



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ŘEŠENÍ NASAZENÍ DWDM SYSTÉMŮ NA 100G A 400G

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Grenar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2016

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**
Ústav telekomunikací

Student: Bc. David Grenar

ID: 145999

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Řešení nasazení DWDM systémů na 100G a 400G

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte analýzu transportních přenosových systémů DWDM s rychlostmi 10G, jejich principů, pravidel a omezení. Řešte podmínky migrace na vyšší rychlosti 40G, 100G a v budoucnu i na 400G. Dále budou posouzeny vlivy disperze (CD a PMD), nelineární jevy a parazitní modulace FWM, SPM a XPM. Při řešení zvažte modulační formáty DP-QPSK a 16-QAM. Součástí práce bude i měření vybraných parametrů na síti 100G.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. CENTA, Brno 2009.
- [2] MAKOVEJS, S. High-speed optical fibre transmission using advanced modulation formats, PhD thesis, UCL, 2011.
- [3] KARÁSEK, M., RADIL, J., BOHÁČ, L. Optimalizace přenosu NRZ dat s rychlostí 10Gb/s po vláknech G.652 bez linkových zesilovačů: simulace a experiment. Praha : Agentura Action, 2003. ISBN 80-86742-03-2. In Optické komunikace O.K. 2003, s. 77-82 [Optické komunikace O.K. 2003, Praha, 21.10.2003-22.10.2003, CZ].

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 25.5.2016

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

Konzultant diplomové práce: Ing. Vladimír Schindler, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzou transportních přenosových systémů DWDM s rychlostí 10G, jejich principy, pravidly a omezeními těchto přenosových systémů. Pozornost je věnována podmínkám migrace transportních přenosových systémů na vyšší rychlost 40G, 100G a v budoucnu na 400G. Teoretická část je zaměřena především na vlivy chromatické a vidové disperze, přičemž jsou dále zohledněny i vlivy nelineárních jevů a parazitních modulací FWM, SPM a XPM v modulačních formátech DP-QPSK a 16-QAM. V praktické části je provedeno nejdříve standardní měření přenosových parametrů na síti 10G a následně experimentální měření přenosových parametrů na síti 100G.

KLÍČOVÁ SLOVA

transportní přenosový systém DWDM; přenosová rychlost 10G, 40G, 100G; migrace; chromatická disperze; vidová disperze; nelineární jevy; parazitní modulace FWM, SPM a XPM; modulační formáty DP-QPSK a 16-QAM.

ABSTRACT

The aim of this master's thesis is an explanation of the problem of transport optical networks with Dense Wavelength Division Multiplexing. DWDM principle, properties and limit of transmission system. Focus of thesis is also specification properties of migration transmission system to higher speed 40G, 100G and in future to 400G. Part of thesis is outlined the basic division of multiplexing system, there are discussed the basic solutions of wavelength multiplexes CWDM and DWDM, focus for the effects of nonlinear phenomena and parasitic modulation FWM, SPM and XPM in modulation DP-QPSK and 16-QAM. In practice part we will make measurement of properties of 10G and then experimental measurement parameters on 100G.

KEYWORDS

transport optical networks with Dense Wavelength Division Multiplexing; transmission system higher speed 40G; 100G; chromatic dispersion; mode dispersion; nonlinear phenomena; parasitic modulation FWM, SPM and XPM; modulation DP-QPSK and 16-QAM.

GRENAR, D. *Řešení nasazení DWDM systémů na 100G a 400G*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 89 s.
Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma *Řešení nasazení DWDM systémů na 100G a 400G* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních anebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 24. května 2016

.....

(podpis autora)



Sensor, Information and Communication Systems

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové 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.

V Brně dne 24. května 2016

.....

(podpis autora)



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a za další cenné rady při zpracování této diplomové práce.

Velké díky náleží Mgr. Karlu Slavičkovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace a za technickou podporu při realizaci experimentálního měření diplomového úkolu.

Děkuji Ing. Vladimíru Schindlerovi, Ph.D. za poskytnutí konzultací k teoretickým problémům řešeným v diplomové práci.

V Brně dne 24. května 2016

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	x
Seznam tabulek	xii
Úvod	13
1 Optická přenosová média	16
1.1 Struktura optického vlákna	17
1.2 Typy optického vlákna.....	18
1.2.1 Jednovidové optické vlákno – singlemode	19
1.2.2 Mnohovidové optické vlákno – multimode	19
2 Technologie WDM a optické systémy s vlnovým sdružováním	22
2.1 Systém s hustým vlnovým sdružováním – DWDM	24
2.2 Systém s hrubým vlnovým sdružováním – CWDM.....	25
2.3 Multiplexovací systémy DWDM a CWDM	26
2.3.1 Vlastnosti multiplexovacího systému DWDM	27
2.3.2 Vysílání a přejímání u multiplexovacího systému DWDM.....	30
2.4 Chromatická disperze – CD.....	32
2.5 Polarizační vidová disperze – PMD.....	33
3 Nelineární jevy WDM – SPM, XPM a FWM	34
4 Modulační formáty	38
4.1 Duobinární modulace – DB	38
4.2 Diferenční fázová modulace – (P)DPSK	39
4.3 Diferenční kvadrurní modulace – (RZ)DQPSK	41
4.4 Polarizační modulace – PM-QPSK.....	43
4.5 Modulační formáty systémů s rychlostí do 100G na jeden kanál optického vlákna	44
4.6 Modulační formáty systémů s rychlostí 100G na jeden kanál optického vlákna	46
4.7 Modulační formáty systémů s rychlostí nad 100G na jeden kanál optického vlákna.....	49
4.7.1 Modulační formáty s jednou nosnou – QAM přenosy	49

