovým rychlostem, protože není limitována „pomalou“ elektronikou, a umožňuje tak vysokorychlostní datové přenosy. V současné době jsou známé studie na vysokorychlostní OTDM systémy, které dosahují až 10,2 Tbit/s [13]. OTDM se jeví jako perspektivní řešení optických sítí dalších generací.

V OTDM se používají úzkopásmové pulzní lasery, díky kterým je možné vytvořit extrémně úzké časové intervaly (sloty) s odpovídající velkou propustností. Dosahují

řádově vyšších přenosových rychlostí díky multiplexaci nižších přenosových rychlostí v optické oblasti. Jedná se v podstatě o časové slučování kanálů, které jsou navázány do optického vlákna a přenášeny dále (viz obrázek 3.7a).

Ve vysílací části je nezbytné použití extrémně rychlého úzkopásmového laseru, který je schopen generovat pulzy o šířkách jednotek ps až stovek fs s rozstupem 33 % šířky pulzu. V přijímací části je pak velice náročné provést demodulaci, která probíhá na základě kontrolních pulzů – tzv. „clock recovery“. Právě femto-sekundový laser a demultiplexační část OTDM systému jsou v dnešní době stále velice nákladné na realizaci, což je hlavní příčinou toho, proč nejsou tyto systémy již nasazeny komerčně v oblasti vysokorychlostních optických sítí [4].



Obr. 3.7: Princip multiplexu OTDM a WDM

3.3.2 Vlnový multiplex WDM

Vlnový multiplex je založen na myšlence sdružit několik optických signálů do jednoho optického vlákna na základě vlnového oddělení. Na každou z nosných frekvencí je ve vysílači namodulována přenášená informace. V multiplexeru se zkombinuje všech n -kanálových příspěvků do jednoho vlákna. Zjednodušený princip je znázorněn na obrázku 3.7b.

Rozeznáváme 3 základní druhy vlnového multiplexu – široký vlnový multiplex WWDM (Wide Wavelength Division Multiplex), hustý vlnový multiplex DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) a hrubý vlnový multiplex CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) [8].

Technologie tzv. „širokého“ vlnového multiplexu WWDM patří mezi starší, můžeme se s ní však do dnes setkat z důvodu cenové dostupnosti. Nejčastěji se v tomto případě používají čtyři vlnové délky s odstupem nosných ≥ 20 nm. Nejčastěji se používá pro přenos 1G a 10G Ethernetu [8].

Hustý vlnový multiplex DWDM patří mezi nejčastěji používané systémy na páteřních linkách. Odstup mezi nosnými vlnovými délkami je pouze 0,8 nm, stále častěji se můžeme setkat i s odstupem 0,4 nm. Existují i systémy označované jako UDWDM (Ultra DWDM), kde odstup nosných dosahuje jen 0,2 nm až 0,1 nm [8]. Se snižujícím odstupem nosných však rapidně rostou požadavky na používané prvky, zejména DFB lasery a jejich kmitočtovou a amplitudovou stabilitu. Pomocí DWDM systémů je možné přenášet desítky až stovky paralelních kanálů. Doporučení G.694.1 specifikuje jednotlivé přenosové kanály v oblasti vlnových délek v rozsahu 1 490 nm (200,95 THz) do 1 620 nm (186 THz) – tzv. S, C a L pásmo. DWDM rastr vychází z normované frekvence 193,1 THz. Pro správnou funkci je nutné, aby se vlnová délka neodchylovala od předepsané vlnové délky o více jak 0,2 odstupem nosných, což prakticky odpovídá $\pm 0,16$ nm [21].

Hrubý multiplex CWDM vznikl jako levnější varianta DWDM. Prvky používané pro CWDM nevyžadují tak přesné a technologicky náročné prvky jako DWDM. Odstup mezi jednotlivými kanály je dle ITU-T G.694.2 stanoven na 20 nm, aby bylo možné použít laserové diody bez nároku na chlazení. Celková tolerance odchýlení od nominální střední vlnové délky byla stanovena v rozsahu ± 6 –7 nm. CWDM umožňuje přenos 18 kanálů, při použití vlákna typu G.652.D a novějších [15].

3.3.3 Ostatní multiplexní techniky

Existuje řada multiplexních technologií, které jsou také velice perspektivních pro budoucí využití v optických přístupových sítích. Jedná se o multiplexy, které jsou využívány již řadu let v oblasti mobilních komunikací, bezdrátových sítí apod. Ve většině případů nejsou tyto technologie komerčně zaváděny do optických sítí z důvodu složité implementace.

CDM (Code Division Multiplexing) – metoda kódového multiplexování, která je známá především z 3G mobilních technologií WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Všichni uživatelé používají celé přidělené spektrum ve stejný okamžik. Navzájem jsou jejich data odlišena pomocí přiděleného binárního kódu. Vynásobením tohoto kódu s původními daty vzniká širokopásmový signál a dochází k rozprostírání informací do spektra [66].

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – využívá stovek až tisíců subnosných kmitočtů. Jedná se o širokopásmovou modulaci, kde je rychlý sériový tok transformován na pomalejší paralelní tok, který je přenášen pomocí subnosných složek. Díky tomu, jsou sousední složky navzájem ortogonální a nedochází k jejich ovlivňování při vzájemném překrytí. Uplatnění tato metoda zatím našla především v oblasti sítí Wifi, Wimax, LTE a digitálního pozemního vysílání DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) [51].

UDWDM (Ultra DWDM) je metoda extrémně hustého vlnového multiplexu DWDM, který je popsán v podkapitole 3.3.2. V zásadě se neliší od principu WDM-PON sítí, rozdílný je pouze rozestup mezi nosnými vlnovými délkami. Nasazení tohoto systému je limitováno především vysokými finančními nároky na lasery [52].

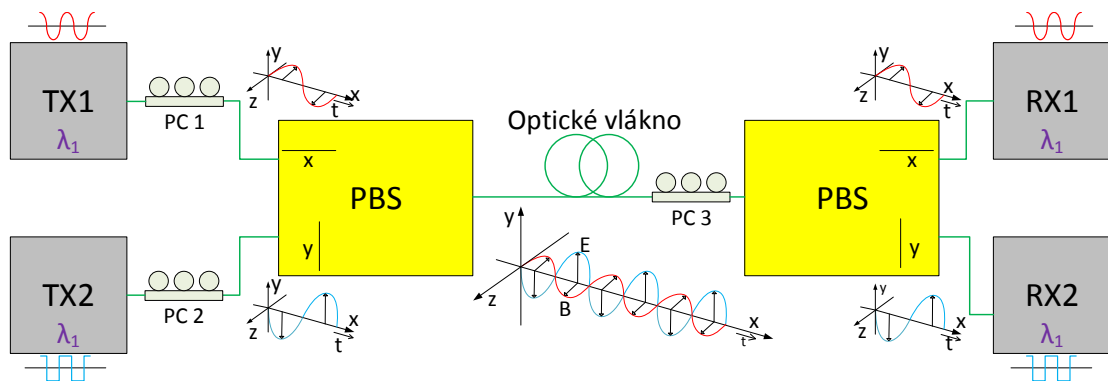
Koherentní optické systémy nachází v dnešní době uplatnění především v 100G systémech, v kombinaci s vlnovým a polarizačním multiplexem. Samotný princip je známý již z 60. let minulého století z oblasti mikrovlnné techniky. V přijímači je umístěn lokální oscilátor (LO) pro zvýšení citlivosti. V oblasti optických sítí byl vývoj koherentních systémů utlumen vývojem EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovačů. V dnešní době vysokorychlostních systémů se však mohutně začínají řešit problémy disperzí, vůči kterým je koherentní systém do značné míry imunní. Koherentní systémy jsou také schopny odolávat CD 30 000–80 000 ps/nm, což by znamenalo teoretický dosvit přes 3000 km bez nutnosti kompenzace CD [45]. Rovněž jsou odolné vůči polarizační vidové disperzi teoreticky až do 30 ps [45]. Samotný koherentní systém je však pouze začátkem, hlavní částí těchto systémů je elektrické a zejména číslicové zpracování signálu DSP (Digital Signal Processing).

3.4 Polarizační multiplex

Polarizační multiplex POL-MUX, též označovaný jako PDM (Polarization Division Multiplex) je založen na myšlence přenosu dvou různých optických signálů jedním optickým vláknem na základě polarizačního dělení. Jak bylo popsáno v podkapitole 2.1.1, optický paprsek se v jednovidovém optickém vlákně šíří ve dvou navzájem ortogonálních polarizačních rovinách x a y . Za pomoci tzv. polarizačního splitteru PBS (Polarization Beam Splitter) je možné do každé z těchto polarizačních rovin navázat nezávislý optický signál a přenášet tak polarizačně oddělené dva signály optickým vláknem.

Princip polarizačního multiplexu lze přirovnat k technologii používané v rádiových systémech, kde také vysíláme signál pomocí dvou ortogonálně polarizovaných rovin a pro příjem využíváme dvě rozdílně orientované a polarizované antény. Detekce je možná za předpokladu, že při průchodu sítí byla zachována ortogonalita obou signálů. Ta se však při průchodu signálu vlákna porušuje vlivem nedokonalostí vlákna (nedokonalá kruhová symetrie vlákna) a dvojlomem [37]. Základní schéma POL-MUX systému je zobrazeno na obrázku 3.8.

Polarizační multiplex nevyžaduje zásah do distribuční části optické přístupové sítě. Na vysílací straně je nutné dva optické signály pomocí polarizačního multiplexu vhodně navázat do optického vlákna. Polarizační multiplexer má dva vstupy, které obsahují polarizační filtry. Skrze jeden tento vstup je navázán signál do roviny x



Obr. 3.8: Princip polarizačního multiplexu

a skrze druhý vstup do roviny y . Vstupní signály je proto nutné vhodně upravit z hlediska úhlu polarizace tak, aby byl každý signál jednou osou polarizace rovnoběžný s osou daného portu. To se provádí pomocí polarizačního kontroléru PC (Polarization Controller).

Multiplexovaný signál obsahuje tedy dva různě modulované optické signály, které mohou mít stejnou vlnovou délku. Tento signál prochází přes optickou trasu, na jejíž konci je umístěn další polarizační kontrolér. Pomocí tohoto kontroléru je multiplexovaný signál optimálně natočen, aby obě polarizační roviny byly rovnoběžné s danými rovinami druhého polarizačního splitteru, který v tomto případě zastává funkci polarizačního demultiplexeru. Tím je zajištěno, že na každém výstupu bude požadovaný výstupní signál [65].

Zvyšováním přenosových rychlostí zpřísňuje nároky na limity PMD, která tak představuje jeden z hlavních problémů vysokorychlostních optických systémů. Díky tomu, že POL-MUX využívá pro přenos signálů dvě separátní roviny, není přenos POL-MUX systémem tolik zatížen polarizační vidovou disperzí jako běžné telekomunikační systémy. To je velice významný fakt pro optické přenosové systémy s rychlostmi ≥ 10 Gbit/s. Polarizační multiplex tak nachází uplatnění nejen pro zdvojnásobení šířky přenosového pásma, ale také pro redukci vlivu PMD, která se zde negativně projevuje formou polarizačního přeslechu.

Hlavní nevýhodou je složitost demultiplexace z důvodu neustále se měnícího stavu a úhlu polarizace. Princip uvedený na obrázku 3.8 je pouze laboratorní. V reálném provozu je nezbytné rychle reagovat na změny stavu polarizace. Za tímto účelem je možné použít dynamický polarizační kontrolér, mnohem častěji se však používá systém přímé detekce, kde je demultiplexace řešena pomocí číslicového zpracování signálu DSP. Dnešní 100G systémy využívají polarizačního multiplexu v kombinaci s koherentním příjmem a vícecestovými modulačními formáty [39].

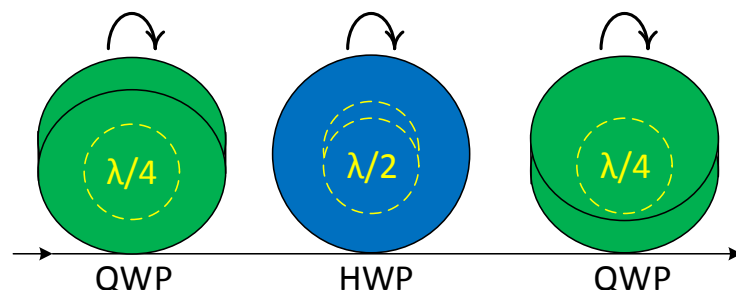
3.4.1 Významné prvky POL-MUX systému

Polarizační multiplex vyžaduje použití speciálních prvků, se kterými se u běžných telekomunikačních systémů nesetkáme. Klíčovými prvky jsou polarizační splitters, polarizační kontroléry a polarizátory.

Polarizační splitter (PBS, PBC) jsou zpravidla tvořeny dvěma navzájem stmelnými trojbokými hranoly nebo planparalelní destičkou. Dělicí vrstva umožňuje průchod části paprsku odpovídající jedné polarizační rovině a zbylá část je odkloněna ze své původní trasy. Roviny polarizace jsou pak navzájem pootočený o 90° . Pro popis funkce polarizačního splitteru lze použít zápis v kartézských souřadnicích. Osa x je paralelní s počáteční polarizací laserového zdroje záření. Koeficienty odrazu a přenosu polarizačního splitteru jsou R_x , T_x , a R_y , T_y . Pro tyto koeficienty platí [2]:

$$R_x + T_x = R_y + T_y = 1 \quad (3.1)$$

Polarizační kontrolér je tvořen třemi částmi – tzv. destičkami. První čtyřvlákná destička je označovaná jako QWP (Quarter-Wave Plates) a transformuje vstupního signálu s libovolnou polarizací na lineárně polarizovaný. Druhá půlvlnná destička, označovaná jako HWP (Half-Wave Plate), natáčí lineární polarizaci do požadovaného úhlu. Třetí čtyřvlákná destička (QWP) natáčí lineárně polarizovaný signál do požadovaného stavu polarizace. Všechny tři destičky je možné natáčet o 180° nezávisle na ostatních viz obrázek 3.9. V první a třetí destičce je navinuta jedna otočka optického vlákna, ve druhé destičce jsou navinuty otočky dvě [26].



Obr. 3.9: Polarizační kontrolér

Navinutím vlákna do cívky v dané destičce vzniká napětí, které při natáčení vyvolá dvojlom nepřímo úměrný druhé mocnině průměru cívky. Počtem závitů cívek a jejich průměrem můžeme vytvořit libovolně n -vláknou změnu na dané destičce. Vzhledem k tomu, že větší ohyby vláken způsobují zvýšený vložný útlum, musí být průměry smyček dostatečně velké. Kromě polarizačního kontroléru se pro natáčení polarizace používá také tzv. Babinetův–Soleilův kompenzátor, který provádí změnu na základě zkrutu a tlaku na vlákno [26].

3.4.2 Specifické parametry

V souvislosti s polarizačním multiplexem je důležité znát následující parametry [26]: **DOP** (Degree Of Polarization) nebo-li stupeň polarizace. Tento parametr je dán vztahem:

$$DOP = I_{pol} / (I_{pol} + I_{unp}) \quad [-], \quad (3.2)$$

kde I_{pol} a I_{unp} jsou intenzity polarizovaného, respektive nepolarizovaného světla. Pokud platí $DOP=0$, můžeme říci, že světlo je nepolarizované, pokud $DOP=1$, světlo je úplně polarizované. Pokud je DOP v rozmezí 0–1, pak je světlo částečně polarizované.

PER (Polarization Extinction Ratio), což je důležitý parametr, který udává poměr mezi minimálním a maximálním výkonem polarizovaného světla, nebo-li poměr mezi výkony v obou polarizačních rovinách. Udává se v dB a je vždy součástí specifikace každého polarizačního prvku.

PDL (Polarization Dependent Loss) – parametr, který udává maximální změnu útlumu vzniklou měnící se polarizací průchodem signálu optickým vláknem. Udává se rovněž v dB.

3.5 Parametry QoS v optických přístupových sítích

Testování kvality služeb QoS (Quality of Services) a bitové chybovosti BER (Bit Error Rate) je v dnešní době běžnou záležitostí, avšak testování v oblasti optických přístupových sítí tak obvyklé není. Je přitom velice důležité vědět, jaký vliv mají parametry fyzické vrstvy na parametry QoS. V optických přístupových sítích se vyskytuje celá řada faktorů, které negativně ovlivňují přenášený signál. Je to zejména vložný útlum, který svojí hodnotou přímo ovlivňuje parametry na vyšších vrstvách modelu ISO/OSI. Dalším nejvýznamnějším negativním faktorem je disperze (chromatická a polarizační vidová) a nelineární jevy, jejichž popis je v kapitole 2.5.

3.5.1 Standardy pro měření QoS

Ještě do nedávna se pro měření parametrů QoS používaly přístroje pracující dle doporučení RFC 2544 (Request For Comments). Měřily parametry jako je propustnost (Throughput), ztrátovost (Frame loss), zpoždění (Delay) a zatížitelnost (Back to back). V sítích triple-play se současně distribuuje hned tři datové toky, kdy každý z těchto toků vyžaduje zajištění specifických podmínek. Verifikace výkonnosti sítě v případě nasazení triple-play služeb by vyžadovala spuštění testu RFC 2544 hned

tříkrát, přičemž test jedné této služby může trvat v závislosti na nastavení až 4 hodiny. Další nevýhodou je, že metodika testování dle RFC 2544 nepodporuje nástroje důležité pro verifikaci real-time služeb jako Packet Jitter (kolísání zpoždění), OoS (Out of Service) či QoS [20].

ITU-T přišla v roce 2011 s návrhem normy s označením ITU-T Y.1564SAM (Service Activation Metodology), často označované jako „EtherSAM“. Tento nový standard obsahuje všechny potřebné nástroje pro rychlou a efektivní verifikaci výkonnosti nejen triple-play sítí. Hlavním účelem EtherSAMu je testování parametrů kritických pro real-time služby v rámci jediného testu (propustnost, ztrátovost, zpoždění, kolísání zpoždění, QoS, OoS). Dalším benefitem je možnost testování výkonnosti distribuční infrastruktury až deseti souběžnými datovými toky reprezentujícími jednotlivé služby (data, hlas, video apod.) [20].

3.5.2 Q-faktor

Parametr vyjadřuje analogovou kvalitu digitálního signálu s ohledem na odstup signálu od šumu. Zahrnuje všechna fyzikální zhoršení, která degradují signál a způsobují bitovou chybovost. Čím je hodnota Q-faktoru vyšší, tím je bitová chybovost nižší (vyšší OSNR). Výpočet Q-faktoru je uveden v následujícím vztahu:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad [-], \quad (3.3)$$

kde I_1 je logická úroveň „1“, I_0 je logická úroveň „0“, σ_1 je standardní odchylka logické úrovně „1“ a σ_0 je standardní odchylka logické úrovně „0“ [35].

3.5.3 Bitová chybovost

Bitová chybovost je definována poměrem chybně přijatých bitů bE ku celkovému počtu přijatých bitů p za určitou dobu t .

$$BER = \frac{bE}{vp \cdot t} \quad [-], \quad (3.4)$$

kde v je přenosová rychlost [35].

Bitová chybovost je hlavním ukazatelem kvality celkového optického systému. V reálných digitálních komunikačních systémech je nenulová pravděpodobnost chybného rozhodnutí, zda vzorkovaná hodnota reprezentuje hodnotu logické „0“ nebo logické „1“. Výpočet bitové chybovosti ze znalosti hodnoty Q-faktoru vyjadřuje vztah [35]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left(\frac{-Q^2}{2} \right)}{Q \cdot \sqrt{2\pi}} \quad [-]. \quad (3.5)$$

4 VÝSLEDKY DIZERTAČNÍ PRÁCE

Praktická část dizertační práce je rozdělena do několika základních částí vedoucích k výslednému návrhu pasivní širokopásmové optické přístupové sítě založené na kombinaci vlnového a polarizačního multiplexu WDM-PDM-PON. Výsledky dizertační práce jsou soustředěny na přenosové parametry optických sítí na fyzické vrstvě, které svými vlastnostmi přímo ovlivňují parametry kvality služeb na vyšších vrstvách a také hodnotu bitové chybovosti. Limitující parametry jako je útlum a disperze omezují využití potenciálu šířky přenosového pásma optických vláken. Útlum optických prvků je daný a k jeho snížení dochází s postupným technologickým vývojem pasivních prvků. Na druhou stranu disperze optických vláken je možné do jisté míry kompenzovat. Vliv polarizační vidové disperze značně limituje maximální přenosové rychlosti vysokorychlostních optických systémů s nárůstem přenosových rychlostí nad 10 Gbit/s. Tento jev má stochastický charakter a velice obtížně se kompenzuje. Existují však možnosti, jak navrhnout optickou síť, která je do značné míry vůči tomuto jevu imunní. Jednou z těchto možností je využití polarizačního multiplexu. Seznam měřících přístrojů a komponentů použitých v praktické části práce je uveden v příloze D.

4.1 Stav optických vláken v ČR z hlediska PMD

V České republice jsou položeny tisíce kilometrů optických vláken různého stáří a snahou telekomunikačních operátorů je využít co nejvíce jejich potenciál z hlediska přenosové kapacity. Před nasazováním technologií je ale dobré znát, v jakém jsou tato vlákna stavu. Důležitými parametry jsou měrný útlum vláken α a hodnota chromatické (CD) a polarizační vidové (PMD) disperze. Chromatická disperze je dána délkou vláken a ve většině případů nejsou její hodnoty nadlimitní. Horší situace je z pohledu měrného útlumu a polarizační vidové disperze. Měrný útlum trasy je tvořen součtem útlumů dílčích úseků, konektorových a svárových spojů na danou délku trasy. Největší problémy přitom tvoří právě konektorové spoje, jejichž nečistota a nevhodná montáž vnáší do trasy další útlum. Jeho hodnotu také ovlivňuje kvalita montáže optické trasy, která bývá rovněž hlavní příčinou zvýšené hodnoty polarizační vidové disperze. Měrný útlum se měří na stěžejních vlnových délkách, na kterých probíhá datový přenos, tzn. 1 310 nm, 1 490 nm, 1 550 nm a 1 625 nm. Často se také měří na vlnové délce 1 383 nm, kde se u starších vláken typu G.652.A vyskytuje zvýšený útlum z důvodu přítomnosti OH iontů vody. Tato vlnová délka leží v pásmu E, které je možné u novějších vláken G.652.D využívat pro přenos CWDM signálů.

4.1.1 Vyhodnocení tras

Jak již bylo zmíněno, kvalita montáže je zásadní z pohledu PMD. Postupný trend navyšování přenosových rychlostí se uplatňuje od páteřních sítí, přes sítě metropolitní až do oblastí optických přístupových sítí. Proto je nezbytné se touto problematikou zabývat v celém oboru optických sítí. Zájem o měření PMD vzrostl v době nasazování systémů s přenosovými rychlostmi 10 Gbit/s, které dnes nabízejí i optické přístupové sítě. Limity PMD jsou přitom striktní a s rostoucí přenosovou rychlostí rapidně klesají, jak je popsáno v podkapitole 2.4.1.

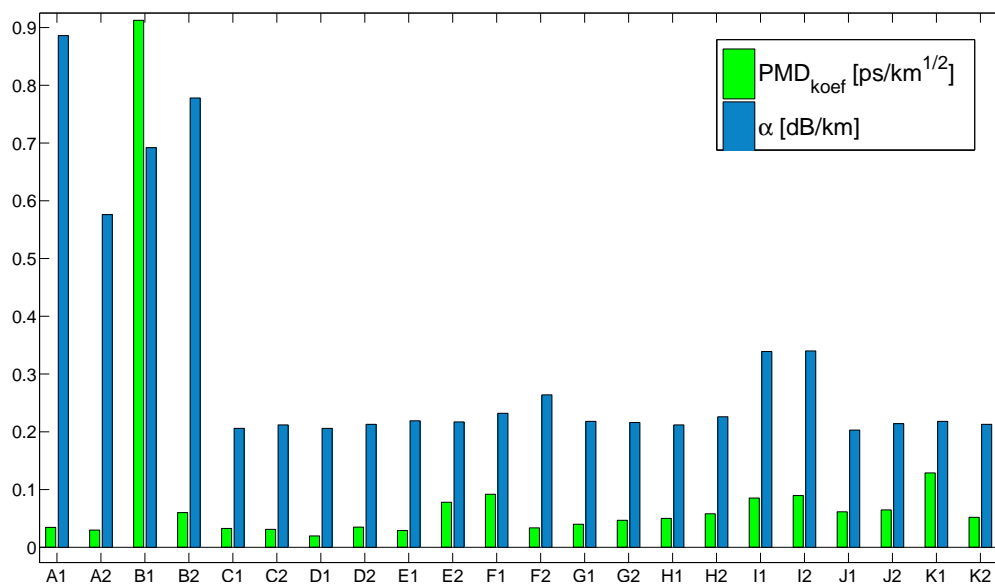
Tab. 4.1: PMD vybraných optických tras v ČR

Trasa	Vlákno	PMD [ps]	Délka [m]	$\text{PMD}_{\text{koef}}[\text{ps}/\sqrt{\text{km}}]$	α [dB/km]
A	1	0,07	3 763	0,0345	0,886
	2	0,06	3 761	0,0298	0,576
B	1	1,80	3 912	0,9125	0,692
	2	0,12	3 912	0,0600	0,778
C	1	0,14	17 429	0,0327	0,206
	2	0,13	17 429	0,0311	0,212
D	1	0,09	19 788	0,0197	0,206
	2	0,16	19 793	0,0350	0,213
E	1	0,15	27 011	0,0291	0,219
	2	0,41	27 018	0,0780	0,217
F	1	0,52	32 730	0,0918	0,232
	2	0,19	32 725	0,0337	0,264
G	1	0,24	36 376	0,0400	0,218
	2	0,28	36 359	0,0468	0,216
H	1	0,34	45 015	0,0500	0,212
	2	0,39	45 022	0,0580	0,226
I	1	0,64	56 850	0,0853	0,339
	2	0,68	56 850	0,0896	0,340
J	1	0,58	88 300	0,0614	0,203
	2	0,61	88 319	0,0648	0,214
K	1	1,24	92 757	0,1288	0,218
	2	0,50	92 765	0,0519	0,213

V tabulce 4.1 jsou uvedeny výsledky měření PMD optických tras, které sestávají vždy ze dvou vláken. Měření PMD i měrného útlumu α probíhalo na vlnové délce 1 550 nm. Jedná se o 11 tras, které se fyzicky nacházejí v různých lokalitách České republiky a jsou používány předními Českými operátory. Nejkratší trasy tvoří optické propoje v rámci jednoho města, delší trasy jsou mezi velkými městy. Pro měření byl

použit modul EXFO FTB-5700. Měřicí metoda tohoto modulu je založená na analýze náhodně se měnícího stavu polarizace SSA (Scrambled State-of-polarization Analysis). Celková hodnota disperze je významná z hlediska nepřekročení stanoveného limitu, který je pro 10G SDH systémy 10 ps, pro 10G Ethernet pak pouze 5 ps [27], [5]. Pro přenosové rychlosti 40 Gbit/s je limit pouze 2,5 ps. 100G systémy využívající koherentního příjmu, polarizačního multiplexu a kvadrurní fázové modulace (QPSK) jsou vůči PMD podstatně odolnější a limit je přibližně 20 ps [45].

Vzhledem k různým délkám tras je vhodné posuzovat jejich stav na základě PMD koeficientu, jehož hodnota by neměla překročit $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ pro trasy s celkovou délkou do 400 km a $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ pro trasy delší [27].



Obr. 4.1: Porovnání měrného útlumu a disperzního koeficientu pro různé trasy

Z tabulky 4.1 a grafu 4.1 můžeme porovnat hodnoty PMD koeficientů a odpovídajícího měrného útlumu pro jednotlivé trasy. Z naměřených hodnot je patrné, že pouze u dvou vláken byla překročena hodnota PMD koeficientu nad $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Znamená to, že 90,9 % testovaných vláken dosahovalo nižších hodnot PMD koeficientu. V jednom případě bylo dosaženo extrémně velké hodnoty $0,9125 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ a trasa tak byla z hlediska doporučených limitů nevyhovující, čemuž odpovídá i značně zvýšený měrný útlum $0,692 \text{ dB}/\text{km}$. Ne vždy je ale pravidlem, že zvýšená hodnota PMD koeficientu indikuje zvýšený měrný útlum, o čemž svědčí ostatní vlákna. Např. vlákno 1 trasy A vykazovalo extrémně vysoký měrný útlum $0,886 \text{ dB}/\text{km}$, přitom PMD koeficient dosahoval nízké hodnoty $0,0345 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Zvýšené hodnoty měrného útlumu se často vyskytují u krátkých tras v rámci jednoho města, které jsou tvořeny velkým množstvím segmentů a tudíž i konektorových spojů (viz trasa A a B).

Nasazením systémů využívajících polarizační multiplex by značně přispělo ke zmírnění limitů na celkovou hodnotu PMD, neboť jsou tyto systémy díky svému principu odolnější vůči negativním vlivům PMD v porovnání s jinými multiplexními systémy.

4.2 Závislost PMD na teplotě

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.4, polarizační vidová disperze je závislá na celé řadě faktorů, kde významnou roli hraje mechanické namáhání a změna teploty, které způsobují vznik dvojlohu v optickém vlákne. Tato část práce je proto zaměřena na výzkum vlivu změny teploty na PMD. Klimatické podmínky jsou v různých zemích na světě zcela rozličné a můžeme se setkat s velkými teplotními rozdíly. Vezmeme-li například extrémní mrazy na Sibiři a naopak extrémní horka v zemích ležících na rovníku. Optické distribuční sítě jsou různorodé, a kromě samotných optických vláken jsou tvořeny také dalšími prvky, které mohou procházet z venkovních prostředí do budov, a tím se teplota mění mnohokrát podél celé distribuční sítě. Také samotné optické kabely většinou mají různou hloubku a způsob uložení, čímž dochází k nepravidelným změnám teploty.

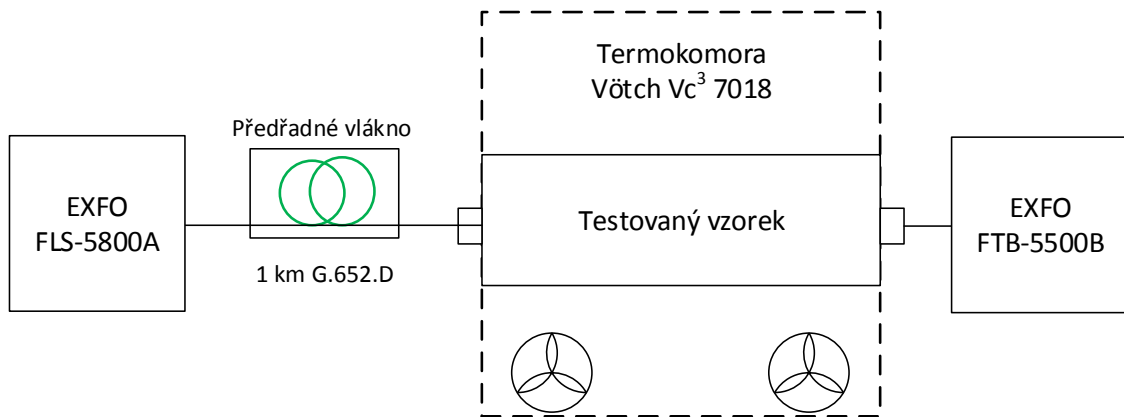
4.2.1 Měření pasivních prvků

Simulace teplotních změn byla vytvářena pomocí termokomory Vötsch Vc³ 7018, která umožňuje vytvoření extrémních teplot od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měření závislosti změny PMD na teplotě bylo prováděno pro:

- konektorové spoje – SC/PC, FC/PC, SC/APC a FC/APC,
- smotky vláken G.652.D a G.657.A,
- přípravek s trojnásobným svárem na vlákne G.657.A,
- rozbočovač (splitter) 1:8.

