VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

Ing. Radim Šifta

KVALITA SLUŽEB V OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH

QUALITY OF SERVICES IN OPTICAL ACCESS NETWORKS

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Teleinformatika

Školitel: Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Oponenti:

Datum obhajoby:

KLÍČOVÁ SLOVA
Polarizace, polarizační multiplex, FTTx, PMD, PON, BER, PER, QoS.

KEY WORDS
Polarization, polarization multiplex, FTTx, PMD, PON, BER, PER, QoS.

Dizertační práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Technická 10, Brno, 616 00.

© Šifta Radim, 2015
ISBN 80-214-
ISSN 1213-4198

OBSAH

Úvod **5**

1 Cíle dizertační práce **6**

2 Dosavadní vývoj **7**

2.1 Rozdělení optických přístupových sítí 8

2.2 Standardy pasivních optických přístupových sítí 8

3 Výsledky dizertační práce **10**

3.1 Stav optických vláken v ČR z hlediska PMD 10

3.1.1 Vyhodnocení tras 10

3.2 Závislost PMD na teplotě 12

3.2.1 Měření pasivních prvků 12

3.2.2 Analýza naměřených závislostí 12

3.3 Měření vlivu teploty na polarizačně multiplexovaný signál 14

3.3.1 Princip měření 15

3.3.2 Vyhodnocení naměřených závislostí 15

3.4 Simulace polarizačního multiplexu 17

3.4.1 Přenos dat a šumu s polarizačním oddělením 17

3.4.2 Oddělení směrů přenosu polarizačním multiplexem 20

3.5 Praktická realizace polarizačního multiplexu 22

3.5.1 Přenos dat a šumu využitím polarizačního multiplexu 22

3.5.2 Polarizační multiplex pro oddělení směrů přenosu 24

3.5.3 Polarizační multiplex na reálné trase 26

3.6 Návrh optické přístupové sítě WDM-PDM-PON 28

3.6.1 Teoretický popis systému 28

3.6.2 Návrh dynamického polarizačního kontroléru DPC 29

3.6.3 Simulační model 31

3.6.4 Analýza výsledků simulace 33

4 Závěr **36**

Literatura **37**

ÚVOD

Požadavky na šířku přenosového pásma neustále rostou a lze říci, že lidé jsou v dnešní době na internetové konektivitě závislí. To je dáno především využíváním nejmodernějších hlasových, datových a video služeb, jejichž kvalita se neustále zvyšuje.

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. 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.

Praktická část práce je rozdělena do šesti podkapitola. 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 vlákně.

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 model simuluje obousměrný přenos na stejné vlnové délce s polarizačním oddělením. Poznatky získané ze simulačních modelů byly následně ověřeny praktickým měřením v laboratorním prostředí i na reálné 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 (PON) 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 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 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 (POL-MUX), 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:

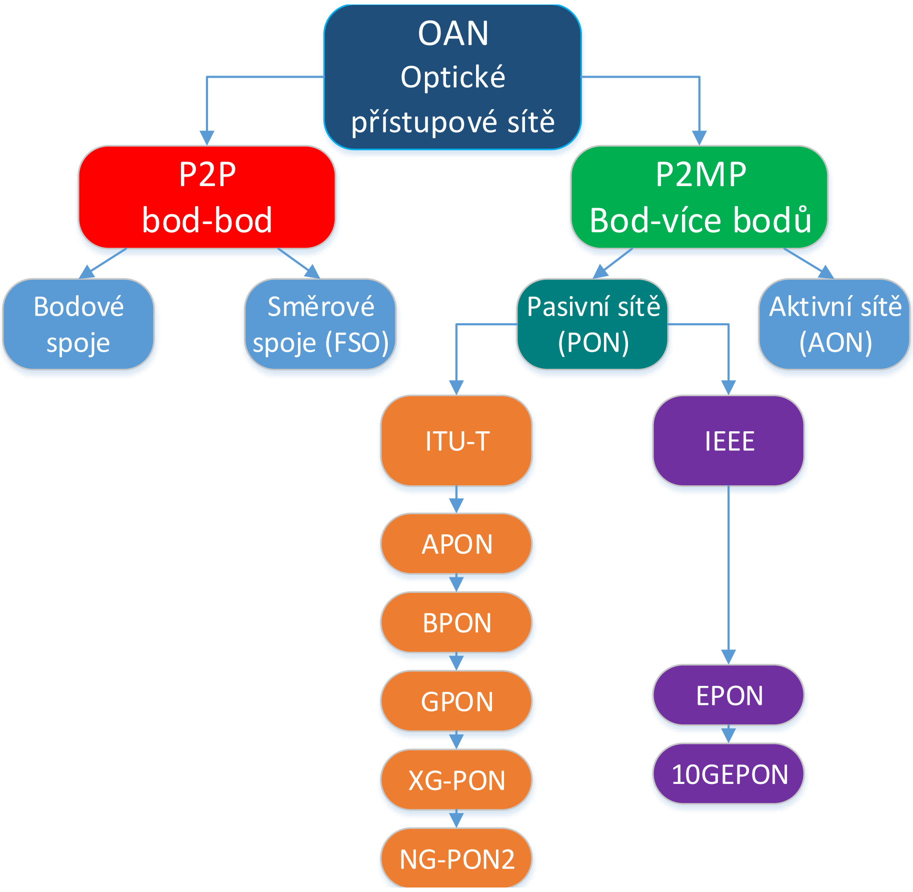
- Posouzení stavu optických tras v ČR z hlediska PMD.
- Analýza závislosti PMD na změnách okolní teploty.
- Vliv teplotních změn na polarizačně multiplexovaný signál.
- Měření a vyhodnocení negativního vlivu přenosových parametrů fyzické vrstvy na parametry kvality služeb.
- Ověření funkce polarizačního 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 DOSAVADNÍ VÝVOJ

Je to již 17 let, kdy byla standardizována první optická přístupová síť. 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).

Optické přístupové sítě označujeme zkratkou FTTx (Fiber To The x), kde písmeno x udává, o jaký konkretní typ se jedná. V prostředí České republiky se nejčastěji setkáme se sítěmi FTTB (Fiber To The Building) – vlákno do budovy, méně často se setkáme se sítěmi FTTH (Fiber To The Home) – vlákno do domu. Mezi další typy patří [2]:

- FTTC (Fiber To The Curb) – optická vlákna jsou zavedena do účastnického rozvaděče a odtud jsou koncoví uživatelé připojení 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.
- FTTA (Fiber To The Anthena) – optická vlákna jsou použita pro datovou konektivitu vysílacích stanic LTE (Long Term Evolution).



Obr. 2.1: Obecné rozdělení optických přístupových sítí

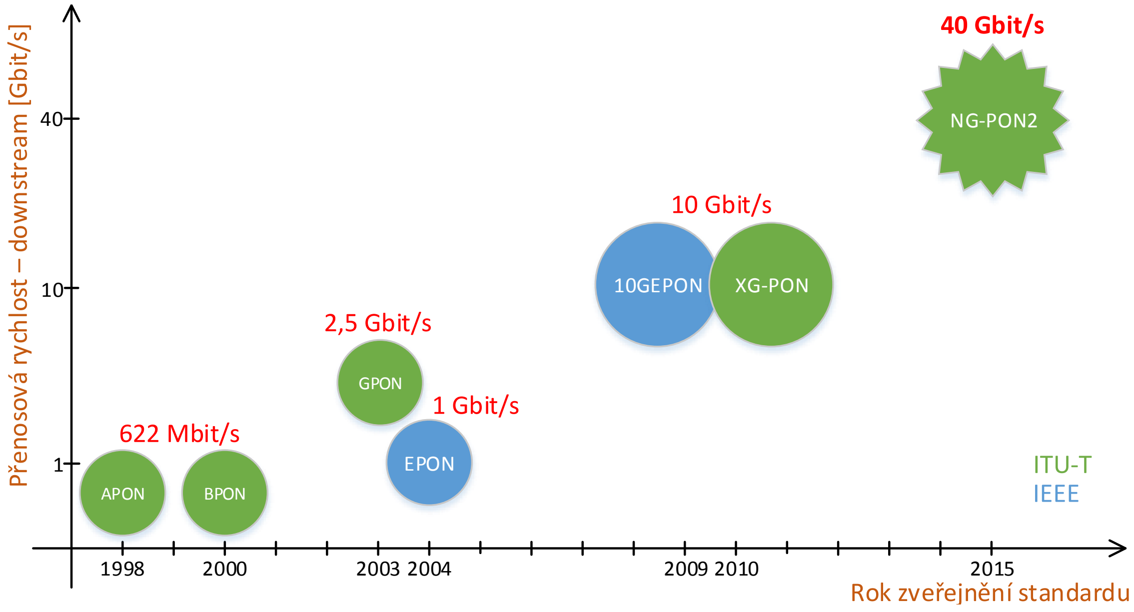
2.1 Rozdělení optických přístupových sítí

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 sítě vytvářející spojení bod–bod (P2P), bod–více bodů (P2MP) a dle použitých prvků na aktivní nebo pasivní sítě. V případě sítí P2MP pak dále můžeme sítě dělit podle použitého multiplexu a v neposlední řadě dle standardů ITU-T a IEEE. Rozdělení optických přístupových sítí je na obrázku 2.1.

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. 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. splittery, respektive pasivními multiplexery.

2.2 Standardy pasivních optických přístupových sítí

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.



Obr. 2.2: Vývoj standardů PON

APON (ATM PON) byla první standardizovanou PON sítí ITU-T 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) s možností využití separace směrů pomocí vlnového multiplexu WDM (Wavelength Division Multiplexing). Přenosová rychlost byla doplněna o symetrickou variantu 622,08 Mbit/s [4].

GPON (Gigabit Passive Optical Network), standardizované dle ITU-T G.984 v roce 2003. Přenosové rychlosti se zvýšily na 1,244 Gbit/s nebo 2,488 Gbit/s, se zachováním zpětné kompatibility s APON/BPON. Pro přenos dat je využito opět ATM buněk a nově GEM (GPON Encapsulation Method) rámců [5].

XG-PON (X Gigabit PON) byla představena v roce 2010 pod označením ITU-T G.987. Přenosová rychlost se zvýšila na 9,953 Gbit/s v sestupném směru, pro vzestupný směr zůstala přenosová rychlost 2,455 Gbit/s. Standard je zpětně kompatibilní s GPON [6]. Vzájemná koexistence GPON a XG-PON variant je řešena separací vlnových délek pomocí WDM.

EPON (Ethernet PON) – standard IEEE 802.3ah vydaný v roce 2004. EPON pro přenos dat využívá standardní rámce protokolu Ethernet. Standard definuje dva typy, a to EPON1 (1000BASE-PX10) a EPON2 (1000BASE-PX20). Rozdíl mezi oběma typy je v maximálním fyzickém dosahu a dělícím poměru. Přenosové rychlosti byly stanoveny symetricky 1,25 Gbit/s [3]. Použité vlnové délky jsou v podobném rozsahu jako u GPON, jejich porovnání je v tabulce 2.1. 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.

10GEPON (10 Gigabit EPON) – standard IEEE 802.3av vydaný v roce 2009. Navazuje na EPON, z čehož plyne zpětná kompatibilita. 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. Vzájemná koexistence s EPON je zajištěna časovým multiplexem TDM (Time Division Multiplexing) 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 [11].

Tab. 2.1: 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
Dělící poměr	1:16	1:64	1:256	1:32	1:32	1:256
Dosah [km]	20	20	20	20	20	40

NG-PON2 – cílem nového standardu bylo vybrat vhodnou technologii, která by umožňovala přenosové rychlosti až 40 Gbit/s, fyzický dosah systému až 40 km bez použití zesilovačů s dělícím poměrem minimálně 1:64 a to se zachováním zpětné kompatibility se stávajícími PON sítěmi standardizovanými dle ITU-T. V roce 2012 byla zvolena pro NG-PON2 kombinace technologií časového a hustého vlnového multiplexu, označované nejčastěji jako TWDM-PON nebo TDM-WDM-PON [14]. V současné době je standard ITU G.989 stále ve fázi tzv. „draftu“. Systémová architektura NG-PON2 udává použití 4–8 párů vlnových délek pro TWDM kanál s možností rozšíření o více vlnových délek do budoucna, dosah systému 40 km při dělícím poměru až 1:256 [7]

3 VÝSLEDKY DIZERTAČNÍ PRÁCE

Praktická část dizertační práce je rozdělena do několika částí vedoucích k výslednému návrhu pasivní širokopásmové optické přístupové sítě založené na kombinaci vlnového a polarizačního multiplexu WDM-PDM-PON.