4.7.2	Modulační formáty s více nosnými – OFDM přenosy	52
4.7.3	Shrnutí k modulačním formátům systému WDM.....	53
5	MĚŘENÍ PARAMETRŮ NA 10G a 100G	54
5.1	Topologie akademické sítě CESNET	54
5.1.1	Rozšíření otevřeného přenosového systému akademické sítě CESNET o pásmo L	55
5.2	Měření optického spektra přenosového systému DWDM.....	56
5.2.1	Měřicí technika pro měření signálu na optických zařízeních	57
5.2.2	Chybovost BER v optickém spektru systému DWDM	59
5.2.3	Optický odstup signálu od šumu – OSNR.....	59
5.2.4	Zobrazení kvality přijímaného optického signálu – oko rozhodnutí ..	60
5.2.5	Měření optického spektra v systému DWDM na optické akademické přenosové síti CESNET	61
5.3	Zkoumání možnosti aplikování polarizace pro zlepšení odstupu optického signálu od šumu – OSNR	64
5.3.1	Maticové otáčení signálu	64
5.3.2	Matice otáčení signálu v Stokesově prostoru	65
5.3.3	Polarizační analyzátor a jeho vliv na přenos optického signálu	65
5.4	Měření aplikace polarizace s cílem zlepšení OSNR.....	66
5.4.1	I. topologie – referenční trasa na vzdálenost 35 m v datovém sále CESNET v Brně.....	67
5.4.2	II. topologie – trasa Praha 1 – Brno 1 o celkové délce 308 km	69
5.4.3	III. topologie – trasa Brno 1 – Praha 1 ve smyčce o celkové délce 616 km.....	71
5.5	Shrnutí výsledků měření aplikace polarizace s cílem zlepšení OSNR ...	74
5.6	Návrh možného řešení klientského rozhraní pro 100G	76
5.7	Návrh možného řešení linkového rozhraní pro 100G.....	79
5.8	Návrh povýšení multiplexovacího systému DWDM.....	79
6	Závěr	81
	Literatura	82
	Abecední přehled použitých zkratk	86

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Grafické znázornění struktury optického vlákna a lomu paprsku v optickém vlákně.	17
Obr. 1.2:	Řez strukturou optického vlákna (1 – jádro, 2 – plášť, 3 – ochrana, 4 – ochrana vlákna obalem z plastických hmot u některých případů).	18
Obr. 1.3:	Grafické znázornění řezu jednovidovým vláknem.	19
Obr. 1.4:	Grafické znázornění řezu mnohovidovým optickým vláknem s konstantním indexem lomu jádra a se skokovou změnou indexu lomu pláště a mnohovidovým optickým vláknem s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna.	21
Obr. 2.1:	Spektrální závislost měrného útlumu SMF (Single Mode Fiber) vlákna. ...	23
Obr. 2. 2:	Blokové schéma uspořádání WDM.	26
Obr. 2.3:	Grafické znázornění provedení DWDM technologie.	27
Obr: 2.4	Grafické znázornění růstu vlivu disperze se čtvercem modulační rychlosti.....	28
Obr. 2.5:	Schematické znázornění růstu vlivu disperze se čtvercem modulační rychlosti.....	29
Obr. 2.6:	Grafické znázornění rekonfigurovatelných optických ad-drop-multiplexorů.	30
Obr. 2.7:	Grafické znázornění příční struktury a) DFB laseru; b) DBG laseru.	31
Obr. 2.8:	Graf s charakteristikou průběhu chromatické disperze.....	32
Obr. 3.1:	FWM v systémech s rovnoměrnými rozestupy mezi kanály.	37
Obr. 3.2:	FWM v systémech s nerovnoměrnými rozestupy mezi kanály.	37
Obr. 4.1	Schéma duobinární modulace: a) vysílač; b) konstelační diagram příslušné duobinární modulace; c) přijímač.....	39
Obr. 4.2:	Schéma diferenční fázové modulace: a) vysílač; b) konstelační diagram příslušné duobinární modulace; c) přijímač.....	40
Obr. 4.3:	Schéma diferenční kvadraturní modulace: a) vysílač; b) konstelační diagram příslušné duobinární modulace; c) přijímač.....	42
Obr. 4.4:	Schéma PM-QPSK modulace: a) vysílač; b) koherentní přijímač s DSP.....	43
Obr. 5.1:	Grafické znázornění přenosového systému akademické transportní optické sítě CESNET.	55
Obr. 5.2:	Grafické znázornění oka rozhodnutí s vyznačením jeho hlavních charakteristik.	61