Pro měření PMD bylo využito precizní sestavy GINTY kanadské společnosti EXFO, konkrétně se jednalo o platformu FTB-500 s modulem FTB-5500B a širokospektrální zdroj záření FLS-5800A. Princip měření je na obrázku 4.2. Rozsah teplot byl pomocí obslužného softwaru nastaven pro všechny testovací scénáře vyjma samotných vláken shodně. Z výchozích $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ docházelo k ochlazování na přibližně $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně k oteplování na přibližně $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotní krok byl pro samotná optická vlákna nastaven obdobně, pouze ochlazování bylo nastaveno na hodnotu přibližně $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotní rozsahy byly nastaveny dle příslušných katalogových listů s jistou rezervou, aby nedošlo k jejich nevratnému poškození. Každé měření trvalo 12 hodin a PMD přitom byla měřena v intervalu každých 15 minut. Nutno také podotknout, že místnost, kde probíhalo měření byla klimatizována na konstantní

teplotu 20 °C a veškeré prvky byly před samotným testováním proměřeny přímou metodou měření útlumu z důvodu eliminace chyby velkým vložným útlumem.



Obr. 4.2: Princip měření v termokomoře

4.2.2 Analýza naměřených závislostí

Naměřené hodnoty byly získány pomocí software FastReporter a graficky zpracovány v prostředí Matlab. Důležité je zmínit, že velká část celkové hodnoty PMD je tvořena předřadným vláknem G.652.D s celkovou délkou 1 km, který byl umístěn vně termokomory v klimatizované laboratoři s konstantní teplotou 20 °C. PMD pro 1 km vlákna G.652.D odpovídá hodnotě 0,2 ps. Naměřené výsledky jsou příliš rozsáhlé a proto jsou uvedeny jen grafické výstupy, a také statistické zpracování naměřených dat, které je uvedeno v tabulce 4.2.

Na obrázku 4.3 jsou souhrnně zobrazeny výsledky pro konektory typu SC (Standard Connector) a FC (Ferrule Connector) pro rovné ferule PC (Polished Connector) i šikmé APC (Angle Polished Connector), které jsou v dnešní době nejvíce rozšířené. V grafech jsou zobrazeny dva průběhy, kde modrý odpovídá ochlazování z cca 20 °C na -20 °C a červený průběh odpovídá oteplování z -20 °C na 80 °C. Pro konektor typu SC/PC (4.3a) dosahovala maximální hodnota PMD 0,435 ps a minimální 0,12 ps, tzn. že celkové variační rozpětí PMD bylo 0,314 ps. V úseku přibližně od 22 °C do 65 °C lze sledovat, že je rozkmit minimální a PMD se v tomto rozsahu měnila jen minimálně. Maximální hodnota PMD byla zjištěna při -7,5 °C během ochlazování a minimální při 7,2 °C během oteplování.

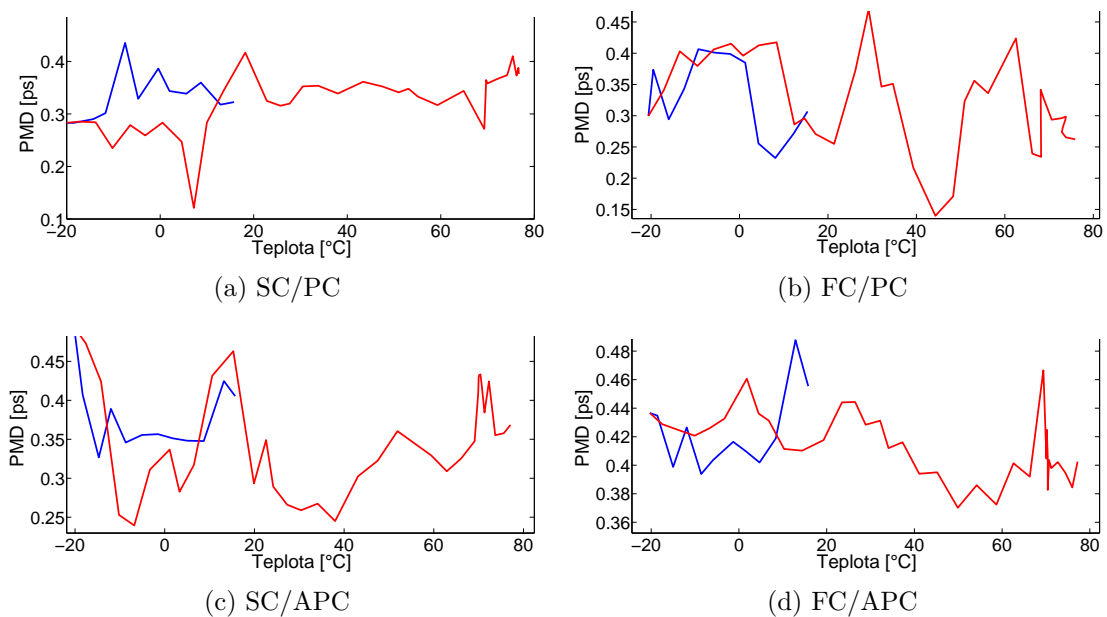
Pro konektor typu FC/PC (4.3b) dosahovala maximální hodnota PMD 0,470 ps a minimální 0,140 ps, tzn. že celkové variační rozpětí PMD bylo 0,303 ps. Maximální hodnota PMD byla zjištěna při 30 °C během oteplování a minimální při 45 °C také během oteplování. Průběh závislosti PMD na teplotě je pro tento typ konektoru

chaotický a není zde úsek, kde by byl rozkmit PMD minimální jako tomu bylo u konektoru SC/PC.

Konektor SC/APC (4.3c) dosahoval nejvyšší hodnoty PMD při teplotě -20°C a to $0,494\text{ ps}$ a nejnižší hodnoty PMD $0,240\text{ ps}$ při teplotě $-6,8^{\circ}\text{C}$ během oteplování. Celkové variační rozpětí PMD bylo v tomto případě $0,254\text{ ps}$. U tohoto typu konektoru je možné sledovat, že nejvyšší hodnoty PMD bylo dosaženo při nejnižší teplotě -20°C . Stejně jako u konektoru FC/PC zde není možné najít úsek, kde by byl rozkmit minimální.

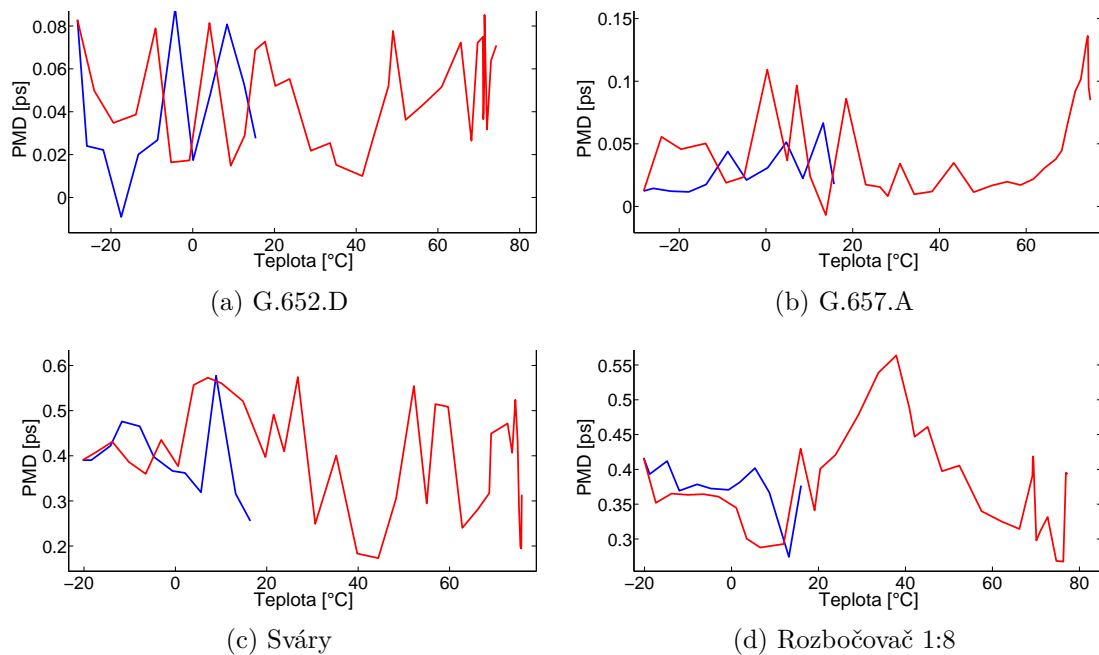
Poslední testovaný typ konektoru FC/APC (4.3d) dosahoval nejvyšší hodnoty PMD $0,488\text{ ps}$ při teplotě 13°C během ochlazování a nejnižší hodnoty PMD $0,370\text{ ps}$ při teplotě 50°C během oteplování. Celkové variační rozpětí PMD bylo v tomto případě pouze $0,118\text{ ps}$. V úseku od 24°C do 50°C je možné sledovat sestupný charakter s minimálním rozkmitem.

Při celkovém zhodnocení výsledků závislosti PMD na teplotě pro výše testované konektorové spoje dospějeme k závěru, že stochastický charakter PMD se u všech dosažených náměrů výrazně projevil a u žádné z naměřených závislostí není možné sledovat plynulou změnu PMD na teplotě. Nejmenšího variačního rozpětí PMD dosahoval konektorový spoj typu FC/APC, maximálního konektorový spoj typu SC/PC.



Obr. 4.3: Závislost PMD na teplotě pro konektorové spoje. Modrý průběh odpovídá ochlazování, červený průběh oteplování

Testování závislosti PMD na teplotě byly podrobeny i smotky optických vláken G.652.D (500 m) a G.657.A (500 m). Na obrázku 4.4 jsou tyto průběhy závislosti



Obr. 4.4: Závislost PMD na teplotě pro vlákna, sváry a rozbočovač. Modrý průběh odpovídá ochlazování, červený průběh oteplování

zobrazeny spolu s výsledky pro přípravek se třemi optickými sváry a planárním rozbočovačem s dělicím poměrem 1:8. Pro měření smotků vláken již předřadné vlákno použité nebylo.

Na obrázku 4.4a je zobrazen průběh pro vlákno G.652.D. Maximální hodnoty PMD 0,088 ps bylo dosaženo při teplotě $-4,3^{\circ}\text{C}$ během ochlazování, minimální hodnoty PMD $-0,01$ ps při teplotě $-17,5^{\circ}\text{C}$ také v průběhu ochlazování. Zápornou hodnotu PMD lze považovat za nulovou a tento výsledek byl způsoben interferometrickou metodou měření PMD. Celkové variační rozpětí PMD bylo 0,097 ps. Hodnota PMD se během celého průběhu chaoticky měnila, střídavě klesala a stoupala s velkým rozkmitem.

Průběh závislosti pro smotek vlákna G.657.A je zobrazen na obrázku 4.4b. Maximální hodnoty PMD 0,136 ps bylo dosaženo při teplotě 74°C během oteplování, minimální hodnoty PMD $-0,007$ ps při teplotě 14°C také v průběhu oteplování. Celkové variační rozpětí PMD bylo 0,143 ps. Přibližně od 50°C je možné sledovat postupný růst hodnoty PMD s rostoucí teplotou. V porovnání s předchozím vzorkem je hodnota PMD vyšší z důvodu sváru na trase, který však byl umístěn mimo termokomoru. Při porovnání grafických výstupů pro oba typy vláken vidíme, že vlákno typu G.652.D je náchylnější na variační rozpětí PMD při změně okolní teploty.

Na obrázku 4.4c je zobrazen grafický výstup závislosti pro přípravek se sváry. Maximální hodnoty PMD 0,577 ps bylo dosaženo při teplotě 9 °C během ochlazování a minimální hodnoty PMD 0,173 ps při teplotě 44,5 °C v průběhu oteplování. Celkové variační rozpětí PMD bylo 0,404 ps. Z grafického výstupu je patrné, že rozkmit PMD je v průběhu změny teplot chaotický a optické sváry tak jsou velice náchylné na změnu teploty z hlediska změny PMD.

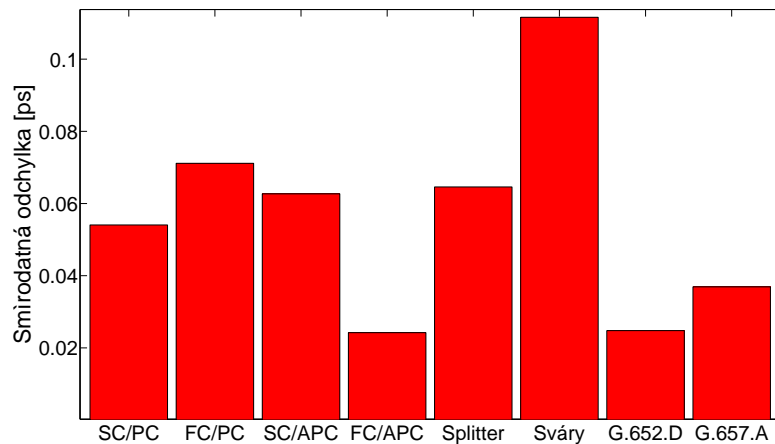
Posledním prvkem, který běžně tvoří distribuční síť optických přístupových sítí je rozbočovač, jehož grafická závislost PMD na teplotě je zobrazena na obrázku 4.4d. Maximální hodnota PMD byla 0,564 ps při teplotě 28 °C během oteplování a minimální hodnota PMD 0,268 ps při teplotě 76,3 °C také v průběhu oteplování. Celkové variační rozpětí PMD bylo 0,296 ps. U tohoto náměru je možné sledovat jistá závislost, v úseku od 12 °C do 38 °C má PMD vzestupný charakter a od této teploty postupně sestupný charakter.

Tab. 4.2: Statistické zpracování měření PMD

	Max	Min	Variační rozpětí	Průměr	Směrodatná odchylka
	[ps]				
SC/PC	0,4354	0,1211	0,3143	0,3290	0,054055807
FC/PC	0,4701	0,1398	0,3303	0,3212	0,071147665
SC/APC	0,4938	0,2395	0,2543	0,3562	0,062680273
FC/APC	0,4877	0,3702	0,1175	0,4153	0,02421718
Splitter 1:8	0,5637	0,2675	0,2962	0,3783	0,064599424
Sváry	0,5773	0,1732	0,4041	0,3924	0,111596821
G.652.D	0,0882	-0,0091	0,0973	0,0452	0,024793967
G.657.A	0,1362	-0,0069	0,1431	0,0455	0,036917316

Z výše prováděných měření plyne, že není možné vysledovat závislost PMD na teplotě exaktně. Významným zjištěním je ale fakt, že pokud dochází ke změnám okolní teploty, dochází k velkým změnám PMD a to i na několiknásobek svojí běžné hodnoty. K těmto změnám dochází u všech prvků optické distribuční sítě. Proto je z hlediska provozu vysoko rychlostních optických přístupových sítí nezbytné zajistit, aby všechny prvky ODN byly co nejméně vystavovány náhlým změnám teploty.

Nejlépe jsou naměřené výsledky porovnatelné v tabulce 4.2 a na sloupcovém grafu 4.5. Abychom mohli porovnávat různé typy konektorů s ostatními testovanými prvky je nejvhodnější se zaměřit na směrodatnou odchylku, pomocí které se nejlépe určuje míra variability. Nejvyšší směrodatné odchylky dosahovaly náměry pro přípravek s třemi optickými sváry na vlákne G.657.A, nejmenší pak konektorový spoj typu FC/APC. Statistické údaje byly zpracovány ze 48 hodnot pro každý uvedený vzorek.



Obr. 4.5: Sloupcové zobrazení smírodatné odchylky pro měřené vzorky

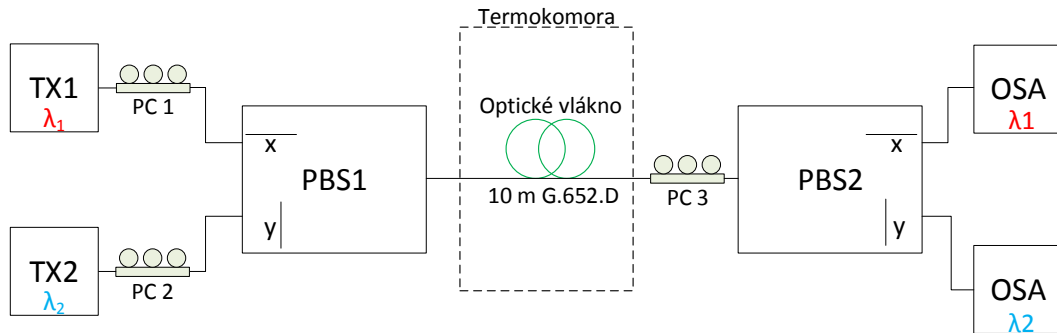
4.3 Měření vlivu teploty na polarizačně multiplexovaný signál

Podobně jako v předchozí podkapitole 4.2, kde byla měřena závislost parametru PMD na teplotě, tak byl testován vliv teploty na změnu úhlu polarizace v optickém vlákne polarizačně multiplexovaného signálu. Pro měření bylo opět využito termokomory Vötsch Vc³ 7018. Cílem měření bylo zjistit, jak výrazně bude docházet ke vzniku dvojlomu vlivem teploty a k následnému otáčení polarizačních rovin, tzn. jak se bude měnit výkon navázaný do dílčích polarizačních rovin vlivem změny okolní teploty, která má spolu s mechanickým namáháním významný vliv na stav polarizace.

4.3.1 Princip měření

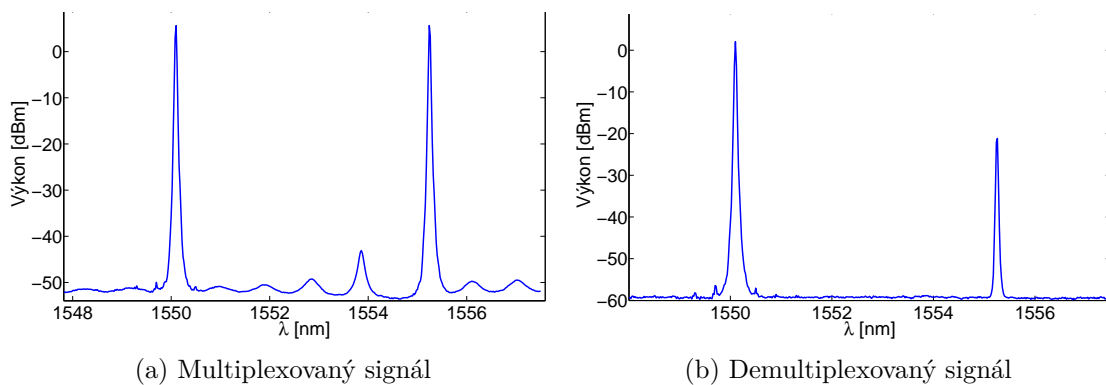
Pro měření byla použita sestava, která je zobrazena na obrázku 4.6. Jako testovací vzorek vlákna byl použit 10 m dlouhý patchord vlákna typu G.652.D. Okolní teplota byla udržována na hodnotě $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Byly použity dvě laserové diody na různých vlnových délkách $\lambda_1 = 1550,1\text{ nm}$ a $\lambda_2 = 1555,2\text{ nm}$, aby bylo možné pomocí spektrálního analyzátoru rozlišit signály navázané do obou polarizačních rovin. Optické signály z laserů TX1 a TX2 byly pomocí polarizačních kontrolérů PC1 a PC2 nastaveny tak, aby byly optimálně multiplexovány polarizačním splitterem PBS₁, tzn. signál z jednoho laseru musí být jednou z os rovnoběžný s polarizační rovinou x a signál z druhého laseru musí být rovnoběžný s polarizační rovinou y polarizačního splitteru PBS₁. Multiplexovaný signál je zobrazen na obrázku 4.7a. Výkony obou laserů byly nastaveny na hodnoty TX1 = 5,61 dBm a TX2 = 5,65 dBm.



Obr. 4.6: Blokové schéma měření závislosti úhlu polarizace na teplotě

Multiplexovaný signál byl po té přiveden do testovacího optického vlákna, které bylo umístěno uvnitř termokomory. Výstup z testovacího vlákna byl připojen k polarizačnímu kontroléru PC3 a dále na polarizační splitter PBS₂. Jeho výstupy byly následně kontrolovány pomocí optického spektrálního analyzátoru OSA (Optical Spectrum Analyzer). Optimální nastavení stavu a úhlu polarizace na konci měřené trasy bylo prováděno pomocí polarizačního kontroléru PC3 tak, aby odstup mezi signály byl dle specifikace polarizačního splitteru ≥ 22 dB. Demultiplexovaný signál je zobrazen na grafu 4.7b. Výchozí rozdíl mezi výkony v jednotlivých polarizačních rovinách byl nastaven na hodnotu 23,22 dB. Můžeme říci, že se v podstatě jedná o odstup signálu od šumu, neboli přeslech mezi polarizačními rovinami OSNR, který je v tomto případě způsoben převážně parametrem PER.

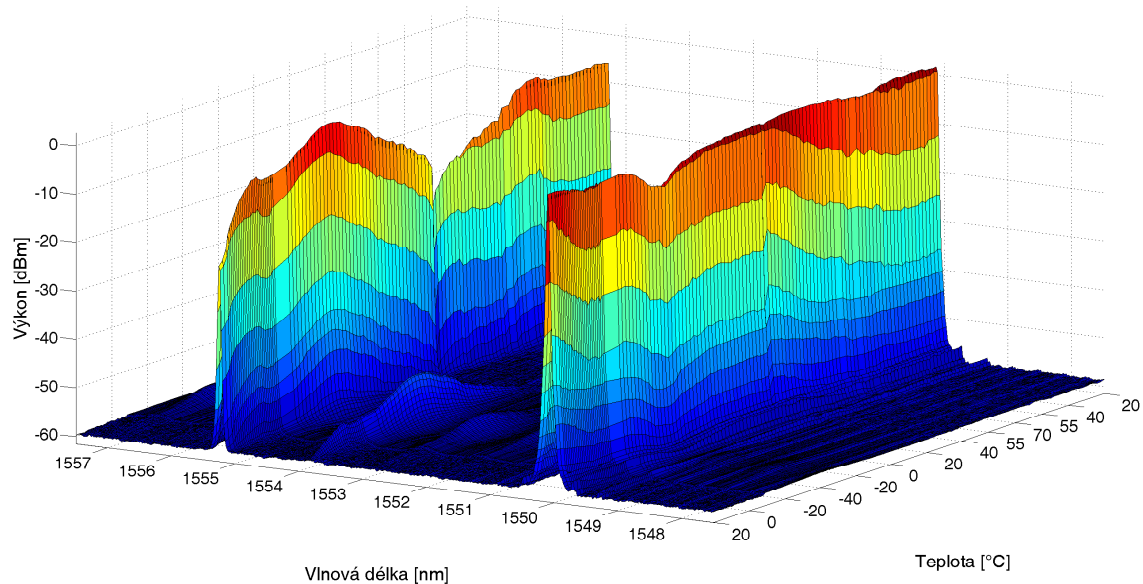


Obr. 4.7: Spektra multiplexovaného a demultiplexovaného signálu

4.3.2 Analýza naměřených závislostí

Měření bylo rozděleno na dvě části. V první části bylo měřené vlákno ochlazováno z 20 °C na -40 °C a následně opět ohříváno na 20 °C. V druhé části pak bylo nao-

pak ohříváno z 20 °C na 70 °C a po té ochlazováno zpět na 20 °C. Na 3D grafickém zobrazení 4.8 je zřetelně vidět, jak se vlivem teploty měnily výkony v obou polarizačních rovinách. Vlnová délka 1 550,1 nm odpovídá výstupu polarizačního splitteru, který byl monitorován pomocí optického spektrálního analyzátoru. Označme tuto polarizační rovinu jako x .



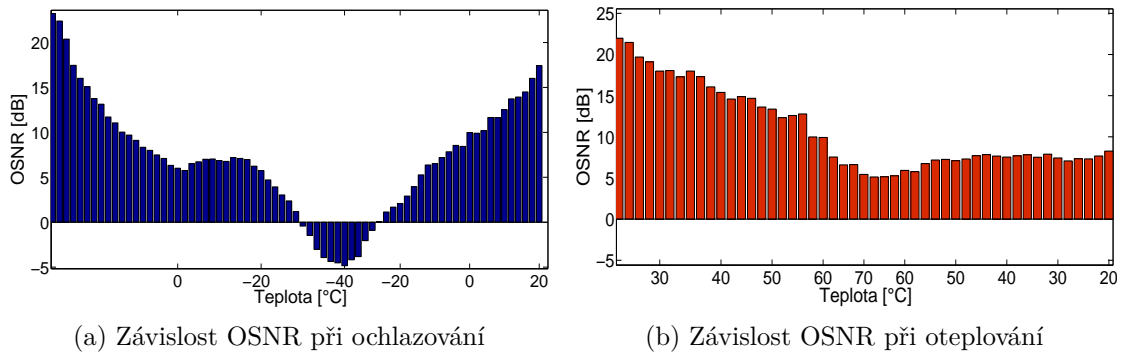
Obr. 4.8: Prostorové zobrazení závislosti výkonu v polarizačních rovinách na teplotě

V průběhu ochlazování docházelo k postupnému růstu výkonové úrovně i v druhé polarizační rovině (y) až při teplotě -40 °C, kdy výkonová úroveň vzrostla z původní hodnoty $-21,17$ dBm na $0,74$ dBm. Po té se s rostoucí teplotou opět snižovala výkonová úroveň až při teplotě 20 °C dosáhla hodnoty $-15,33$ dBm. Po vytemperování termokomory po přibližně 30 minutách došlo ke snížení přibližně na původní hodnotu -24 dBm.

Současně je možné vidět, že v polarizační rovině x se výkonová úroveň snižovala minimálně, řádově o desetiny dB. Od -20 °C do -40 °C je však možné pozorovat pokles výkonové úrovně s největším minimem $-4,15$ dBm na -40 °C, což odpovídá maximální výkonové úrovni v polarizační rovině y . Nastala situace, kdy došlo k otočení úhlu polarizace téměř o 90 ° vlivem okolní teploty. To má za následek změnu nejen úhlu polarizace, ale také stavu polarizace, obdobně jako kdybychom na optické vlákno mechanicky působili např. tahem. Při dalším ohřívání vlákna se výkonová úroveň opět vrátila na původní úroveň 2 dBm.

V druhé části měření bylo měřené vlákno zahříváno na $+70$ °C. Výkonová úroveň v polarizační rovině y s rostoucí teplotou opět výrazně stoupala, téměř lineárně, až dosáhla maximální hodnoty $-4,31$ dBm při teplotě 70 °C. Po té při ochlazování na

původní teplotu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ docházelo k zpětnému snižování velice pozvolna. Po vytemperování termokomory se hodnota opět vrátila na původní hodnotu přibližně -21 dBm . V polarizační rovině x se výkonová úroveň v průběhu snižovala velice mírně. Při maximálním výkonu v polarizační rovině y došlo k poklesu výkonu v rovině x pouze o 1 dB .



Obr. 4.9: Porovnání vlivu ochlazování a oteplování vlákna na OSNR

Na obrázku 4.9 je možné porovnat vliv ochlazování a oteplování vlákna na změnu odstupu signálů mezi oběma polarizačními rovinami (v grafech označeno jako OSNR). Na základě těchto grafických výstupů je zřejmé, že stav polarizace v optickém vlákne je výrazně citlivější na ochlazování vlákna do záporných hodnot, než oteplování do vysokých kladných hodnot teploty. Při ochlazování došlo k otočení polarizačních rovin téměř o 90° . Při zahřívání vlákna se pouze snížila hodnota odstupu signálů mezi oběma polarizačními rovinami, k jejich otočení však nedošlo. Na základě provedené analýzy lze říci, že pokud by teplota optické distribuční sítě byla udržována v rozmezí $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, byla by zachována funkcionality systému využívajícího polarizační multiplex i bez využití dynamické kontroly stavu a úhlu polarizace. Při změně teploty o $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ je průměrná změna OSNR menší než 5 dB . Měřením uvedeným v kapitole 4.5 bylo dokázáno, že taková změna OSNR nezpůsobí nefunkčnost statického polarizačního multiplexu. Další naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze A.

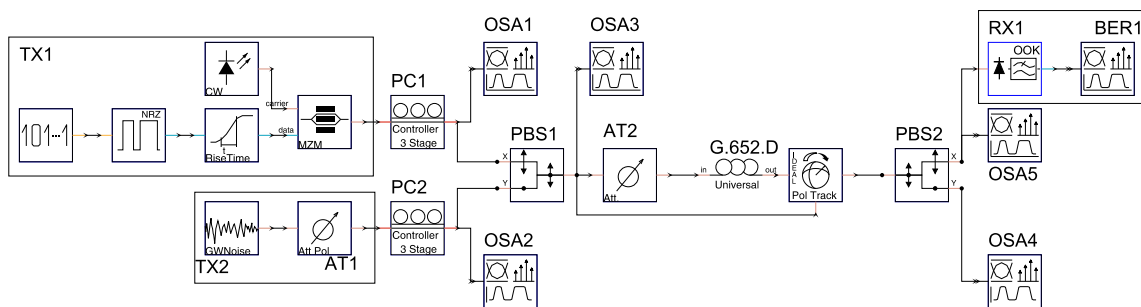
4.4 Simulace polarizačního multiplexu

Před praktickou realizací polarizačního multiplexu byly nejprve simulovány dva modely, které byly později podrobeny i praktickým měřením. Pro simulace bylo použito simulačního prostředí VPI photonics. První model simuluje současný přenos

datového 10G signálu spolu s analogovým šumem, přičemž oba signály jsou odděleny pomocí polarizačního multiplexu. Druhý model simuluje situaci, ve které jsou směry přenosu dat odděleny pomocí polarizačního multiplexu. Vzhledem k nevhodným grafickým výstupům a použitým jednotkám simulačního software byla veškerá data ukládána do csv souborů a následně byly grafy vytvářeny jednotně v prostředí Matlab, stejně jako tomu je u praktického měření.