3.1 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.

3.1.1 Vyhodnocení tras

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.

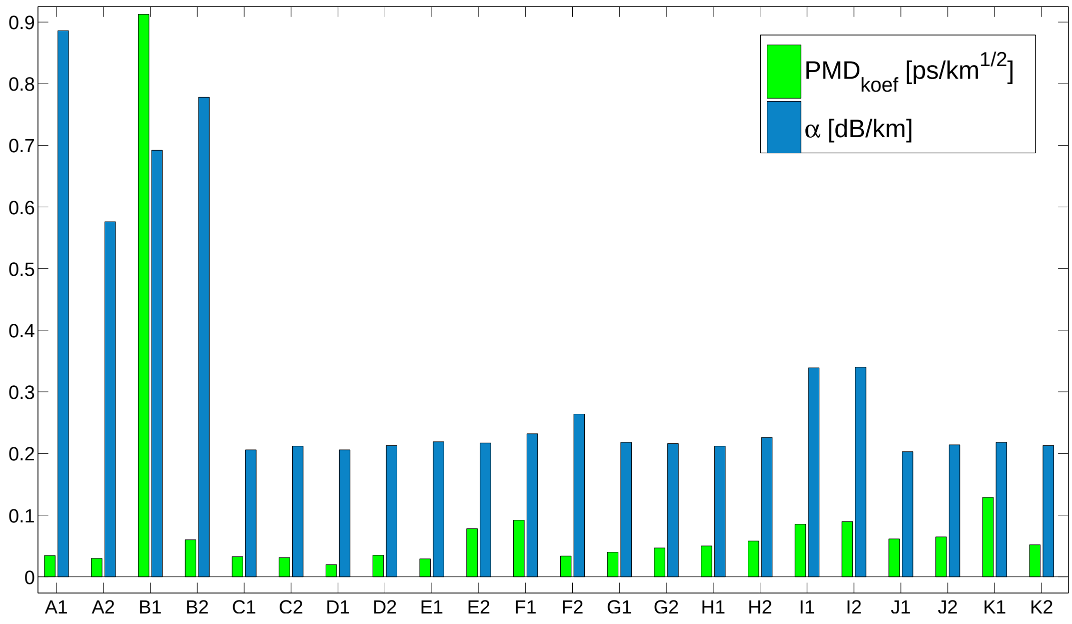
Tab. 3.1: PMD vybraných optických tras v ČR

Trasa	**Vlákno**	**PMD [ps]**	**Délka [m]**	**PMD$_{koef}$[ps/$\sqrt{km}$]**	**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 3.1 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. Pro měření byl

použit modul EXFO FTB-5700. 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 [8], [1]. Pro přenosové rychlosti 40 Gbit/s je limit pouze 2,5 ps. 100G systémy využívající koherentního příjmu, polarizačního multiplexu a kvadraturní fázové modulace (QPSK) jsou vůči PMD podstatně odolnější a limit je přibližně 20 ps [10].

Vzhledem k různým délkám tras je vhodné posuzovat jejich stav na základě PMD koeficientu, jehož hodnota by neměla překročit 0,4 ps/$\sqrt{\text{km}}$ pro trasy s celkovou délkou do 400 km a 0,2 ps/$\sqrt{\text{km}}$ pro trasy delší [8].



Obr. 3.1: Porovnání měrného útlumu a disperzního koeficientu pro různé trasy

Z tabulky 3.1 a grafu 3.1 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 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 ps/$\sqrt{\text{km}}$ a trasa tak byla z hlediska doporučených limitů nevyhovující, čemuž odpovídá i značně zvýšený měrný útlum 0,692 dB/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 dB/km, přitom PMD koeficient dosahoval nízké hodnoty 0,0345 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.

3.2 Závislost PMD na teplotě

Polarizační vidová disperze je závislá na celé řadě faktorů, kde významnou roli hraje změna teploty, která spolu s mechanickým namáháním způsobuje vznik dvojlomu v optickém vlákně. Klimatické podmínky jsou v různých zemích na světe zcela rozličné a můžeme se setkat s velkými teplotními rozdíly. Optické distribuční sítě jsou kromě samotných optických vláken tvořeny také dalšími prvky, které mohou procházet z venkovních prostředí do budov a tím se teplota mění mnohokrát podél celé distribuční sítě.

3.2.1 Měření pasivních prvků

Simulace teplotních změn byla vytvářena pomocí termokomory Vötch Vc^3 7018. 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 vlákně G.657.A,
- rozbočovač (splitter) 1:8.

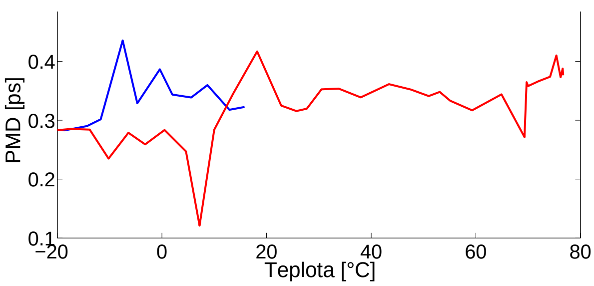
Pro měření PMD bylo využito precizní sestavy GINTY (General Interferometric Method) kanadské společnosti EXFO. Rozsah teplot byl nastaven pro všechny testovací scénáře vyjma samotných vláken shodně. Z výchozích 20 °C docházelo k ochlazování na přibližně −20 °C a následně k oteplování na přibližně 80 °C. Teplotní krok byl pro samotná optická vlákna nastaven obdobně, pouze ochlazování bylo nastaveno na hodnotu přibližně −30 °C. Každé měření trvalo 12 hodin a PMD přitom byla měřena v intervalu každých 15 minut.

3.2.2 Analýza naměřených závislostí

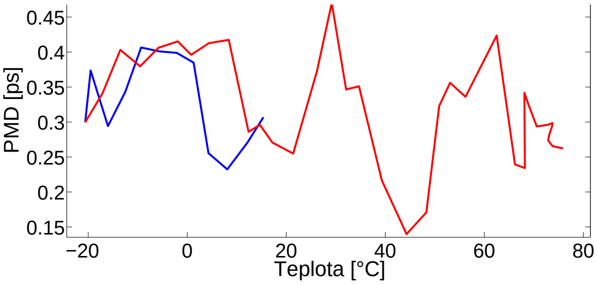
Na obrázku 3.2 jsou souhrnně zobrazeny výsledky pro konektory typu SC (Standard Connector) a FC (Ferrule Connector) pro rovné ferule PC (Polished Connector) i šikmé APC (Angle Polished Connector). V grafech jsou zobrazeny dva průběhy, kde modrý odpovídá ochlazování z cca 20 °C na −20 °C a červený průběh odpovídá oteplování z −20 °C na 80 °C.

Testování závislosti PMD na teplotě byly podrobeny i smotky optických vláken G.652.D (500 m) a G.657.A (500 m). Na obrázku 3.3 jsou tyto průběhy závislostí zobrazeny spolu s výsledky pro přípravek se třemi optickými sváry a planárním rozbočovačem s dělícím poměrem 1:8. Pro měření smotků vláken na rozdíl od konektorů předřadné vlákno použito nebylo. Výsledky měření jsou souhrnně uvedeny v tabulce 3.2.

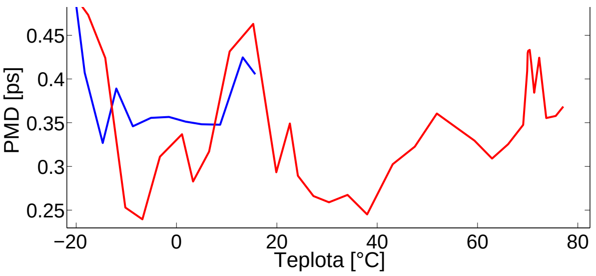
Při celkovém zhodnocení výsledků závislosti PMD na teplotě pro výše testované konektorové spoje dospějeme k závěru, že stochastický charakter PMD se u všech dosažených náměrů výrazně projevil a u žádné z naměřených závislostí není možné sledovat plynulou změnu PMD na teplotě. Nejmenšího variačního rozpětí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



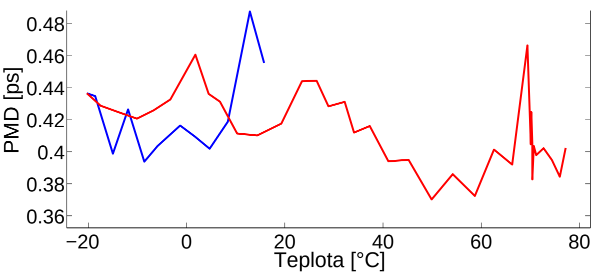
(a) SC/PC



(b) FC/PC

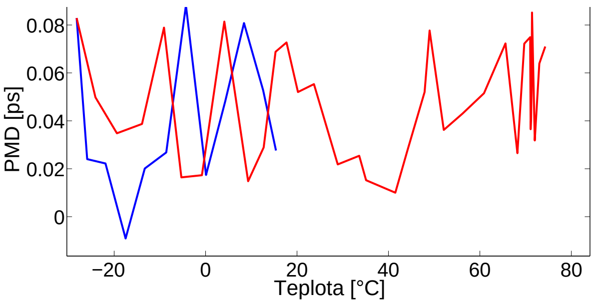


(c) SC/APC

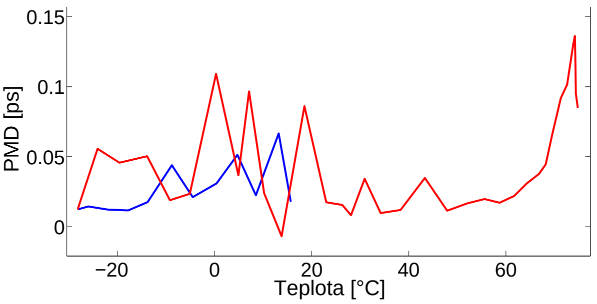


(d) FC/APC

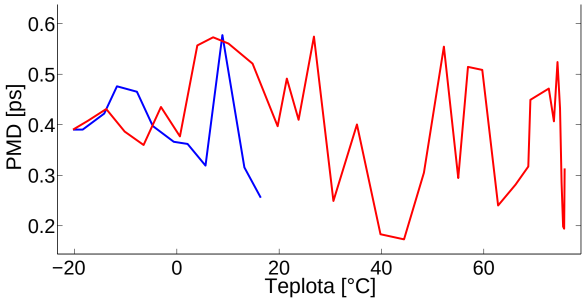
Obr. 3.2: Závislost PMD na teplotě pro konektorové spoje. Modrý průběh odpovídá ochlazování, červený průběh oteplování



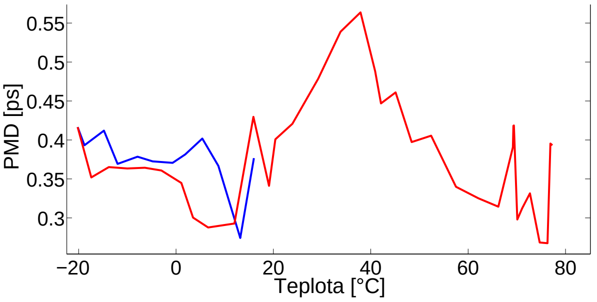
(a) G.652.D



(b) G.657.A



(c) Sváry

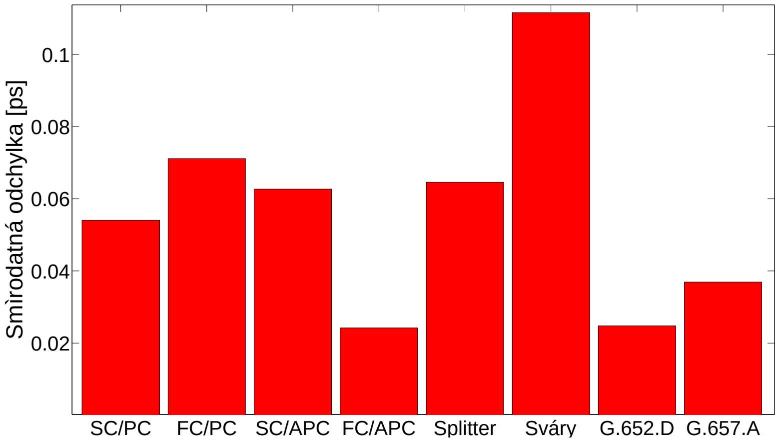


(d) Rozbočovač 1:8

Obr. 3.3: Závislost PMD na teplotě pro vlákna, sváry a rozbočovač. Modrý průběh odpovídá ochlazování, červený průběh oteplování

Tab. 3.2: 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



Obr. 3.4: Sloupcové zobrazení směrodatné odchylky pro měřené vzorky

Nejlépe jsou naměřené výsledky porovnatelné pomocí směrodatné odchylky, která nejlépe určuje míru variability. Nejvyšší směrodatné odchylky dosahovaly náměry pro přípravek s třemi optickými sváry na vlákně G.657.A, nejmenší pak konektorový spoj typu FC/APC. Statistické údaje byly zpracovány ze 48 hodnot pro každý uvedený vzorek.