Obr. 5.3:	Blokové schéma spektrálního měření na trasách Praha 1 – Brno 1 a Brno 1 – Olomouc prostřednictvím přenosových systémů DWDM.	61
Obr. 5.4:	Grafické znázornění měřených tras v akademické transportní optické síti CESNET.	62
Obr. 5.5:	Názorné zobrazení připojení měřicích optických přístrojů – generátoru generátoru KEOPSYS a spektrálního analyzátoru OSA – na optický patch panel s ukončením optických obou tras.	63
Obr. 5.8:	Printscreen softwarového zpracování výstupu analyzátoru Agilent N7781B na modelu Poincarého koule.	66
Obr. 5.9:	Blokové schéma I. topologie.	67
Obr. 5.10:	Grafické znázornění oka rozhodnutí. I. topologie: a) bez připojení polarizačního filtru b) s připojením polarizačního filtru.	69
Obr. 5.11:	Blokové schéma II. topologie.	69
Obr. 5.12:	Grafické znázornění oka rozhodnutí. II. topologie: a) bez připojení polarizačního filtru a bez zesílení; b) bez polarizace a s korekcí (zesílením); c) s připojením polarizačního filtru s korekcí (zesílením).	71
Obr. 5.13:	Blokové schéma III. topologie.	71
Obr. 5.14:	Grafické znázornění oka rozhodnutí. III. topologie: a) bez polarizace a bez zesílení; b) bez polarizace se zesílením; c) polarizováno se zesílením.	73
Obr. 5.15:	Graf zobrazující šířku diagramu oka rozhodnutí.	75
Obr. 5.16:	Graf zobrazující délku diagramu oka rozhodnutí.	75
Obr. 5.17:	Blokové schéma rozhraní LR-4 (4 x 25G) a LR-10 (10 x 10G).	77
Obr. 5.18:	Blokové schéma rozhraní LR-4 a LR-10 s jednotlivými typy konektorů.	78
Obr. 5.19:	Zobrazení různých typů modulů pro rychlosti 100G.	78

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1:	Přehled teoretických a měřením získaných OSRN požadavků u vícestavových formátů.....	46
Tab. 4.2:	Komparace měřením získaných hodnot bitové rychlosti, spektrální účinnosti a přenosové kapacity u vybraných modulačních formátů.....	46
Tab. 4.3:	Podrobnější komparace vybraných modulačních formátů.....	48
Tab. 4.4:	Porovnání modulačních formátů pro systémy nad 100G.....	50
Tab. 4.5:	Přehled M-QAM možností pro 400G a 1000G s využitím jako reference systému 100G (PM-QPSK) a 200G (PM-16QAM).....	51
Tab. 5.1:	Hodnoty naměřené v I. topologii.	68
Tab. 5.2:	Podrobný rozpis oka rozhodnutí I. topologie.....	68
Tab. 5.3:	Hodnoty naměřené ve II. topologii.	70
Tab. 5.4:	Podrobný rozpis oka rozhodnutí II. topologie.	70
Tab. 5.5:	Hodnoty naměřené ve III. topologii.....	72
Tab. 5.6:	Podrobný rozpis oka rozhodnutí III. topologie	72

ÚVOD

Jedním z parametrů pro hodnocení kvality života, životní úrovně a životních podmínek je v naší moderní době i přístup k informacím a informačním zdrojům obecně, tj. dostupnost informací a informačních zdrojů, jejich pravdivost, aktuálnost a přesnost. K současným aktuálním vývojovým trendům v oblasti informačních komunikačních technologií jsou řazeny vedle nelineárně rostoucích požadavků na rychlost přenosu a na zvětšování objemu přenášených dat i požadavky na kvalitu vysokorychlostní infrastruktury. Tento neustálý růst požadavků se odvíjí od rozvoje telekomunikačních služeb a je zapříčiněn rychle se rozvíjejícím využíváním informačních technologií a akcelerujícím nástupem aplikací různých širokopásmových multimediálních služeb do každodenní uživatelské praxe.

Optimální míra využívání telekomunikačních služeb uživatelem je podmíněna maximálním možným využitím kapacity přenosového pásma optického vlákna. Efektivnější využití šířky přenosového pásma optického vlákna je v současnosti umožněno technologií WDM, v jejímž rámci jsou realizovány průběžné inovace za účelem dosažení vyšší rychlosti a kvality přenosu. Jedním ze systémů pracujících na platformě technologie WDM je transportní přenosový systém DWDM, jemuž se bude podrobněji věnovat předkládaná diplomová práce.

V roce 2013 bylo v celosvětovém měřítku v provozu přes 350 transportních přenosových systémů DWDM s rychlostí 100G pracujících na platformě WDM [1]. Vzhledem k neustále se zvětšujícímu množství přenášených dat rostou spolu se stupňujícím se požadavkem na kvalitu přenosu i nároky na rychlost přenosu dat, a to přibližně o 1,5 násobek ročně.

Předmět odborného zájmu diplomového úkolu spočívá v provedení analýzy transportních přenosových systémů DWDM s rychlostmi 10G, ve vyhodnocení jejich plusů a mínusů a v hledání vhodného řešení migrace přenosových systémů na vyšší rychlosti, a to především na rychlost 40G, 100G včetně 400G jako výhledu do budoucnosti. Dílčími cíli diplomového úkolu je posouzení vlivů disperze CD a PDM, nelineárních jevů a parazitních modulací FWM, SPM a XPM, dále možností formátů

DP-QPSK a 16-QAM a v neposlední řadě také provedení experimentálního měření vybraných parametrů na síti 100G.

V diplomové práci tak bude z hlediska jejího formálního uspořádání nejprve podán stručný teoretický výklad k principu optických přenosových médií a optických přenosových systémů na platformě technologie WDM s vlnovým sdružováním. Podrobněji bude analyzována problematika optického transportního přenosového systému DWDM a poté bude přistoupeno k základní charakteristice vlivů chromatické a vidové disperze se zřetelem k zohlednění vlivů nelineárních jevů a parazitních modulací FWM, SPM a XPM v modulačních formátech DP-QPSK a 16-QAM.

V rámci řešení diplomového projektu bude realizováno nejprve standardní měření přenosových parametrů na síti 10G, následně bude provedeno experimentální měření přenosových parametrů na síti 100G.