4.4.1 Přenos dat a šumu s polarizačním oddělením

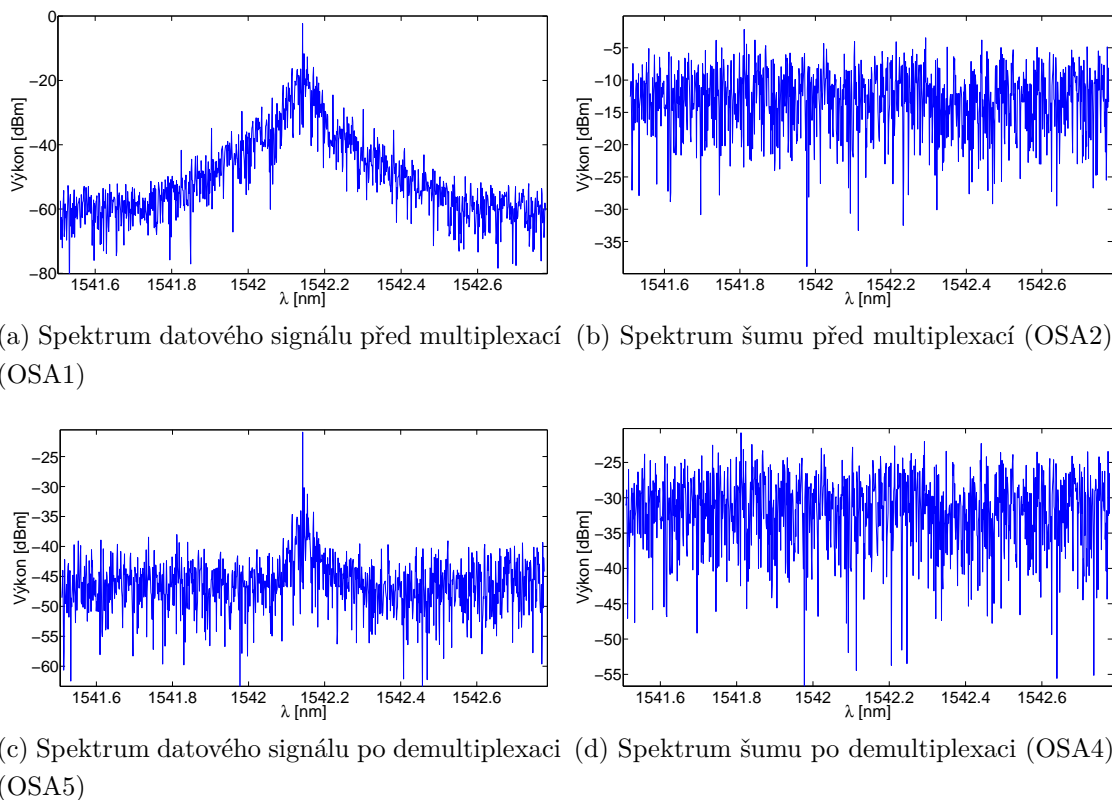
Za účelem simulace přenosu dvou různých signálů na stejné vlnové délce jedním vláknem byl vytvořen model polarizačního multiplexu. Blokové schéma simulovaného zapojení je na obrázku 4.10. Nastavení výkonových úrovní, vlnových délek a útlumů komponent bylo provedeno dle parametrů reálných prvků, které byly použity pro praktické měření uvedené v 4.5, aby bylo možné simulované a prakticky měřené výsledky vzájemně porovnat. Blok TX1 je vysílací část datového signálu s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s. Tento blok je tvořen pomocí laserové diody, generátoru dat PBRs (Pseudo Random Bit Sequence), NRZ (Non Return to Zero) modulátoru a Mach-Zehnderova (MZM) modulátoru. Vlnová délka byla nastavena na hodnotu 1 542,14 nm. Na stejné vlnové délce byl nastaven i generátor šumu v druhém vysílacím bloku TX2. Pomocí atenuátoru AT1 byla regulována výkonová úroveň šumu. Datový signál i šum dále procházely skrze polarizační kontroléry PC1 a PC2 do polarizačního splitteru PBS1.



Obr. 4.10: Blokové schéma zapojení – přenos dat a šumu

Pomocí polarizačních kontrolérů byla vhodně nastavena polarizace obou vysílačů tak, aby byl do jedné polarizační roviny navázán jen jeden z vysílaných signálů. Izolace portů polarizačního splitteru byla nastavena na 22 dB. Spektra obou signálů před multiplexací jsou na obrázku 4.11a a 4.11b. Použité vlákno je typu G.652.D s celkovou délkou 20 km a parametry shodnými s vlákem, které bylo použito dále pro praktické měření. Vzhledem k tomu, že vlákno bylo nastaveno v režimu

„real“ (reálné chování), docházelo průchodem multiplexovaného signálu k otáčení polarizačních rovin. Z tohoto důvodu byl použit dynamický polarizační kontrolér (Polarization Tracker), aby na výstupu optického vlákna byl stav polarizace shodný jako na vstupu vlákna. Multiplexovaný signál byl po té demultiplexován druhým polarizačním splitterem (PBS2). Spektra obou demultiplexovaných signálů jsou na obrázku 4.11c a 4.11d. Výstup polarizačního splitteru, který odpovídá datovému signálu byl převeden z optické oblasti do elektrické v přijímači RX1. Zde byla pomocí analyzátoru bitové chybovosti BER1 měřena bitová chybovost pro simulované scénáře.



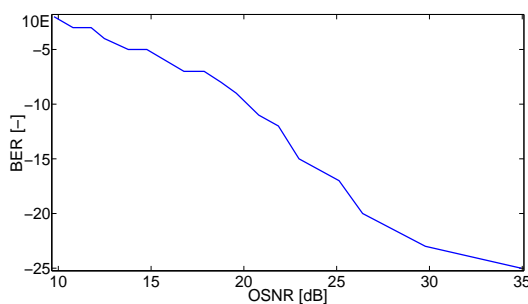
Obr. 4.11: Spektra obou signálů před multiplexací a po demultiplexaci

Účel tohoto simulačního modelu je teoretické ověření chování polarizačního multiplexu při jednosměrném přenosu dvou nezávislých signálů a také analogie situace, kdy by byl současně přenášen digitální signál s daty a analogový signál televize CATV (Cable Analogue TV), jejíž signál má řádově shodný kmitočtet jako generovaný šum. Pomocí proměnného atenuátoru AT1 byl postupně zvyšován výkon v polarizační rovině přenášející signál s analogovým šumem. Současně při tom probíhalo měření bitové chybovosti. Tabulka 4.3 zobrazuje výsledky simulace pro bitovou chybovost a Q-faktor při určitém odstupu obou multiplexovaných signálů. Tento

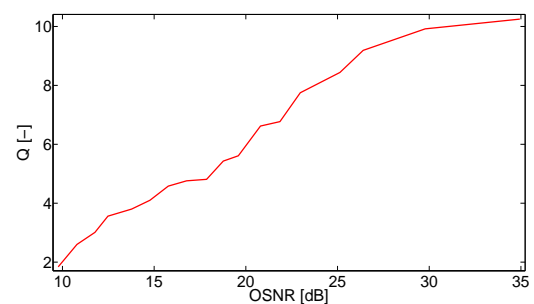
odstup je označen jako OSNR. Sloupec P_{λ_1} odpovídá datovému signálu a sloupec P_{λ_2} signálu s šumem. Grafické znázornění závislosti bitové chybovosti a Q-faktoru je na obrázku 4.12.

Tab. 4.3: Výsledky simulací pro BER a Q-faktor – přenos dat a šumu

P_{λ_1} [dBm]	P_{λ_2} [dBm]	OSNR [dB]	BER [-]	Q [-]
-20,86	-55,8	34,94	5,66E-25	10,25
-20,86	-50,64	29,78	1,06E-23	9,92
-20,86	-47,26	26,4	2,04E-20	9,19
-20,86	-45,99	25,13	1,63E-17	8,44
-20,86	-43,83	22,97	4,56E-15	7,75
-20,86	-42,72	21,86	5,83E-12	6,77
-20,86	-41,66	20,8	1,72E-11	6,62
-20,86	-40,45	19,59	9,18E-09	5,61
-20,86	-39,63	18,77	2,71E-08	5,43
-20,86	-38,72	17,86	7,18E-07	4,81
-20,86	-37,63	16,77	9,86E-07	4,76
-20,86	-36,63	15,77	2,14E-06	4,58
-20,86	-35,63	14,77	1,91E-05	4,1
-20,86	-34,63	13,77	6,42E-05	3,8
-20,86	-33,34	12,48	1,74E-04	3,56
-20,86	-32,63	11,77	1,21E-03	3,01
-20,86	-31,65	10,79	4,42E-03	2,6
-20,86	-30,63	9,77	3,25E-02	1,84



(a) Závislost BER na OSNR

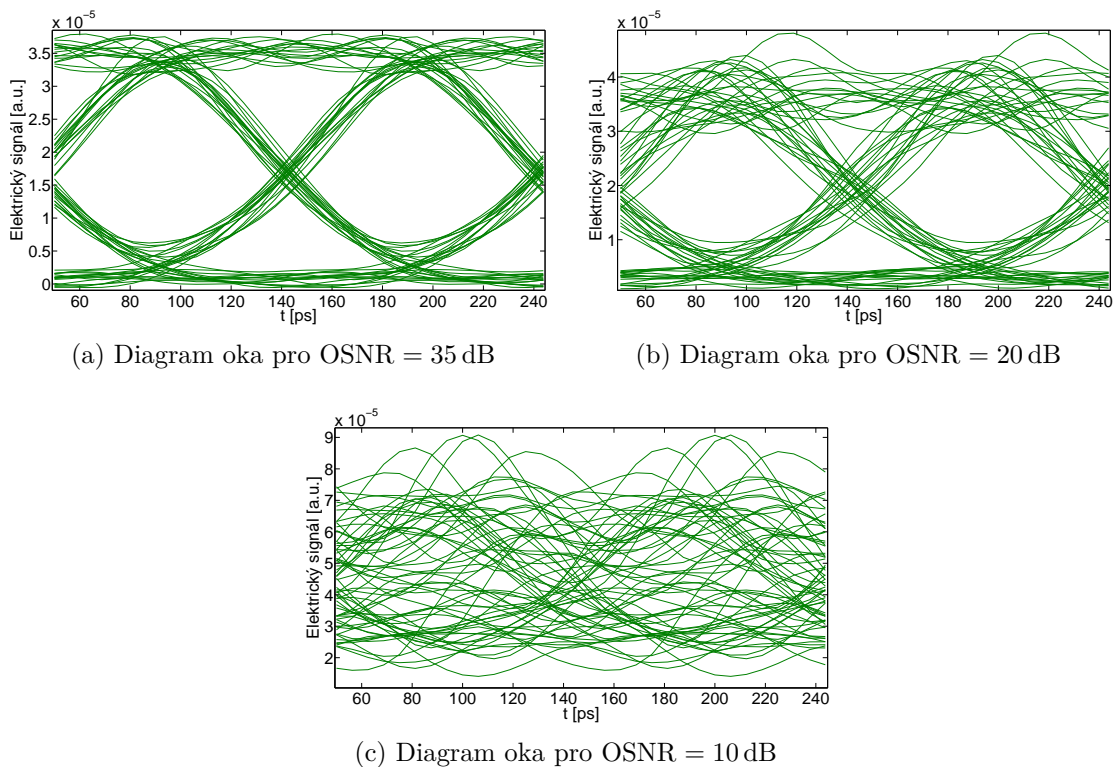


(b) Závislost Q-faktoru na OSNR

Obr. 4.12: Závislost BER a Q-faktoru pro přenos datového signálu a šumu

Z výsledků simulací lze usoudit, že systém začal chybovat nad 10^{-12} pokud byl odstup obou signálů nižší než 22 dB a při postupném snižování až na 10 dB systém přestal pracovat zcela. Vliv odstupů signálů na degradaci datového signálu je patrný

i z diagramů oka na obrázku 4.13. Oko pro ideální nastavení je zcela otevřené a při dalším snižování odstupů mezi signály dochází k postupnému zavírání oka. Z těchto teoretických výsledků plyne, že pokud pomocí polarizačního multiplexu přenášíme datový signál spolu s analogovým signálem s kmitočty řádově desítek MHz, hrají velkou roli polarizační splittery, jejichž izolace mezi polarizačními rovinami určuje, jak se signály v obou polarizačních rovinách budou navzájem ovlivňovat.

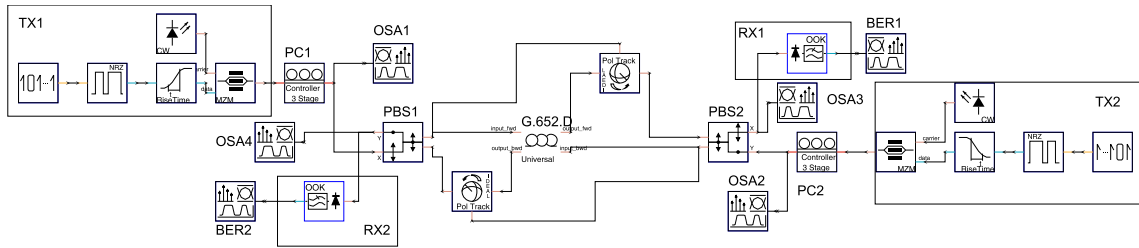


Obr. 4.13: Diagramy oka pro různé OSNR – přenos dat a šumu

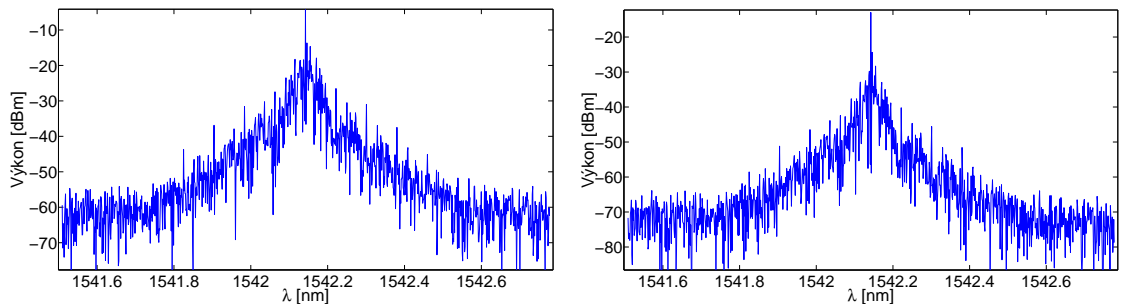
4.4.2 Oddělení směrů přenosu polarizačním multiplexem

Druhý simulační model je zaměřený na využití polarizačního multiplexu pro oddělení směrů přenosu. Blokové schéma simulovaného zapojení je na obrázku 4.14. Nastavení výkonových úrovní, vlnových délek a útlumů komponent bylo provedeno stejně jako v předchozím simulačním modelu dle parametrů reálných prvků.

Zapojení simulačního modelu koresponduje se zapojením, které bylo dále použito pro praktické měření. Na obou stranách přenosové linky byly vytvořeny shodné vysílače i přijímače pro přenosovou rychlost 10 Gbit/s. Oba vysílače TX1 a TX2 byly tvořeny stejnými bloky jako ve schématu 4.10. Vlnové délky byly opět nastaveny na hodnotu 1 542,14 nm. Zde je shodná vlnová délka velmi významná. Oba vysílače



Obr. 4.14: Blokové schéma zapojení – obousměrný přenos



(a) Spektrum signálu před multiplexací (OSA1) (b) Spektrum signálu po demultiplexaci (OSA3)

Obr. 4.15: Spektra signál před a po multiplexaci pro sestupný směr

proti sobě posílají různé datové signály, přičemž oddělení je realizováno polarizačním multiplexem.

Signál z vysílače TX1 byl prostřednictvím polarizačního kontroléru PC1 navázán do prvního polarizačního splitteru PBS1. Pomocí kontroléru PC1 byla polarizace vhodně natočena tak, aby daný signál byl navázán pouze do jedné polarizační roviny. Spektrum signálu před multiplexací je na obrázku 4.15a. Dále signál procházel obousměrným optickým vláknem G.652.D s celkovou délkou 20 km. Vláknem bylo nastaveno v režimu „real“, proto byl použit dynamický polarizační kontrolér v obou směrech přenosu. Po průchodu vláknem došlo k demultiplexaci pomocí druhého polarizačního splitteru PBS2. Spektrum demultiplexovaného signálu je na obrázku 4.15b. Odpovídající výstup polarizačního splitteru byl pomocí přijímače RX1 převeden z optické oblasti do elektrické, kde byla následně pomocí analyzátoru bitové chybovosti BER1 měřena bitová chybovost a Q-faktor. V opačném (vzestupném) směru je zapojení zcela shodné. Vysílač TX2 vysílá signál proti vysílači TX1. Na konci přenosové trasy je signál přijímán pomocí RX1 a vyhodnocován pomocí analyzátoru BER2. Spektra vzestupného signálu před i po demultiplexaci jsou shodná jako pro sestupný směr na obrázku 4.15. Spektra signálu mají stejný průběh před multiplexací i po ní, dojde pouze ke snížení výkonové úrovně vlivem vložného útlumu

trasy. V porovnání s výstupem simulací pro přenos datového signálu a šumu na obrázku 4.11a a 4.11c vidíme, že při využití polarizačního multiplexu pro oddělení směrů přenosu nedochází k výraznému ovlivňování signálu z jedné polarizační roviny do druhé. V tomto případě jsou navíc spektra obou vysílačů shodná.

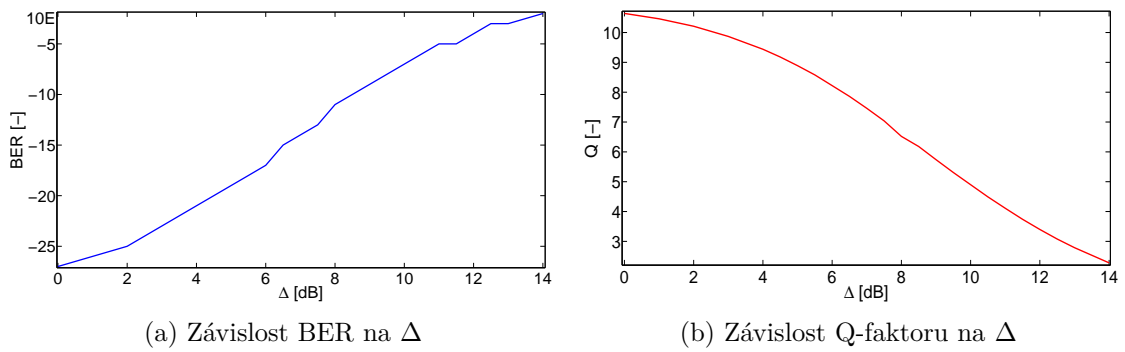
Pomocí polarizačního kontroléru byla otáčena polarizace signálu z vysílače TX1 před polarizačním splitterem, čímž docházelo k výkonové degradaci demultiplexovaného signálu na přijímací straně. To odpovídá situaci, kdy by vlivem okolní teploty nebo mechanickým namáháním byl měněn stav polarizace v optickém vlákne. Stejná simulace byla prováděna i v opačném směru a pro oba směry současně. Vzhledem k teoretickému a idealizovanému charakteru simulačních nástrojů však byly výsledky shodné, proto jsou dále uvedeny jen pro natáčení polarizace pouze v jednom směru.

Tab. 4.4: Výsledky simulace pro BER a Q-faktor – obousměrný přenos

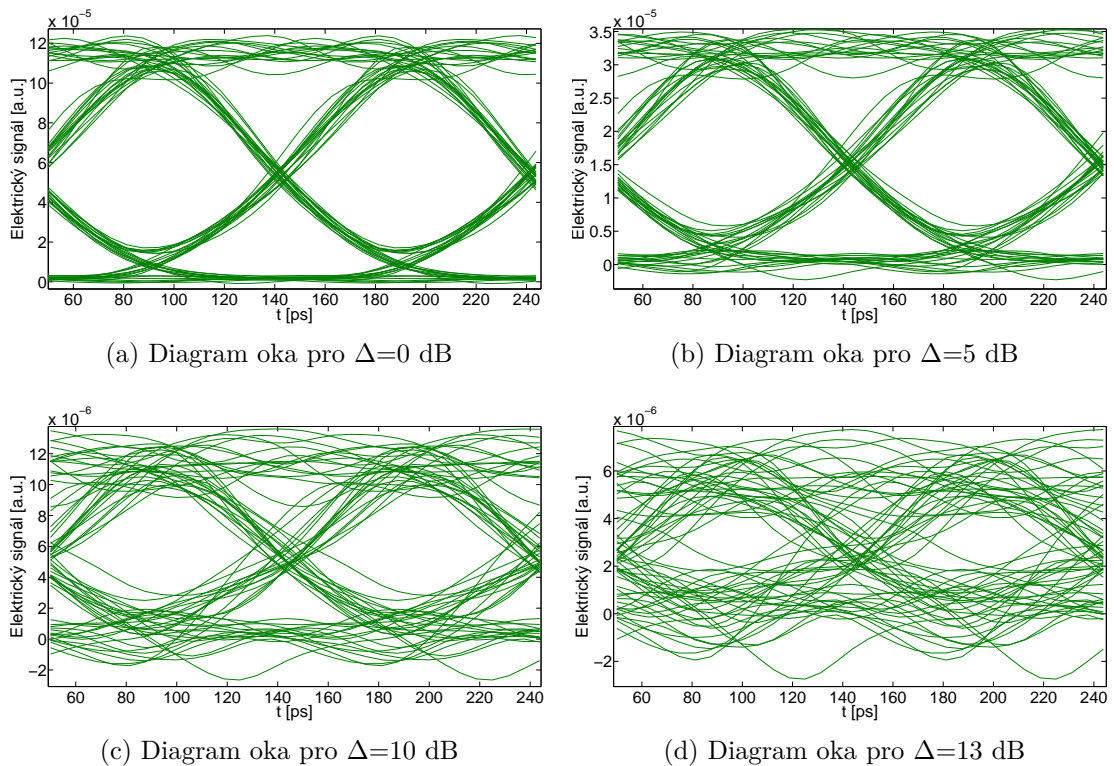
Δ [dB]	BER [-]	Q [-]	Δ [dB]	BER [-]	Q [-]
0	9,38E-27	10,64	8	1,84E-11	6,52
1	6,89E-26	10,46	8,5	3,18E-10	6,18
2	9,36E-25	10,21	9	4,57E-09	5,74
3	2,70E-23	9,87	9,5	5,31E-08	5,31
4	1,82E-21	9,44	10	4,88E-07	4,9
4,5	2,08E-20	9,18	10,5	3,52E-06	4,49
5	2,91E-19	8,89	11	2,00E-05	4,11
5,5	4,87E-18	8,58	11,5	9,08E-05	3,74
6	9,37E-17	8,22	12	3,34E-04	3,4
6,5	1,98E-15	7,86	12,5	1,01E-03	3,08
7	4,35E-14	7,46	13	2,60E-03	2,79
7,5	9,33E-13	7,04	14	1,13E-02	2,28

V tabulce 4.4 jsou uvedeny výsledky simulace. Parametr Δ udává, o kolik dB byl výkon přijímaného signálu snižen v důsledku natáčení polarizace. Závislost bitové chybovosti a Q-faktoru na změně parametru Δ jsou zobrazeny na grafu 4.16. Z výsledků je zřejmé, že pokud byl výkon signálu vlivem natáčení polarizace snižován až o 7,5 dB, chybovost byla stále v přijatelné míře řádově do 10^{-12} . Při dalším natáčení polarizace vrůstala chybovost a klesal Q-faktor, až při snížení výkonové úrovně o 14 dB systém dosáhl chybovosti $1,13 \cdot 10^{-2}$ a Q-faktoru 2,28. Míra zvyšování chybovosti systému je rovněž dobře patrná z diagramů oka na obrázku 4.17.

Tyto simulace byly vytvořeny za účelem potvrzení teoretického předpokladu k použití polarizačního multiplexu k oddělení směrů přenosu dvou různých signálů se stejnou vlnovou délkou. Získané výsledky jsou dále ověřeny praktickými měřeními pro 10G datový přenos v laboratorním prostředí i na reálné přenosové lince.



Obr. 4.16: Závislost BER a Q-faktoru pro obousměrný přenos



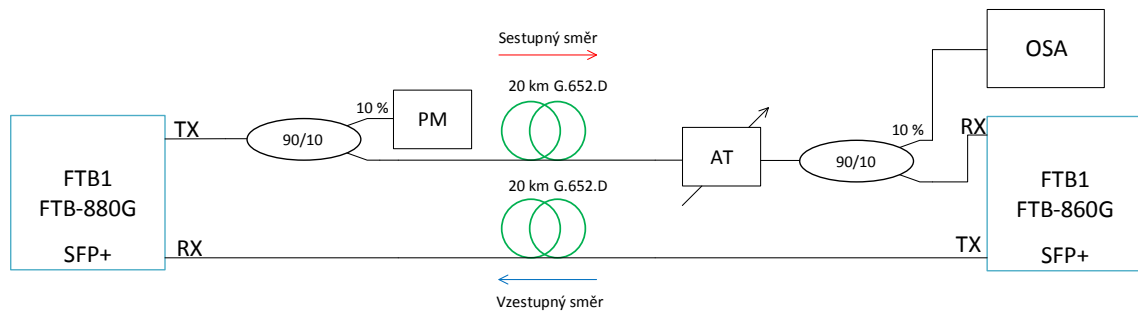
Obr. 4.17: Diagramy oka pro různé Δ – obousměrný přenos

4.5 Praktická realizace polarizačního multiplexu

Na základě teoretických podkladů a výsledků simulačních modelů byl realizován praktický návrh a měření přenosového systému založeného na polarizačním multiplexu. Ten sestával z řady laboratorních měření a finálního ověření na reálné optické trase. Pro deterministické určení chování navrhovaného systému bylo nezbytné kon-

krétně zjistit, jak se bude systém chovat bez nasazeného polarizačního multiplexu. Jedná se o vlastnosti jako je vliv vložného útlumu na bitovou chybovost pro dané vysílače/přijímače, citlivost na PMD, citlivost na PDL apod. Úvodní část této podkapitoly je proto věnována měření těchto parametrů.

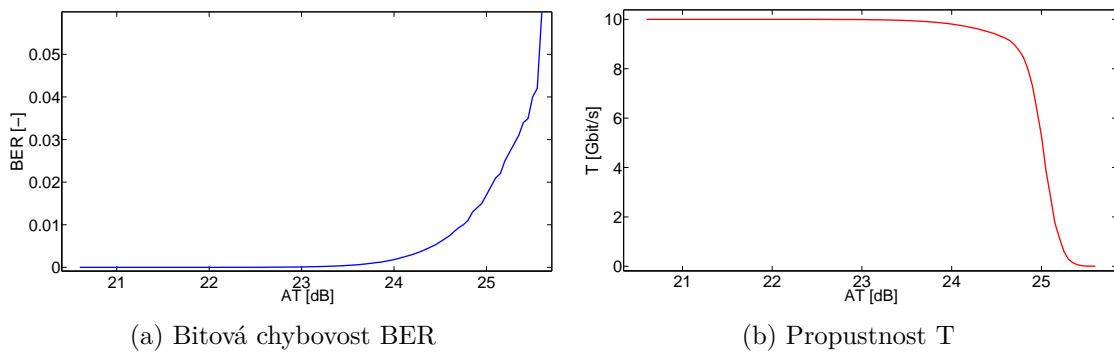
4.5.1 Vliv vložného útlumu na BER



Obr. 4.18: Schéma pro měření závislosti vložného útlumu na BER

V první části byl testován vliv vložného útlumu na propustnost T a bitovou chybovost BER . Měřené zapojení je zobrazeno na obrázku 4.18. Pro realizaci praktického měření bylo využito měřících platform EXFO FTB-1 a testovacích modulů EXFO NetBlazer 860G a 880G, které umožňují generování vysokorychlostních datových toků, měření bitové chybovosti i parametrů QoS na vyšších vrstvách. Měření probíhalo pro přenosovou rychlost 10 Gbit/s díky dvojici SFP+ modulů Optoway SPS-2385MW-D440G přesně laděných dle 50 GHz DWDM rastru na 1 542,14 nm. Jako testovací vlákna pro oba směry přenosu bylo použito standardních telekomunikačních vláken G.652.D s délkou 20 km umístěných na cívkách. Vložný útlum byl vytvářen uměle pomocí laditelného útlumového článku EXFO FVA-60B. Dvojici couplerů s dělicím poměrem 90:10 bylo na začátku a na konci trasy vyděleno 10 % signálu. Na začátku trasy byl umístěn běžný měřič výkonu PM (Power Meter) EXFO FPM-600, pomocí kterého byly sledovány změny výstupního výkonu SFP+ modulu. Na konci trasy byl umístěn optický spektrální analyzátor OSA Anritsu MS9740A, kterým byl sledován výkon snížený proměnným atenuátorem.

Použité SFP+ moduly mají garantovanou maximální délku optického vlákna 80 km, což je ekvivalentní 20 dB vložného útlumu. Tomu odpovídají i naměřené výsledky, které jsou souhrnně obsaženy v příloze B. Až při nastavení útlumu 20,6 dB proměnným atenuátorem začal systém chybovat. Závislost BER na vložném útlumu je zobrazena na obrázku 4.19a. Pro optické sítě obecně je vhodné dodržovat bitovou chybovost $\geq 10^{-12}$. Při zvyšování bitové chybovosti dochází k degradaci parametrů



Obr. 4.19: Závislost BER a propustnosti na vložném útlumu

kvality služeb QoS. Do jaké míry má bitová chybovost vliv na tyto parametry v optických přístupových sítích je popsáno dále. Při dalším zvyšování vložného útlumu se bitová chybovost postupně zvyšovala, jak je patrné z obrázku 4.19a, s přibližně exponenciální závislostí, až při hodnotě 25,6 dB systém přestal zcela reagovat při bitové chybovosti $6 \cdot 10^{-2}$. Systém dokázal pracovat za cenu zvýšené bitové chybovosti i s dalším vložným útlumem 5 dB.

Měřením bylo prokázáno, že z hlediska celkové propustnosti je systém na vložný útlum odolný i při překročení limitu pro BER 20,6 dB. Závislost propustnosti T na vložném útlumu AT je zobrazena na obrázku 4.19b. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze B. Propustnost systému byla 10 Gbit/s až do útlumu 22,05 dB. Po té začala klesat až při útlumu 25,6 dB byla 1 Mbit/s. V rámci testování byl měřen vliv

Tab. 4.5: Nastavení služeb pro EtherSAM

Typ služby:	Rámec [B]	CIR [Gbit/s]	EIR [Gbit/s]	Jitter [ms]	Latence [ms]	Ztrátovost [%]
Video	1 374	1,0592	10	30	150	0,1
VoIP	138	0,005	10	20	120	0,1
Data	–	0,035	10	55	200	0,1

vložného útlumu i na parametry QoS na vyšších vrstvách pomocí standardu Y.1564 EtherSAM, který je implementován v modulu EXFO NetBlazer 860G i 880G. Díky tomuto měření bylo zjištěno, do jaké míry má bitová chybovost vliv na parametry QoS. Pro měření byly nastaveny 3 standardní triple play služby – hlasová VoIP (Voice over IP), video a datová. Parametry těchto služeb jsou uvedeny v tabulce 4.5. Pro hlasovou službu bylo zvoleno 30 kanálů s kodekem G.711, pro video službu pak 10 kanálů s kodekem MPEG-2. Parametr CIR (Committed Information Rate) při tom vyjadřuje garantovanou maximální přenosovou rychlost a parametr EIR (Excess Information Rate) negarantovanou maximální přenosovou rychlost.

Tab. 4.6: Výsledky měření dle EtherSAM – vliv útlumu

AT [dB]	20	21	21,5	21,75
BER [-]	0	1,60E-08	3,30E-07	8,00E-07
<i>Video</i>				
CIR [Gbit/s]	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,029	4,732	15,932	25,429
Propustnost [Gbit/s]	9,997	9,500	8,324	7,335
<i>VoIP</i>				
CIR [Gbit/s]	0,005	0,005	0,005	0,005
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,006	0,575	2,095	3,700
Propustnost [Gbit/s]	10,000	9,942	9,782	9,618
<i>Data</i>				
CIR [Gbit/s]	0,035	0,035	0,035	0,035
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,030	2,814	9,735	16,292
Propustnost [Gbit/s]	9,998	9,628	8,727	7,892

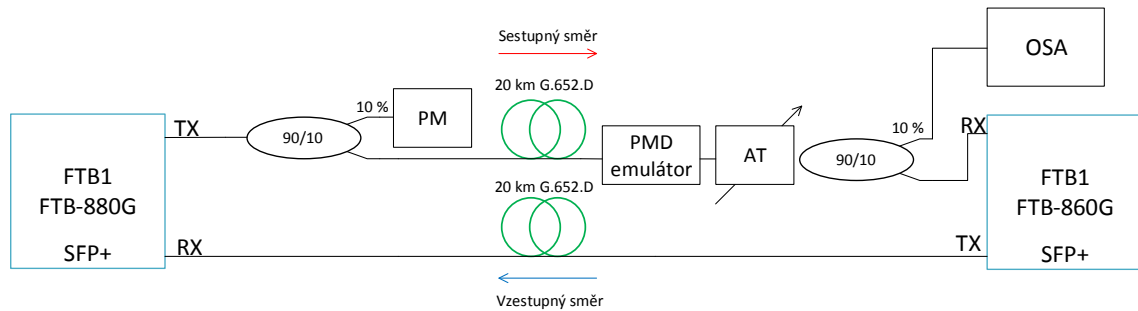
Naměřené výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.6. Při vloženém útlumu 20 dB, kterému ještě odpovídá nulová bitová chybovost, byly naměřené hodnoty v limitech. Po zvýšení útlumu na 21 dB a následně na 21,5 dB a 21,75 dB již vzrostla ztrátovost u všech měřených služeb. Rovněž začala rapidně klesat datová propustnost. Při dalším zvýšení o 0,05 dB již nebylo možné měřit. Z toho plyne, že maximální přípustná hodnota BER pro měření pomocí standardu EtherSam je řádově 10^{-7} .