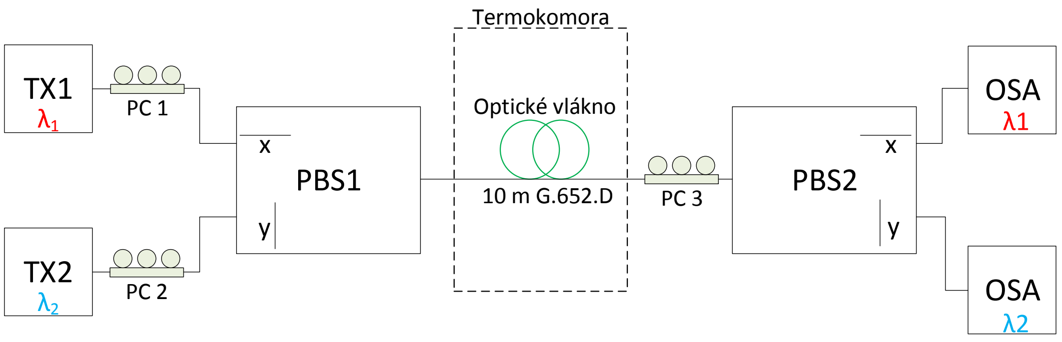
Z výše prováděných měření plyne, že pokud dochází ke změnám okolní teploty, dochází k velkým změnám PMD a to i na několikanásobek svojí běžné hodnoty. K těmto změnám dochází u všech prvků optické distribuční sítě.

3.3 Měření vlivu teploty na polarizačně multiplexovaný signál

Podobně jako v předchozí podkapitole 3.2, kde byla měřena závislost parametru PMD na teplotě, tak byl testován vliv teploty na změnu úhlu polarizace v optickém vlákně polarizačně multiplexovaného signálu. 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.

3.3.1 Princip měření

Pro měření byla použita sestava, která je zobrazena na obrázku 3.5. Jako testovací vzorek vlákna byl použit 10 m dlouhý patchord vlákna typu G.652.D. Okolní teplota byla udržována na hodnotě 20 ± 1 °C.



Obr. 3.5: Blokové schéma měření závislosti úhlu polarizace na teplotě

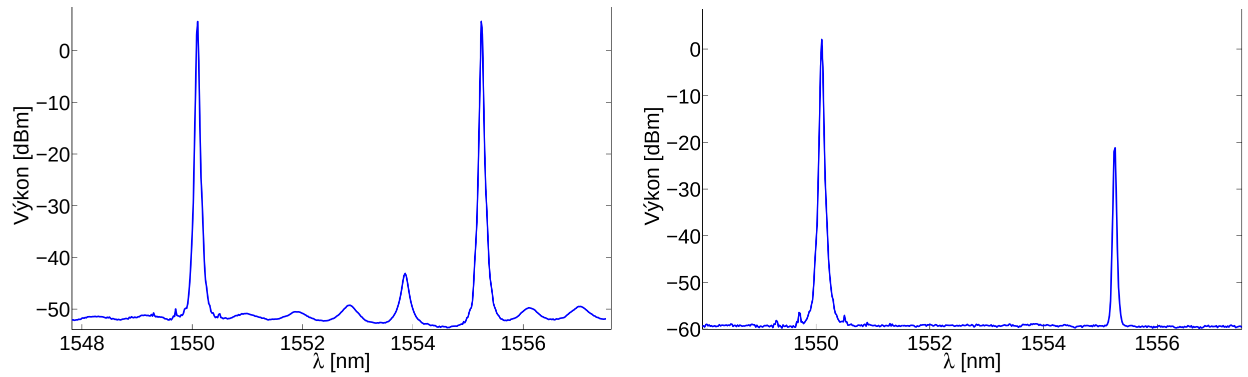
Byly použity dvě laserové diody na vlnových délkách $\lambda_1 = 1\,550,1\,\text{nm}$ a $\lambda_2 = 1\,555,2\,\text{nm}$, aby bylo možné pomocí optického spektrálního analyzátoru (OSA) rozlišit signály navázané do obou polarizačních rovin. Optické signály z laserů TX1 a TX2 byly pomocí polarizačních kontrolérů PC1 a PC2 nastaveny tak, aby byly optimálně multiplexovány polarizačním splitterem PBS_1. Multiplexovaný signál je zobrazen na obrázku 3.6a. Výkony obou laserů byly nastaveny na hodnoty $TX1 = 5,61\,\text{dBm}$ a $TX2 = 5,65\,\text{dBm}$.

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 PBS_2. Jeho výstupy byly následně kontrolovány pomocí optického spektrálního analyzátoru OSA (Optical Spectrum Analyzer). Demultiplexovaný signál je zobrazen na grafu 3.6b. Výchozí rozdíl mezi výkony v jednotlivých polarizačních rovinách byl nastaven na hodnotu 23,22 dB.

3.3.2 Vyhodnocení 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 naopak ohříváno z 20 °C na 70 °C a po té ochlazováno zpět na 20 °C. Na 3D grafickém zobrazení 3.7 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.

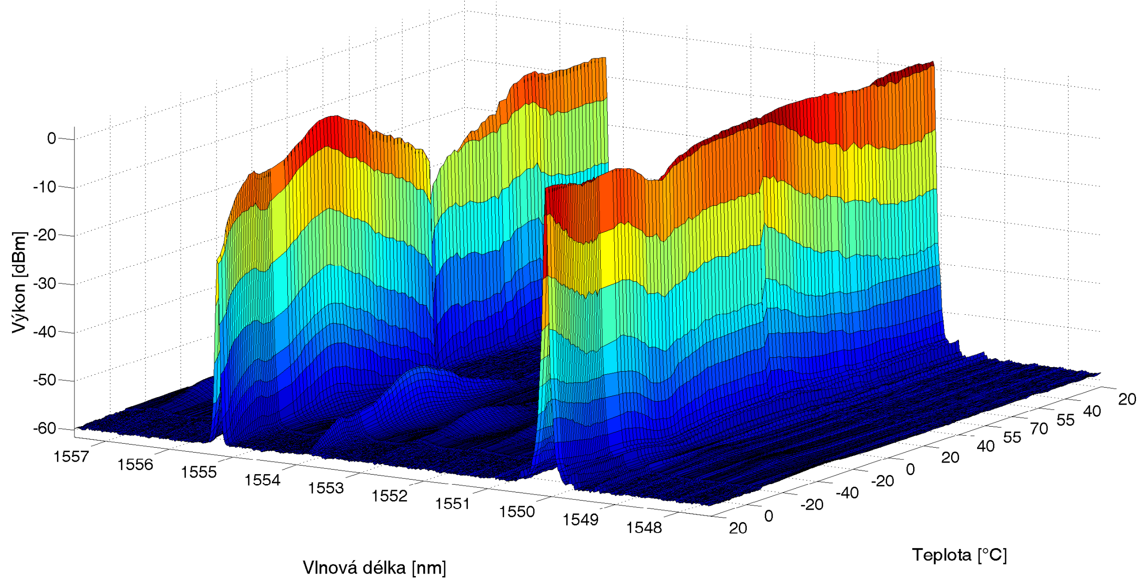
V průběhu ochlazování docházelo k postupnému růstu výkonové úrovně i v druhé polarizační rovině (y) až při teplotě −40 °C, kdy výkonová úroveň vzrostla z původní hodnoty $-21,17\,\text{dBm}$ na 0,74 dBm. Po té se s rostoucí teplotou opět snižovala výkonová úroveň až při



(a) Multiplexovaný signál

(b) Demultiplexovaný signál

Obr. 3.6: Spektra multiplexovaného a demultiplexovaného signálu



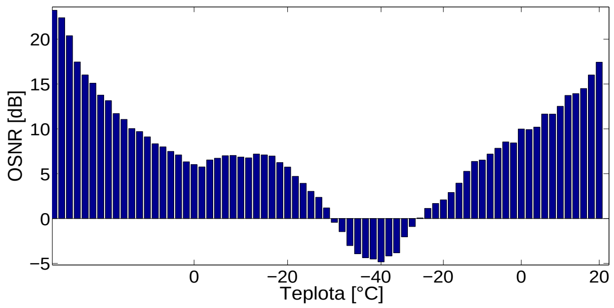
Obr. 3.7: Prostorové zobrazení závislosti výkonu v polarizačních rovinách na teplotě

teplotě 20 °C dosáhla hodnoty −15, 33 dBm. Po vytemperování termokomory po přibližně 30 minutách došlo ke snížení přibližně na původní hodnotu −24 dBm.

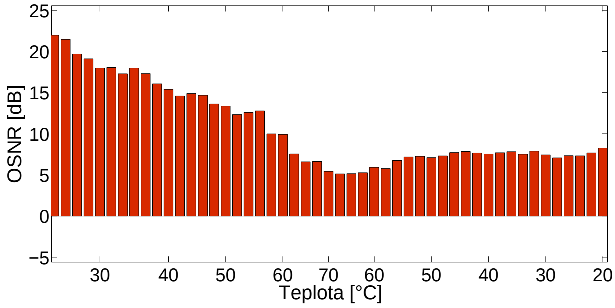
Současně je možné vidět, že v polarizační rovině x se výkonová úroveň snižovala minimálně, řádově o desetiny dB. Od −20 °C do −40 °C je však možné pozorovat pokles výkonové úrovně s největším minimem −4, 15 dBm na −40 °C, což odpovídá maximální výkonové úrovni v polarizační rovině y. Nastala situace, kdy došlo k otočení úhlu polarizace téměř o 90 °C vlivem okolní teploty. To má za následek změnu nejen úhlu polarizace, ale také stavu polarizace. Pří 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 °C dochá-

zelo 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.



(a) Závislost OSNR při ochlazování



(b) Závislost OSNR při oteplování

Obr. 3.8: Porovnání vlivu ochlazování a oteplování vlákna na OSNR

Na obrázku 3.8 je možné porovnat vliv ochlazování a oteplování vlákna na změnu odstupu signálů mezi oběma polarizačními rovinami (v grafech označeno jako OSNR – Optical Signal to Noise Ratio). Na základě těchto grafických výstupů je zřejmé, že stav polarizace v optickém vlákně je výrazně citlivější na ochlazování vlákna do záporných hodnot, než oteplování do vysokých kladných hodnot teploty.