Dále bude proveden teoretický komentář k problematice optického přenosového média, konkrétně – pozornost bude krátce zacílena na konstrukci optického vlákna, klasifikaci a podrobný popis jednotlivých typů optických vláken.

Ve druhé kapitole bude podán teoretický výklad k technologii WDM v kontextu optických systémů s vlnovým sdružováním. Je provedeno vymezení jednotlivých typů systémů s vlnovým sdružováním a zároveň jsou popsány chromatická disperze – CD a polarizační vidová disperze – PMD.

Ve třetí kapitole bude předložena stručná charakteristika nelineárních jevů a jejich vlivu na kvalitu přenosu signálu po optickém vlákně.

Ve čtvrté kapitole bude pojednáno o nejčastěji používaných typech modulačních formátů a budou podrobněji rozebrány jejich pozitiva a negativa. Dále se práce soustředí na využití technologií WDM a DWDM pro různé přenosové rychlosti.

Pátá kapitola bude zacílena na realizaci experimentálního měření parametrů na systémech s přenosovou rychlostí 10G a 100G v rámci akademické transportní sítě CESNET. Měřením bude testován vliv filtrační polarizace na zlepšení odstupu optického signálu od šumu – OSNR na třech topologiích o různé délce trasy. Získaná data budou podrobena analýze a následně bude provedeno vyhodnocení výsledků. Poté budou vyvozeny dílčí závěry a shrnutí. V závěrečné části páté kapitoly bude představen návrh

možného řešení pro linkové a klientské rozhraní pro systémy 100G. Posléze budou navrženy podmínky pro technologicky a ekonomicky efektivní povýšení multiplexovacího systému DWDM. Zároveň budou formulovány souhrnné závěry vyplývající z experimentálního měření i teoretických výsledků.

V závěrečné části diplomové práce budou krátce nastíněny možnosti dalšího rozvoje systému DWDM a optických sítí pro přenos optického signálu.

Nedílná součást předkládané diplomové práce je tvořena seznamem použité literatury, pramenů a elektronických zdrojů. Diplomová práce je vybavena abecedním přehledem použitých zkratek, veličin a symbolů, seznamem obrázků, tabulek a příloh, jež usnadňují orientaci v diplomové práci.

1 OPTICKÁ PŘENOSOVÁ MÉDIA

Přenos dat optickým vláknem je umožněn prostřednictvím světelného paprsku, a na principu dopadu a odrazu světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí s rozdílnou optickou hustotou, jenž je založen na rozdílném indexu lomu. Rozdílným indexem lomu je způsobeno, že první část paprsku se po lomu odráží a následně vrací zpět do původního přenosového prostředí a jeho druhá část prostupuje z jednoho prostředí do druhého.

Intenzita odrazu paprsku je ovlivněna úhlem, pod nímž je paprsek do optického vlákna přiváděn, přičemž každé optické rozhraní má na základě materiálového složení předem stanovenou svůj mezní úhel odrazu. Mezním úhlem odrazu je označena situace, při níž dojde pouze k odrazu světla a současně nedojde k opuštění prostředí, z něhož paprsek přichází. Princip odrazu světla na základě vnitřních odrazů je využíván u přenosu dat optickými vlákny. Vzorec (1.1) je dán vztahem [2]:

$$\cos \theta = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.1)$$

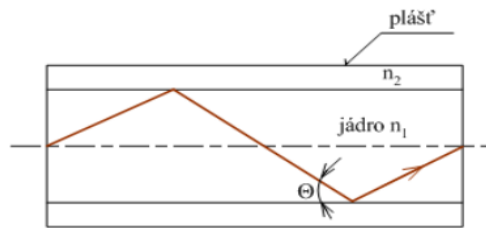
v němž jsou vyjádřeny proměnné:

n_1 index lomu materiálu pláště;

n_2 je index lomu materiálu jádra.

Oblast optického záření je vymezena délkou optické vlny v rozpětí od 100 nm do 1 mm. Pro optický přenos dat má význam oblast optického záření v rozpětí 0,4 μm až 1,7 μm , proto jsou pro výrobu vláken optického přenosu využívány materiály s co nejmenším útlumem, tj. v rozpětí 0,4 μm až 1,7 μm . Optické vlákno je tvořeno válcovým dielektrickým jádrem s indexem lomu n_1 a dielektrickým pláštěm s indexem lomu n_2 – viz obr. 1.1: Grafické znázornění struktury optického vlákna a lomu paprsku v optickém vlákne. Zároveň musí platit vztah, že $n_1 > n_2$. U paprsků, jež vstupují do jádra pod menším úhlem, než je úhel odrazu – θ dle výše uvedené rovnice 1.1, tak dochází na rozhraní jádro – plášť k potřebnému odrazu.

Nejmenší útlumy jsou vykazovány u optického vlákna vyrobeného z křemenného skla nebo z plastu, popř. v kombinaci obou materiálů, jež prostřednictvím světla přenášejí signály.



Obr. 1.1: Grafické znázornění struktury optického vlákna a lomu paprsku v optickém vlákně.