4.5.2 Odolnost systému vůči PMD a PDL

Vzhledem k zaměření praktické části práce bylo vhodné ověřit vliv velké PMD, která se prakticky projeví zvýšením parametru označovaného jako „power penalty“, přídavný útlum, který zkracuje dosah optické linky. PMD byla vytvářena pomocí PMD emulátoru EXFO EM-550V s pevnými hodnotami PMD 5 ps, 10 ps a 15 ps. Zapojení je zobrazeno na obrázku 4.20. Pro 10G Ethernet platí limit maximální PMD 5 ps, při překročení této hodnoty se zvyšuje útlum přenosové linky o 1 dB [56]. Vliv PMD emulátoru bylo možné ověřit při nastavení limitních hodnot vloženého útlumu, které byly proměřeny v předchozí části. Pomocí přímé metody byl PMD

emulátor proměřen, aby bylo zřejmé, jaký má vložený útlum včetně konektorů, aby nedošlo k zanesení chyby:

- 5 ps – 1 dB,
- 10 ps – 0,8 dB,
- 15 ps – 3,8 dB (propojení 5 ps a 10 ps etalonů).



Obr. 4.20: Vliv PMD emulátoru na celkový útlum

V tabulce 4.7 jsou uvedeny naměřené výsledky pro všechny emulátory. Vezmeme-li v úvahu, že bez vloženého PMD emulátoru systém začal chybovat při hodnotě 20,6 dB, tak při 5 ps PMD byla tato hodnota snížena na $19,3 + 1 = 20,3$ dB. Při 10 ps PMD $18,3 + 0,8 = 19,1$ dB a při 15 ps PMD $15,6 + 3,8 = 19,4$ dB. Z toho plyne, že vložený PMD emulátor způsobil přidání celkového útlumu:

- 5 ps – 0,3 dB,
- 10 ps – 1,5 dB,
- 15 ps – 1,2 dB.

Tab. 4.7: Vliv PMD na chybovost

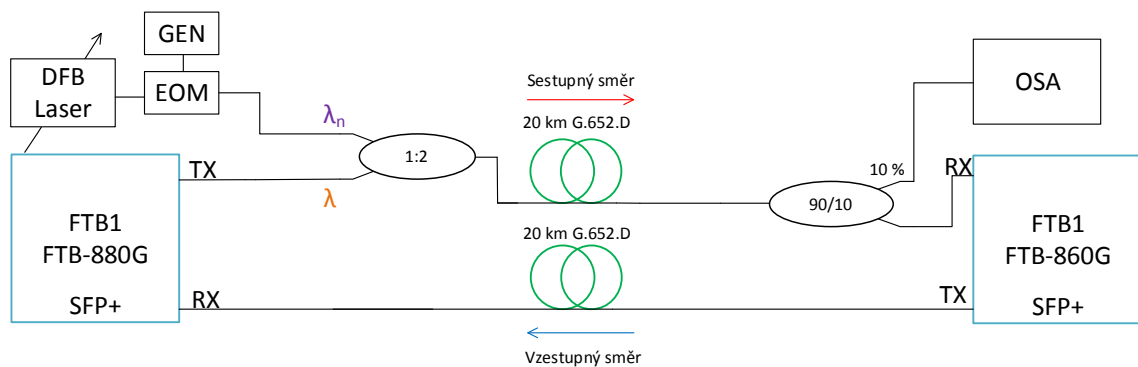
AT [dB]	BER [-]	AT [dB]	BER [-]	AT [dB]	BER [-]
5 ps		10 ps		15 ps	
19,30	7,10E-11	18,30	3,00E-11	15,60	9,30E-11
19,70	5,70E-08	19,00	3,40E-10	17,00	8,40E-09
20,00	2,50E-06	20,00	5,10E-07	18,00	5,70E-07
21,00	1,40E-04	21,00	8,60E-05	19,00	3,00E-05
22,00	1,60E-03	22,00	1,60E-03	20,00	6,70E-04
23,00	1,40E-02	23,00	1,50E-02	21,00	1,40E-02
23,50	3,50E-02	23,65	4,40E-02	21,50	3,40E-02

V další části byla proměřena citlivost signálu na polarizaci (při běžném 10G datovém přenosu). Tato citlivost bývá definována jako PDL (parametr popsáný v 3.4.2). Řádově tato hodnota bývá pro optické prvky v desetinách dB. Schéma pro toto

měření je odpovídající schématu 4.20 s jediným rozdílem, namísto PMD emulátoru byl vložen polarizační kontrolér. Při nízké hodnotě útlumu nastavené proměnným atenuátorem se vliv PDL neprojevil. Při nastavení vysokých hodnot, při kterých systém začal chybovat však byl vliv výrazný. Pomocí polarizačního kontroléru bylo nalezeno minimum a maximum vlivu polarizace na přenášený signál. Tento rozdíl způsoboval změnu chybovosti o jeden řád. Toho bylo docíleno pomocí monitorováním propustnosti a bitové chybovosti. Na základě hodnot závislost BER na vloženém útlumu (popsané v 4.5.1) bylo možné určit, že daný růst chybovosti odpovídá útlumu PDL 0,1 dB.

4.5.3 Odolnost systému vůči jiným vlnovým délkám

Před realizací měření vlastního polarizačního multiplexu byla měřena závislost bitové chybovosti na další vlnové délce. Měřené schéma je zobrazeno na obrázku 4.21. Jako druhý zdroj záření byla použita laditelná laserová DFB dioda Optokon ITLA, jejíž signál byl dále modulován elektro-optickým modulátorem EOM (Electro Optical Modulator) Photline MXER-LN-10. Jako modulační signál byl použit bílý šum s kmitočtem 30 MHz vytvářený externím generátorem Agilent 33521A. Modulovaný signál (šum) byl následně sloučen s užitečným signálem couplerem 1:2. Smíchaný signál dále procházel 20 km optického vlákna G.652.D do coupleru 90:10, kde 10 % signálu bylo dále přivedeno na optický spektrální analyzátor (OSA) a 90 % procházelo na detektor. Pro vytváření datového toku bylo využito stejné sestavy jako u předešlých měření.



Obr. 4.21: Schéma měření – odolnost vůči jiné vlnové délce

Pomocí laditelného laseru byly nastavovány vlnové délky v rozsahu C-pásma 1 566,8 nm až 1 531,88 nm. Vlnová délka užitečného signálu odpovídá předchozím měřením s SFP+ 1 542,14 nm. V závislosti na spektrálním přiblížování vlnové délky λ_n byla měřena bitová chybovost a propustnost 10G Ethernetového spoje. V tabulce

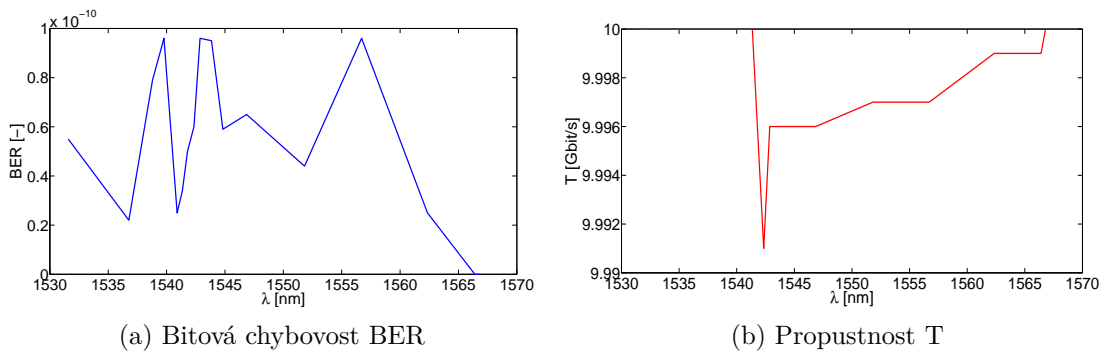
4.8 jsou souhrnně zobrazeny naměřené výsledky a k nim odpovídající grafické výstupy na obrázku 4.22. Z naměřených údajů vyplývá, že při postupném přeladování DFB laseru začal datový přenos chybovat při $\delta_\lambda = 20,55$ nm spektrálně vzdáleném od nosné vlnové délky λ . Hodnota BER se pohybovala řádově 10^{-11} až do $\lambda_n = 1541,79$ nm, kdy došlo téměř ke spektrálnímu překrytí obou vlnových délek λ a λ_n . Tento bod není v grafu 4.22a zanesen z důvodu lepší přehlednosti. Hodnota BER v tomto bodě byla neměřitelná (příliš vysoká). Kroky přeladování DFB laseru byly zvoleny s ohledem na možnosti daného zařízení, které neumožňovalo plynulé přeladování. Při dalším přeladování směrem k nižším vlnovým délkám byla hodnota BER opět řádově 10^{-11} .

Tab. 4.8: Tabulka naměřených hodnot – vliv spektrální polohy další vlnové délky

λ_n [nm]	δ_λ [nm]	BER [-]	T [Gbit/s]
1566,80	25,01	0	10,000
1566,41	24,62	0	9,999
1562,34	20,55	2,50E-11	9,999
1556,70	14,91	9,60E-11	9,997
1551,82	10,03	4,40E-11	9,997
1546,85	5,06	6,50E-11	9,996
1544,82	3,03	5,90E-11	9,996
1543,85	2,06	9,50E-11	9,996
1542,87	1,08	9,60E-11	9,996
1542,34	0,55	6,00E-11	9,991
1541,79	0,00	–	0,000
1541,36	–0,43	5,00E-11	10,000
1540,90	–0,89	3,40E-11	10,000
1539,78	–2,01	2,50E-11	10,000
1538,80	–2,99	9,60E-11	10,000
1536,77	–5,02	7,90E-11	10,000
1531,58	–10,21	2,20E-11	10,000
1531,88	–9,91	5,50E-11	10,000

Z hlediska celkové datové propustnosti T je systém odolnější, což bylo prokázáno již v 4.5.1. V případě tohoto testování se začala propustnost nepatrně snižovat jakmile začal systém chybovat. Při $\lambda_n = 1541,79$ nm kde byla chybovost neměřitelná, byla propustnost nulová. Tento bod rovněž není v 4.22b vnesen pro lepší přehlednost. Při dalším přeladování směrem k nižším vlnovým délkám již byla propustnost 10 Gbit/s.

Účelem tohoto měření bylo zjistit, jakým způsobem bude rušivý signál na blízké vlnové délce ovlivňovat užitečný přenášený signál, za předpokladu shodné výkonové

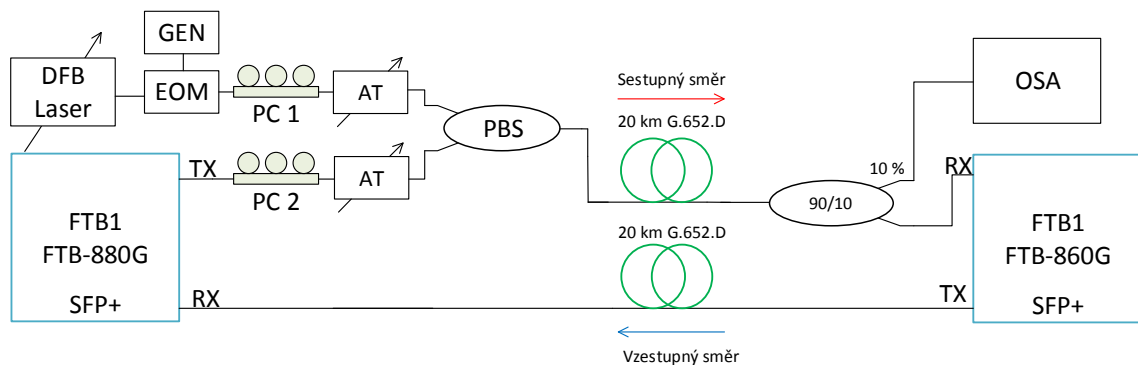


Obr. 4.22: Závislost BER a propustnosti T na spektrální poloze další vlnové délky

úrovně. Toto měření je významné pro porovnání přenosu dvou signálů přenášených pomocí polarizačního multiplexu. Lze tak usoudit, jak musí být dva nezávislé signály spektrálně vzdáleny, aby nedocházelo k chybování přenosového systému, pokud není použitý polarizační multiplex.

4.5.4 Částečný polarizační multiplex

Tato část práce je zaměřena na polarizační multiplexování užitečného datového signálu navázaného do jedné polarizační roviny spolu s bílým šumem navázaným do druhé polarizační roviny. Tyto polarizačně multiplexované signály však nejsou dále demultiplexovány a dopadají společně na detektor. Odpovídající schéma měřeného zapojení je na obrázku 4.23.



Obr. 4.23: Schéma zapojení měření – částečný polarizační multiplex

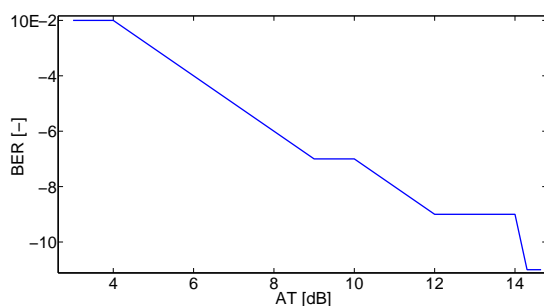
Tímto měřením bylo zjišťováno, jak se bude systém chovat, pokud na detektor bude dopadat multiplexovaný signál, ale pouze jedna polarizační složka bude nést užitečný signál. V druhé složce byl modulován bílý šum s kmitočtem 30 MHz. Vlnové délky obou signálů byly téměř shodné $\lambda_1 = 1541,77$ nm a $\lambda_2 = 1541,78$ nm.

Oba signály byly pomocí polarizačních kontrolérů PC1 a PC2 optimálně navázány do polarizačního splitteru a pomocí proměnných atenuátorů byla upravována jejich výkonová úroveň.

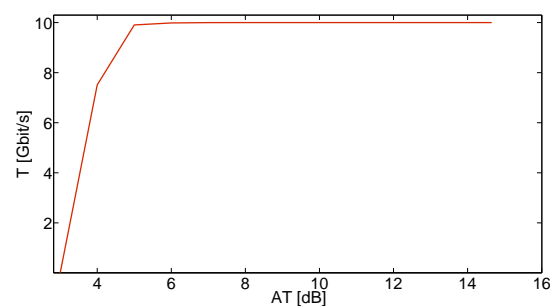
Nejprve byly výkonové úrovně obou signálů nastaveny na shodnou úroveň. Při tomto nastavení však přenosový systém nepracoval. Až při zatlumení šumu o 3 dB byla bitová chybovost a propustnost měřitelná. Naměřené výsledky jsou zobrazeny v tabulce 4.9. Při dalším zatlumování docházelo k postupnému snižování chybovosti a nárůstu propustnosti. Při zatlumení o 15 dB již systém nevykazoval chybovost. Graficky jsou závislosti bitové chybovosti a propustnosti zobrazeny na obrázku 4.24. Výsledky této části měření budou dále porovnány s plným polarizačním multiplexem, který je schopen bez chybovosti přenášet dva signály na stejné vlnové délce, při stejných výkonových úrovních.

Tab. 4.9: Tabulka naměřených hodnot pro částečný polarizační multiplex

AT [dB]	BER [-]	T [Gbit/s]
3,00	1,30E-02	0,000
4,00	1,30E-02	7,511
5,00	2,60E-03	9,905
6,00	5,50E-04	9,986
7,00	3,00E-05	9,999
8,00	2,30E-06	10,000
9,00	3,20E-07	10,000
10,00	1,60E-07	10,000
11,00	3,00E-08	10,000
12,00	6,90E-09	10,000
13,00	9,60E-09	10,000
14,00	3,60E-09	10,000
14,30	7,80E-11	10,000
14,50	7,90E-11	10,000
14,65	5,10E-11	10,000
15,00	0,00E+00	10,000



(a) Bitová chybovost BER

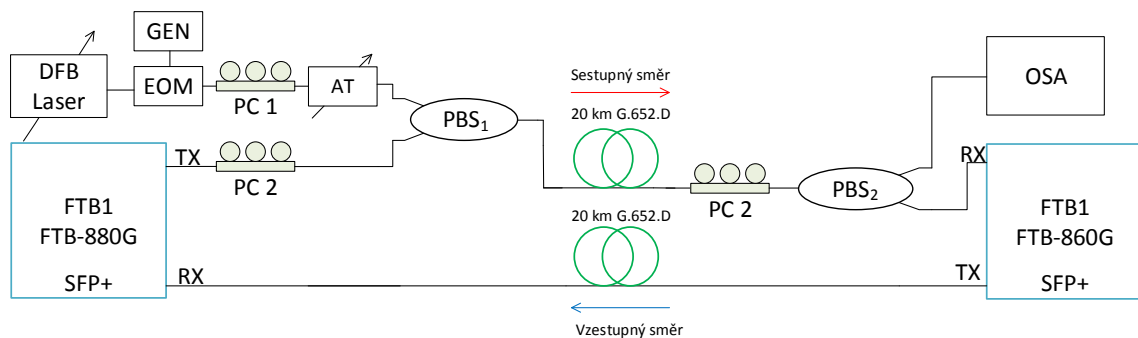


(b) Propustnost T

Obr. 4.24: Závislost BER a propustnosti T pro částečný polarizační multiplex

4.5.5 Přenos dat a šumu využitím polarizačního multiplexu

Po té co byl přenosový 10G systém podrobně prozkoumán na výše testované parametry (kap. 4.5.1, 4.5.2, 4.5.3, 4.5.4), bylo sestaveno měřící pracoviště pro současný přenos užitečného 10G datového signálu na stejné vlnové délce spolu s analogovým bílým šumem vzájemně oddělených polarizačním multiplexem. Účelem tohoto měření je ověření chování polarizačního multiplexu při jednosměrném přenosu dvou nezávislých signálů a jejich vzájemnou separátnost. Dalším účelem měření je analógie signálu modulovaného bílým šumem s přenosem analogové televize CATV, jejíž signál má podobný kmitočet. Měřením tedy bylo možné simulovat současný přenos vysokorychlostního datového 10G digitálního signálu a analogového signálu CATV pomocí polarizačního multiplexu a jejich vzájemné ovlivňování. Schéma použitého zapojení je zobrazeno na obrázku 4.25.



Obr. 4.25: Schéma měření – přenos datového signálu a šumu

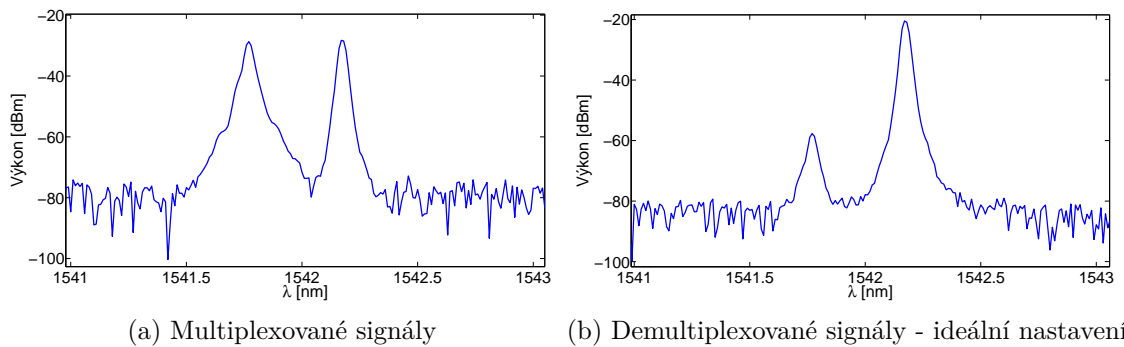
Schéma je obdobné jako u předchozího zapojení 4.23, navíc je zde demultiplexační část. Ta sestává z polarizačního kontroléru PC3, pomocí které je polarizace vhodně natočena na odpovídající filtry pro polarizační roviny x a y v druhém polarizačním splitteru PBS₂. Vlnové délky SFP+ modulu a laditelného laseru byly nastaveny téměř shodně na $\lambda_1 = 1541,77$ nm a $\lambda_2 = 1541,78$ nm. Pro možnost sledování výkonových úrovní však byl pomocný laser přeladován na vedlejší vlnový kanál. Díky tomu je možné signály v obou polarizačních rovinách sledovat. Naměřené výsledky však odpovídají nastavení výše uvedených (téměř shodných) vlnových délek. Pomocí proměnného atenuátoru byly výkonové úrovně v obou polarizačních rovinách vyrovnány, jak je možné vidět na obrázku 4.26a, který zobrazuje multiplexovaný signál. Levá nosná vlnová délka odpovídá signálu s bílým šumem a pravá datovému signálu. Demultiplexovaný signál je zobrazen na obrázku 4.26b.

Pomocí proměnného atenuátoru byl postupně zvyšován výkon v polarizační rovině přenášející signál s bílým šumem. Současně při tom probíhalo měření bitové

Tab. 4.10: Tabulka naměřených hodnot – přenos datového signálu a šumu s využitím polarizačního multiplexu

P_{λ_1} [dBm]	P_{λ_2} [dBm]	OSNR [dB]	BER [-]	T [Gbit/s]
-56,53	-20,54	35,99	0	10,000
-51,33	-20,50	30,83	0	10,000
-45,69	-20,50	25,19	0	10,000
-45,34	-21,10	24,24	9,10E-11	10,000
-43,53	-20,98	22,55	2,50E-10	10,000
-42,75	-20,96	21,79	9,70E-09	10,000
-41,52	-21,03	20,49	8,70E-08	10,000
-40,98	-21,01	19,97	7,50E-07	10,000
-39,58	-21,35	18,23	1,80E-06	10,000
-38,25	-21,42	16,83	7,30E-06	10,000
-37,77	-21,54	16,23	2,90E-05	9,999
-36,91	-21,45	15,46	5,60E-05	9,997
-35,55	-21,67	13,88	7,10E-04	9,968
-34,81	-21,81	13,00	1,50E-03	9,928
-34,10	-21,87	12,23	5,00E-03	9,407
-32,65	-21,91	10,74	2,70E-02	6,683
-31,91	-21,85	10,06	-	0,000

chybovosti, datové propustnosti a také měření parametrů QoS na vyšších vrstvách pomocí již dříve zmíněného standardu EtherSAM.



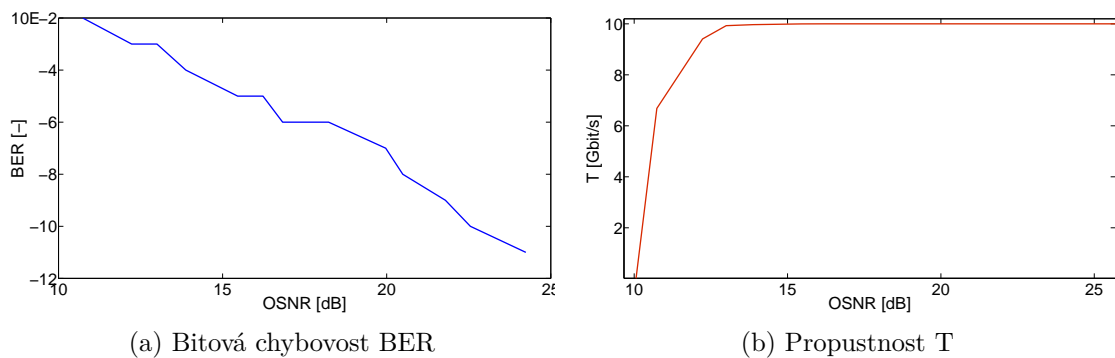
Obr. 4.26: Spektra multiplexovaných a demultiplexovaných signálů

Tabulka 4.10 zobrazuje výsledky měření BER a propustnosti T při určitém výkonovém odstupu obou multiplexovaných signálů. Sloupec P_{λ_1} odpovídá datovému signálu a sloupec P_{λ_2} signálu s šumem. Tento odstup je označen jako OSNR. Grafické znázornění závislosti bitové chybovosti a propustnosti na OSNR je zobrazeno

Tab. 4.11: Výsledky měření dle EtherSAM pro různé OSNR

OSNR [dB]	25	20	18	16	14
BER [-]	0	7,50E-07	7,30E-06	5,60E-05	1,50E-03
<i>Video</i>					
CIR [Gbit/s]	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,001	0,004	0,132	0,729	7,56
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	9,989	9,950	9,346
<i>VoIP</i>					
CIR [Gbit/s]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,006	0,000	0,030	0,110	1,140
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	9,997	9,993	9,916
<i>Data</i>					
CIR [Gbit/s]	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,000	0,000	0,222	0,420	8,483
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10	9,978	9,954	8,925

na obrázku 4.27. Z výsledků je patrné, že systém začal chybovat pokud byl odstup obou signálů nižší než 25 dB a při postupném snižování až na 10 dB systém přestal pracovat zcela.



Obr. 4.27: Závislost BER a propustnosti T pro přenos datového signálu a šumu

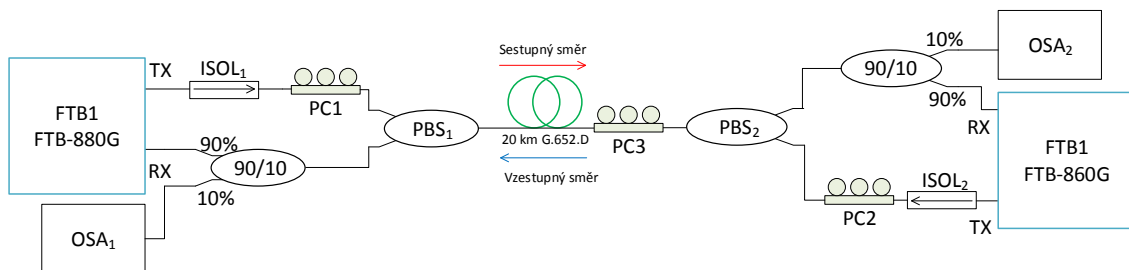
Z těchto výsledků plyne, že pokud pomocí polarizačního multiplexu přenášíme spolu s užitečným datovým signálem také analogový signál s kmitočty řádově desítek

MHz, je nezbytně nutné použití velice kvalitních polarizačních splitterů, které mají izolaci mezi polarizačními rovinami ≥ 25 dB. V porovnání s čistě digitálním datovým přenosem, který je uveden dále, lze říci, že pokud přenášíme takové signály, systém je mnohem více náchylný k nestabilitě, bitové chybovosti a s tím související degradaci parametrů QoS na vyšších vrstvách.

Pro měření parametrů QoS dle standardu EtherSAM bylo použito shodné nastavení, které je uvedeno v tabulce 4.5. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 4.11. Z uvedených výsledků plyne, že i při relativně vysoké chybovosti $7,50 \cdot 10^{-7}$ je systém z hlediska parametrů QoS odolný vůči rušení šumem přenášeným v ortogonální polarizační rovině. Při dalším snižování OSNR a tudíž i bitové chybovosti je dopad na kvalitu triple play služeb značný, pouze však z hlediska ztrátovosti a propustnosti. Zpoždění (latence) a kolísání zpoždění (jitter) jsou neměnné. Lze tak usoudit, že služby pracující v reálném čase by byly ovlivněny až velkou ztrátovostí.

4.5.6 Polarizační multiplex pro oddělení směrů přenosu

Jako finální laboratorní měření bylo vytvořeno zapojení uvedené na obrázku 4.28. Polarizační multiplex byl využit pro oddělení směrů přenosu. Pro sestupný i vzešupný směr byly použity identické vlnové délky 1 542,14 nm dvou precizních SFP+ modulů Optoway SPS-2385MW-D440G, stejně jako v předchozích testech. U tohoto testování je však setinová přesnost vlnové délky velice důležitá. Vysílaný signál pro



Obr. 4.28: Schéma měření – polarizační multiplex pro oddělení směrů přenosu

sestupný směr prochází nejprve izolátorem $ISOL_1$. Izolátor je zde vložen z důvodu eliminace rizika poškození laseru SFP+ modulu při nastavování úhlů polarizačních rovin na polarizačním splitteru. Z izolátoru $ISOL_1$ je signál přiveden na polarizační kontrolér PC1, kde je vhodně nastaven úhel polarizace před vstupem do polarizačního splitteru PBS_1 . Vhodné nastavení bylo provedeno pomocí spektrálního analyzátoru na základě maximálního navázaného výkonu. Optický signál dále prochází 20 km optického vlákna G.652.D a následně na polarizační kontrolér PC3. Pomocí

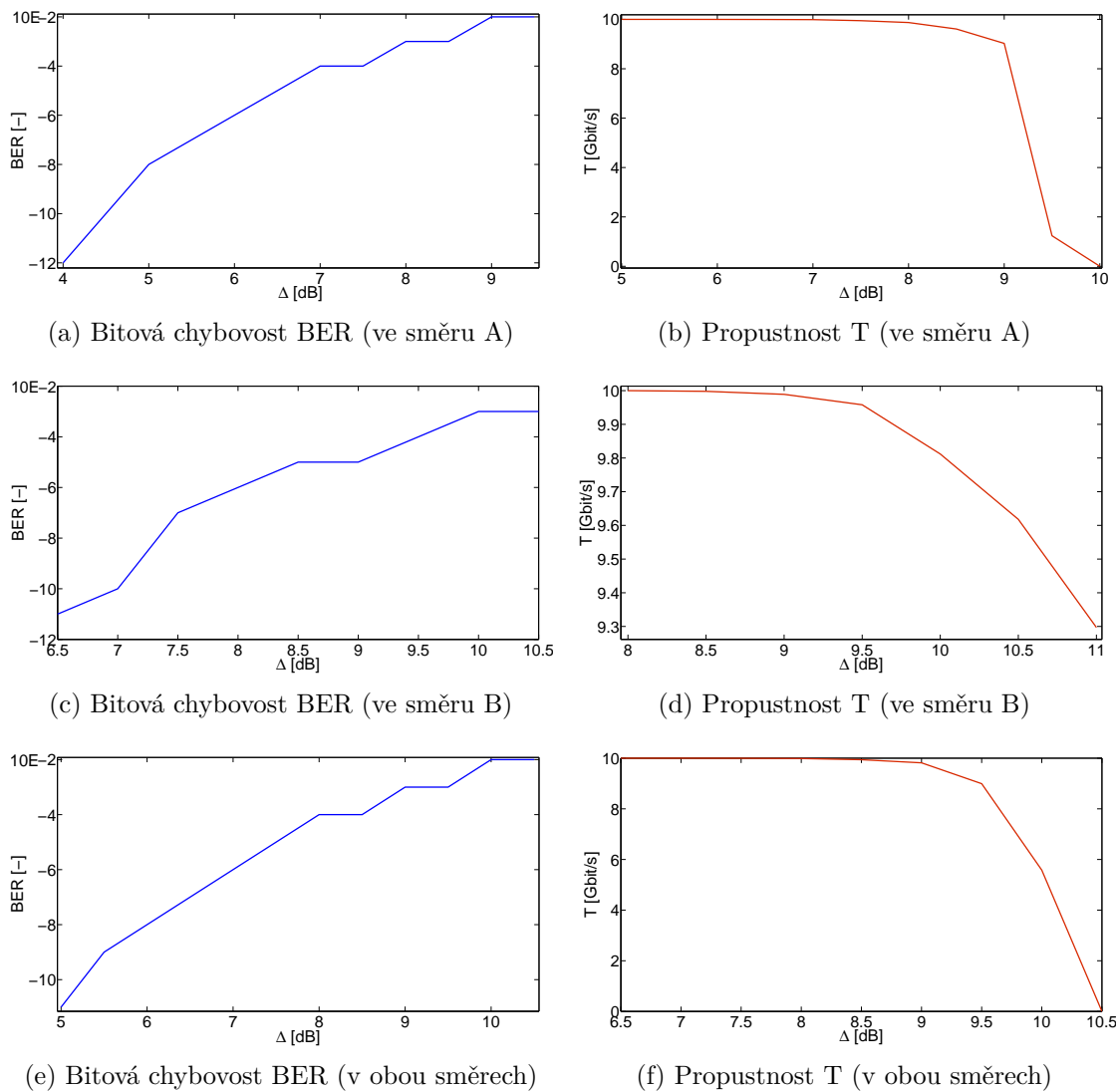
Tab. 4.12: Naměřené parametry pro dílčí směry přenosu

A->				B->			
TX1 [dBm]	Δ [dB]	BER [-]	T [Gbit/s]	TX1 [dBm]	Δ [dB]	BER [-]	T [Gbit/s]
-25,7	0	0	10	-25,7	0	0	10
-26,7	1	0	10	-26,7	1	0	10
-27,7	2	0	10	-27,7	2	0	10
-28,7	3	0	10	-28,7	3	0	10
-29,7	4	9,40E-12	10	-29,7	4	0	10
-30,2	4,5	2,70E-10	10	-30,7	5	0	10
-30,7	5	7,50E-08	10	-31,7	6	0	10
-31,2	5,5	9,50E-07	10	-32,2	6,5	6,80E-11	10
-31,7	6	5,30E-06	9,999	-32,7	7	3,30E-10	10
-32,2	6,5	3,20E-05	9,996	-33,2	7,5	3,60E-07	10
-32,7	7	1,30E-04	9,99	-33,7	8	3,20E-06	10
-33,2	7,5	4,80E-04	9,947	-34,2	8,5	1,50E-05	9,998
-33,7	8	1,40E-03	9,872	-34,7	9	6,80E-05	9,989
-34,2	8,5	4,30E-03	9,610	-35,2	9,5	3,00E-04	9,958
-34,7	9	1,00E-02	9,028	-35,7	10	1,10E-03	9,812
-35,2	9,5	2,40E-02	1,237	-36,2	10,5	2,80E-03	9,618
-35,7	10	-	0,001	-36,7	11	-	9,297

tohoto kontroléru byla polarizace vhodně nastavena tak, aby na odpovídajícím výstupu polarizačního splitteru PBS₂ byla maximální výkonová úroveň. 10 % signálu bylo využito pro monitorování optickým spektrálním analyzátozem OSA₂ a 90 % signálu bylo přivedeno na přijímací část SFP+ modulu. Pro vzestupný směr je zapojení analogické. Vhodné nastavení polarizačního kontroléru PC3 určuje rovněž optimální výstup z polarizačního splitteru PBS₁.