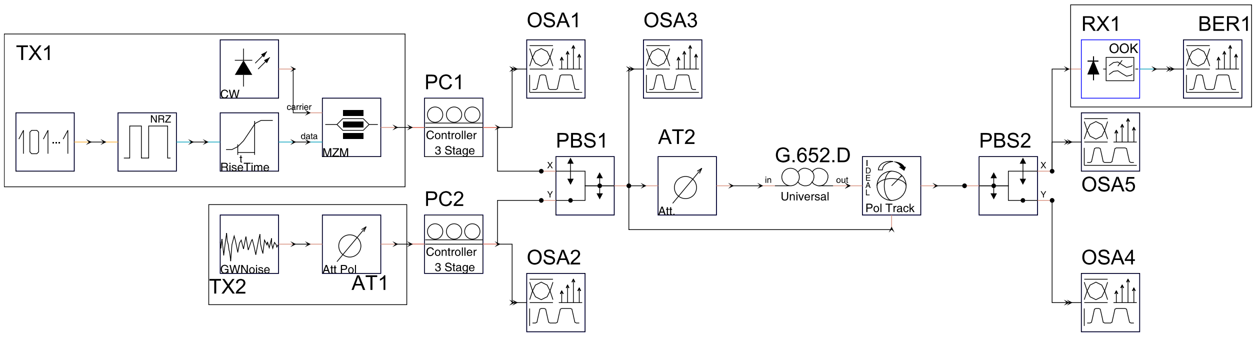
3.4 Simulace polarizačního multiplexu

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.

3.4.1 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 3.9. 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 (Polarization Beam Splitter).

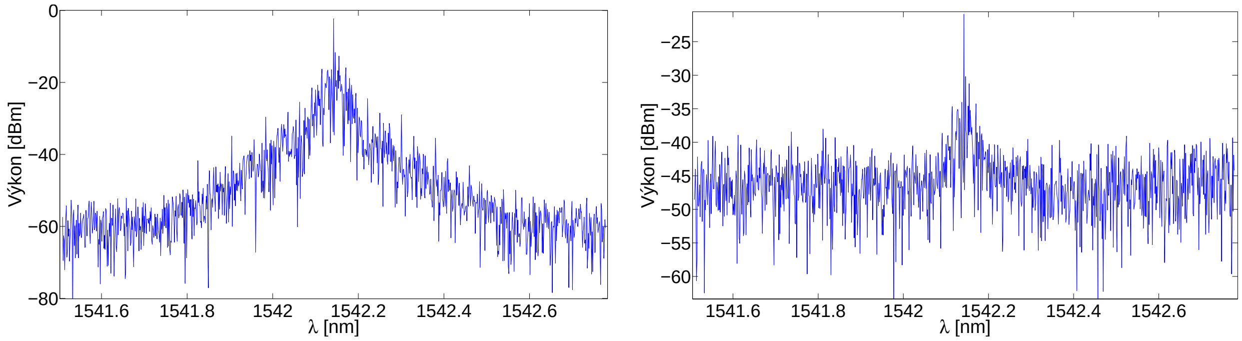
Izolace portů polarizačního splitteru byla nastavena na 22 dB. Spektrum datového signálu před multiplexací je na obrázku 3.10a. Použité vlákno je typu G.652.D s celkovou délkou 20 km.



Obr. 3.9: Blokové schéma zapojení – přenos dat a šumu

Pro udržování optimálního stavu a úhlu polarizace byl použit dynamický polarizační kontrolér (Polarization Tracker). Signál byl po té demultiplexován druhým polarizačním splitterem (PBS2). Spektrum demultiplexovaného datového signálu je na obrázku 3.10b.

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 Analougue TV). Pomocí proměnného atenuátoru AT1 byl postupně zvyšován výkon v polarizační rovině přenášející signál s analogovým šumem. Současně při tom probíhalo měření bitové chybovosti BER (Bit Error Rate). Tabulka 3.3 zobrazuje výsledky simulace pro bitovou chybovost a Q-faktor při určitém odstupu obou multiplexovaných signálů. Tento odstup je označen jako OSNR. Grafické znázornění závislosti bitové chybovosti a Q-faktoru je na obrázku 3.11.



(a) Spektrum datového signálu před multiplexací (OSA1)

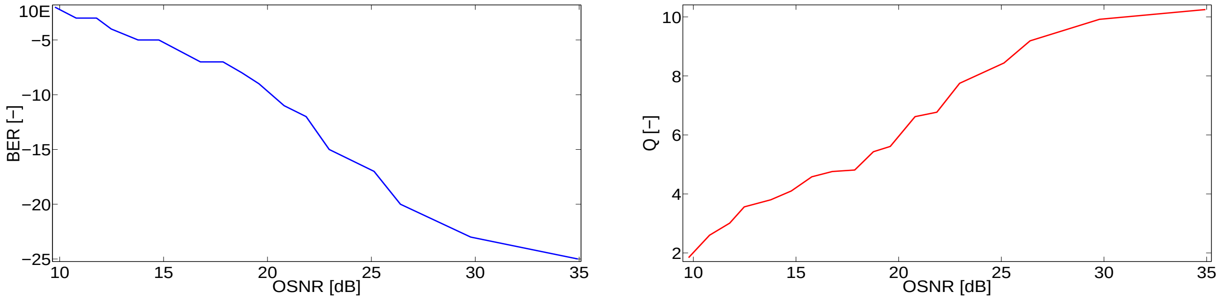
(b) Spektrum datového signálu po demultiplexaci (OSA5)

Obr. 3.10: Spektra obou signálů před multiplexací a po demultiplexaci

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 odstupu signálů na degradaci datového signálu je patrný i z diagramů oka na obrázku 3.12. Pokud polarizačním multiplexem přenášíme datový signál s analogovým signálem s kmitočty řádově desítek MHz, hraje velkou roli izolace mezi polarizačními rovinami.

Tab. 3.3: Výsledky simulací pro BER a Q-faktor – přenos dat a šumu

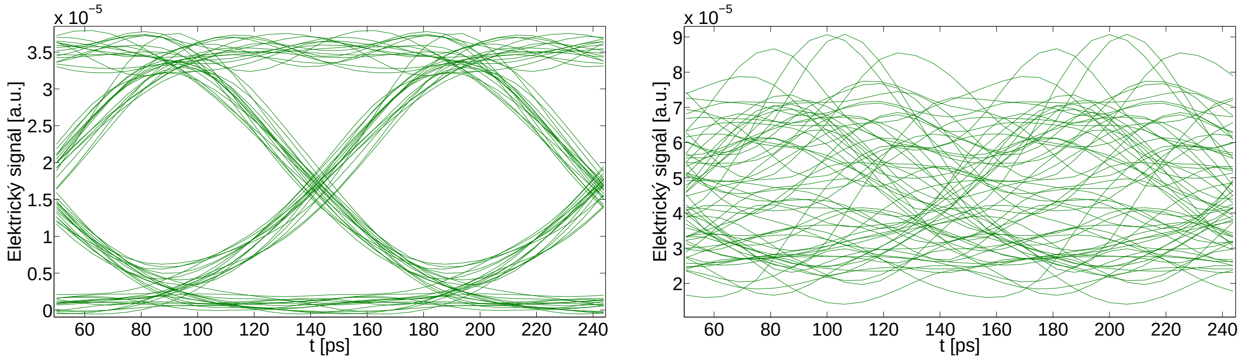
$P_{\lambda 1}$ **[dBm]**	$P_{\lambda 2}$ **[dBm]**	**OSNR [dB]**	**BER** [–]	**Q** [–]
$-20,86$	$-55,8$	34,94	5,66E−25	10,25
$-20,86$	$-50,64$	29,78	1,06E−23	9,92
$-20,86$	$-47,26$	26,4	2.04E−20	9,19
$-20,86$	$-45,99$	25,13	1,63E−17	8,44
$-20,86$	$-43,83$	22,97	4,56E−15	7,75
$-20,86$	$-42,72$	21,86	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. 3.11: Závislost BER a Q-faktoru pro přenos datového signálu a šumu



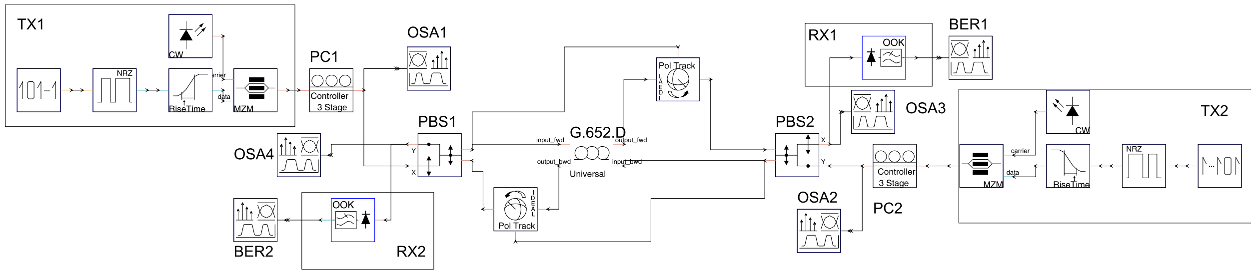
(a) Diagram oka pro OSNR = 35 dB

(b) Diagram oka pro OSNR = 10 dB

Obr. 3.12: Diagramy oka pro různé OSNR – přenos dat a šumu

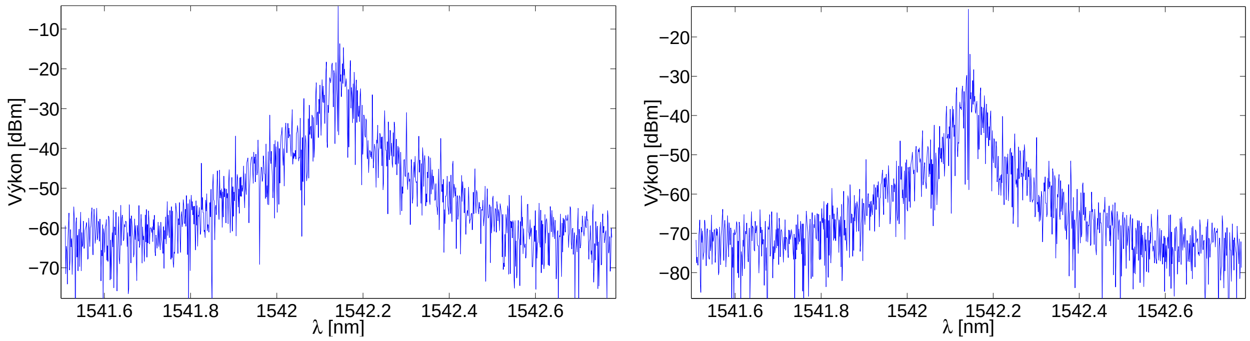
3.4.2 Oddělení směrů přenosu polarizačním multiplexem

Druhý simulační model je zaměřený na využití polarizačního multiplexu pro oddělení směrů přenosu. Blokové schéma simulovaného zapojení je na obrázku 3.13. 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 3.9.



Obr. 3.13: Blokové schéma zapojení – obousměrný přenos

Signál z vysílače TX1 byl prostřednictvím polarizačního kontroléru PC1 navázán do prvního polarizačního splitteru PBS1. Spektrum signálu před multiplexací je na obrázku 3.14a. Dále signál procházel obousměrným optickým vláknem G.652.D s celkovou délkou 20 km. Po průchodu vláknem došlo k demultiplexaci pomocí druhého polarizačního splitteru PBS2. Spektrum demultiplexovaného signálu je na obrázku 3.14b. V opačném (vzestupném) směru je zapojení zcela shodné. V porovnání s výstupem simulací pro přenos datového signálu a šumu na obrázku 3.10a a 3.10b vidíme, že při využití polarizačního multiplexu pro oddělení směrů přenosu nedochází k výraznému ovlivňování signálu z jedné polarizační roviny do druhé.



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

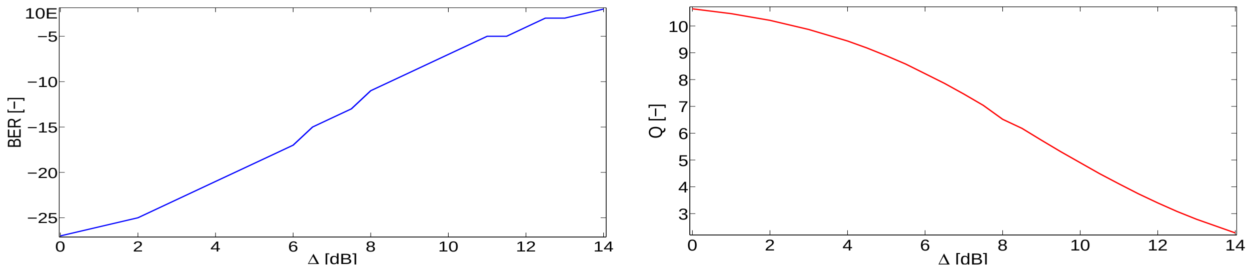
Obr. 3.14: Spektra signálu před a po multiplexaci pro sestupný směr

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 situace, kdy by vlivem okolní teploty nebo mechanickým namáháním byl měněn stav polarizace v optickém vlákně. Stejná simulace byla prováděna i v opačném směru a pro oba směry současně.