Optické vlákno umožňuje přenos vysoké datové kapacity na velkou vzdálenost a navíc vykazuje plnou odolnost vůči elektromagnetickému rušení. A poněvadž světlo prochází ve srovnání s metalickým vedením optickými vlákny s malým útlumem, je tato technologie využívána hlavně pro transportní dálkové spoje. Za klíčovou vlastnost optického vlákna je považována jeho vysoká kapacita datového přenosu, a to až v 100násobcích G. V praxi je možno se nejčastěji setkat s 10 násobky a lze předpokládat, že v blízké budoucnosti budou upřednostňovány 100násobky kapacity datového přenosu v G. Každé optické vlákno je schopno přenášet mnoho nezávislých signálů a každý nezávislý používá jiné vlnové délky světla. Další vlastností optického vlákna je jeho elektrická nevodivost, takže např. v případě úderu blesku jsou jednotlivé aktivní prvky od sebe automaticky izolovány. V jednom optickém kabelu může být i 144 optických vláken.

I přes fakt, že mohou být vyrobena optická vlákna ze skla, plastu či kombinací obou materiálů, při aplikaci na velkou vzdálenost je z důvodu nižšího optického útlumu vždy instalováno optické vlákno ze skla.

1.1 Struktura optického vlákna

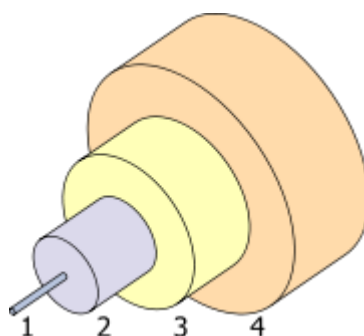
Optické vlákno se skládá ze tří elementárních prvků, a to z jádra, obalu jádra a z primární ochrany – viz obr. 1.2: Řez strukturou optického vlákna (1 – jádro, 2 – plášť, 3 – ochrana, 4 – ochrana vlákna obalem z plastických hmot u některých případech).

Jádrem představuje nejdůležitější prvek optického vlákna a je určeno pro vlastní přenos dat. Průměr jádra přímo závisí na druhu kabelu. Běžně používanými rozměry jsou

9,50 a 62,5 μm .

Obal jádra optického kabelu má za úkol hlavní ochranu a zpevnění jádra. Spolu s jádrem má průměr 125 μm .

Jako primární ochrana je označována vrstva, jež slouží k základní ochraně optického vlákna před nepříznivými účinky okolního prostředí. Vrstva je nejčastěji tvořena tvrzeným akrylátovým lakem. Celkový průměr s jádrem a obalem jádra je kolem 250 μm .



Obr. 1.2: Řez strukturou optického vlákna (1 – jádro, 2 – plášť, 3 – ochrana, 4 – ochrana vlákna obalem z plastických hmot u některých případů).

Dále může být optické vlákno chráněno tzv. sekundární ochranou tvořenou z plastických hmot, jež zvyšují průměr na 900 μm . K této vrstvě jsou přidány další vrstvy, jejichž hlavní funkce spočívá v ochraně kabelu především před mechanickým namáháním.

1.2 Typy optického vlákna

Odborníky na optoelektrotechniku [1], [2], [5] jsou rozlišovány dva základní typy optických vláken – jednovidová a mnohovidová. Jednovidové optické vlákno je konstruováno s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště. Mnohovidové optické vlákno lze dále podle konstrukce členit na mnohovidová optická vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště a na mnohovidová optická vlákna s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna – podrobněji viz níže v podkapitole 1.2.2.

Jednovidové vlákno vyrobené ze skla je používáno na páteřní vzdálené trasy a pro vyzařování je použit laser. Mnohovidová vlákna se užívají na kratší vzdálenosti,

konkrétně do vzdálenosti cca 600 metrů. Další posílení výtěžnosti kapacity optického vlákna představuje technologie WDM, jež umožňuje po jednom vláknu provozovat obousměrný přenos dat [1].

1.2.1 Jednovidové optické vlákno – singlemode

Jednovidová optická vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště se používají pro optické kabely s průměrem jádra pouhých 9 μm . Typickými vlnovými délkami jsou v současné době 1310 nm a 1550 nm. Signál je tvořen jedním videm, jenž je šířen podél osy jádra a zároveň se odráží při ohybu vlákna – viz obr. 1.3: Grafické znázornění řezu jednovidovým vláknem.



Obr. 1.3: Grafické znázornění řezu jednovidovým vláknem.

Pro vyzařování vlnových délek a jejich příjem je zapotřebí u jednovidových vláken ve srovnání se zařízením pro mnohovidový přenos zajistit kvalitnější, tj. i finančně náročnější, zařízení. Jak již bylo uvedeno výše, světelný zdroj pro přenos dat optickým jednovidovým vlákem je zajištěn pomocí laseru. U optických vláken s vlnovou délkou 1310 nm dosahuje útlum hodnoty 0,35 dB/km a u optických vláken s vlnovou délkou 1550nm útlumu kolem 0,2 dB/km. Jednovidová optická vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště se používají zejména na dlouhých trasách, tj. v rozsahu zhruba 100 km.

1.2.2 Mnohovidové optické vlákno – multimode

U mnohovidových vláken se běžně používají optická vlákna s průměrem 50 a 62,5 μm . Za typickou vlnovou délku pro gigabitové aktivní prvky je považována vlnová délka 850 nm a pro 100Mbitové aktivní prvky vlnová délka o hodnotě 1310 nm.