Pro výše uvedené ideální nastavení systém pracoval s nulovou chybovostí. Klíčové při tom je nastavení polarizačních kontrolérů, teplotní stabilita vlákna a mechanické namáhání podél trasy. Za účelem výzkumu vlivu nastavení polarizačních kontrolérů na kvalitu přenosových parametrů byla provedena sada testů, při kterých byl cíleně zhoršován úhel polarizace, nejprve na jedné vysílací straně, po té na druhé a finálně na obou vysílacích stranách současně. Naměřené výsledky pro natáčení polarizace v dílčích směrech je uvedeno v tabulce 4.12, pro současnou změnu polarizace v obou směrech pak v tabulce 4.13. Ačkoliv nebylo možné sledovat, jak se mění úhel polarizace, bylo možné sledovat tento vliv na výkon navázaný v dané polarizační rovině.

Na základě poklesu výkonu oproti původní hodnotě (v tabulkách parametr Δ) bylo možné sledovat, jak jsou ovlivňovány přenosové parametry. Toto měření simuluje reálnou situaci, kdy by vlivem teploty nebo mechanického namáhání došlo ke



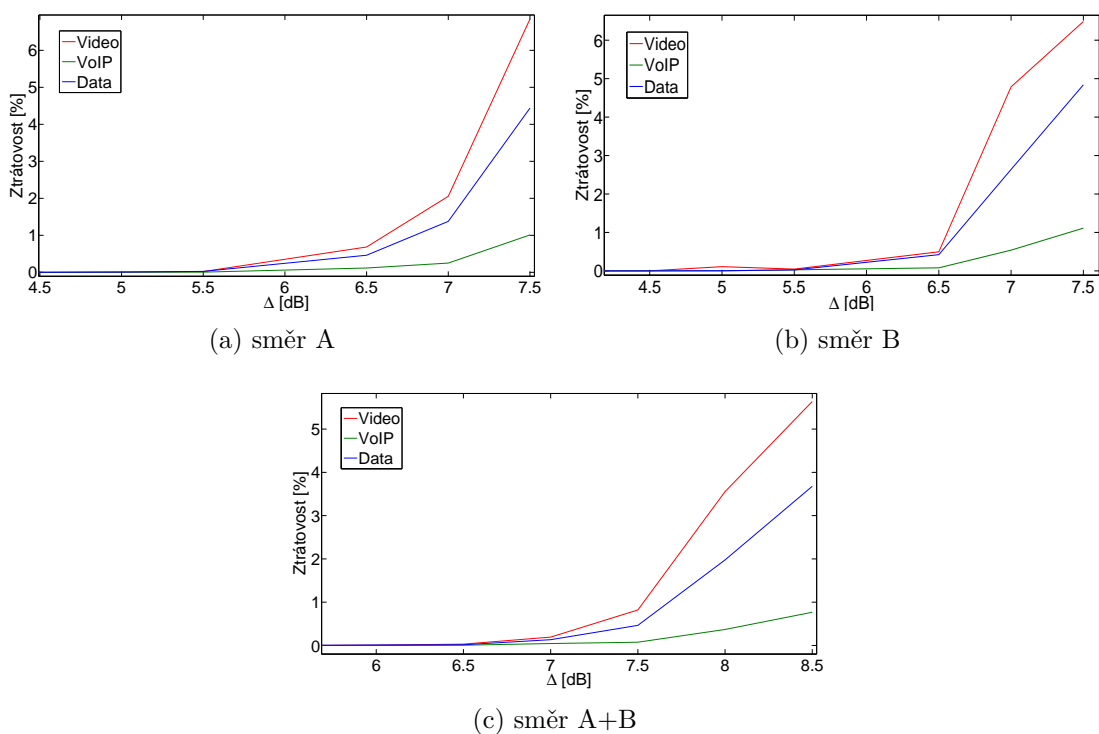
Obr. 4.29: Závislost BER a propustnosti T pro degradování signálu natáčením polarizačních rovin

změně úhlu polarizace v přenosové trase. Závislosti bitové chybovosti a propustnosti jsou zobrazeny na obrázku 4.29 pro dílčí směry přenosu i pro obousměrné degradování signálu natáčením úhlu polarizace.

Z grafických výstupů na obrázku 4.29 je patrné, že přenosový systém začal chybovat, pokud změna úhlu polarizace způsobila pokles výkonové úrovně o 4 dB pro směr A (obrázek 4.29a), 6,5 dB pro směr B (obrázek 4.29c) a 5 dB pro oba směry přenosu (obrázek 4.29e). Z hlediska datové propustnosti bylo testované zapojení opět odolnější v porovnání s BER. Pro měření parametrů QoS dle standardu EtherSAM bylo použito shodné nastavení, které je uvedeno v tabulce 4.5. Výsledky měření pro dílčí směry jsou uvedeny v příloze C.1 a pro oba směry současně v příloze C.2.

Tab. 4.13: Naměřené parametry pro současnou změnu polarizace v obou směrech

A+B				
TX1 [dBm]	TX2 [dBm]	Δ [dB]	BER [-]	T [Gbit/s]
-28,7	-28,7	3	0	10
-30,7	-30,7	5	2,20E-11	10
-31,2	-31,2	5,5	1,60E-09	10
-31,7	-31,7	6	6,50E-08	10
-32,2	-32,2	6,5	7,00E-07	10
-32,7	-32,7	7	5,20E-06	9,999
-33,2	-33,2	7,5	3,10E-05	9,997
-33,7	-33,7	8	1,40E-04	9,986
-34,2	-34,2	8,5	6,60E-04	9,94
-34,7	-34,7	9	1,90E-03	9,816
-35,2	-35,2	9,5	9,70E-03	8,993
-35,7	-35,7	10	1,60E-02	5,579
-36,2	-36,2	10,5	4,80E-02	0



Obr. 4.30: Závislost datové ztrátovosti signálu na natáčení polarizačních rovin

U všech tří měření lze vidět, že natáčení polarizace nemá nepříznivý vliv na zpoždění a jeho kolísání, z čehož lze usoudit vyšší odolnost služeb pracujících v reálném

čase. To potvrzuje i grafický výstup na obrázku 4.30. Pro všechny tři měření platí, že nejméně rostla ztrátovost pro službu VoIP. Nejvíce naopak rostla ztrátovost pro video služby, které mají vysoké nároky na šířku přenosového pásma.

Z výsledků těchto měření v porovnání s výsledky měření přenosu datového signálu a šumu s využitím polarizačního multiplexu jasně vyplývá, že pro současný přenos dvou polarizačně oddělených různých signálů v jednom směru je přenosový systém podstatně náchylnější na změnu polarizace signálu než v případě, kdy je polarizační multiplex použit pro oddělení směrů přenosu.

4.5.7 Porovnání simulací a praktického měření

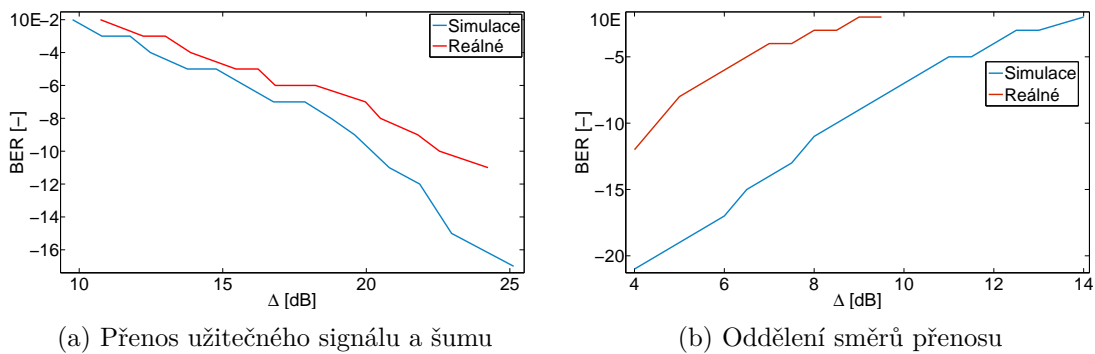
V simulačním prostředí VPI byly simulovány dva modely, které byly následně i prakticky sestaveny a proměřeny. V prvním případě se jednalo o současný jednosměrný přenos datového signálu v jedné polarizační rovině a šumu v rovině druhé. V druhém případě to byl obousměrný přenos s polarizačním oddělením sestupného a vzestupného směru. Parametry simulací byly v rámci možností VPI nastaveny tak, aby co nejvíce odpovídaly reálným parametrům prvků, použitých pro praktické měření. Schémata zapojení pro simulace i praktická měření jsou téměř identická. Přenosová rychlost byla v obou případech 10 Gbit/s.

V simulačním prostředí byly analyzovány spektra optických signálů, bitová chybovost, Q-faktor a diagramy oka. Při praktickém měření byly rovněž analyzovány spektra optických signálů a bitová chybovost. Dále byla měřena propustnost a parametry QoS pomocí standardu EtherSAM. Pro vzájemné porovnání simulací a praktických měření je proto nejvhodnější zaměřit se na bitovou chybovost.

Obecně platí, že simulační software bývá vždy do jisté míry idealizovaný v porovnání s praktickým měřením. To je dané tím, že nikdy není možné nasimulovat všechny reálné faktory, které se projevují u praktických měření. Tomu odpovídá i obrázek 4.31, na kterém je možné vzájemně porovnat výsledky simulací a reálných měření pro oba uvedené scénáře. Rozsahy BER nebyly zcela shodné pro simulace a měření, neboť použitý měřicí přístroj umožňuje měření BER až od hodnoty 10^{-12} , kdežto simulační software umožňuje měřit BER s rozsahem více než 10^{-100} .

Simulací současného přenosu užitečného signálu a šumu byly získány dosti podobné výsledky jako u praktického měření, jak lze vidět na grafu 4.31a. Se snižujícím se výkonovým odstupem signálu od šumu (Δ) docházelo ke zvyšování bitové chybovosti do 10^{-2} , přičemž simulací bylo této hodnoty dosaženo při $\Delta = 9,77$ dB a měřeními při $\Delta = 10,74$ dB. Při odstupu přibližně 25 dB byla hodnota BER pro simulaci 10^{-17} a pro měření 10^{-11} .

U druhého testovaného scénáře již byl rozdíl mezi simulací a měřeními markantnější, jak lze vidět na grafu 4.31b. Při praktickém měření začal systém chybovat při



Obr. 4.31: Porovnání BER pro simulace a reálné měření

hodnotě BER 10^{-12} již při poklesu výkonu v polarizační rovině (Δ) o 4 dB. Simulací při stejné hodnotě Δ vyšla chybovost 10^{-21} . Nejhorší chybovosti 10^{-2} bylo měřením dosaženo při $\Delta = 9,5$ dB a simulací při $\Delta = 14$ dB.

Při vzájemném porovnávání je nutno podotknout, že významný vliv na odolnost přenosového systému vůči BER má i použitý modulační formát. Zatímco v simulacním modelu byla použita modulace NRZ-OOK (NRZ – On Off Keying), SFP+ moduly použité pro praktické měření využívaly 10G Ethernet s pulzní amplitudovou modulací (PAM – Pulse Amplitude Modulation) v kombinaci s dopřednou chybovou korekcí (FEC – Forward Error Correction) a kódováním 64B/66B.

4.5.8 Polarizační multiplex na reálné trase

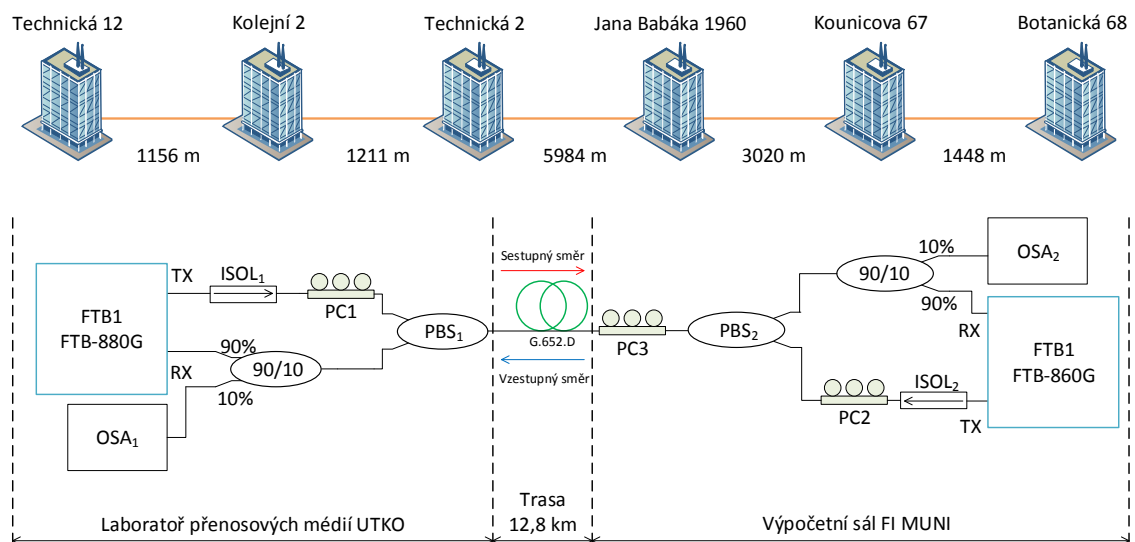
V souvislosti s měřením popsáním v předchozí kapitole bylo sestaveno obdobné zapojení pro ověření funkčnosti statického polarizačního multiplexu pro praktický přenos dat na reálné optické trase. Polarizační multiplex byl opět použit pro oddělení sestupného a vzestupného směru 10G přenosu. Cívka s 20 km optického vlákna byla nahrazena reálnou trasou s celkovou délkou 12,8 km. Schéma měřeného zapojení je na obrázku 4.32.

V laboratoři přenosových médií na Ústavu Telekomunikací VUT FEKT byla sestavena jedna vysílací a přijímací strana, stejným způsobem jako v předchozí podkapitole 4.5.6. Výstupní signál z SFP+ modulu byl skrze izolátor ISOL₁ a polarizační kontrolér PC1 navázán do polarizačního splitteru PBS₁. Pomocí polarizačního kontroléru byla polarizace vhodně natočena tak, aby měl signál za polarizačním splitterem co nejvyšší výkon. To bylo provedeno pomocí optického spektrálního analyzátoru, který byl po té odpojen a na místo něj byla připojena reálná trasa.

Druhá přijímací a vysílací strana byla sestavena ve výpočetním sálu Fakulty Informatiky Masarykovy Univerzity. Zde byl na výstup trasy připojen polarizační

kontrolér PC3, pomocí kterého byla nastavena maximální výkonová úroveň signálu vysílaného ze strany Ústavu Telekomunikací. Tento signál byl sledován pomocí optického spektrálního analyzátoru OSA₂. Vysílaný signál byl skrze izolátor ISOL₂ přiveden do druhého polarizačního kontroléru PC2, pomocí kterého byla nastavena maximální výkonová úroveň kontrolovaná optickým spektrálním analyzátozem na výstupu PBS₂.

Trasa mezi oběma pracovišti je součástí akademického testovacího polygonu laboratoře optických sítí Ústavu Telekomunikací. Jak jde vidět z obrázku 4.32, trasa je velice členitá a skládá se z pěti segmentů. Obsahuje spoustu konektorových spojů na propojovacích panelech v dílčích objektech. Z toho lze usoudit, že taková trasa bude velice náchylná na stav polarizace v optickém vlákne, která se může neustále měnit zejména v důsledku změny teplot.



Obr. 4.32: Schéma zapojení měření na reálné trase

Po sestavení měřicího systému byl spuštěn dlouhodobý test bitové chybovosti. Účelem bylo zjistit, jakým způsobem se bude vlivem času, teploty a případně mechanickým namáháním měnit stav a úhel polarizace ve vláknech, což se projeví poklesem výkonu navázaného do polarizačních rovin. Tyto změny se prakticky projeví rostoucí bitovou chybovostí. Vzhledem k absenci dynamického polarizačního kontroléru, lze tento systém označit jako statický a není tak schopen reagovat na výše uvedené okolní změny.

Bitová chybovost byla testována po dobu 4 dnů, přičemž při aktivaci testu byla bitová chybovost neměřitelná ($> 10^{-12}$). Dále se měnila následovně:

- 1. den – $BER \approx 0$
- 2. den – $BER \approx 10^{-12}$

- 3. den – $\text{BER} \approx 10^{-11}$
- 4. den – $\text{BER} \approx 10^{-10}$

Je nutné uvést, že na obou pracovištích byla klimatizací udržována konstantní teplota, takže se mohla projevit jen změna polarizace v důsledku působení vnějších vlivů na optickou trasu. Tímto měřením byly získány významné poznatky. I přes to, že na trase nebyl zapojen dynamický polarizační kontrolér, tak nedocházelo k žádným rychlým změnám stavu polarizace. Z toho plyne, že pokud bychom realizovali dynamický polarizační kontrolér, stačilo by, kdyby byl schopný reagovat na pozvolné změny polarizace a jeho realizace by nevyžadovala rychlé optoelektronické obvody.

4.6 Návrh širokopásmové optické přístupové sítě WDM-PDM-PON

Na základě poznatků získaných z teoretické části, simulačních modelů a rozsáhlého měření byl vytvořen návrh vysokorychlostní optické přístupové sítě, která je založena na polarizačním multiplexu v kombinaci s vlnovým multiplexem. Nejdříve je systém popsán v teoretické rovině a následně doplněn o simulace v prostředí VPI.

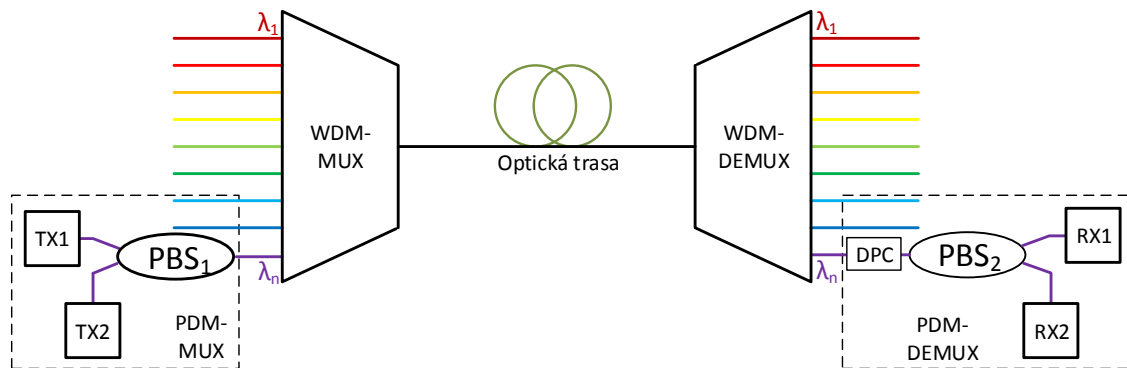
4.6.1 Teoretický popis systému

Technologie polarizačního multiplexování umožňuje zdvojnásobení šířky přenosového pásma, jak již bylo popsáno dříve. Pro jeho praktické uplatnění se však počítá s jeho kombinováním s dalšími multiplexními systémy. Jako nejlépe implementovatelný přichází v úvahu časový nebo vlnový multiplex. Polarizační multiplex je přitom zcela transparentní k dalším multiplexním technikám.

Pro finální návrh širokopásmové přístupové sítě byla vybrána kombinace vlnového multiplexu DWDM s polarizačním multiplexem PDM. Tuto hybridní kombinaci můžeme označit jako WDM-PDM-PON. Taková hybridní síť umožňuje použití n -kanálů (vlnových délek) dle konkrétních zařízení v C nebo L pásmu. Díky polarizačnímu multiplexu je pak možné použít stejné kanály podruhé a zvýšit tak celkový počet přenášených kanálů dvakrát. Celkovou šířku přenosového pásma tak bude určovat hustota vlnové multiplexu, tzn. odstup nosných vlnových délek a s tím související možný počet kanálů.

Princip polarizačního multiplexu je znám již řadu let. Jeho problematickou částí je však efektivní demultiplexace pro dosažení optimálního odstavu signálů mezi polarizačními rovinami a související přeslech mezi nimi, který vzniká v důsledku polarizační vidové disperze PMD a polarizačně závislého útlumu PDL. V dnešních

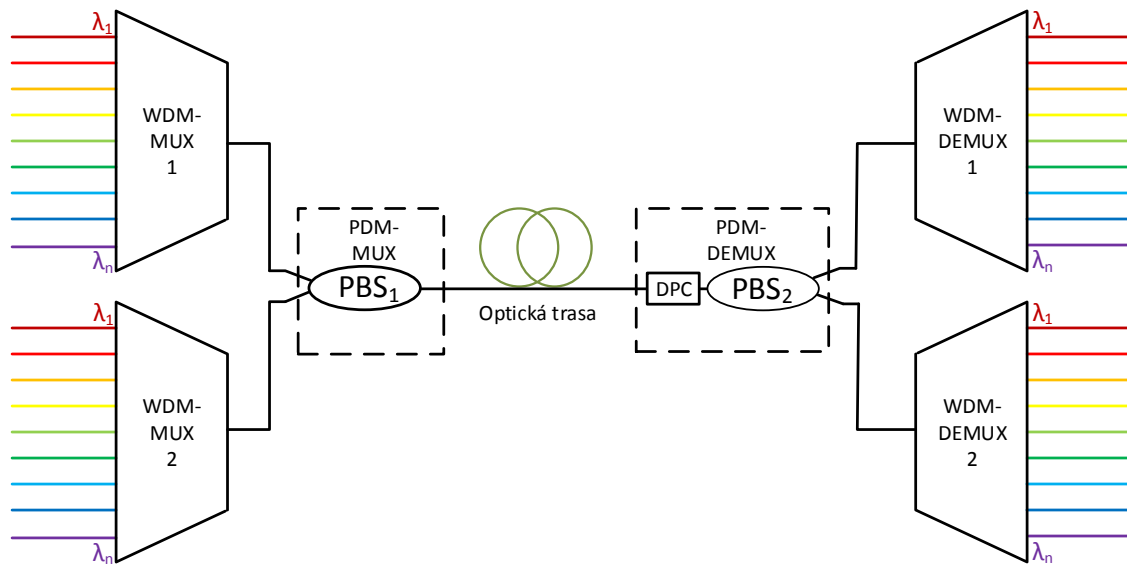
vysokorychlostních 100G systémech se demultiplexace provádí pomocí digitálního zpracování signálu – DSP. Tato metoda ale klade velké nároky na použité technologie a tudíž odpovídající finanční náročnost. Proto byl navrhnout tzv. dynamický polarizační kontrolér DPC (Dynamic Polarization Controller), jehož princip je popsáný dále.



Obr. 4.33: Blokové schéma WDM-PDM-PON prvního typu

Kombinace WDM a PDM pro vytvoření hybridní optické přístupové sítě je možné realizovat dvěma způsoby. První možnou topologií zobrazuje obrázek 4.33. Zapojení obsahuje vlnový multiplexer (WDM-MUX) a demultiplexer (WDM-DEMUX), které vlnově multiplexují a demultiplexují n -signálů na vlnových délkách λ_1 až λ_n . Polarizační multiplex je realizován pro každou vlnovou délku separátně. Před vlnovým multiplexerem jsou pomocí polarizačního splitteru PBS_1 polarizačně multiplexovány dva nezávislé signály z vysílačů TX1 a TX2, přičemž vlnová délka je pro oba vysílače shodná λ_n . V demultiplexační části sítě jsou pak na odpovídajícím výstupu vlnového demultiplexeru λ_n pomocí druhého polarizačního splitteru PBS_2 polarizačně demultiplexovány oba signály a detekovány na přijímačích RX1 a RX2. Tato varianta má výhodu v tom, že na stávající WDM linku stačí na daném vstupním a výstupním portu zapojit systém polarizačního multiplexu, který je nezávislý na ostatních kanálech. Není tak třeba řešit, jak jsou signály vysílačů dalších vlnových délek polarizované. Nevýhodou však je, že pokud bychom polarizační multiplex provozovali na více vlnových délkách, tak v každé demultiplexační části polarizačního multiplexu je nutné použít samostatný dynamický polarizační kontrolér DPC, čímž výrazně roste složitost celého systému, tím pádem i finanční náročnost.

Z tohoto důvodu byla navržena další topologie, která je zobrazena na obrázku 4.34. Celkový počet kanálů je stejně jako v předchozím případě díky polarizačnímu multiplexu zdvojnásobený. Významný rozdíl je však v umístění polarizačního multiplexu. V tomto případě jsou n -kanálové multiplexované signály z vlnových multiplexerů WDM-MUX1 a WDM-MUX2 polarizačně multiplexovány pomocí polari-



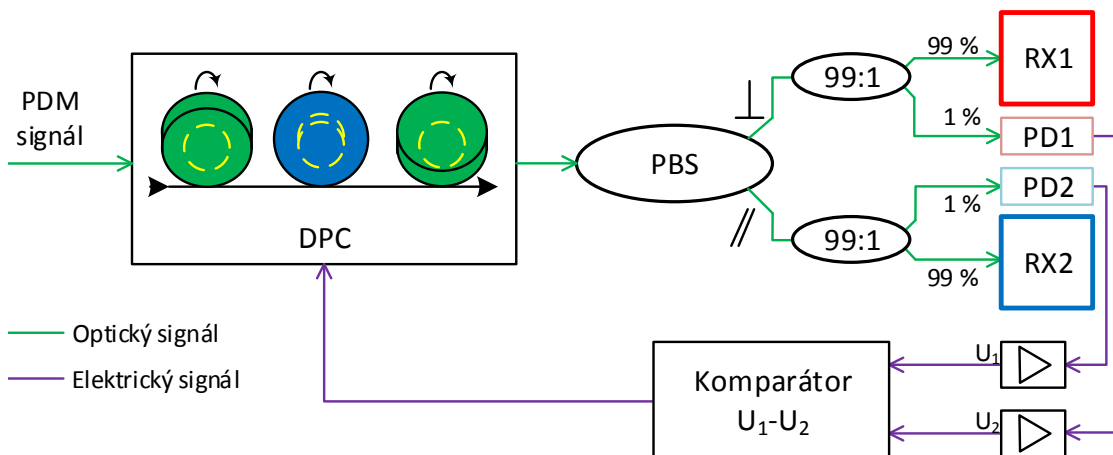
Obr. 4.34: Blokové schéma WDM-PDM-PON druhého typu

začního splitteru PBS_1 . Multiplexované signály z obou multiplexerů přitom nesou různá data na stejných vlnových délkách. Na konci optické trasy jsou pomocí polarizačního demultiplexu (PBS_2) oba vlnově multiplexované signály rozděleny a přivedeny na odpovídající vlnový demultiplexer WDM-DEMUX1 a WDM-DEMUX2. Výhodou této varianty je použití jednoho systému polarizačního multiplexeru a demultiplexeru pro libovolný počet kanálů vlnového multiplexu. Díky tomu stačí použít jeden dynamický polarizační kontrolér a celková složitost je tak výrazně nižší v porovnání s předchozí variantou. Na druhou stranu, u této varianty je velká nevýhoda v polarizaci $2 \times n$ laserů pro $2 \times n$ -kanálový signál. Aby bylo možné jedním polarizačním kontrolérem kontrolovat a udržovat stav polarizace na optimální hranici, je nezbytně nutné, aby všechny použité vysílače byly shodně polarizovány. Z toho plyne nutnost použití $2 \times n$ polarizátorů pro všechny vysílače dílčích vlnových délek. Další nevýhodou, která plyne z této varianty, je nutnost použití polarizaci zachovávajících (PM) vláken mezi vysílači a WDM multiplexerem, aby nedošlo ke změně stavu polarizace před vlnovým multiplexováním.

4.6.2 Návrh dynamického polarizačního kontroléru DPC

Vzhledem k neustále se měnícímu stavu a úhlu polarizace v optické přenosové lince je pro praktickou implementaci polarizačního multiplexu nezbytně nutné, vhodným způsobem demultiplexovat signál. Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, je pro tento účel vhodný dynamický polarizační kontrolér, který je schopen dynamicky

reagovat na změny stavu polarizace v optickém vlákně a na demultiplexovaném výstupu automaticky udržovat výstupní signál s minimálním vzájemným polarizačním přeslechem. Cílem při tom je použití běžných prvků, které nevyžadují vysokorychlostní elektronické obvody. Na základě těchto požadavků byl navržen dynamický polarizační kontrolér, který vychází z patentu [64]. Blokové schéma tohoto kontroléru je na obrázku 4.35.



Obr. 4.35: Blokové schéma dynamického polarizačního kontroléru

Vstupní polarizačně multiplexovaný signál prochází dynamickým polarizačním kontrolérem DPC, na jehož výstupu je demultiplexační polarizační splitter PBS. Demultiplexované signály prochází couplerem s dělicím poměrem 99:1, kde 99 % signálu prochází dále na přijímač RX1, respektive RX2 a 1 % signálu je přivedeno na pomocnou fotodiodu PD1, respektive PD2. Po převodu optického signálu na elektrický v pomocných fotodiódách PD1 a PD2 jsou elektrické signály zesíleny a přivedeny na komparační obvod. Tento komparační obvod porovnává napěťové úrovně obou signálů a na základě jejich rozdílů vysílá řídicí signál do dynamického kontroléru, který pomocí servo motorků natáčí polarizaci ve vlákně obdobně, jako je tomu u běžného polarizačního kontroléru. Řídicí signál z komparátoru vytváří zpětnou vazbu, pomocí které je polarizace neustále udržována v ideálním nastavením. Popsaný systém je tedy díky svému principu nezávislý na přenosové rychlosti datového signálu a je nezávislý na použitých modulačních formátech. Další výhodou je, že systém nevyžaduje zásah do přenosové linky, používaných vysílačů, přijímačů ani dalších prvků použitých na optické trase.