Tab. 3.4: Výsledky simulace pro BER a Q-faktor – obousměrný přenos

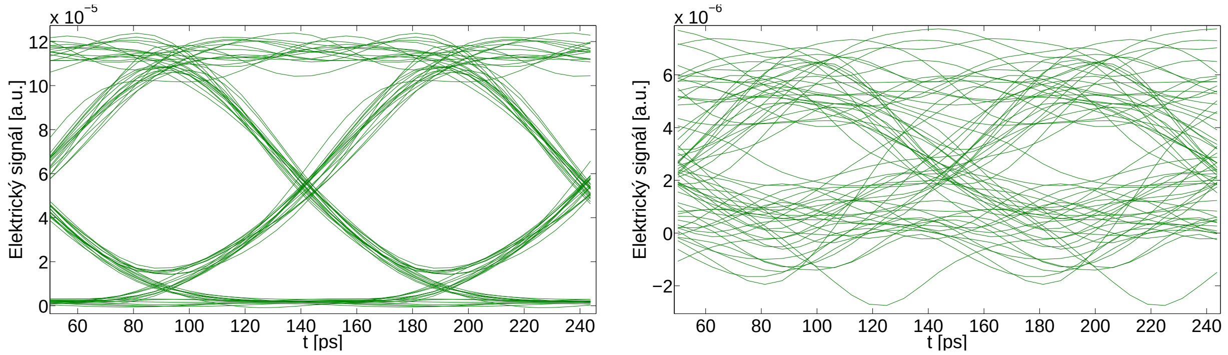
Δ [dB]	**BER** [–]	**Q** [–]	Δ [dB]	**BER** [–]	**Q** [–]
0	9,38E−27	10,64	8	1,84E−11	6,52
1	6,89E−26	10,46	8,5	3,18E−10	6,18
2	9,36E−25	10,21	9	4,57E−09	5,74
3	2,70E−23	9,87	9,5	5,31E−08	5,31
4	1,82E−21	9,44	10	4,88E−07	4,9
4,5	2,08E−20	9,18	10,5	3,52E−06	4,49
5	2,91E−19	8,89	11	2,00E−05	4,11
5,5	4.87E−18	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

Parametr Δ v tabulce 3.4 udává, o kolik dB byl výkon přijímaného signálu snížen v důsledku natáčení polarizace. 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.



(a) Závislost BER na Δ (b) Závislost Q-faktoru na Δ

Obr. 3.15: Závislost BER a Q-faktoru pro obousměrný přenos



(a) Diagram oka pro Δ=0 dB (b) Diagram oka pro Δ=13 dB

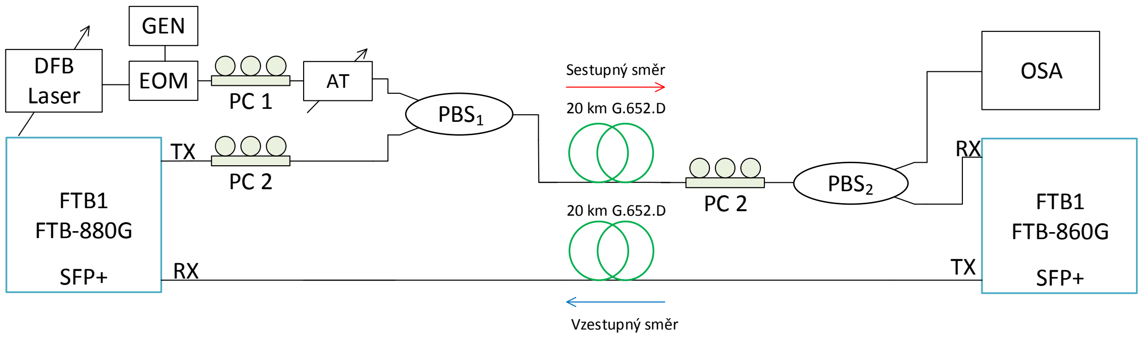
Obr. 3.16: Diagramy oka pro různé Δ – obousměrný přenos

3.5 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 konkrétně 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 (Polarization Dependent Loss) apod.

3.5.1 Přenos dat a šumu využitím polarizačního multiplexu

Po té co byl přenosový 10G systém podrobně prozkoumán z hlediska výše uvedených parametrů, 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. Schéma použitého zapojení je zobrazeno na obrázku 3.17.



Obr. 3.17: Schéma měření – přenos datového signálu a šumu

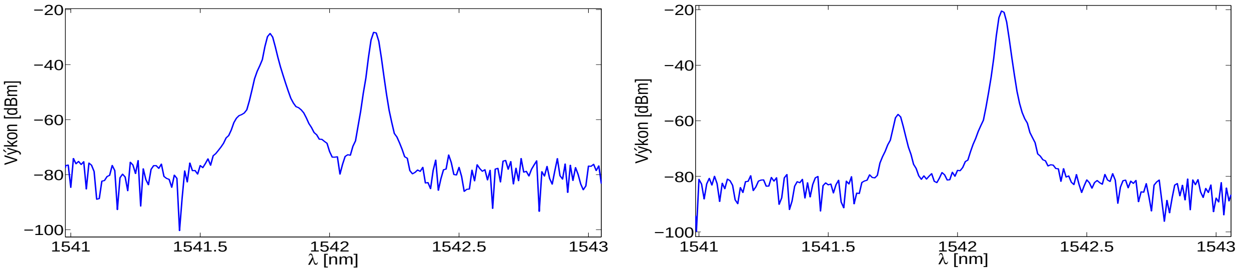
Vlnové délky SFP+ (Small Form-factor Pluggable) modulu a laditelného laseru byly nastaveny téměř shodně na $\lambda_1 = 1\,541,77\,\text{nm}$ a $\lambda_2 = 1\,541,78\,\text{nm}$. Pro možnost sledování výkonových úrovní však byl pomocný laser přelaďován na vedlejší vlnový kanál. Spektrum multiplexovaného signálu je na obrázku 3.18a. Levá nosná vlnová délka odpovídá signálu s bílým šumem a pravá datovému signálu. Demultiplexovaný signál je zobrazen na obrázku 3.18b.

Pomocí proměnného atenuátoru byl postupně zvyšován výkon v polarizační rovině s bílým šumem. Současně probíhalo měření bitové chybovosti, datové propustnosti a také měření parametrů kvality služeb QoS (Quality of Services) za pomocí standardu EtherSAM.

Tabulka 3.5 zobrazuje výsledky měření *BER* a propustnosti T při určitém výkonovém odstupu obou multiplexovaných signálů. Tento odstup je označen jako OSNR. Grafické znázornění závislosti bitové chybovosti a propustnosti na OSNR je zobrazeno na obrázku 3.19.

Tab. 3.5: Tabulka naměřených hodnot – přenos datového signálu a šumu s využitím polarizačního multiplexu

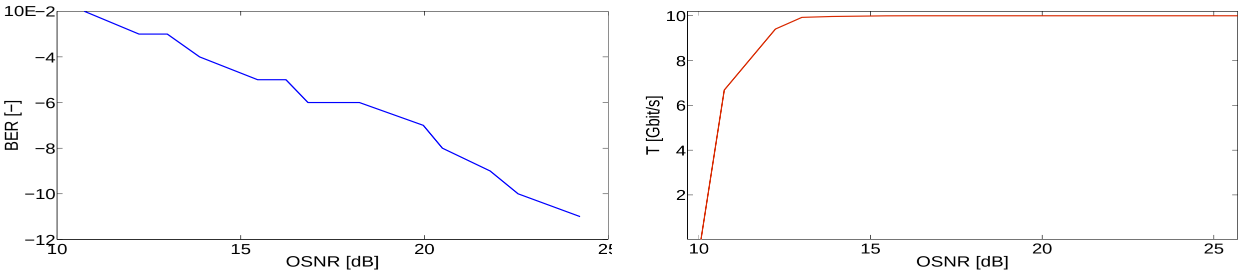
$P_{\lambda 1}$ **[dBm]**	$P_{\lambda 2}$ **[dBm]**	**OSNR [dB]**	**BER [–]**	**T [Gbit/s]**
−56, 53	−20, 54	35,99	0	10,000
−51, 33	−20, 50	30,83	0	10,000
−45, 69	−20, 50	25,19	0	10,000
−45, 34	−21, 10	24,24	9,10E−11	10,000
−43, 53	−20, 98	22,55	2,50E−10	10,000
−42, 75	−20, 96	21,79	9,70E−09	10,000
−41, 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



(a) Multiplexované signály (b) Demultiplexované signály – ideální nastavení

Obr. 3.18: Spektra multiplexovaných a demultiplexovaných signálů

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.



(a) Bitová chybovost BER (b) Propustnost T

Obr. 3.19: Závislost BER a propustnosti T pro přenos datového signálu a šumu

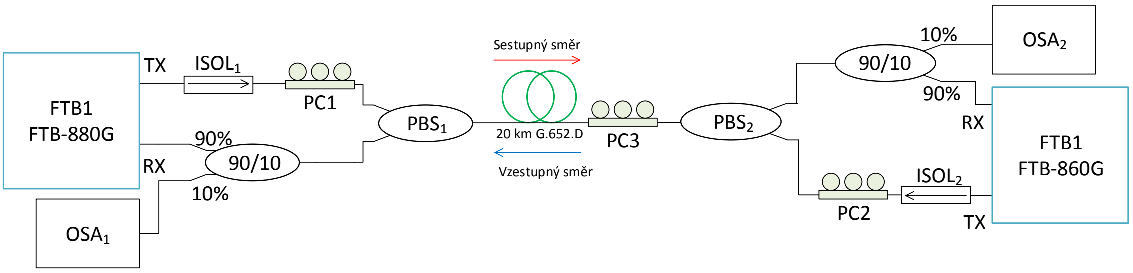
Tab. 3.6: Výsledky měření dle EtherSAM pro různé OSNR

OSNR [dB]	**25**	**20**	**18**	**16**	**14**
BER [–]	0	7,50E−07	7,30E−06	5,60E−05	1,50E−03
Video					
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
VoIP					
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
Data					
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

Výsledky měření dle standardu EtherSAM jsou uvedeny v tabulce 3.6. 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 testovaných 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.

3.5.2 Polarizační multiplex pro oddělení směrů přenosu

Toto finální laboratorní měření bylo vytvořeno pomocí dvou precizních SFP+ modulů Optoway SPS-2385MW-D440G s identickou vlnovou délkou 1 542,14 nm. Schéma zapojení je na obrázku 3.20.



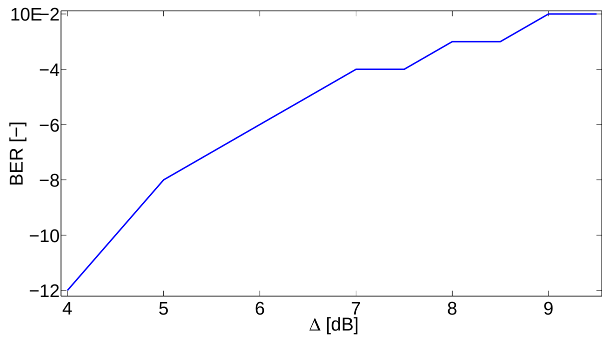
Obr. 3.20: Schéma měření – polarizační multiplex pro oddělení směrů přenosu

Vysílaný signál pro sestupný směr prochází nejprve izolátorem $ISOL_1$ a dále je signál přiveden na polarizační kontrolér PC1, kde je vhodně nastaven úhel polarizace před vstupem

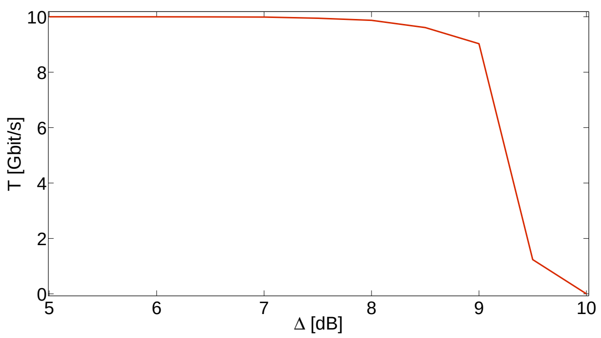
Tab. 3.7: Naměřené parametry pro dílčí směry přenosu

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

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 tohoto kontroléru byla polarizace vhodně nastavena tak, aby na odpovídajícím výstupu polarizačního splitteru PBS_2 byla maximální výkonová úroveň. Pro vzestupný směr je zapojení analogické.