Jak bylo uvedeno výše, mnohovidové optické vlákno je možno dále třídit, a to na:

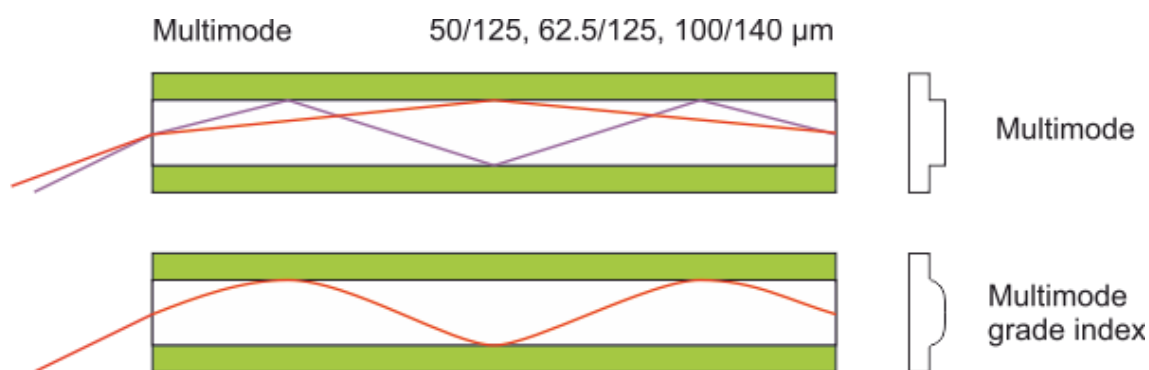
- mnohovidové optické vlákno s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště;
- mnohovidové optické vlákno s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna.

Mnohovidové optické vlákno s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště se vyznačuje jednoduchou výrobou a snadnou manipulací. Za nevýhodu mnohovidového optického vlákna s konstantním indexem lomu a skokovou změnou indexu lomu pláště je považován větší útlum, disperze a malá přenosová kapacita. Tento druh mnohovidového optického vlákna je nejvíce používán na krátké vzdálenosti [3].

Pro mnohovidové vlákno s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna je charakteristická změna indexu lomu v průřezu jádra. Maximální hodnoty indexu lomu je dosaženo v ose jádra a směrem od osy jádra se hodnota indexu lomu snižuje. Optické vlákno s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna se oproti mnohovidovému vláknu s konstantním indexem lomu a skokovou změnou indexu lomu pláště vyznačuje menší disperzí, menším útlumem a složitější výrobou a náročnějším spojováním optických vláken. Využívá se pro středně velké přenosy dat, a je výhodné k multiplexním přenosům [3].

Technologie využívaná k přenosu po obou druzích mnohovidového vlákna je finančně poměrně dostupná a ve srovnání s technologií přenosu po jednovidovém vláknu s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště se jeví jako levnější, a to jak cenou samotného optického kabelu, tak i finančními náklady na pořízení generátorů a detektorů světla. Jako generátor světla lze u přenosu po obou druzích mnohovidového optického vlákna užít například LED diodu. Generátor vyzařuje světelné impulsy a ty tvoří vidy neboli paprsky, jež se potom odrážejí v různých úhlech – viz obr. 1.4: Grafické znázornění řezu mnohovidovým optickým vláknem s konstantním indexem lomu jádra a se skokovou změnou indexu lomu pláště a mnohovidovým optickým vláknem s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna. K detektoru však přicházejí jednotlivé vidy s určitým časovým zpožděním mezi sebou navzájem a toto zpoždění je nazýváno vidovou disperzí. Příмым důsledkem vidové disperze je zkreslení signálu

přenášeného optickým vláknem. Toto zkreslení je typické pro oba druhy mnohovidového optického vlákna, přičemž vyšších hodnot je dosahováno u mnohovidového optického vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště. Jelikož toto zkreslení roste lineárně s délkou optického vlákna, lze mnohovidové optické vlákno s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna aplikovat na trasách s maximální vzdáleností do 2 km.



Obr. 1.4: Grafické znázornění řezu mnohovidovým optickým vláknem s konstantním indexem lomu jádra a se skokovou změnou indexu lomu pláště a mnohovidovým optickým vláknem s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna.

Oba druhy mnohovidového optického vlákna jsou tvořeny z tenkých vrstev, lišících se indexem lomu. Čím je paprsek dál od osy jádra, tím je index lomu menší, a postupně se tak paprsek "vrací zpět" do středu jádra. Vlákná tedy netrpí vidovou disperzí, takže vyslané paprsky dorazí ke konci vlákna zhruba ve stejné časové okamžiky. Typický útlum těchto vláken je 2 až 10 db/km při vlnové délce 850 nm.

Mnohovidová vlákna se nejčastěji používají u LAN sítí. Vzhledem k tlustšímu jádru optického kabelu se na oba druhy mnohovidového vlákna snáze připevňují konektory [1].

2 TECHNOLOGIE WDM A OPTICKÉ SYSTÉMY S VLNOVÝM SDRUŽOVÁNÍM

Optické systémy s vlnovým multiplexem prostřednictvím technologie WDM (Wavelength Division Multiplex) jsou založeny na principu sružování několika kanálů o různých nosných vlnových délkách do optického vlákna, jež vychází z funkce frekvenčního sružování FDM (Frequency-Division Multiplexing) používaného v elektrické oblasti [3]. Tímto způsobem je dosaženo efektivnějšího využití optického spektra v optickém vlákně.