Optické signály s ortogonálním stavem polarizace TX1 a TX2 mohou být generovány z jedné laserové diody, případně dvěma různými diodami, které vysílají na stejné vlnové délce. Tyto signály jsou multiplexovány pomocí polarizačního splitteru.

Během průchodu multiplexovaného signálu optickým vláknem dochází ke změně polarizace obou signálů z lineární na eliptickou. Důležité však je, že zůstává zachována jejich vzájemná ortogonalita. Zvolíme-li osy polarizačních rovin na vstupu polarizačního splitteru jako x a y , pak mají odpovídající Müellerovy matice polarizačního splitteru tvar [65]:

$$M_x = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

$$M_y = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Optický datový tok i s libovolným stavem polarizace (SOP) můžeme ve Stokesově prostoru vyjádřit jako [65]:

$$\vec{S}_i = \begin{bmatrix} S_{i0} \\ S_{i1} \\ S_{i2} \\ S_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i \\ P_i \cos 2\chi_i \cos 2\varphi_i \\ P_i \cos 2\chi_i \sin 2\varphi_i \\ P_i \sin 2\chi_i \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

kde P_i je optický výkon, φ_i je úhel elipticity a χ_i je orientační úhel i -tého optického datového toku (viz obrázek 4.36). Po průchodu polarizačním splitterem mají Stokesovy vektory podél osy x a y tvar $M_x \vec{S}_i$ a $M_y \vec{S}_i$. První řada každého Stokesova vektoru reprezentuje optický výkon podél odpovídající polarizační roviny [38]:

$$P_{ix} = \frac{1}{2} P_i (1 + \cos 2\chi_i \cos 2\varphi_i), \quad (4.4)$$

$$P_{iy} = \frac{1}{2} P_i (1 - \cos 2\chi_i \cos 2\varphi_i). \quad (4.5)$$

Pokud jsou signály v polarizačních rovinách vzájemně nekoherentní (nejsou generovány z jednoho laseru), pak má optický výkon odpovídající dané polarizační rovině tvar:

$$P_x = P_{1x} + P_{2x} = \frac{1}{2} P_1 (1 + \cos 2\chi_1 \cos 2\varphi_1) + \frac{1}{2} P_2 (1 + \cos 2\chi_2 \cos 2\varphi_2), \quad (4.6)$$

$$P_y = P_{1y} + P_{2y} = \frac{1}{2} P_1 (1 - \cos 2\chi_1 \cos 2\varphi_1) + \frac{1}{2} P_2 (1 - \cos 2\chi_2 \cos 2\varphi_2). \quad (4.7)$$

Pro dva optické datové toky s ortogonálním stavem polarizace \vec{S}_1 a \vec{S}_2 platí [65]:

$$\chi_2 = -\chi_1, \quad (4.8)$$

přičemž pro úhel φ_1 a φ_2 platí:

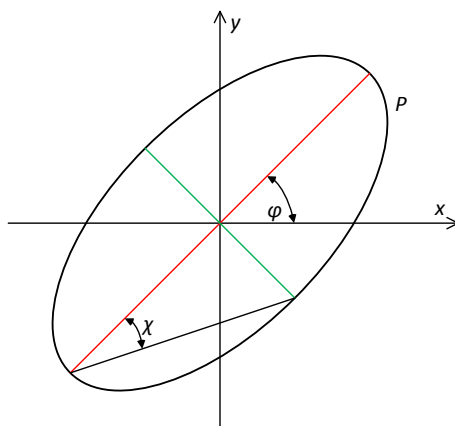
$$\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{1}{2}\pi, \quad 0 \leq \varphi_1 \leq \frac{1}{2}\pi, \quad (4.9)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \frac{1}{2}\pi, \quad \frac{1}{2}\pi < \varphi_1 < \pi.$$

Substitucí rovnic 4.4 a 4.5 do rovnic 4.6 a 4.7 dostaneme tvar:

$$P_x = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) + \frac{1}{2}(P_1 - P_2) \cos 2\chi_1 \cos 2\varphi_1, \quad (4.10)$$

$$P_y = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) - \frac{1}{2}(P_1 - P_2) \cos 2\chi_1 \cos 2\varphi_1. \quad (4.11)$$



Obr. 4.36: Polarizační elipsa

Monitorováním optických výkonů signálů z obou polarizačních rovin je provedeno pomocí fotodetektorů PD1 a PD2, které mohou být realizovány běžnými fotodiodami. Po konverzi optického signálu na elektrický je odpovídající rozdíl výkonů $P_x - P_y$ v optické oblasti roven rozdílu napětí fotodiod $U_1 - U_2$ v elektrické oblasti. Tento rozdíl Δ_U je řídicí napětí, pomocí kterého je ovládán dynamický kontrolér. Rozdíl Δ_U je tedy závislý na orientačním úhlu φ a úhlu elipticity χ , které mohou být měněny pomocí dynamického polarizačního kontroléru. Pokud bude platit, že $\Delta_U = 0$, pak bude přeslech mezi signály v obou polarizačních rovinách minimální a bude dán parametrem PER (Polarization Extinction Ratio), jehož význam je popsán v kap. 3.4.2. $\Delta_U = 0$ nastane tehdy, je-li dosaženo tzv. pozitivní maxima, při kterém platí [64]:

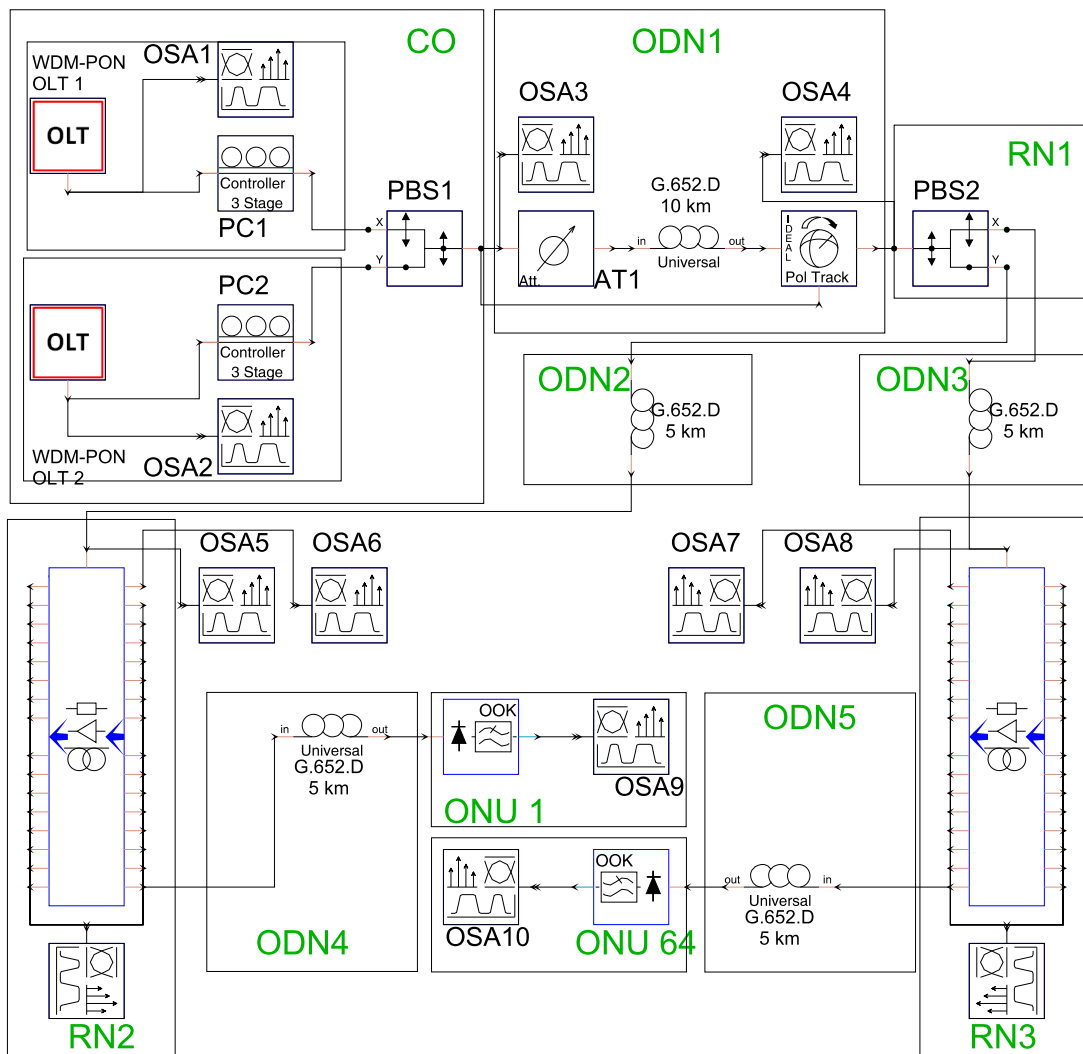
$$\begin{aligned} \varphi = 0^\circ & \quad \chi = 0^\circ, \\ \varphi = \pm 90^\circ & \quad \chi = \pm 90^\circ, \end{aligned} \quad (4.12)$$

nebo pokud je dosaženo tzv. negativního maxima, při kterém platí:

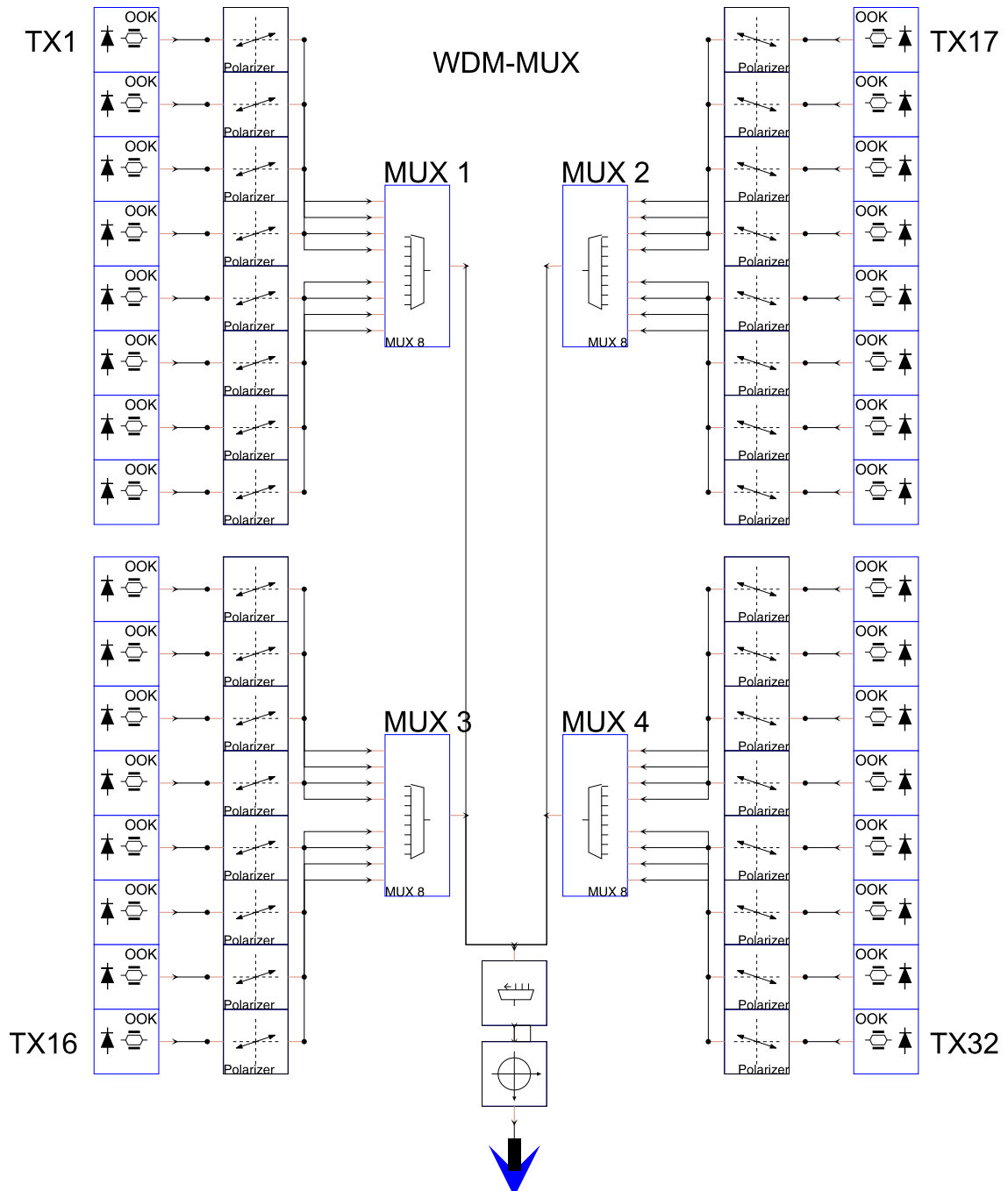
$$\begin{aligned} \varphi &= \pm 90^\circ & \chi &= 0^\circ, \\ \varphi &= 0^\circ & \chi &= \pm 90^\circ. \end{aligned} \quad (4.13)$$

4.6.3 Simulační model

Simulační model optické přístupové sítě WDM-PDM-PON je založený na myšlence popsané v druhé části podkapitoly 4.6.1. Jedná se tudíž o kombinaci hustého vlnového multiplexu DWDM a polarizačního multiplexu, který je použit pro multiplexování všech příspěvkových WDM kanálů současně. Blokové schéma zapojení simulačního modelu je na obrázku 4.37.



Obr. 4.37: Schéma simulačního modelu WDM-PDM-PON

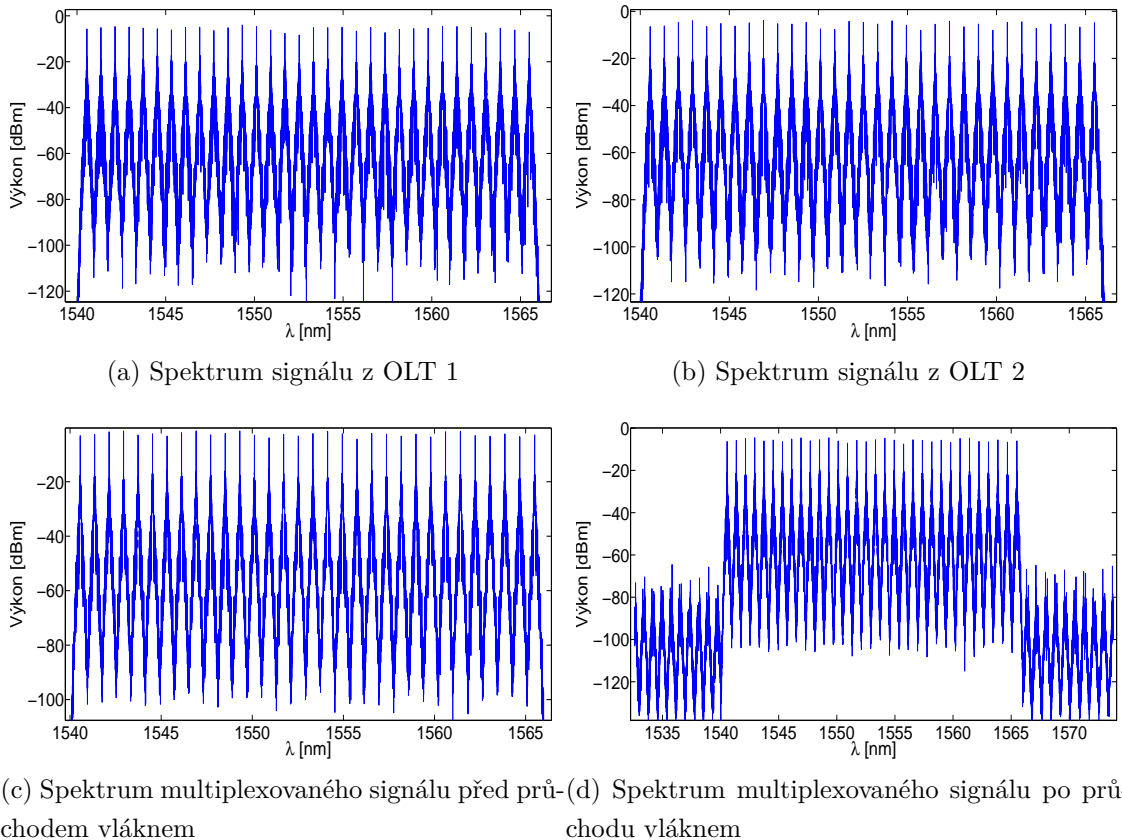


Obr. 4.38: Schéma vnitřního zapojení OLT jednotky

Blok CO (Central Office) označuje hlavní centrální uzel, který obsahuje dvě OLT jednotky WDM-PON systému. Vnitřní zapojení OLT jednotky je zobrazeno na obrázku 4.38. Každá OLT jednotka obsahuje 32 vysílačů TX1 až TX32 v rozsahu C-pásma při odstupě nosných vlnových délek 0,8 nm (100 GHz). Pilotní vlnová délka prvního vysílače TX1 odpovídá 1 565,49 nm (191,5 THz) a posledního vysílače TX32 1 540,56 nm (194,6 THz). Výkony laserů byly nastaveny na 1 mW (0 dBm). Použitý

modulační formát OOK-NRZ s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s. Jako generátor dat byl použit pseudonáhodný generátor PBRS (Pseudo Random Bit Sequence).

Výstupní signály vysílačů byly shodně polarizovány pomocí polarizátorů a přivezeny na vlnové multiplexery MUX 1 až MUX 4. Tyto čtyři multiplexované signály byly dále multiplexovány na jeden výstupní multiplexovaný signál.



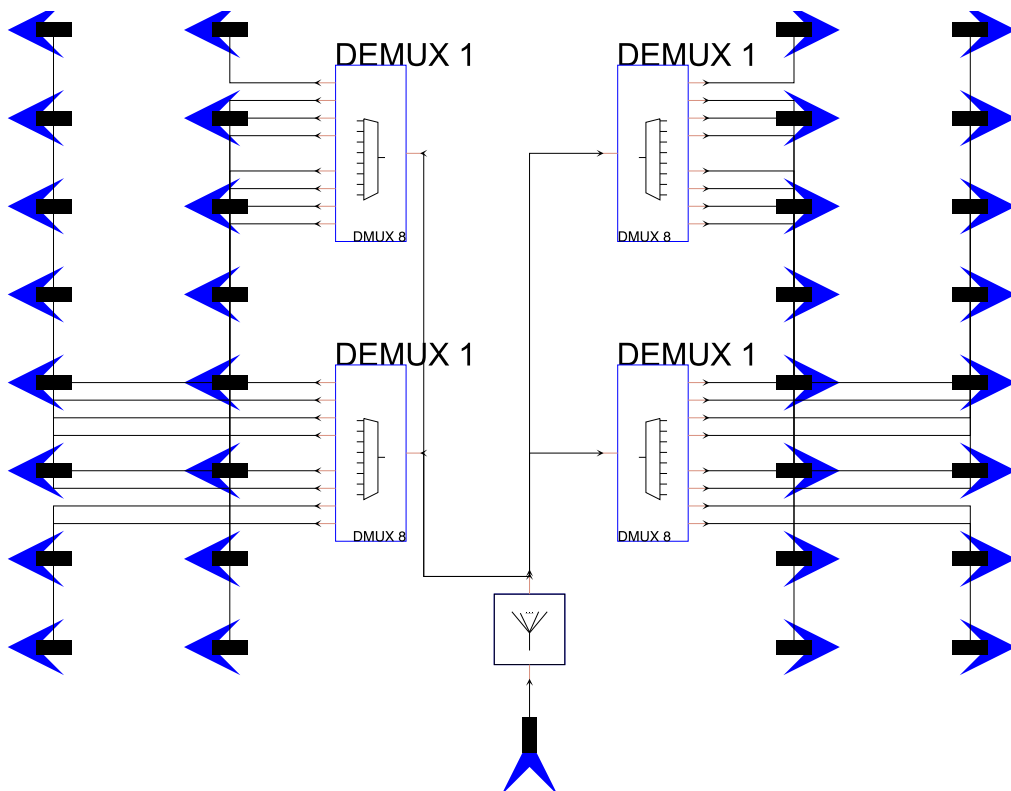
Obr. 4.39: Spektra multiplexovaných signálů

Výstupní vlnově multiplexované signály z jednotky OLT 1 a OLT 2 byly dále pomocí polarizačních kontrolérů vhodně upraveny z hlediska polarizace tak, aby multiplexovaný signál z OLT 1 byl jednou z polarizačních rovin ortogonální k rovině x polarizačního splitteru PBS1 a signál z OLT 2 ortogonální k rovině y . Spektra výstupních signálů z OLT 1 a OLT 2 jsou identická, viz obrázek 4.39. Parametr PER byl pro polarizační splitter nastaven na hodnotu 25 dB.

Za blokem CO následuje první segment optické distribuční sítě ODN1. Tento segment je tvořen 10 km optického vlákna G.652.D. Jeho parametry byly nastaveny dle reálných vláken – měrný útlum 0,2 dB/km, koeficient chromatické disperze CD na 16 ps/(nm·km) a koeficient polarizační vidové disperze PMD na 0,1 ps/ \sqrt{km} . Před samotným vláknem byl umístěn atenuátor, kterým byl uměle vytvářen útlum 3 dB,

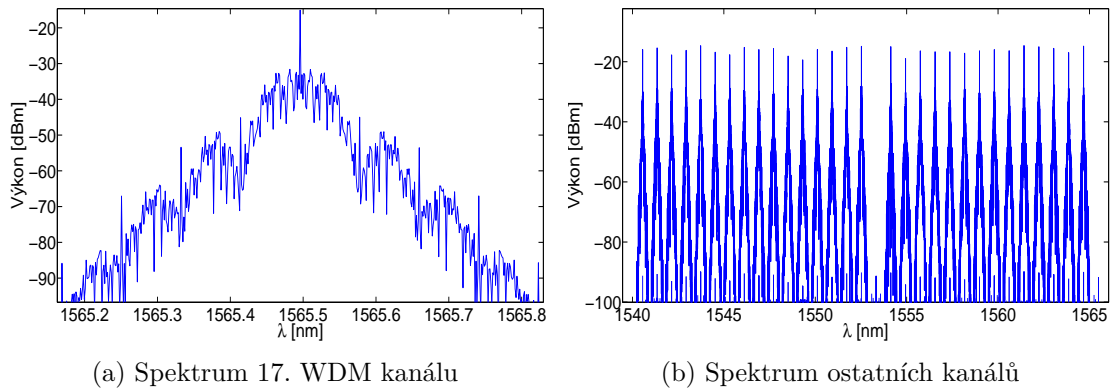
který by v praxi tvořil součet útlumů konektorů a spojek. Za vláknem je umístěn polarizační tracker, jehož význam v simulačním prostředí byl popsán již v předchozích podkapitolách. Porovnání spekter vlnově a polarizačně multiplexovaných signálů před a po průchodu vláknem je na obrázku 4.39c a 4.39d. Je zde patrné, že došlo ke snížení výkonové úrovně o přibližně 2 dB, což je odpovídající vůči nastavenému útlumu optického vlákna. Mnohem více je však výrazná změna spektra multiplexovaného signálu. Vlivem čtyřvlnného směšování došlo k vygenerování dalších vlnových délek, které jsou však výkonově umístěny v oblasti šumu pro běžné telekomunikační fotodetektory a nemají tak negativní vliv.

Za prvním segmentem distribuční sítě následuje blok RN1 (Remote Node), který je tvořen polarizačním splitterem PBS2, tentokrát ve funkci polarizačního demultiplexeru. Parametr PER zde byl opět nastaven na hodnotu 25 dB. Distribuční síť je dále rozdělena do dvou větví ODN2 a ODN3 se shodnou délkou vláken 5 km. Následují bloky vlnových demultiplexerů RN2 a RN3. Vnitřní zapojení je na obrázku 4.40. Multiplexované WDM signály, nesoucí 32 kanálů, byly pomocí čtveřice demultiplexerů vyděleny na dílčí vlnové kanály. Spektrum 17. vyděleného kanálu je na obrázku 4.41a. Spektra ostatních kanálů po demultiplexaci jsou zobrazena na 4.41b.



Obr. 4.40: Schéma vnitřního zapojení bloku RN2 a RN3

Výstupní demultiplexované signály jsou dále přiváděny přes další distribuční síť ODN4–ODN68 k jednotlivým ONU jednotkám. Délka vlákna byla zvolena opět na 5 km, tak aby byl celkový součet optické trasy roven 20 km. ONU jednotky jsou tvořeny fotodetektorem a OOK-NRZ demodulátorem.

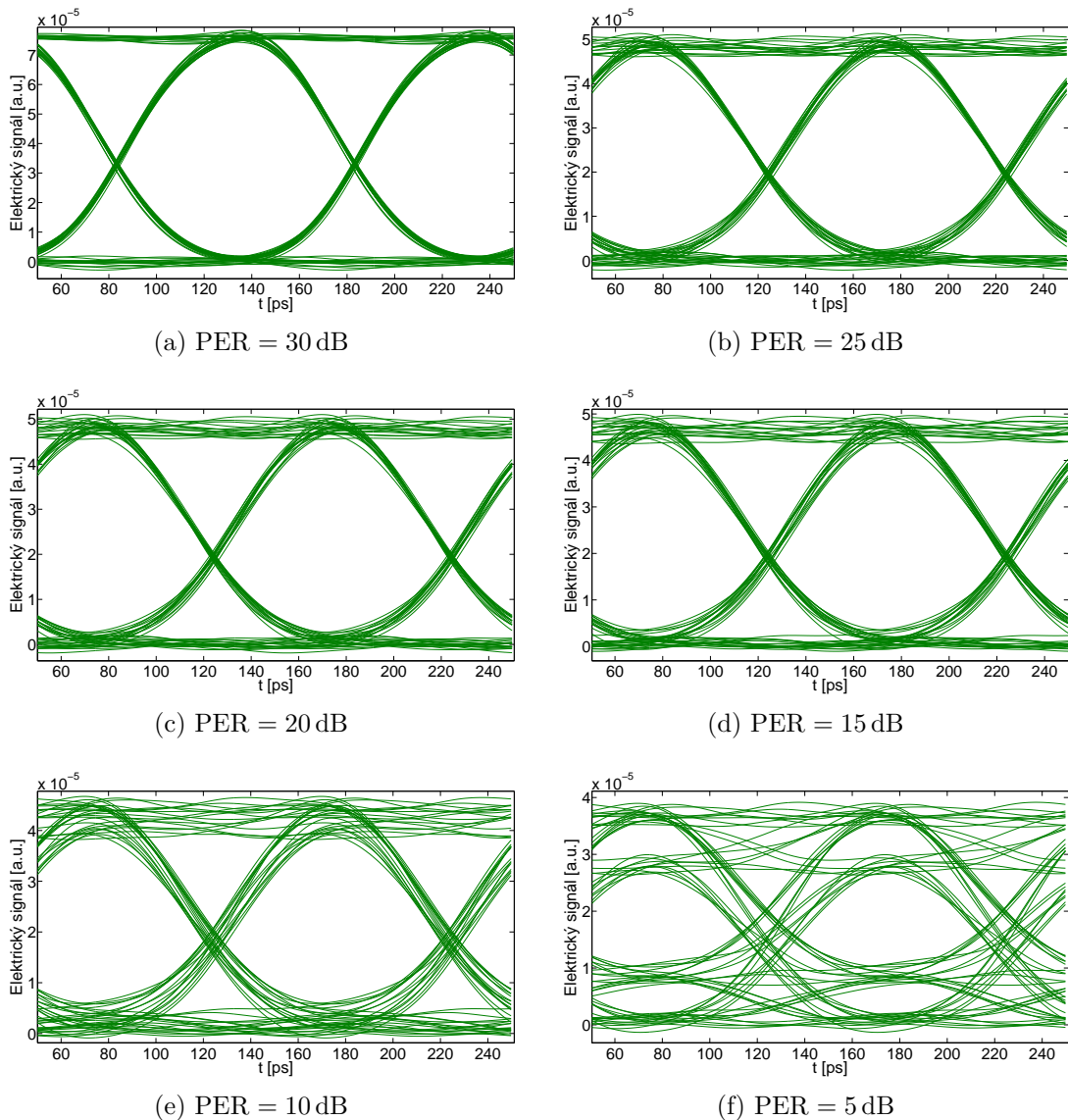


Obr. 4.41: Spektra demultiplexovaných signálů

4.6.4 Analýza výsledků simulace

Z hlediska analýzy funkčnosti navrženého modelu je významné sledovat, jakým způsobem změna parametru PER nastaveného na polarizačních splitterech ovlivňuje výsledný demultiplexovaný signál konkrétní ONU jednotky. Za předpokladu použití dynamického polarizačního kontroléru (zde má tuto úlohu blok Pol. Track) tak bude ovlivňovat kvalitu výsledného signálu z hlediska polarizace právě parametr PER. Vliv nastavení tohoto parametru je možné nejlépe sledovat pomocí diagramu oka. Na obrázku 4.42 jsou znázorněny diagramy oka pro výsledný demultiplexovaný a demodulovaný signál v elektrické oblasti pro různé nastavení parametru PER.

Z diagramů oka lze vidět, jak snižováním hodnoty parametru PER dochází k postupnému degradování kvality výsledného signálu. Hodnoty PER = 30 dB dosahují špičkové polarizační splittery, a jak lze z diagramu oka 4.42a vidět, výsledný signál není nikterak degradovaný. Tomuto průběhu odpovídá bitová chybovost 10^{-25} . Pro výchozí simulaci bylo použito nastavení PER = 25 dB, což odpovídá běžně dostupným polarizačním splitterům. I pro toto nastavení je kvalita signálu velice dobrá, čemuž odpovídá i naměřená bitová chybovost 10^{-21} . Při dalším snižování hodnoty PER dochází k mírnému degradování signálu. Pro PER = 20 dB je odpovídající hodnota bitové chybovosti 10^{-19} , pro PER = 15 dB pak 10^{-15} . K výraznému zhoršení kvality signálu dochází až při PER = 10 dB, o čemž vypovídá i uzavírání oka (viz 4.42e) a bitová chybovost 10^{-11} . Nejvýraznější zhoršení signálu nastává při snížení



Obr. 4.42: Diagramy oka pro různé nastavení PER

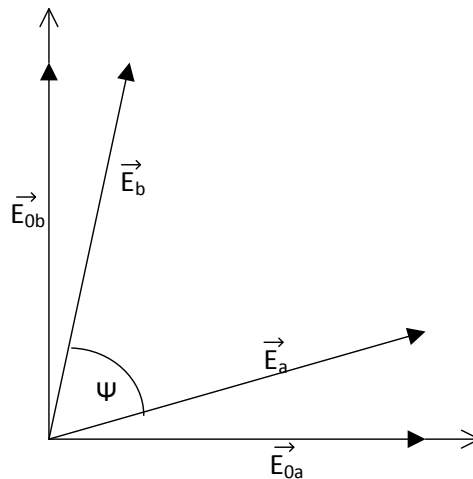
PER na hodnotu 5 dB, kdy dochází k výraznému uzavírání oka a bitová chybovost dosahuje hodnoty 10^{-4} .