(a) Bitová chybovost BER (ve směru A)



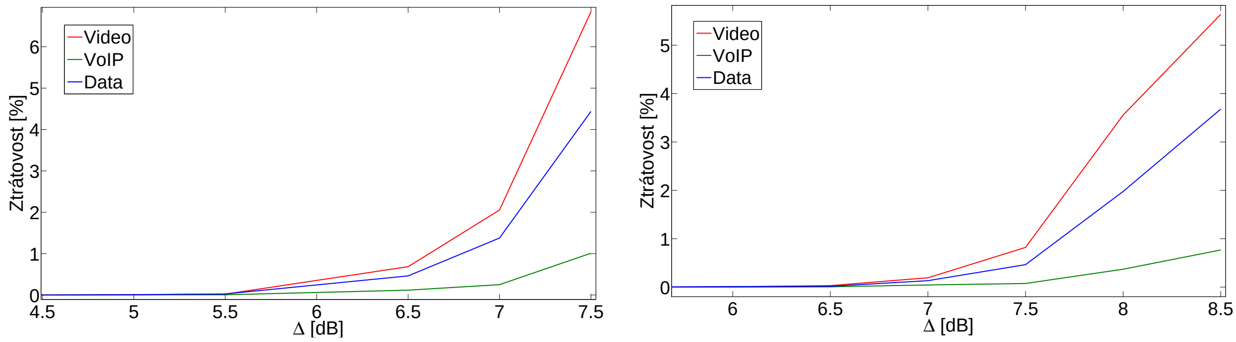
(b) Propustnost T (ve směru A)

Obr. 3.21: Závislost BER a propustnosti T pro degradování signálu natáčením polarizačních rovin

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 jsou uvedeny v tabulce 3.7. 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 tabulce parametr Δ) bylo možné sledovat, jak jsou ovlivňovány přenosové parametry. Toto měření simuluje reálnou situaci, kdy by vlivem teploty nebo mechanického namáhání došlo ke změně úhlu polarizace v přenosové trase. Závislosti bitové chybovosti a propustnosti jsou zobrazeny na obrázku 3.21. Přenosový systém začal chybovat, pokud změna úhlu polarizace způsobila pokles výkonové úrovně o 4 dB pro směr A, 6,5 dB pro směr B a 5 dB pro oba směry přenosu.



(a) směr A

(b) směr A+B

Obr. 3.22: Závislost datové ztrátovosti signálu na natáčení polarizačních rovin

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 3.22. Nejméně rostla ztrátovost pro službu VoIP (Voice over IP). 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 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.

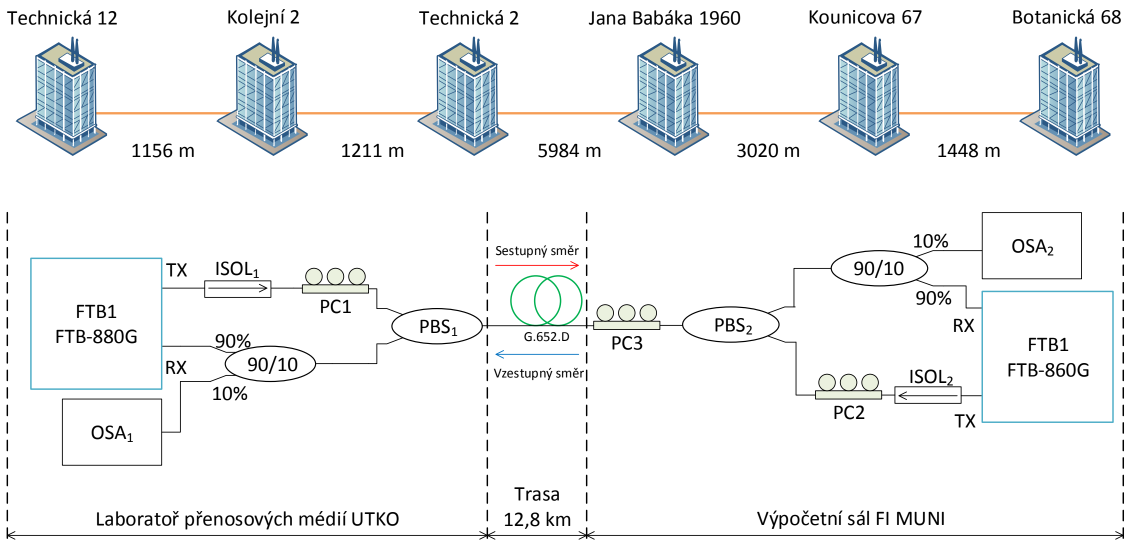
3.5.3 Polarizační multiplex na reálné trase

V souvislosti s měřením popsaným v předchozí podkapitole bylo sestaveno obdobné zapojení pro ověření funkčnosti statického polarizačního multiplexu pro praktický přenos dat na reálné optické trase s celkovou délkou 12,8 km. Schéma měřeného zapojení je na obrázku 3.23.

V laboratoři přenosových médií na Ústavu Telekomunikací VUT FEKT byla sestavena jedna vysílací a přijímací strana, stejným způsobem jako v předchozí podkapitole 3.5.2. Druhá přijímací a vysílací strana byla sestavena ve výpočetním sálu Fakulty Informatiky Masarykovy Univerzity.

Trasa mezi oběma pracovišti je součástí akademického testovacího polygonu laboratoře optických sítí Ústavu Telekomunikací. Jak jde vidět z obrázku 3.23, 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 vlákně, která se může neustále měnit zejména v důsledku změny teplot.



Obr. 3.23: Schéma zapojení měření na reálné trase

Po sestavení měřícího 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≈ 0
- 2. den – BER$\approx 10^{-12}$
- 3. den – BER$\approx 10^{-11}$
- 4. den – BER$\approx 10^{-10}$

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, postačilo by, když by byl schopný reagovat na pozvolné změny polarizace a jeho realizace by nevyžadovala rychlé optoelektronické obvody.

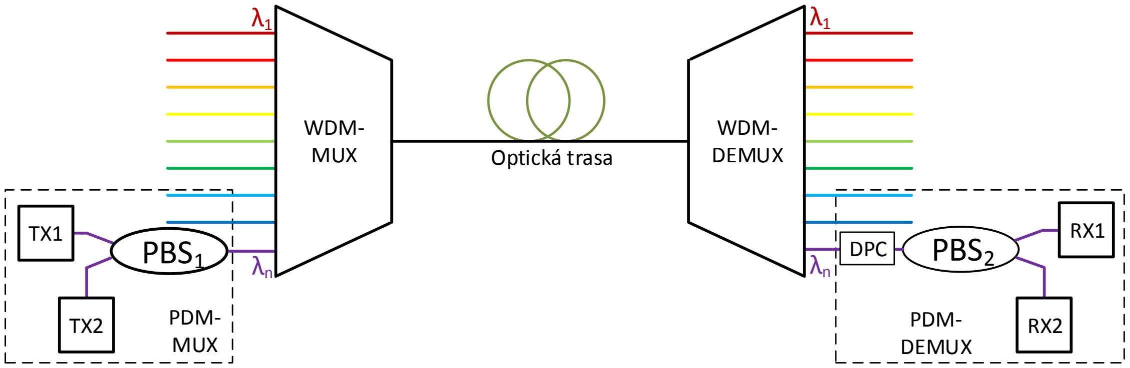
3.6 Návrh optické přístupové sítě WDM-PDM-PON

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.

3.6.1 Teoretický popis systému

Pro praktické uplatnění polarizačního multiplexování se počítá s jeho kombinováním s dalšími multiplexními systémy. Jako nejlépe implementovatelný přichází v úvahu časový nebo vlnový multiplex.

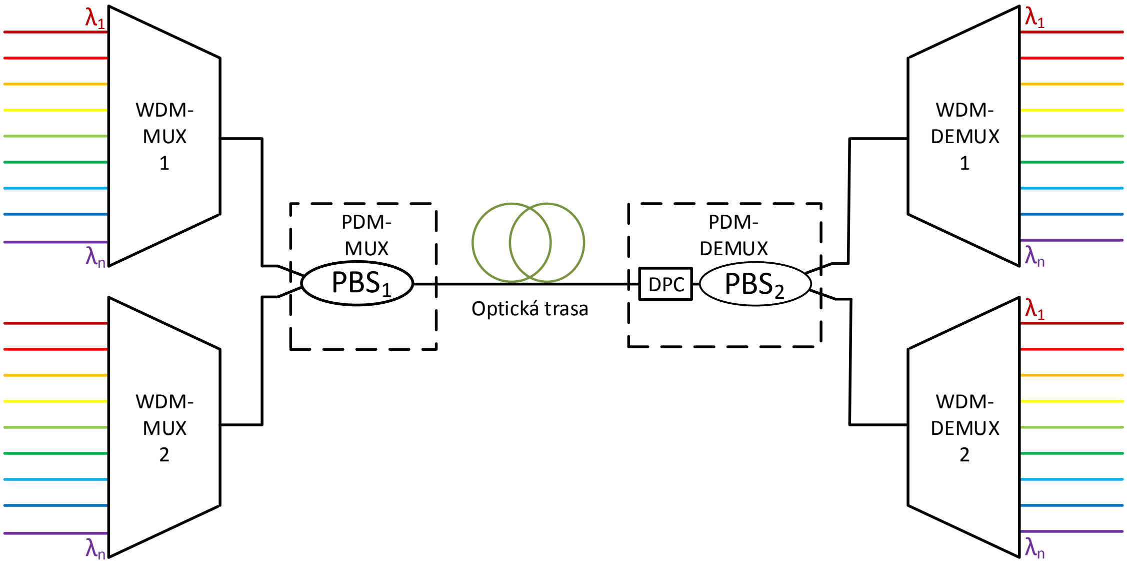
Pro finální návrh širokopásmové přístupové sítě byla vybrána kombinace vlnového multiplexu s polarizačním multiplexem. Tuto hybridní kombinaci můžeme označit jako WDM-PDM-PON. Taková hybridní síť umožňuje použití n-kanálů (vlnových délek) dle konkrétních zařízení v C nebo L pásmu. Díky polarizačnímu multiplexu je pak možné použít stejné kanály podruhé a zvýšit tak celkový počet přenášených kanálů dvakrát.



Obr. 3.24: Blokové schéma WDM-PDM-PON prvního typu

Kombinace WDM a PDM (Polarization Division Multiplexing) pro vytvoření hybridní optické přístupové sítě je možné realizovat dvěma způsoby. První možnou topologii zobrazuje obrázek 3.24. 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. Nevýhodou 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.