Výpočet přenosové kapacity (2.1) lze provést podle vztahu [4]:

$$C_{WDM} = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_{pk} \quad (2.1)$$

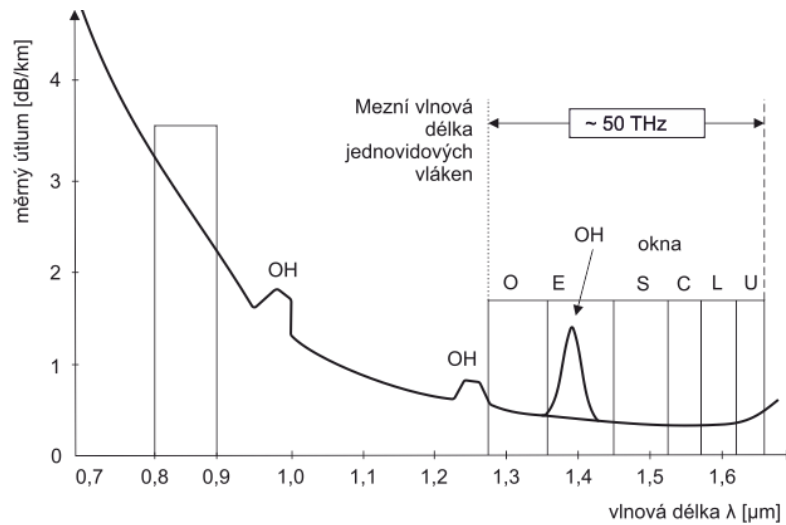
V němž jsou vyjádřeny proměnné:

- C_{wdm} celková přenosová kapacita;
 V_{pk} přenosová rychlost k-tého kanálu;
 N je celkový počet kanálů systému.

Každému kanálu je přiřazena určitá šířka spektra, bez ohledu na to, zda je šířka spektra využita celá či jen její část. Pokud je rozestup mezi kanály zbytečně veliký, dosahuje systém horší celkové spektrální účinnosti. Spektrální závislost měrného útlumu SMF (Single Mode Fiber) vlákna je zobrazena na obrázku – viz obr. 2.1: Spektrální závislost měrného útlumu SMF (Single Mode Fiber) vlákna.

Na obr. 2.1 jsou graficky znázorněna jednotlivá spektrální pásma pro optický přenos. Jedná se o tato konkrétní spektrální pásma:

- O-pásmo: 1 260 – 1 360 nm (O = original);
- E-pásmo: 1 360 – 1 460 nm (E = extended);
- S-pásmo: 1 460 – 1 530 nm (S = short);
- C-pásmo: 1 530 – 1 565 nm (C = conventional);
- L-pásmo: 1 565 – 1 625 nm (L = long);
- U-pásmo: 1 625 – 1 675 nm (U = ultra long).



Obr. 2.1: Spektrální závislost měrného útlumu SMF (Single Mode Fiber) vlákna.

Optický multiplex se na první pohled jeví jako principiálně jednoduchý, jeho úspěšná realizace je však podmíněna dokonalým zvládnutím technologie optoelektronických i čistě optických prvků. Za jistý technologický převrat v problematice aplikace WDM je možno označit úspěšné vyřešení technické stránky výroby zesilovačů na čistě optickém principu bez nutnosti převodu optického signálu na signál elektrický a naopak a jejich následnou bezproblémovou konstrukci a ověření jejich plné funkčnosti v praxi.

Optické přenosové prostředky dnes zvládnou překonat bez použití zesilovače optický přenos do vzdálenosti i přes 100 km. Pro delší trasy je nezbytné provádět průběžně zesílení, popř. dle konkrétní situace korekci obnovení tvaru signálu, jež bývá označována i jako tzv. regenerace signálu.

U klasických elektrických opakovaců (neboli regenerátorů) digitálního signálu je nutno nejprve převést optický zkreslený signál na elektrický, zesílit jej, opravit časování, obnovit tvar impulzů a následně převést signál elektrický zpět na optický. Pro elektrický opakováč je odbornou veřejností užíváno i synonymní označení regenerátor.

Je-li na vlákne sruženo několik vlnových délek pomocí WDM, je zapotřebí vždy provést tzv. vlnové demultiplexování, elektrické zesílení a vlnové multiplexování. Jako mnohem efektivnější (a mimochodem z hlediska finančního zajištění i ekonomičtější) se jeví postup, kdy je provedeno zesílení celé skupiny vlnových délek zároveň, tj. v jednom

okamžiku, a zároveň je toto zesílení realizováno prostřednictvím jediného zesilovače optického signálu.

2.1 Systém s hustým vlnovým sdružováním – DWDM

Systém s hustým vlnovým sdružováním DWDM je označován jako vlnový multiplex DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Tento systém umožňuje sdružování kanálů s velmi malým vzájemným rozestupem. V doporučení ITU-T G.694.1 [4] pro technickou aplikaci tohoto systému je definováno několik možných variant rozestupů mezi kanály, a to 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz a 100 GHz. Jako normalizovaný referenční kmitočet, od něhož se odvíjí stanovení kmitočtů pro ostatní kanály, je ve výše uvedeném doporučení stanoven kmitočet 193,1 THz. Kmitočty ostatních kanálů pro rozestup 50 GHz lze vypočítat podle vztahu (2.2):

$$f_n = 193,1 + n \cdot 0,05 \text{ [THz]} \quad (2.2)$$

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

f_n označení pro kmitočet kanálů;

n označení libovolného kladného nebo záporného celého čísla, včetně nuly [3].