Porovnáme-li výsledky této simulace pro různé hodnoty PER, se simulací uvedenou v podkapitole 4.4.1, kde byla prováděna simulace současného přenosu datového signálu a šumu s polarizačním oddělením, dospějeme k závěru, že při přenosu dvou datových signálů (navíc vlnově multiplexovaných) je systém z hlediska bitové chybovosti odolnější vůči polarizačnímu přeslechu. Signál by byl samozřejmě degradovaný, i pokud bychom zvětšovali délku segmentů distribučních sítí. Vliv vloženého útlumu však již byl dostatečně popsán v předchozích částech práce, proto nebude tento vliv dále popisován.

Polarizační přeslech je způsobený polarizační vidovou disperzí PMD, polarizačně závislým útlumem PDL a jeho hodnotu také určuje parametr PER. K polarizačnímu přeslechu také dochází, pokud není ideální úhel polarizace polarizačně multiplexovaného signálu před vstupem do demultiplexačního polarizačního splitteru. Pro eliminaci posledního zmíněného jevu byl navržen dynamický polarizační kontrolér. Polarizační přeslech je možné vyjádřit vztahem [41]:

$$C_{pol} = K \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Psi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Psi}{2}\right)} \quad [\text{dB}], \quad (4.14)$$

kde $K = E_{0b}/E_{0a}$, přičemž E_{0b} a E_{0a} jsou vektory vyjadřující intenzitu polarizace dílčích polarizačních rovin a Ψ je úhel vyjadřující degradaci vzájemné ortogonality, jak je znázorněno na obrázku 4.43.

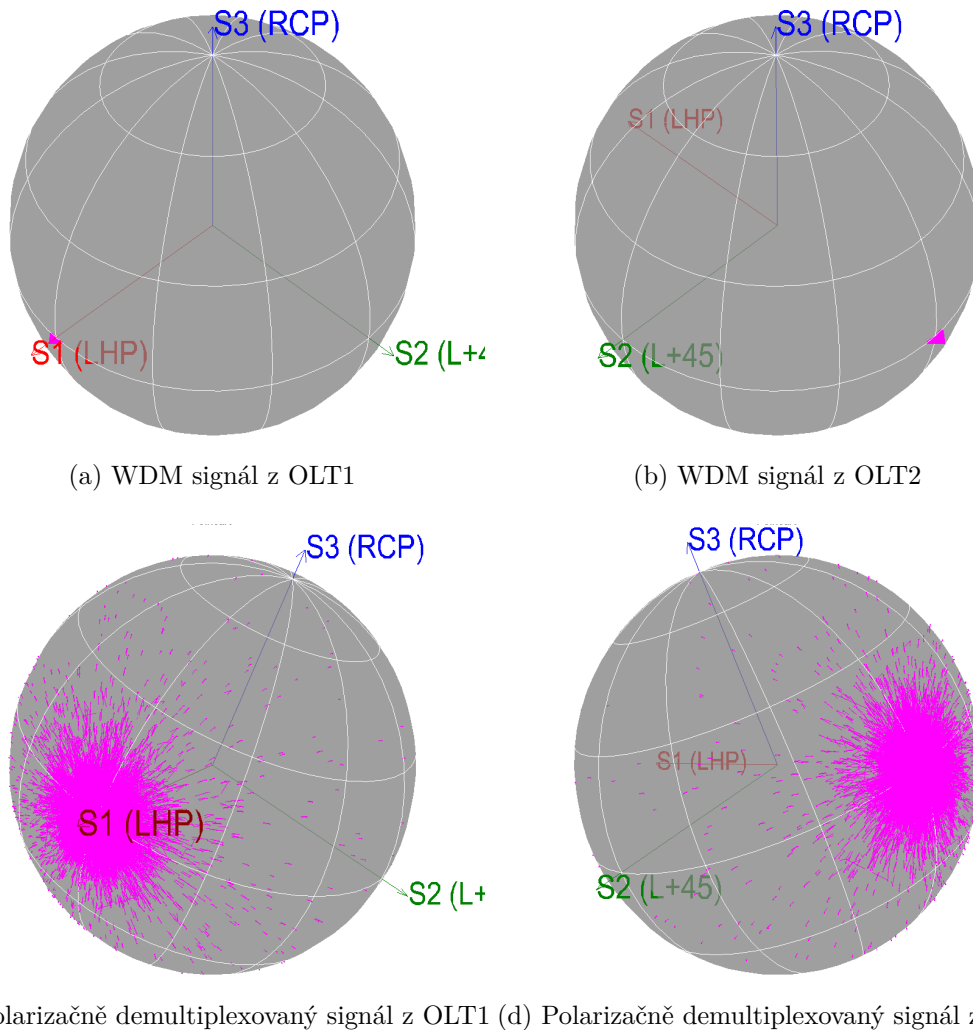


Obr. 4.43: Vznik polarizačního přeslechu

Z hlediska vlnového multiplexování již byl navrhnutý systém dostatečně podroben analýze pomocí výstupů ze spektrálních analyzátorů. Z hlediska polarizačního multiplexování je možné analyzovat změny stavu polarizace pomocí Poincarého koule, jejíž popis je uveden v podkapitole 2.1.5.

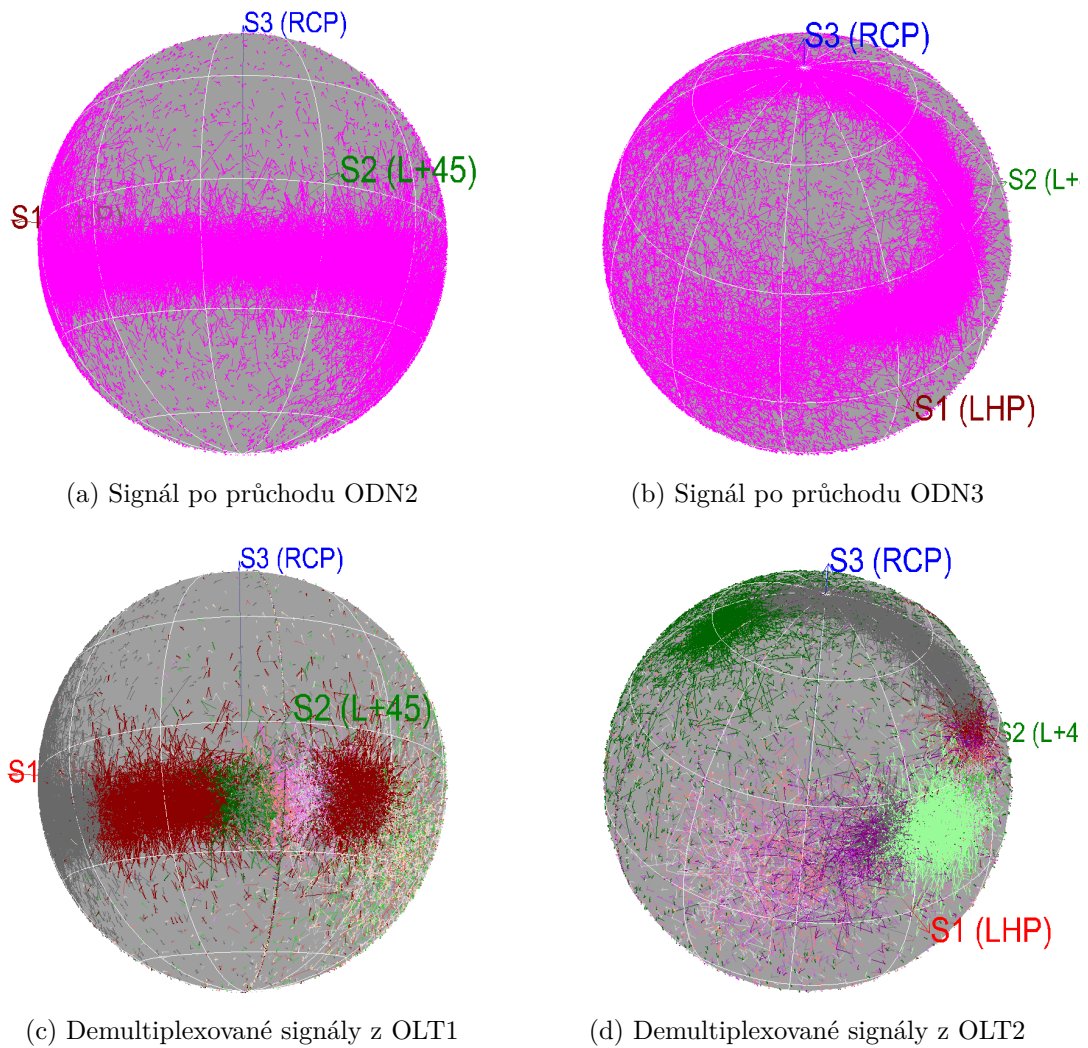
Na obrázku 4.44 jsou zobrazeny Poincarého koule, přičemž koule 4.44a odpovídá analyzátoru OSA1 a koule 4.44b odpovídá analyzátoru OSA2. Výstupy z obou OLT jednotek obsahují shodné vlnově multiplexované signály. Vzhledem k použití polarizátorů na všech dílčích vysílačích, jsou oba signály shodně lineárně polarizovány. Aby bylo možné signály polarizačně multiplexovat, bylo nezbytné nejprve vhodně nastavit úhel polarizace pomocí polarizačního kontroléru tak, aby druhý signál byl pootočen o 90° . Jak plyne z obrázku 4.44, oba signály jsou lineárně polarizovány, neboť bod S (v obrázku označen růžovou značkou) leží pouze v rovině x a y . Dále

je možné určit, že oba signály jsou zcela polarizované, neboť bod S leží na povrchu Poincarého koule (platí $DOP = 1$).



Obr. 4.44: Zobrazení stavu polarizace pomocí Poincarého koule před a po polarizačním multiplexem

Po průchodu multiplexovaného signálu polarizačním splitterem PBS 1 již dochází ke změně z lineárně polarizovaného signálu na elipticky polarizovaný signál. Pomocí dynamického polarizačního kontroléru, který udržuje vhodný úhel polarizovaného signálu, je také možné měnit stav polarizace pomocí 1/4 vlnné destičky, jak bylo popsáno v podkapitole 3.4.1. Libovolný vstupní signál je tak možné transformovat na lineárně polarizovaný signál. Stav polarizace obou polarizačně demultiplexovaných signálů je zobrazen na Poincarého koulích na obrázcích 4.44c a 4.44d. Jak je z tohoto obrázku patrné, signály průchodem demultiplexačním splitterem nejsou již zcela lineárně polarizované a stav polarizace se mění na eliptický.



Obr. 4.45: Stav polarizace signálů před a po vlnovém demultiplexu

Po dalším průchodu demultiplexovaného signálu 5 km optického vlákna se stav polarizace dále mění, jak plyne z teoretických předpokladů uvedených v podkapitole 2.1.4. Stav polarizace obou signálů je možné označit jako eliptický, přičemž na obrázku 4.45a je vidět, že převážná část bodů je soustředěna v rovině x a y , takže signál lze považovat i za částečně lineárně polarizovaný. Na druhou stranu na obrázku 4.45b je zobrazen stav polarizace pro druhý signál. Zde jsou body výrazně soustředěny do osy z (bod S3), takže je možné signál označit jako částečně kruhově (pravotočivě) polarizovaný. U obou signálů platí, že všechny body leží na povrchu koule, tudíž jsou oba signály zcela polarizované.

Po vlnovém demultiplexu obou signálů byly vykresleny dvě Poincarého koule, které sestávají ze všech dílčích vlnově demultiplexovaných signálů odpovídající OLT jednotky (různé barvy odpovídají různým vlnovým délkám). Je zde výrazná ana-

logie mezi těmito koulemi a koulemi na obrázku 4.45a a 4.45b. Rozložení bodů je v obou případech stejné. Lze tak usoudit, že po polarizačním demultiplexování se stav polarizace mění různě pro různé vlnové délky. To však nemá negativní vliv na kvalitu signálů.

Pokud bychom pomocí Poincarého koule zobrazili dílčí vlnově demultiplexovaný signál, výsledek by byl tvořen částí bodů zobrazených na obrázku 4.45c, respektive 4.45d pro signál původně z druhé OLT jednotky. Po průchodu tohoto signálu posledním segmentem distribuční sítě, o celkové délce 5 km, je výsledný stav polarizace čistě eliptický.

Snižováním hodnoty PER na polarizačních splitterech dochází také ke změně stavu polarizace – poměr lineárně a elipticky polarizovaného signálu se mění, až v krajním případě při nastavení PER na hodnotu 5 dB, dochází vlivem silného polarizačního přeslechu ke změně stavu polarizace. Z původního částečně lineárně polarizovaného signálu se stává zcela elipticky polarizovaný signál. Na Poincarého kouli má rovnoměrné rozložení bodů na celém povrchu koule. Všechny signály za polarizačním splitterem PBS 2 jsou pak elipticky polarizované.

Na základě poznatků získaných předchozími simulacemi i praktickým měřením, byl proveden návrh simulačního modelu optické přístupové sítě založené na myšlence kombinace vlnového a polarizačního multiplexu. Navržený model prokázal funkčnost takovéto kombinace. Simulacemi byl ověřen negativní vliv při snižování parametru PER na kvalitu přenášeného signálu vlivem polarizačního přeslechu. Dále bylo simulacemi i praktickým měřením ověřeno, že změna stavu polarizace nemá negativní vliv na kvalitu přenášených signálů, jedná-li se o běžné telekomunikační optické sítě. Negativní dopad by změna stavu polarizace měla tam, kde je vyžadována vysoká míra koherence. S takovými případy se můžeme nejčastěji setkat u senzorických systémů.

5 ZÁVĚR

Vývoj optických přístupových sítí je směřován k vyšším přenosovým rychlostem, při snaze současného zachování zpětné kompatibility se staršími standardy, a pokud možno využít stávající položené optické kabely na maximum. V současných optických přístupových sítích se uplatňuje zejména časový multiplex, připravovaný standard NG-PON2 navíc kombinuje časový multiplex s vlnovým. Přenosové rychlosti 10 Gbit/s mají přísné limity PMD, které rostou s dalším navyšování přenosových rychlostí. Při porušení těchto limitů dochází k mezisymbolové interferenci a tím k celkovému zvýšení chybovosti přenosové systému. Pro další vývoj optických přístupových sítí aplikovatelných na stávající optické trasy bude třeba zvolit technologie, které budou schopny odolávat negativním vlivům polarizační vidové disperze a navíc budou zpětně kompatibilní s předchozími standardy. Cílem dizertační práce proto bylo prozkoumat vliv přenosových parametrů fyzické vrstvy na parametry kvality služeb a navrhnout model optické přístupové sítě, která bude splňovat výše uvedené požadavky. Dílčí cíle dizertační práce byly shrnuty v první kapitole.

Teoretická část práce je tvořena úvodem do řešení problematiky tak, aby následně řešená praktická část byla srozumitelná. Je však nutné podotknout, že teoretické informace jsou uvedeny jen v rozsahu omezeném pro tuto práci a jejich plné znění lze nalézt v uvedených referencích. Druhá kapitola je rozdělena do pěti částí. V první podkapitole byly popsány přenosové parametry optických vláken a princip šíření signálu. V druhé podkapitole byla popsána optická vlákna, se stručným popisem vícevidových vláken a detailnějším popisem jednovidových vláken. Třetí podkapitola byla věnována lineárním jevům v optických vláknech. Mezi lineární jevy patří také disperze, které byly vzhledem k jejich významu pro tuto práci popsány samostatně ve čtvrté podkapitole. V páté podkapitole byly stručně popsány nelineární jevy.

Třetí kapitola byla věnována optickým přístupovým sítím. V první podkapitole byly tyto sítě rozděleny a v druhé podkapitole byly rozebrány z hlediska standardů ITU-T i IEEE. Zvláštní pozornost byla věnována nejnovějšímu standardu NG-PON2 a také pasivním sítím WDM-PON, které byly použity v praktické části práce pro finální návrh. Maximální přenosové rychlosti optických přístupových sítí určují především použité multiplexní techniky, které byly popsány ve třetí podkapitole. Kromě používaného časového a vlnového multiplexu byly také stručně shrnuty další progresivní multiplexní techniky. Praktická část se z velké části zabývá metodou polarizačního multiplexování, proto byl jeho princip a specifické parametry popsány v samostatné čtvrté podkapitole. Simulacemi i praktickým měřením byl zjišťován vliv parametrů na fyzické vrstvě na parametry kvality služeb QoS, které byly spolu s metodikou měření uvedeny v poslední páté podkapitole.

Praktická část dizertační práce byla rozdělena do šesti částí, které na sebe svými výsledky navazují. První podkapitola byla zaměřena na stav reálných vláken v České republice. Bylo proměřeno a vyhodnoceno 11 nezávislých tras, vždy po dvou vláknech. Výsledky reflektují stav vláken používaných pro vysokorychlostní optické přenosy a důsledky s tím spojené pro další navyšování přenosových rychlostí. Trasy měly různé délky přibližně od 4 km, až do téměř 100 km. Byly posuzovány z hlediska koeficientu PMD a také měrného útlumu, který ve většině případů překračoval limit 0,25 dB/km. Limit pro PMD koeficient $0,4 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ byl porušen u jedné z tras s délkou 4 km, kde dosahoval hodnoty $0,9125 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Dále byla posuzována vazba mezi měrným útlumem a disperzním koeficientem, kde bylo prokázáno, že zvýšení jednoho parametru neovlivňuje ve většině případů druhý. Posouzení stavu vláken potvrzuje předpoklad, že s dalším navyšováním přenosových rychlostí bude nezbytné zabývat se problematikou redukce vlivu PMD i v oblasti optických přístupových sítí.

Hodnota PMD je závislá na celé řadě faktorů, přičemž k její změně dochází výrazným způsobem při změně okolní teploty. Tato závislost doposud nebyla blíže prozkoumána, proto bylo provedeno měření závislosti PMD na teplotě pro pasivní prvky optické přístupové sítě, které je popsáno v druhé podkapitole. Měření probíhalo pro různé typy konektorových spojů, vzorků vláken, svárů a rozbočovače pomocí termokomory v teplotních rozsazích od -30°C až do $+80^\circ$ vždy po dobu 12 hodin. Na základě analýzy a statistického vyhodnocení vyplývá, že nelze určit konkrétní průběh závislosti PMD na teplotě. Bylo však prokázáno, že nejvíce se měnila směrodatná odchylka PMD se změnou teploty pro přípravek s optickými sváry, které by tak mohly představovat kritickou část distribuční sítě z hlediska změn PMD.

Změna teploty je rovněž kritickým parametrem polarizačně multiplexovaného signálu, neboť jejím vlivem dochází k polarizačnímu přeslechu, změně stavu a natáčení polarizace. V třetí podkapitole byl proto zkoumán vliv teploty na polarizačně multiplexovaný signál. Pomocí dvou vysílačů, jejichž signály byly navázány každý do jedné polarizační roviny, byl optickým spektrálním analyzátozem sledován vliv teploty na výkon demultiplexovaných signálů. Měření bylo prováděno v rozsahu teplot -40°C až $+80^\circ\text{C}$. Vzorek 10 m vlákna byl nejprve ochlazován a po té zahříván. Na základě vyhodnocení výsledků bylo zjištěno, že polarizačně multiplexovaný signál je podstatně více náchylný na ochlazování, při kterém došlo k otočení polarizačních rovin o téměř 90° a výkon signálu z jedné polarizační roviny výrazně pronikal do druhé. Při zahřívání již docházelo k mírnějším změnám. Z toho plyne, že systém polarizačního multiplexu je více odolný při zahřívání vlákna, než při jeho ochlazování v rozsahu běžných teplot.

Ve čtvrté podkapitole byla prováděna simulace dvou modelů 10G přístupových sítí v prostředí VPI. První model simuloval současný přenos datového signálu a šumu na stejné vlnové délce při polarizačním oddělení. Byl zde posuzován vliv šumu na-

vázaného do druhé polarizační roviny na chybovost BER. Bylo zjištěno, že při této situaci je třeba, aby byl odstup užitečného signálu od šumu po polarizační demultiplexaci vyšší než 22 dB, jinak je hodnota BER vyšší než 10^{-12} . Druhý model simuloval situaci, kdy by byl použit polarizační multiplex pro oddělení směrů přenosu dvou signálů na stejných vlnových délkách. Simulací bylo zjištěno, že vlivem změny polarizace nesmí dojít ke snížení výkonu signálu navázaného v jedné polarizační rovině o více než 7,5 dB.

Na základě poznatků získaných simulacemi byl laboratorně sestaven systém polarizačního multiplexu. Před jeho realizací bylo nejprve provedeno rozsáhlé měření parametrů na fyzické vrstvě pro určení chování systému bez použitého polarizačního multiplexu. Tím bylo ověřeno, jakým způsobem ovlivňuje parametry kvality služeb vložný útlum, parametry PMD, PDL a signály na jiných blízkých vlnových délkách. Následně bylo možné posoudit, jaký vliv má na parametry kvality služeb samotný polarizační multiplex. Stejně jako byly vytvořeny dva simulační modely, byly tyto scénáře realizovány i praktickým měřením pro 10G Ethernet. Při současném přenosu datového signálu a šumu bylo zjištěno, že odstup užitečného signálu od šumu po polarizační demultiplexaci musí být vyšší než 25 dB, jinak bude chybovost vyšší než 10^{-12} . Měřením druhého scénáře bylo zjištěno, že vlivem změny polarizace nesmí dojít ke snížení výkonu signálu navázaného v jedné polarizační rovině o více než 4 dB. Kromě měření bitové chybovosti bylo prováděno také měření parametrů QoS dle standardu EtherSAM. Pro ověření funkčnosti statického polarizačního multiplexu bylo provedeno měření na reálné trase dlouhé 12,8 km. Systém byl měřen z hlediska bitové chybovosti po dobu 4 dnů, čímž byla ověřena jeho funkčnost a vliv změn polarizace na bitovou chybovost, která se během 4 dnů změnila o dva řády z 10^{-12} na 10^{-10} .

V poslední části práce byl vytvořen model vysokorychlostní širokopásmové optické přístupové sítě WDM-PDM-PON založené na kombinaci vlnového a polarizačního multiplexu. Systém byl nejprve popsán v teoretické rovině a po té byl v simulačním prostředí VPI odsimulován. Mezi tím byl také proveden návrh dynamického polarizačního kontroléru pro automatické nastavování stavu a úhlu polarizace pro polarizačně demultiplexační část, která je nejvíce komplikovanou částí pro praktické nasazení těchto systémů.

Simulační model byl vytvořen 64 vlnovými DWDM kanály s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s a modulací NRZ-OOK. Prvních 32 kanálů bylo navázáno do jedné polarizační roviny a druhých 32 kanálů (se stejnými vlnovými délkami) do druhé. Simulovaný systém dosahoval maximální přenosové rychlosti 640 Gbit/s, která je sdílena mezi 64 koncových uživatelů na vzdálenost 20 km. Systém byl podroben simulacím vlivu změny parametru PER na bitovou chybovost a změnu stavu polarizace. Bylo ověřeno, že změna stavu polarizace nemá negativní dopad na parametry kvality slu-

žeb pro optické přístupové sítě. Kritická je změna úhlu polarizovaného signálu a také parametr PER. Pro udržování optimálního úhlu polarizace byl navržen dynamický polarizační kontrolér. Tato optická přístupová síť by tak měla dynamicky reagovat na změny polarizace vlivem teplotních změn i mechanického namáhání, redukovat vliv PMD a zdvojnásobit šířku přenosového pásma. Koncovým uživatelům by umožňovala vysoké přenosové rychlosti sdíleného média při zachování optimálních hodnot parametrů QoS.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AON Active Optical Network

APC Angle Polished Connector

APON ATM Passive Optical Network

AT Attenuator

ATM Asynchronous Transfer Mode

AWG Arrayed Waveguide Grating

BER Bit Error Rate

BPON Broadband PON

CATV Cable Analogue TV

CD Chromatic Dispersion

CDM Code Division Multiplexing

CG Channel Group

CIR Committed Information Rate

CO Central Office

CP Channel Pair

Cex Co-existence Element

CWDM Coarse Wavelength Division Multiplex

DBA Dynamic Bandwidth Assignment

DEMUX Demultiplexer

DFB Distributed Feedback Laser

DFG Difference Frequency Generation

DGD Differential Group Delay

DOP Degree Of Polarisation

DPC Dynamic Polarization Controller

DSF Dispersion Shifted Fiber

DSP Digital Signal Processing

DVB-T Digital Video Broadcasting - Terrestrial

DWDM Dense Wavelength Division Multiplex

EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier

EIR Excess Information Rate

EOM Electro Optical Modulator

EPON Electrical Time Domain Multiplex

ETDM Ethernet PON

FC Ferrule Connector

FEC Forward Error Correction

FP Fabry Perrot

FSAN Full Service Access Network

FSO Free Space Optics

FTTA Fiber To The Anthena

FTTB Fiber To The Building

FTTC Fiber To The Curb

FTTD Fiber To The Desk

FTTH Fiber To The Home

FTTO Fiber To The Office

FWM Four Wave Mixing

GE Gigabit Ethernet

GEM GPON Encapsulation Method

GEN Generator

GINTY Generalized Interferometric Method

GPON Gigabit Passive Optical Network

GVD Group Velocity Dispersion

HE Head End

HWP Half-Wave Plate

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

ITU International Telecommunication Union

ISP Internet Service Provider

LED Light Emitting Diode

LO Local Oscillator

LTE Long Term Evolution

MC Matched Cladding

MFD Mode Field Diameter

MLM Multi Longitudal Mode

MMF Multi Mode Fiber

MPEG Moving Picture Experts Group

MUX Multiplexer

MZM Mach Zehnder Modulator

NA Numerical Aperture

NG-PON Next-Generation Passive Optical Network

NRZ Non-Return to Zero

NZ-DSF Non-Zero Disperzion Shifted Fiber

OAN Optical Access Network

OCDM Optical Code Division Multiplexing

ODN Optical Distribution Network

OFC Optical Frequency Conversion

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OLT Optical Line Terminal

OOK On Off Keying

OoS Out of Service

ONU Optical Network Unit

OPA Optical Parametric Amplifiers

OPO Optical Parametric Oscillators

OSA Optical Spectrum Analyzer

OSNR Optical Signal to Noise Ratio

OTDM Optical Time Domain Multiplexing

OTDR Optical Time Domain Reflectometer

PAM Pulse Amplitude Modulation

PBC Polarization Beam Coupler

PBRs Pseudo Random Bit Sequence

PBS Polarization Beam Splitter

PC Polarization Controller

PC Polished Connector

PD Photo Diode

PDL Polarization Dependent Loss

PDM Polarization Division Multiplex

PER Polarization Extinction Ratio

PM Polarization Maintaining

PM Power meter

PMD Polarization Mode Dispersion

POL-MUX Polarization Multiplexing

Pol-Track Polarization Tracker

PON Passive Optical Network

PPLN Periodically Poled Lithium Niobate

PSP Principal States of Polarization

P2MP Point To Multipoint

P2P Point To Point

QoS Quality of Services

QPM Quasi Phase Matching

QPSK Quadrature Phase Shift Keying

QWP Quarter Wave Plates

RF Radio Frequency

RFC Request For Comments

RN Remote Node

RX Receiver

SBS Stimulated Brillouin Scattering

SC Standard Connector

SDH Synchronous Digital Hierarchy

SFG Sum Frequency Generation

SFP Small Form-factor Pluggable

SHG Second Harmonic Generation

SMF Single Mode Fiber

SNI Service Node Interface

SOP State Of Polarization

SPM Self Phase Modulation

SRS Stimulated Raman Scattering

SSMF Standard Single Mode Fiber

STM Synchronous Transport Module

TDM Time Division Multiplexing

TWDM Time-Wavelength Division Multiplexing

TX Transmitter

UDWDM Ultra DWDM

UNI User Network Interface

VDSL Very high bit rate Digital Subscriber Line

VoIP Voice over IP

WCDMA Wideband Code Division Multiple Access

WDM Wavelength Division Multiplex

WWDM Wide Wavelength Division Multiplex

XG-PON X Gigabit PON

XPM Cross Phase Modulation

LITERATURA

- [1] Agrawal, G.: *Nonlinear Fiber Optics*. Optics and Photonics, Elsevier Science, 2001, ISBN 9780080479743.
- [2] Ao, X.; Liu, L.; Wosinski, L.; aj.: Polarization beam splitter based on a two-dimensional photonic crystal of pillar type. *Applied Physics Letters*, ročník 89, č. 17, 2006: 171115, doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.2360201>.
- [3] Aso, O.; Tadakuma, M.; Namiki, S.: Method for efficient four-wave mixing generation and short pulse generation equipment using the method. 2003, patent US 6522818 B1.
- [4] Bogoni, A.; Poti, L.; Ghelfi, P.; aj.: OTDM-based optical communications networks at 160 Gbit/s and beyond. *Optical Fiber Technology*, ročník 13, č. 1, 2007: s. 1–12, ISSN 1068-5200, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.yofte.2006.08.001>.
- [5] Brouček, J.: Disperze CD a PMD. *Profiber Networking*, 2012.
- [6] Chauvel, G.: Dispersion in Optical Fibers. *Anritsu Corp*, 2008.
- [7] Dado, M.; Turek, I.; Štelina, J.; aj.: *Kapitoly z optiky pre technikov*. Žilinská univerzita v Žiline, 1998.
- [8] Filka, M.: *Optoelectronics for telecommunications and informatics*. Dallas, Texas, USA: Optokon CO., LTD., první vydání, 2009.
- [9] Franta, D.; Ohlídal, I.; Necas, D.: Influence of cross-correlation effects on the optical quantities of rough films. *Opt. Express*, ročník 16, č. 11, 2008: s. 7789–7803, doi:[10.1364/OE.16.007789](https://doi.org/10.1364/OE.16.007789).
- [10] Fuka, J.; Havelka, B.: *Optika – fyzikální kompendium pro vysoké školy*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury SNTL, 1961.
- [11] Ghatak, K.; Thyagarajan, A.: *Introduction to Fiber Optics*. New Delhi: Cambridge University Press, 1999.
- [12] Girard, A.: *FTTx PON Technology and Testing*. Canada, Quebec: EXFO, 2005.
- [13] Hirooka, T.: Recent progress on OTDM terabit/s transmission and their future. In *Optical Fiber Communication Conference*, Optical Society of America, 2010, str. OWM5.

- [14] IEEE: Recommendation 802.3ah – Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks. *IEEE*, 2004.
- [15] ITU-T: Recommendation G.694.2 – Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid. *ITU-T*, 2003.
- [16] ITU-T: Recommendation G.959.1 – Optical transport network physical layer interfaces. *ITU-T*, 2003.
- [17] ITU-T: Recommendation G.697 – Optical monitoring for DWDM systems. *ITU-T*, 2004.
- [18] ITU-T: Recommendation G.983.1 – Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON). *ITU-T*, 2005.
- [19] ITU-T: Recommendation G.984.1 – Gigabit-capable passive optical networks (GPON). *ITU-T*, 2008.
- [20] ITU-T: Recommendation Y.1564 – Ethernet service activation test methodology. *ITU-T*, 2011.
- [21] ITU-T: Recommendation G.694.1 – Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. *ITU-T*, 2012.
- [22] ITU-T: Recommendation G.987 – 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems. *ITU-T*, 2012.
- [23] ITU-T: Recommendation G.989.1 – 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements. *ITU-T*, 2013.
- [24] ITU-T: Recommendation G.989.2 – 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification. *ITU-T*, 2014.
- [25] Jenkins, F. A.; White, H. E.: *Fundamentals of optics*. McGraw Hill Company, 1957.
- [26] Jeong, J.: *Fiber Optic Polarization – Polarization Control and Measurement for Optical Fibers*. Newport, 2006.
- [27] Johnson, M.: *Optical Fibres, cables and systems*. Geneva, Switzerland: ITU, 2009.