Z tohoto důvodu byla navržena další topologie, která je zobrazena na obrázku 3.25. 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 polarizačního splitteru PBS_1. Na konci optické trasy jsou



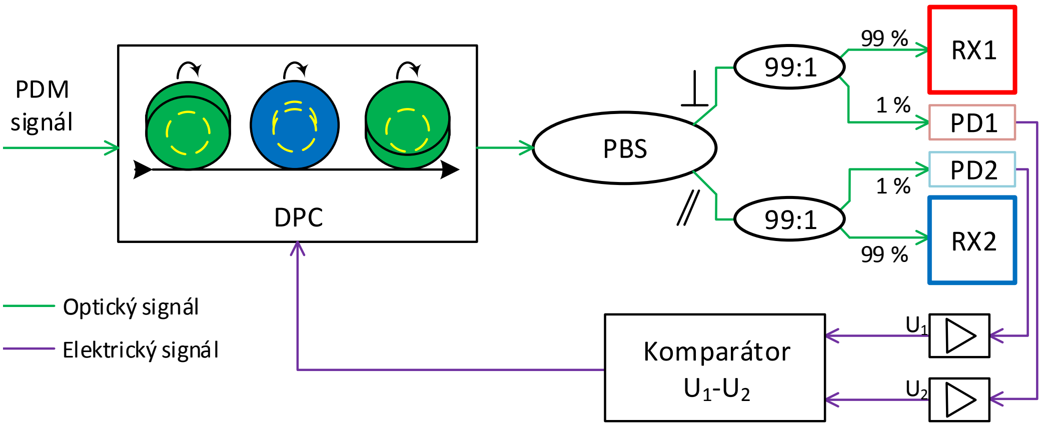
Obr. 3.25: Blokové schéma WDM-PDM-PON druhého typu

pomocí polarizačního demultiplexu (PBS_2) oba vlnově multiplexované signály rozděleny a přivedeny na odpovídající vlnový demultiplexer WDM-DEMUX1 a WDM-DEMUX2. Aby bylo možné jedním polarizačním kontrolérem kontrolovat a udržovat stav polarizace na optimální hranici, je nutné použití $2 \times n$ polarizátorů pro všechny vysílače dílčích vlnových délek.

3.6.2 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. Pro tento účel je 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 [12]. Blokové schéma tohoto kontroléru je na obrázku 3.26.

Vstupní polarizačně multiplexovaý signál prochází dynamický polarizačním kontrolérem DPC, na jehož výstupu je demultiplexační polarizační splitter PBS. Demultiplexované signály prochází couplerem s dělícím 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 fotodiodách 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 řídící signál do dynamického kontroléru. Řídící signál z komparátoru vytváří zpětnou vazbu, pomocí které je polarizace neustále udržována v ideálním nastavení. Popsaný systém je tedy díky svému principu zcela transparentní k přenášenému signálu.



Obr. 3.26: Blokové schéma dynamického polarizačního kontroléru

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 Muellerovi matice polarizačního splitteru tvar [13]:

$$M_x = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.1}$$

$$M_y = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{3.2}$$

Optický datový tok i s libovolným stavem polarizace (SOP) můžeme ve Stokesově prostoru vyjádřit jako [13]:

$$\vec{S_i} = \begin{bmatrix} S_{i0} \\ S_{i1} \\ S_{i2} \\ S_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i \\ P_i cos 2\chi_i cos 2\varphi_i \\ P_i cos 2\chi_i sin 2\varphi_i \\ P_i sin 2\chi_i \end{bmatrix}, \tag{3.3}$$

kde P_i je optický výkon, φ_i je úhel elipticity a χ_i je orientační úhel i-tého optického datového toku. 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 [9]:

$$P_{ix} = \frac{1}{2} P_i \left(1 + cos 2\chi_i cos 2\varphi_i\right), \tag{3.4}$$

$$P_{iy} = \frac{1}{2} P_i \left(1 - cos2\chi_i cos2\varphi_i\right). \tag{3.5}$$

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

$$P_x = P_{1x} + P_{2x} = \frac{1}{2} P_1 \left(1 + cos2\chi_1 cos2\varphi_1\right) + \frac{1}{2} P_2 \left(1 + cos2\chi_2 cos2\varphi_2\right), \tag{3.6}$$

$$P_x = P_{1y} + P_{2y} = \frac{1}{2} P_1 \left(1 - cos2\chi_1 cos2\varphi_1\right) + \frac{1}{2} P_2 \left(1 - cos2\chi_2 cos2\varphi_2\right). \tag{3.7}$$

Pro dva optické datové toky s ortogonálním stavem polarizace $\vec{S_1}$ a $\vec{S_2}$ platí [13]:

$$\chi_2 = -\chi_1, \tag{3.8}$$

přičemž pro úhel φ_1 a φ_2 platí:

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \varphi_1 + \frac{1}{2}\pi, \qquad 0 \leq \varphi_1 \leq \frac{1}{2}\pi, \\ \varphi_2 &= \varphi_1 - \frac{1}{2}\pi, \qquad \frac{1}{2}\pi < \varphi_1 < \pi. \end{aligned} \tag{3.9}$$

Substitucí rovnic 3.4 a 3.5 do rovnic 3.6 a 3.7 dostaneme tvar:

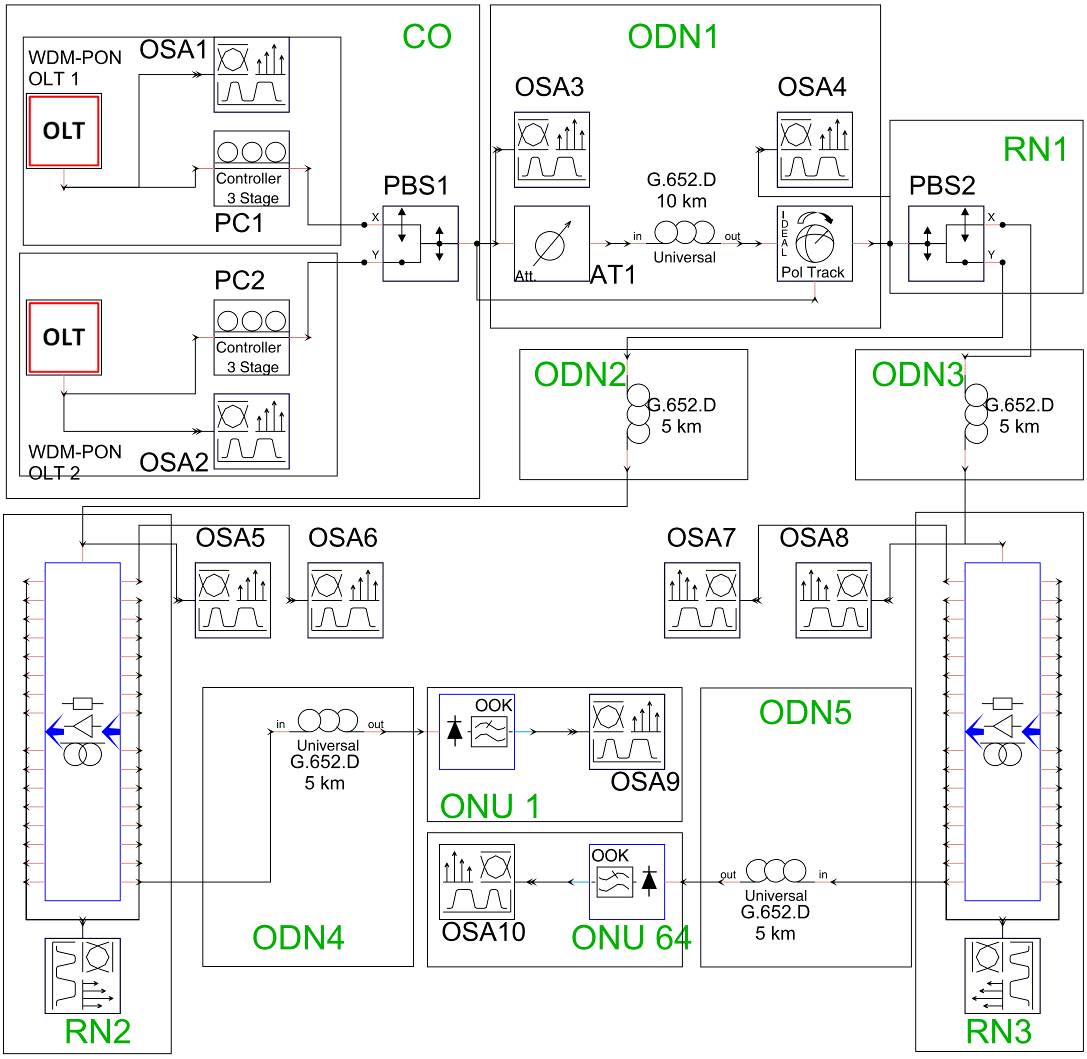
$$P_x = \frac{1}{2}\left(P_1 + P_2\right) + \frac{1}{2}\left(P_1 - P_2\right) cos2\chi_1 cos2\varphi_1, \tag{3.10}$$

$$P_y = \frac{1}{2}\left(P_1 + P_2\right) - \frac{1}{2}\left(P_1 - P_2\right) cos2\chi_1 cos2\varphi_1. \tag{3.11}$$

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 řídící napětí, pomocí kterého je ovládán dynamický kontrolér. 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).

3.6.3 Simulační model

Simulační model optické přístupové sítě WDM-PDM-PON je založený na myšlence popsané v druhé částí podkapitoly 3.6.1. Blokové schéma je na obrázku 3.27. Blok CO (Central Office) označuje hlavní centrální uzel, který obsahuje dvě OLT (Optical Line Terminal) jednotky WDM-PON systému. Každá OLT jednotka obsahuje 32 vysílačů TX1 až TX32 v rozsahu C-pásma při odstupu 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



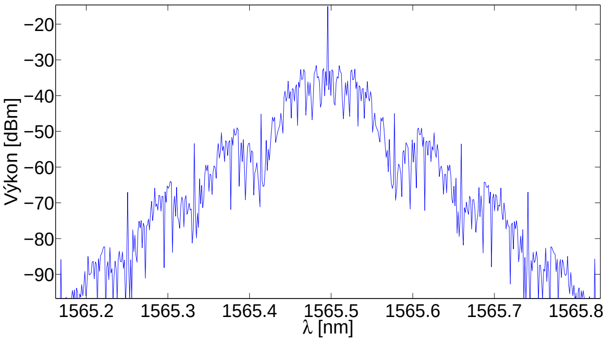
Obr. 3.27: Schéma simulačního modelu WDM-PDM-PON

PBRS (Pseudo Random Bit Sequence). Výstupní signály vysílačů byly shodně polarizovány pomocí polarizátorů a přivedeny na vlnové multiplexery MUX 1 až MUX 4. Tyto čtyři multiplexované signály byly dále multiplexovány na jeden výstupní multiplexovaný signál.

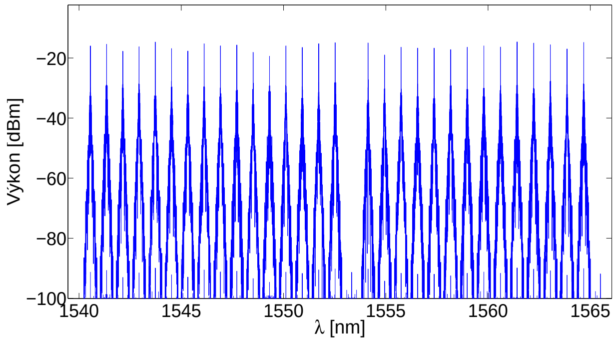
Výstupní vlnově multiplexované signály z jednotky OLT 1 a OLT 2 byly dále pomocí polarizačních kontrolérů a polarizačního splitteru PBS1 polarizačně multiplexovány. Spektra výstupních signálů z OLT 1 a OLT 2 jsou identická. Parametr PER byl pro polarizační splitter nastaven na hodnotu 25 dB.

Za blokem CO následuje první segment optické distribuční sítě ODN1 (Optical Distribution Network), který je tvořen 10 km optického vlákna G.652.D. Za ním následuje blok RN1 (Remote Node), který je tvořen polarizačním splitterem PBS2 ve funkci polarizačního demultiplexeru. Distribuční síť je dále rozdělena do dvou větví ODN2 a ODN3 se shodnou délkou vláken 5 km. Následují bloky vlnových demultiplexerů RN2 a RN3. Multiplexované WDM signály, nesoucí 32 kanálů byly vyděleny na dílčí vlnové kanály. Spektrum 17. vyděleného kanálu je na obrázku 3.28a. Spektra ostatních kanálů po demultiplexaci jsou zobrazena na 3.28b.

Výstupní demultiplexované signály jsou dále přiváděny přes další distribuční sítě 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.