- [28] Jonsson, F.: *Lectures on Nonlinear Optics*. Stockholm, Sweden: Kungl Tekniska Hogskolan, 2003, ISBN 9172835176.
- [29] Kaminov, I.: *Optical Fiber Telecommunications (Sixth Edition)*. Berkeley, California, USA: Academic Press, 6 vydání, 2013, doi:0.1016/B978-0-12-396960-6.00031-6.
- [30] Kikuchi, N.; Sekine, K.; Sasaki, S.: Analysis of cross-phase modulation (XPM) effect on WDM transmission performance. *Electronics Letters*, ročník 33, č. 8, Apr 1997: s. 653–654, ISSN 0013-5194, doi:10.1049/el:19970489.
- [31] Klauder, J.; Sudarshan, E.: *Fundamentals of Quantum Optics*. Dover Books on Physics, Dover Publications, 2006.
- [32] Kovář, D.: *Polarizace světla a její využití v praxi*. Diplomová práce, MU, Brno, 2008.
- [33] Kucharski, M.: Optická vlákna, 2010, příspěvek na veletrhu Ampér.
- [34] Lam, C.: *Passive Optical Networks: Principles and Practice*. Elsevier Science, 2011, ISBN 9780080553450.
- [35] Malhotra, J. S.; Kumar, M.: Performance analysis of NRZ, RZ, CRZ and CSRZ data formats in 10Gb/s optical soliton transmission link under the impact of chirp and TOD. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, ročník 121, č. 9, 2010: s. 800–807.
- [36] Maršálek, L.: *Optická vlákna*. Ostrava, Česká republika: VŠB-TUO, 2006.
- [37] Morant, M.; Pérez, J.; Llorente, R.: Polarization Division Multiplexing of OFDM Radio-over-Fiber Signals in Passive Optical Networks. *Advances in Optical Technologies*, ročník 2014, č. 269524, 2014: str. 9, doi:10.1155/2014/269524.
- [38] Nelson, L.; Nielsen, T.; Kogelnik, H.: Observation of PMD-induced coherent crosstalk in polarization-multiplexed transmission. *Photonics Technology Letters, IEEE*, ročník 13, č. 7, 2001: s. 738–740, ISSN 1041-1135, doi:10.1109/68.930432.
- [39] Oktem, T.; Erdogan, A.; Demir, A.: Adaptive Receiver Structures for Fiber Communication Systems Employing Polarization-Division Multiplexing. *Lightwave Technology, Journal of*, ročník 27, č. 23, 2009: s. 5394–5404, ISSN 0733-8724, doi:10.1109/JLT.2009.2027912.

- [40] Paschotta, R.: *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. Wiley-VCH, 2008, ISBN 3527408282.
- [41] Perlicki, K.: A Simplified Analytical Model of Crosstalk in Polarization Division Multiplexing System. In *Proceedings of the 5th Conference on Applied Electromagnetics, Wireless and Optical Communications, ELECTROSCIENCE'07*, Stevens Point, Wisconsin, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2007, ISBN 978-960-6766-25-1, s. 7–10.
- [42] Perlicks, V.: *Ray Optics, Fermat's Principle, and Applications to General Relativity*. Lecture Notes in Physics Monographs (Book 61), Springer, 2000.
- [43] Powers, P. E.: *Fundamentals of Nonlinear Optics*. Taylor & Francis, 2011, ISBN 9781420093513.
- [44] Prat, J.: *Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research Towards Unlimited Bandwidth Access*. Springer, 2008, ISBN 9781402084706.
- [45] Radil, J.: Nové směry v návrhu a realizaci sítí – vyřeší koherentní systémy vše? In *Optical communication 2013*, Cesnet, Action-M, 2014, s. 1–22.
- [46] Rafael, S.: Ethernet fibre access innovations and WDM-PON. In *International Symposium: The future telecommunications*, LG-NORTEL, Madrid: Life and Earth Sciences, April 2010, s. 1–24.
- [47] Ramaswami, R.; Sivarajan, K.; Sasaki, G.: *Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., třetí vydání, 2009, ISBN 0123740924, 9780123740922.
- [48] Richter, P., D.; Weibring; Fried, A.: High-power, tunable difference frequency generation source for absorption spectroscopy based on a ridge waveguide periodically poled lithium niobate crystal. *OPTICS EXPRESS*, ročník 15, č. 2, 01 2007: s. 1–8.
- [49] Schneider, T.; Junker, M.; Lauterbach, K.-U.: Theoretical and experimental investigation of Brillouin scattering for the generation of millimeter waves. *J. Opt. Soc. Am. B*, ročník 23, č. 6, 2006: s. 1012–1019, doi:10.1364/JOSAB.23.001012.
- [50] Senior, J. M.; Jamro, Y.: *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. Pearson Prentice Hall, 2009, ISBN 9780130326812.
- [51] Shieh, W.; Djordjevic, I.: *OFDM for Optical Communications*. Elsevier Science, 2009, ISBN 9780080952062.

- [52] Smolorz, S.; Rohde, H.; Gottwald, E.; aj.: Demonstration of a Coherent UDWDM-PON with Real-Time Processing. In *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011*, Optical Society of America, 2011, str. PDPD4, doi:10.1364/NFOEC.2011.PDPD4.
- [53] Stibor, P.: Optical fiber solution: Jednovidová optická vlákna, 2012, seminář sítí FTTx 2012.
- [54] Stibor, P.: Optická telekomunikační vlákna. In *Utilization of Optical Fibers*, ExCOM, Prague: VŠB-TUO, 2014, s. 1–76.
- [55] Tanaka, K.; Agata, A.; Horiuchi, Y.: IEEE 802.3av 10G-EPON Standardization and Its Research and Development Status. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, ročník 28, č. 4, 2010.
- [56] Ten, S.; Edwards, M.: An introduction to the fundamentals of PMD in fibers. *Corning Incorporated*, 2006.
- [57] Thevenaz, L.: *Advanced Fiber Optics*. Engineering sciences, EFPL Press, 2011, ISBN 9781439835173.
- [58] Träger, F.: *Springer Handbook of Lasers and Optics*. Springer, 2012, ISBN 9783642194092.
- [59] Āupa, M.; Filka, M.; Dostál, O.: Polarizační vidová disperze – PMD. *Elektrorevue*, ročník 14, č. 2, 2012: s. 1–6, iSSN 1213-1539.
- [60] White, K.: Practical application of the refracted near-field technique for the measurement of optical fibre refractive index profiles. *Optical and Quantum Electronics*, ročník 11, č. 2, 1979: s. 185–196, ISSN 0306-8919, doi:10.1007/BF00624397.
- [61] Wuilpart, M.: Concept of light polarization. In *Trends in photonics and optoelectronics*, ExCOM, VŠB-TUO, 2015, s. 1–43.
- [62] Yao, C.: What is Optical Fiber Dispersion? *Fiber Optics For Sale Co.*, 2009.
- [63] Yao, C.: Optical Fiber Loss and Attenuation. *Fiber optics for sale Co.*, 2010.
- [64] Yao, X.: Optical communications based on optical polarization multiplexing and demultiplexing. 2005, patent US 20050265728 A1.
- [65] Yao, X. S.; Yan, L.-S.; Zhang, B.; aj.: All-optic scheme for automatic polarization division demultiplexing. *Opt. Express*, ročník 15, č. 12, 2007: s. 7407–7414, doi:10.1364/OE.15.007407.

- [66] Yin, H.; Richardson, D.: *Optical Code Division Multiple Access Communication Networks: Theory and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, ISBN 9783540684688.
- [67] Young, J.: GEAPON & GPON Comparison. *CommScope, Inc*, 2011: s. 1–21.
- [68] Yuanqiu, L.; Effenberger, F.: TWDM-PON – The solution of choice for NG-PON2. *Huawei*, ročník 2013, č. 68, 2013.

SEZNAM PŘÍLOH

A	Vliv teploty na polarizačně multiplexovaný signál	133
A.1	Změna OSNR při ochlazování	133
A.2	Změna OSNR při oteplování	134
B	Vliv útlumu na BER a Propustnost	135
C	Polarizační multiplex	136
C.1	EtherSAM – dílčí směry	136
C.2	EtherSAM – obousměrně	137
D	Seznam použitých přístrojů	138

A VLIV TEPLoty NA POLARIZAČNĚ MULTIPLEXOVANÝ SIGNÁL

A.1 Změna OSNR při ochlazování

T [°]	TX1 [dBm]	TX2 [dBm]	OSNR [dB]	T [°]	TX1 [dBm]	TX2 [dBm]	OSNR [dB]
20	2,05	-21,17	23,22	-32	-1,22	-0,79	-0,43
18	2,08	-20,31	22,39	-34	-1,80	-0,33	-1,47
16	2,07	-18,31	20,38	-36	-2,82	0,20	-3,02
15	2,07	-15,39	17,46	-38	-3,41	0,52	-3,93
14	1,94	-14,08	16,02	-40	-3,70	0,67	-4,37
13	1,94	-13,15	15,09	-38	-3,78	0,74	-4,52
12	1,71	-12,06	13,77	-36	-4,15	0,69	-4,84
11	1,85	-11,29	13,14	-34	-3,68	0,50	-4,18
10	1,52	-10,19	11,71	-32	-3,47	0,36	-3,83
9	1,59	-9,47	11,06	-30	-2,29	-0,24	-2,05
8	1,20	-8,83	10,03	-28	-1,69	-0,79	-0,90
7	1,41	-8,29	9,70	-26	-1,10	-1,17	0,07
6	1,34	-7,77	9,11	-24	-0,57	-1,71	1,14
5	1,11	-7,23	8,34	-22	-0,50	-2,18	1,68
4	1,04	-6,96	8,00	-20	-0,29	-2,38	2,09
3	0,93	-6,56	7,49	-18	0,17	-2,74	2,91
2	0,63	-6,47	7,10	-16	0,49	-3,46	3,95
1	0,50	-5,83	6,33	-14	0,77	-4,50	5,27
0	0,30	-5,71	6,01	-12	0,90	-5,47	6,37
-1	0,25	-5,51	5,76	-10	1,03	-5,49	6,52
-2	0,48	-6,06	6,54	-8	1,03	-6,17	7,20
-3	0,43	-6,30	6,73	-6	1,07	-6,77	7,84
-4	0,55	-6,46	7,01	-4	1,31	-7,24	8,55
-5	0,52	-6,52	7,04	-2	1,19	-7,25	8,44
-6	0,54	-6,32	6,86	0	1,64	-8,35	9,99
-7	0,35	-6,42	6,77	2	1,55	-8,36	9,91
-8	0,85	-6,35	7,20	4	1,53	-8,66	10,19
-9	0,77	-6,33	7,10	6	1,75	-9,91	11,66
-10	0,79	-6,19	6,98	8	1,67	-9,98	11,65
-18	1,08	-5,16	6,24	10	1,64	-10,88	12,52
-20	1,17	-4,57	5,74	12	1,83	-11,90	13,73
-22	0,86	-3,85	4,71	14	1,77	-12,16	13,93
-24	0,69	-3,24	3,93	16	2,00	-12,50	14,5
-26	0,43	-2,61	3,04	18	2,01	-14,00	16,01
-28	0,09	-2,28	2,37	20	2,10	-15,33	17,43
-30	-0,38	-1,57	1,19	Temp.	1,83	-24,81	26,64

A.2 Změna OSNR při oteplování

T [°]	TX1 [dBm]	TX2 [dBm]	OSNR [dB]	T [°]	TX1 [dBm]	TX2 [dBm]	OSNR [dB]
20	1,62	-20,36	21,98	66	0,81	-4,31	5,12
22	2,00	-19,47	21,47	64	0,83	-4,32	5,15
24	2,10	-17,59	19,69	62	0,89	-4,38	5,27
26	2,19	-16,92	19,11	60	0,90	-5,02	5,92
28	2,37	-15,62	17,99	58	0,78	-4,99	5,77
30	2,51	-15,54	18,05	56	1,16	-5,59	6,75
32	2,52	-14,77	17,29	54	1,53	-5,65	7,18
34	2,57	-15,42	17,99	52	1,61	-5,65	7,26
36	2,59	-14,72	17,31	50	1,54	-5,56	7,10
38	2,53	-13,54	16,07	48	1,78	-5,53	7,31
40	2,53	-12,87	15,40	46	1,91	-5,80	7,71
42	2,48	-12,11	14,59	44	1,96	-5,88	7,84
44	2,48	-12,41	14,89	42	1,82	-5,84	7,66
46	2,49	-12,19	14,68	40	1,83	-5,71	7,54
48	2,43	-11,19	13,62	38	1,91	-5,78	7,69
50	2,26	-11,11	13,37	36	2,06	-5,76	7,82
52	2,11	-10,22	12,33	34	1,89	-5,63	7,52
54	2,24	-10,35	12,59	32	2,00	-5,89	7,89
56	2,38	-10,4	12,78	30	1,97	-5,46	7,43
58	1,98	-8,01	9,99	28	1,53	-5,54	7,07
60	2,01	-7,91	9,92	26	1,54	-5,80	7,34
64	1,49	-6,06	7,55	24	1,44	-5,88	7,32
66	1,31	-5,28	6,59	22	1,53	-6,14	7,67
68	1,34	-5,29	6,63	20	1,61	-6,66	8,27
70	1,03	-4,4	5,43	temp.	1,64	-19,5	21,14

B V LIV ÚTLUMU NA BER A PROPUSTNOST

AT [dB]	BER [-]	T [Gbit/s]	AT [dB]	BER [-]	T [Gbit/s]
3,00	0	10	23,10	1,40E-04	9,984
20,55	0	10	23,15	1,60E-04	9,982
20,60	9,10E-11	10	23,20	1,90E-04	9,981
20,65	2,30E-10	10	23,25	2,20E-04	9,976
20,70	1,10E-10	10	23,30	2,60E-04	9,975
20,75	3,40E-09	10	23,35	2,90E-04	9,967
20,80	3,00E-09	10	23,40	3,40E-04	9,964
20,85	1,00E-09	10	23,45	3,90E-04	9,957
20,90	1,00E-08	10	23,50	4,60E-04	9,950
20,95	1,20E-08	10	23,55	5,30E-04	9,943
21,00	1,60E-08	10	23,60	6,00E-04	9,934
21,05	5,20E-08	10	23,65	7,00E-04	9,924
21,10	4,30E-08	10	23,70	8,20E-04	9,913
21,15	2,70E-08	10	23,75	9,40E-04	9,903
21,20	1,40E-07	10	23,80	1,10E-03	9,885
21,25	1,70E-07	10	23,85	1,20E-03	9,869
21,30	2,40E-07	10	23,90	1,40E-03	9,852
21,35	1,50E-07	10	23,95	1,60E-03	9,832
21,40	3,00E-07	10	24,00	1,80E-03	9,809
21,45	1,60E-07	10	24,05	2,10E-03	9,781
21,50	3,30E-07	10	24,10	2,40E-03	9,751
21,55	2,90E-07	10	24,15	2,70E-03	9,721
21,60	4,20E-07	10	24,20	3,00E-03	9,682
21,65	5,70E-07	10	24,25	3,40E-03	9,646
21,70	6,20E-07	10	24,30	3,80E-03	9,606
21,75	8,00E-07	10	24,35	4,30E-03	9,553
21,80	9,30E-07	10	24,40	4,80E-03	9,504
21,85	1,30E-06	10	24,45	5,30E-03	9,449
21,90	1,60E-06	10	24,50	6,00E-03	9,388
21,95	2,00E-06	10	24,55	6,70E-03	9,311
22,00	2,60E-06	10	24,60	7,40E-03	9,236
22,05	3,10E-06	10	24,65	8,40E-03	9,133
22,10	3,60E-06	9,999	24,70	9,30E-03	8,971
22,15	4,90E-06	9,999	24,75	1,00E-02	8,743
22,20	6,00E-06	9,999	24,80	1,10E-02	8,464
22,25	7,00E-06	9,999	24,85	1,30E-02	7,979
22,30	9,00E-06	9,999	24,90	1,40E-02	7,307
22,35	1,10E-05	9,999	24,95	1,50E-02	6,321
22,40	1,30E-05	9,999	25,00	1,70E-02	5,290
22,45	1,50E-05	9,998	25,05	1,90E-02	3,885
22,50	2,00E-05	9,998	25,10	2,10E-02	2,843
22,55	2,20E-05	9,997	25,15	2,20E-02	1,761
22,60	2,70E-05	9,997	25,20	2,50E-02	1,161
22,65	3,30E-05	9,996	25,25	2,70E-02	0,610
22,70	4,00E-05	9,995	25,30	2,90E-02	0,286
22,75	4,00E-05	9,994	25,35	3,10E-02	0,147
22,80	5,00E-05	9,994	25,40	3,40E-02	0,063
22,85	6,00E-05	9,993	25,45	7,00E-03	0,026
22,90	7,30E-05	9,992	25,50	4,00E-02	0,008
22,95	8,40E-05	9,991	25,55	4,20E-02	0,004
23,00	9,90E-05	9,990	25,60	6,00E-02	0,001
23,05	1,20E-04	9,987	25,65	-	0,000

C POLARIZAČNÍ MULTIPLEX

C.1 EtherSAM – dílčí směry

<i>Směr A-></i>								
Δ [dB]	0	4	4,5	5	5,5	6,5	7	7,5
BER [-]	0	9,40E-12	2,70E-10	7,50E-08	9,50E-07	3,20E-05	1,30E-04	4,80E-04
<i>Video</i>								
CIR [Gbit/s]	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,000	0,000	0,001	0,004	0,021	0,685	2,055	6,845
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	10,000	10,000	9,998	9,925	9,784	9,285
<i>VoIP</i>								
CIR [Gbit/s]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,000	0,000	0,000	0,005	0,005	0,117	0,25	1,010
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	9,992	9,975	9,912
<i>Data</i>								
CIR [Gbit/s]	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,000	0,000	0,000	0,008	0,025	0,462	1,377	4,438
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	10,000	10,000	9,999	9,943	9,834	9,421
<i>Směr B-></i>								
Δ [dB]	0	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5
BER [-]	0	6,80E-11	3,30E-10	3,60E-07	3,20E-06	1,50E-05	6,80E-05	3,00E-04
<i>Video</i>								
CIR [Gbit/s]	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,000	0,000	0,001	0,011	0,047	0,496	4,786	6,485
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	10,000	9,999	9,997	9,962	9,625	9,582
<i>VoIP</i>								
CIR [Gbit/s]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,028	0,080	0,540	1,112
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	9,993	9,957	9,219
<i>Data</i>								
CIR [Gbit/s]	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,000	0,000	0,001	0,005	0,025	0,422	2,639	4,839
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	10,000	10,000	9,998	9,955	9,711	9,241

C.2 EtherSAM – obousměrně

Δ [dB]	3	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
BER [-]	0	2,20E-11	1,60E-09	6,50E-08	7,00E-07	5,20E-06	3,10E-05	1,40E-04	6,60E-04	1,90E-03
<i>Video</i>										
CIR [Gbit/s]	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592	1,0592
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,000	0,000	0,000	0,007	0,031	0,193	0,82	3,555	5,637	2,367
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	10,000	9,999	9,997	9,979	9,914	9,629	9,406	9,755
<i>VoIP</i>										
CIR [Gbit/s]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,044	0,075	0,370	0,767	0,25
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	9,998	9,991	9,96	9,926	9,975
<i>Data</i>										
CIR [Gbit/s]	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Jitter [ms]	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Latence [ms]	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
Ztrátovost [%]	0,000	0,000	0,000	0,011	0,016	0,133	0,464	1,977	3,678	1,199
Propustnost [Gbit/s]	10,000	10,000	10,000	9,999	9,998	9,985	9,945	9,747	9,484	9,846

D SEZNAM POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ

Prvek	Výrobce	Typ	Počet kusů
Modul SFP+	Optoway	SPS-2385MW-D440G	2
Modul SFP	SPS	7380CIS	2
Elektro-optický modulátor (EOM)	Photline	MXER-LN-10	1
Měřicí platforma	EXFO	FTB-1	2
Modul netblazer	EXFO	860G	1
Modul netblazer	EXFO	880G	1
Generátor	Agilent	33521A	1
Optický spektrální analyzátor (OSA)	Anritsu	MS9740A	1
Laditelný optický laser	Optokon	ITLA	1
Optický laser	Qphotonics	QDFBLD-1550-10	1
Laser driver	Thorlabs	CLD-1015	1
Laditelný optický atenuátor	Optokon	OFA-420	1
Laditelný optický atenuátor	EXFO	FVA-60B	1
Laser-přímá metoda	EXFO	FLS-600	1
Měřič výkonu - přímá metoda	EXFO	FPM-600	1
Media convertor	TP-Link	MC220L	2
Coupler 90:10	Optokon	SFT-TAP-AT-10-CAMP	2
Vlákno 20 km	OFS	G.652.D	2
Předřadné vlákno 1 km	SQS	-	1
Izolátor	Thorlabs	IO-H-1550APC	2
Polarizační splitter (PBS)	Opneti	PBS-1x2-1550-3000	1
Polarizační splitter (PBS)	Thorlabs	PBC1550PM-APC	1
Polarizační kontrolér (PC)	Thorlabs	FPC032	3
PMD emulátor	EXFO	EM-550V	1
OTDR měřicí přístroj	EXFO	FTB-7200	1
CD/PMD měřicí přístroj	EXFO	FTB-5700	1
PMD GINTY měřicí přístroj	EXFO	FTB-5500B	1
Širokospektrální zdroj pro GINTY	EXFO	FLS-5800A	1
Svářečka optických vláken	Fitel	S177	1
Termokomora	Vötech	Vc3 7018	1

Publikace autora

Články v odborném periodiku impaktovaném:

ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P.; SYSEL, P.; HORVÁTH, T.; NOVOTNÝ, V.; KRAJSA, O. Distributed fiber – optic sensor for detection and localization of acoustic vibrations. *METROL MEAS SYST*, 2015, roč. [22], č. [1], s. 111–118. ISSN: 0860-8229.

Články v neimpaktovaném odborném periodiku:

ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P.; KRAJSA, O.; FILKA, M. Simulation of bidirectional traffic in WDM-PON networks. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, roč. 90, č. 1, s. 95–100. ISSN: 0033-2097.

MÜNSTER, P.; ŠIFTA, R.; TEJKAL, V.; FILKA, M. The influence of binary modulations in OTDM. *Communications*, 2013, roč. 15, č. 2a/2013, s. 155–159. ISSN: 1335-4205.

ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P.; FILKA, M. Optická přístupová síť EPON a její měření distribuční sítě. *Elektrorevue – Internetový časopis*, 2013, roč. 2013, č. 11, s. 1–8. ISSN: 1213-1539.

ŠIFTA, R.; ŠPORIK, J. Měření výkonových úrovní v pasivní optické síti EPON. *Elektrorevue – Internetový časopis*, 2013, roč. 2013, č. 12, s. 1–7. ISSN: 1213-1539.

ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P.; ŤUPA, M. Měření parametrů QoS v pasivní optické síti EPON. *Elektrorevue – Internetový časopis*, 2013, roč. 2013, č. 13, s. 1–5. ISSN: 1213-1539.

ŠIFTA, R.; FILKA, M. Pasivní optická síť EPON na VUT. *Telekomunikace*, 2012, roč. XLIX, č. 4/2012, s. 19–22. ISSN: 0040-2591.

ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P.; HORVÁTH, T. Přesnost měření disperzí CD/PMD. *Elektrorevue – Internetový časopis*, 2013, roč. 15, č. 5, s. 333–338. ISSN: 1213-1539.

MÜNSTER, P.; ŠIFTA, R.; HORVÁTH, T. Dvoustavové modulace v OTDM sítích. *Elektrorevue – Internetový časopis*, 2013, roč. 15, č. 5, s. 339–342. ISSN: 1213-1539.

FILKA, M.; ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P. Simulace optických tras. *Sdělovací technika*, 2013, roč. 2013, č. 3, s. 18–21. ISSN: 0036-9942.

KOVÁČ, F.; ŠIFTA, R.; HORVÁTH, T. Comparison of PMD measuring methods and their reproducibility. *Elektrorevue – Internetový časopis*, 2015, roč. 6, č. 1, s. 11–14. ISSN: 1213-1539.

REICHERT, P.; ŠIFTA, R.; FILKA, M. Nová generace pasivních optických sítí WDM-PON. *Sdělovací technika*, 2012, roč. 2012, č. 9, s. 5–7. ISSN: 0036-9942.

ŠIFTA, R.; FILKA, M. Simulace a měření vlnových multiplexů pro pasivní optické sítě. *Elektrorevue – Internetový časopis*, 2011, roč. 2011, č. 27, s. 1–12. ISSN: 1213-1539.

FILKA, M.; TEJKAL, V.; MÜNSTER, P.; ŠIFTA, R. Trendy optických přenosů. *Sdělovací technika*, 2012, roč. 2012, č. 4, s. 5–9. ISSN: 0036-9942.

REICHERT, P.; ABILOV, A.; ŠIFTA, R. Kvantová kryptografie v optickém přenosovém systému. *Elektrorevue – Internetový časopis*, 2011, roč. 2011 (2), č. 61, s. 1–4. ISSN: 1213-1539.

HORVÁTH, T.; ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P. Měření služeb Triple play v pasivních optických sítích. *Elektrorevue – Internetový časopis*, 2013, roč. 2013, č. 3, s. 1–12. ISSN: 1213-1539.

MOTÚZ, R.; FILKA, M.; ŠIFTA, R. Chromatická a polarizační módová disperze v optických sítích. *Elektrorevue – Internetový časopis*, 2013, roč. 15, č. 5, s. 326–332. ISSN: 1213-1539.

HORVÁTH, T.; ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P. Detekce hudebních a komprimovaných souborů v BitTorrent protokolu. *Access Server*, 2013, roč. 11, č. 1, s. 1–4. ISSN: 1214-9675.

Články v konferenčních sbornících:

MÜNSTER, P.; VOJTĚCH, J.; SYSEL, P.; ŠIFTA, R.; NOVOTNÝ, V.; HORVÁTH, T.; FILKA, M.; ŠÍMA, S. Phi-OTDR signal amplification. In *Proc. SPIE 9506, Optical Sensors 2015*. 2015. s. 1–9. ISBN: 9781628416275.

KRAJSA, O.; ŠIFTA, R.; ŠEDÝ, J. A Comparative Study of The Modern Access Networks. In *36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 1. 2013. s. 123–126. ISBN: 978-1-4799-0403-7.

REICHERT, P.; ŠIFTA, R.; FILKA, M.; ŠPORIK, J.; KRAJSA, O. New generations of passive optical networks. In *Third forum of young researchers*. 1. Izhevsk: 2012. s. 425–432. ISBN: 978-5-7526-0531-4.

ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P.; KRAJSA, O.; NOVOTNÝ, V.; KOTON, J. Distributed fiber sensor for acoustic vibrations. In *Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum Education Quality – 2014*. 1. Izhevsk, Russia: Publishing House, 2014. s. 368–371. ISBN: 978-5-7526-0649-6.

MÜNSTER, P.; ŠIFTA, R.; HORVÁTH, T.; NOVOTNÝ, V.; FILKA, M. Polarization mode dispersion in NG- PON. In *Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum Education Quality – 2014*. 1. Izhevsk, Russia: Publishing House, 2014. s. 364–367. ISBN: 978-5-7526-0649-6.

ŠIFTA, R.; FILKA, M.; MÜNSTER, P. Temperature Dependence of Polarization Mode Dispersion. In *DGaO-PROCEEDINGS*. Erlangen, 2015. s. 1. ISSN: 1614-8436.

NOVOTNÝ, V.; SYSEL, P.; ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P.; HORVÁTH, T.; FILKA, M. Distributed fiber–optic sensor system based on phase – sensitive OTDR. In *OPTICAL COMMUNICATIONS 2014*. Praha: Agentura Action M, 2014. s. 20–23. ISBN: 978-80-86742-39-7.

ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P.; NOVOTNÝ, V.; KOVÁČ, F.; FILKA, M. Reproducibility and Accuracy of CD/PMD Dispersion Measurements. In *OPTICAL COMMUNICATIONS 2013*. Praha: Agentura Action M, 2013. s. 8–12. ISBN: 978-80-86742-37-3.

ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P.; FILKA, M. Design and simulation of WDM networks in optSim and optiSystem. In *Research in Telecommunication Technologies*. Žilina: University of Žilina, 2012. s. 175–180. ISBN: 978-80-554-0569-8.

MÜNSTER, P.; ŠIFTA, R.; TEJKAL, V.; FILKA, M. The Influence of Binary Modulations in OTDM Networks. In *Research in Telecommunication Technologies*. Žilina: University of Žilina, 2012. s. 193–196. ISBN: 978-80-554-0569-8.

HORVÁTH, T.; MÜNSTER, P.; ŠIFTA, R. Simulace Triple Play služeb v sítích NG-PON2. In *Sborník příspěvků studentské konference Zvůle 2014*. 2014. s. 15–18. ISBN: 978-80-214-5005-9.

ŠIFTA, R.; ŤUPA, M.; FILKA, M. Testing of EtherSam in passive optical network EPON. In *NEW INFORMATION AND MULTIMEDIA TECHNOLOGIES – NIMT 2012*. 2012. s. 41–46. ISBN: 978-80-214-4546-8.

ŠIFTA, R.; LÁTAL, J.; FILKA, M. Comparison of the simulation model with real measurement on fiber optic network WDM-PON. In *NEW INFORMATION AND MULTIMEDIA TECHNOLOGIES NIMT – 2011*. 2011. s. 73–78. ISBN: 978-80-214-4241-2.

ŠPORIK, J.; ŠIFTA, R.; FILKA, M. POF – POLYMER OPTICAL FIBERS – APPLICATIONS. In *NEW INFORMATION AND MULTIMEDIA TECHNOLOGIES NIMT – 2011*. 2011. s. 89–92. ISBN: 978-80-214-4241-2.

Curriculum Vitæ

Ing. Radim Šifta

Osobní informace

Datum narození: 17. 11. 1986
Místo narození: Brno
Národnost: Česká
Stav: Ženatý
Adresa: 9. Května 801, 644 53 Újezd u Brna
Telefon: +420 773 986 061
E-mail: radim.sifta@gmail.com

Vzdělání

2011–nyní Vysoké Učení Technické v Brně, Ph.D.
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Obor: Teleinformatika
Téma dizertace: Kvalita služeb v optických přístupových sítích

2009–2011 Vysoké Učení Technické v Brně, Ing.
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Obor: Telekomunikační a informační technika
Téma diplomové práce: DWDM v přístupových sítích

2006–2009 Vysoké Učení Technické v Brně, Bc.
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Obor: Teleinformatika
Téma bakalářské práce: Návrh sítě FTTH

2002–2006 ISS-COP, Olomoucká 61, Brno
Obor: Mechanik–elektronik, zaměření IT

Ocenění

2011 Cena děkanky FEKT, VUT v Brně za diplomovou práci
2009 Cena děkana FEKT, VUT v Brně za bakalářskou práci

Pracovní zkušenosti

2011–2015 Vědecko-technický pracovník, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací.

Participace na projektech

2014–nyní FEKT-S-14-2352, *Výzkum elektronických komunikačních a informačních systémů*, hlavní řešitel: prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

2012–nyní ED2.1.00/03.0072, *Centrum sensorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)*, hlavní řešitel: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

2013–2015 MPO FR-TI4/696, *Lokalizace a klasifikace vibrací pomocí rozprostřeného optovláknového senzoru na velké vzdálenosti*, hlavní řešitel: doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.

2011–2014 FEKT-S-11-15, *Výzkum elektronických komunikačních systémů*, hlavní řešitel: prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Určený recenzent

- Elektrevue, ISSN: 1213-1539.
- IJATES – Internet All-Electronic Journal, ISSN 1805-5443.

Publikační aktivity

- Články v odborných impaktovaných časopisech: 1.
- Články v odborných neimpaktovaných časopisech: 18.
- Články publikované v konferenčních sbornících: 13.
- Články indexované databází WoS: 4.
- Články indexované databází Scopus: 4.
- H-index dle databáze WoS: 1.
- H-index dle databáze Scopus: 1.

Uvedené informace jsou uvedeny k datu 22. 7. 2015.