(a) Spektrum 17. WDM kanálu

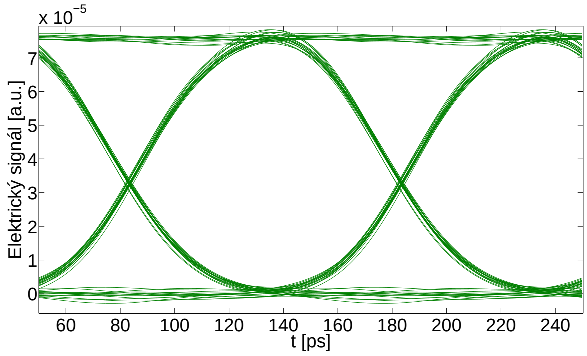


(b) Spektrum ostatních kanálů

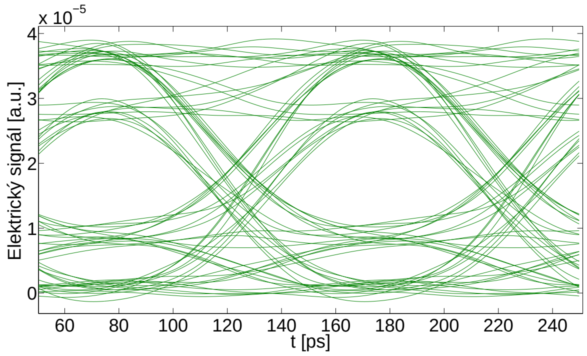
Obr. 3.28: Spektra demultiplexovaných signálů

3.6.4 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. Vliv nastavení tohoto parametru je možné nejlépe sledovat pomocí diagramu oka. Na obrázku 3.29 jsou znázorněny diagramy oka pro výsledný demultiplexovaný a demodulovaný signál v elektrické oblasti pro různé nastavení parametru PER.



(a) PER = 30 dB

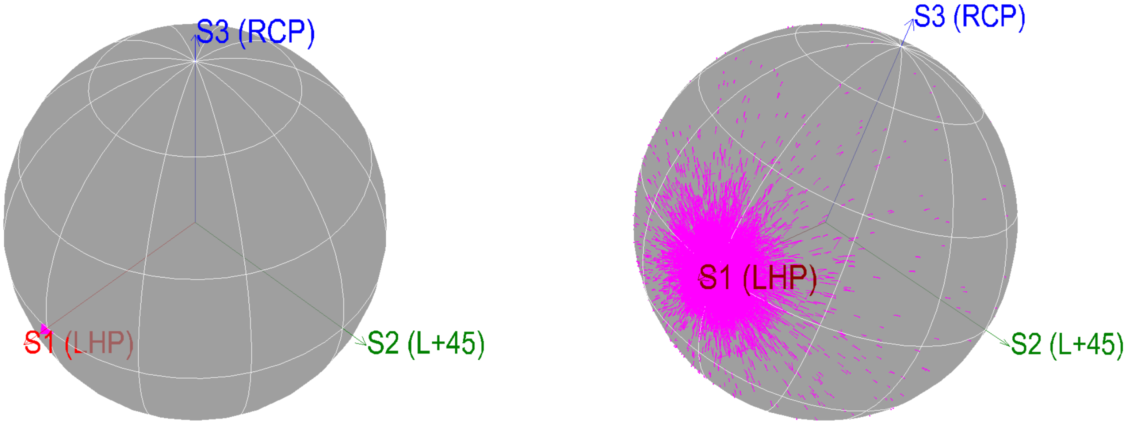


(b) PER = 5 dB

Obr. 3.29: Diagramy oka pro různé nastavení 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 3.29a 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 a bitové chybovosti 10^{-11}. Nejvýraznější zhoršení signálu nastává při snížení PER na hodnotu 5 dB, kdy dochází k výraznému uzavírání oka a bitová chybovost dosahuje hodnoty 10^{-4}.



(a) WDM signál z OLT1

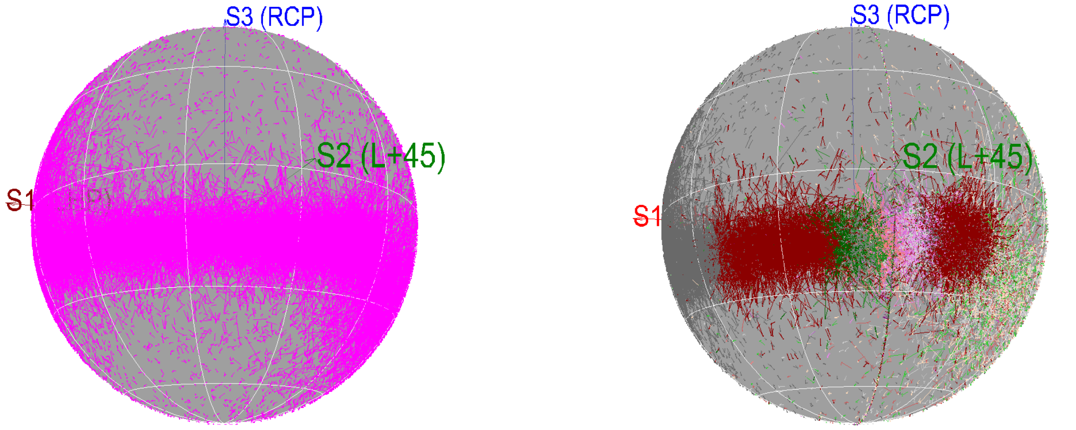
(b) Polarizačně demultiplexovaný signál z OLT1

Obr. 3.30: Zobrazení stavu polarizace pomocí Poincarého koule před a po polarizačním multiplexem

Z hlediska polarizačního multiplexování je možné analyzovat změny stavu polarizace pomocí Poincarého koule, které jsou zobrazeny na obrázku 3.30. Koule 3.30a odpovídá signálu z OLT1. 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 3.30a, signál je lineárně polarizovaný, neboť bod S (v obrázku označen růžovou značkou) leží pouze v rovině x a y. Dále je možné určit, že je zcela polarizovaný, neboť bod S leží na povrchu Poincarého koule (platí DOP = 1).

Po průchodu multiplexovaného signálu polarizačním splitterem PBS 1 již dochází ke změně z lineárně polarizovaného signálu na elipticky polarizovaný signál. Stav polarizace polarizačně demultiplexovaného signálu je zobrazen na Poincarého kouli na obrázku 3.30b. Jak je z tohoto obrázku patrné, signál průchodem demultiplexačním splitterem již není zcela lineárně polarizovaný a stav polarizace se mění na eliptický.

Po dalším průchodu demultiplexovaného signálu 5 km optického vlákna se stav polarizace dále mění na eliptický, přičemž na obrázku 3.31a je vidět, že převážná část bodů je soustředěna



(a) Signál po průchodu ODN2 (b) Demultiplexované signály z OLT1

Obr. 3.31: Stav polarizace signálů před a po vlnovém demultiplexu

v rovině x a y, takže signál lze považovat i za částečně lineárně polarizovaný. Platí, že všechny body leží na povrchu koule, tudíž je signál stále zcela polarizovaný.

Po vlnovém demultiplexu signálu byla vykreslena Poincarého koule, která sestává ze všech dílčích vlnově demultiplexovanýh signálů odpovídající OLT jednotky (různé barvy odpovídají různým vlnovým délkám). Je zde výrazná analogie mezi touto koulí a koulí na obrázku 3.31a. 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 Poincarého koulí zobrazili dílčí vlnově demultiplexovaný signál, výsledek by byl tvořen částí bodů zobrazených na obrázku 3.31b. 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 případně při nastavení PER na hodnotu 5 dB, dochází vlivem silného polarizačního přeslechu ke změně stavu polarizace z původního částečně lineárně polarizovaného signálu na zcela elipticky polarizovaný signál. Na Poincarého kouli má takový signál rovnoměrné rozložení bodů na celém povrchu. 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 signálu, pokud se jedná 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.

4 ZÁVĚR

Cílem teoretické části práce byl popis dosavadního vývoje optických přístupových sítí, jejich rozdělení a používaných standardů.

Praktická část práce byla rozdělena do šesti dílčích podkapitol. První podkapitola byla zaměřena na stav reálných vláken v České republice. Trasy byly posuzovány z hlediska koeficientu PMD, měrného útlumu a jejich vzájemné vazby. Limit pro PMD koeficient $0{,}4\,\mathrm{ps}/\sqrt{\mathrm{km}}$ byl porušen u jedné z tras s délkou 4 km, kde dosahoval hodnoty $0{,}9125\,\mathrm{ps}/\sqrt{\mathrm{km}}$. Výsledky potvrzují nutnost zabývat se měřením a redukcí vlivu PMD i v oblasti přístupových sítí.

Ke změně PMD dochází výrazně při změně okolní teploty. Druhá kapitola se věnuje měření této závislosti, která doposud nebyla blíže prozkoumána. Měření probíhalo pro různé vzorky v teplotních rozsazích od $-30\,°\mathrm{C}$ až do $+80\,°$. Na základě analýzy a statistického vyhodnocení bylo prokázáno, že nejvíce se měnila směrodatná odchylka PMD pro přípravek s optickými sváry, které by tak mohly představovat kritickou část distribuční sítě z hlediska změn PMD.

Ve třetí podkapitole byl zkoumán vliv teploty na polarizačně multiplexovaný signál. Měření bylo prováděno v rozsahu teplot $-40\,°\mathrm{C}$ až $+80\,°\mathrm{C}$. Na základě vyhodnocení výsledků bylo zjištěno, že polarizačně multiplexovaný signál je podstatně více náchylný na ochlazování, při kterém výkon signálu z jedné polarizační roviny výrazně pronikal do druhé.

Ve čtvrté podkapitole byla provedena simulace dvou modelů 10G přístupových sítí. První model simuloval přenos datového signálu a šumu na stejné vlnové délce při polarizačním oddělení. 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.

Z poznatků získaných simulacemi byl laboratorně sestaven systém polarizačního multiplexu popsaný v páté podkapitole. Při přenosu datového signálu a šumu bylo zjištěno, že odstup užitečného signálu od šumu po 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. Tento scénář byl ověřen i na reálné trase dlouhé 12,8 km. Systém byl měřen z hlediska vlivu změny 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 návrh vysokorychlostní optické přístupové sítě WDM-PDM-PON založené na kombinaci vlnového a polarizačního multiplexu. Simulační model byl vytvořen 2×32 WDM kanály a dosahoval maximální přenosové rychlosti 640 Gbit/s sdílené mezi 64 koncových uživatelů na vzdálenost 20 km. Bylo ověřeno, že změna stavu polarizace nemá negativní dopad na parametry kvality služeb. Kritická je změna úhlu polarizovaného signálu a také parametr PER. Pro udržování optimálního úhlu polarizace byl navržen dynamický polarizační kontrolér. Navržená přístupová síť by tak měla dynamicky reagovat na změny polarizace, redukovat vliv PMD a zdvojnásobit šířku přenosového pásma.

LITERATURA

[1] Brouček, J.: Disperze CD a PMD. *Profiber Networking*, 2012.

[2] Girard, A.: *FTTx PON Technology and Testing*. Canada, Quebec: EXFO, 2005.

[3] IEEE: Recommendation 802.3ah – Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks. *IEEE*, 2004.

[4] ITU-T: Recommendation G.983.1 – Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON). *ITU-T*, 2005.

[5] ITU-T: Recommendation G.984.1 – Gigabit-capable passive optical networks (GPON). *ITU-T*, 2008.

[6] ITU-T: Recommendation G.987 – 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems. *ITU-T*, 2012.

[7] ITU-T: Recommendation G.989.1 – 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements. *ITU-T*, 2013.

[8] Johnson, M.: *Optical Fibres, cables and systems*. Geneva, Switzerland: ITU, 2009.

[9] 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.

[10] Radil, J.: Nové směry v návrhu a realizaci sítí – vyřeší koherentní systémy vše? In *Optical communication 2013*, Cesnet, Action-M, 2014, s. 1–22.

[11] Tanaka, K.; Agata, A.; Horiuchi, Y.: EEE 802.3av 10G-EPON Standardization and Its Research and Development Status. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, ročník 28, č. 4, 2010.

[12] Yao, X.: Optical communications based on optical polarization multiplexing and demultiplexing. 2005, patent US 20050265728 A1.

[13] 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.

[14] Yuanqiu, L.; Effenberger, F.: TWDM-PON – The solution of choice for NG-PON2. *Huawei*, ročník 2013, č. 68, 2013.

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	ISŠ-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 senzorických, 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

- Elektrorevue, 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.

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na optické přístupové sítě a 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 vložným 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.