Tyto systémy s hustým vlnovým sdružováním DWDM mohou být provozovány v oblasti vlnových délek S, C a L optického pásma SMF. DWDM systémy sice dosahují velké spektrální účinnosti a vysokých přenosových rychlostí, vyžadují však použití opticky přesných komponent. Požadovaná přesná funkce komponent je zajišťována např. chlazenými DFB lasery (Distributed Feedback Laser) [9]. Nevýhodou tohoto jinak velice efektivního řešení jsou vysoké finanční náklady na primární vybudování tohoto systému. V současnosti je systém s hustým vlnovým sdružováním DWDM preferován pro zajištění přenosů po vysokorychlostních optických trasách, těšících se ze strany uživatele značné oblibě a vysokým preferencím ve srovnání s ostatními systémy, a tak je logické, že je tento systém uživateli v praxi aktivně požadován. Správná funkce a potřebná kvalita přenosu je podmíněna požadavkem na vlnovou délku paprsku. Je nezbytné, aby nedocházelo k překročení stanoveného limitu pro odchylku od definované vlnové délky, přičemž hodnota odchylky může dosáhnout hodnoty menší než 0,2 odstupu nosných

kmitočtů, což odpovídá toleranci $\pm 0,16$ nm pro 100 GHz rastr [9].

System s hustým vlnovým sdružováním DWDM umožňuje:

- vícenásobné využití stávajících dříve instalovaných optických vláken;
- pro přenesení až 160 (teoreticky i více) datových kanálů stačí pouze jedno vlákno;
- dostatečnou technickou připravenost pro nástup nejnovějších technologií;
- jednoduché rozšíření o další datové kanály;
- bezpečné zálohování optickou formou a minimalizaci možného výpadku datového přenosu.

2.2 System s hrubým vlnovým sdružováním – CWDM

System s hrubým vlnovým sdružováním – CWDM je nazýván také hrubým vlnovým multiplexem CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing). Pro tento system jsou typické větší rozestupy mezi kanály, což je obzvlášť patrné, při vzájemné komparace systému CWDM se systémem DWDM. Tento základní charakteristický rozdílný rys je vyjádřen již v samotném anglickém i českém názvu systému. Přímým důsledkem větších rozestupů mezi kanály je nižší spektrální účinnost tohoto systému [3]. V technickém doporučení ITU-T G.694.2 [5] tohoto systému s hrubým vlnovým sdružováním – CWDM je stanoveno osmnáct nominálních vlnových délek s kanálovými rozestupy 20 nm a s přípustnou tolerancí $\pm 6-7$ nm. Díky této toleranci je možné v rámci přenosového systému CWDM užit levné, tj. opravdu obecně cenově dostupné, komponenty. Takovéto finančně dostupné řešení při plné funkčnosti systému představuje např. použití nechlazených laserů s vykazovanou nestabilitou vysílané frekvence signálu v daném rozsahu. Z tohoto důvodu jsou systémy s hrubým vlnovým sdružováním – CWDM aplikovány zejména do provozu metropolitních sítí. Jako nespornou výhodu popisovaného technického řešení optického přenosu signálu je třeba označit nízkou finanční zátěž pro investora při budování metropolitní sítě pomocí tohoto systému i nižší náklady v porovnání se systémem DWDM z pohledu uživatele a správce takovéto sítě (např. nižší cenová hladina komponent – optických prvků a z hlediska technické náročnosti – nižší nároky na přesnost součástek v rámci daného systému).

System s hrubým vlnovým sdružováním – CWDM disponuje:

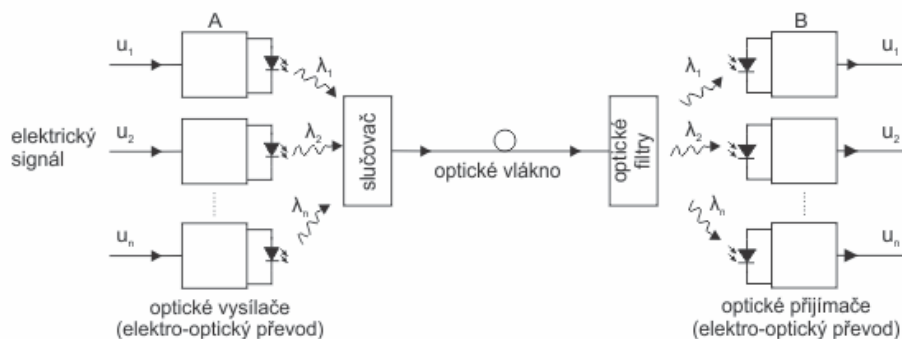
- tolerancí střední vlnové délky kanálu v rozmezí 6–7 nm;
- na trhu bohatou dostupnou nabídkou vysílačů dle stanoveného požadavku na vzdálenost (např. vysílač SFP, XFP apod.);
- variantními specifikacemi s mezerami mezi kanály přibližně 20 nm;
- velice přijatelnou cenovou hladinou a snadnou dostupností;
- možností realizace tzv. „optiku do domu“ neboli „fiber-to-home“.

K nevýhodám systému s hrubým vlnovým sdružováním – CWDM patří:

- omezené množství přenosových kanálů;
- nevhodnost systému pro zesílení optického spoje, jež je technicky ošetřena užitím technologie LAN/WAN.

2.3 Multiplexovací systémy DWDM a CWDM

Díky metodám vlnových multiplexů je možné využít z draze položeného a mnoha uživatelů sdíleného optického vlákna maximum. Jde především o systém Dense Wave Division Multiplexing (DWDM), popřípadě Course Wave Division Multiplexing (CWDM). Jejich základní princip je názorně zdokumentován na obrázku – viz obr. 2.2: Blokové schéma uspořádání WDM. Pozn.: pro zjednodušení je zde zobrazen jenom jeden směr přenosu.

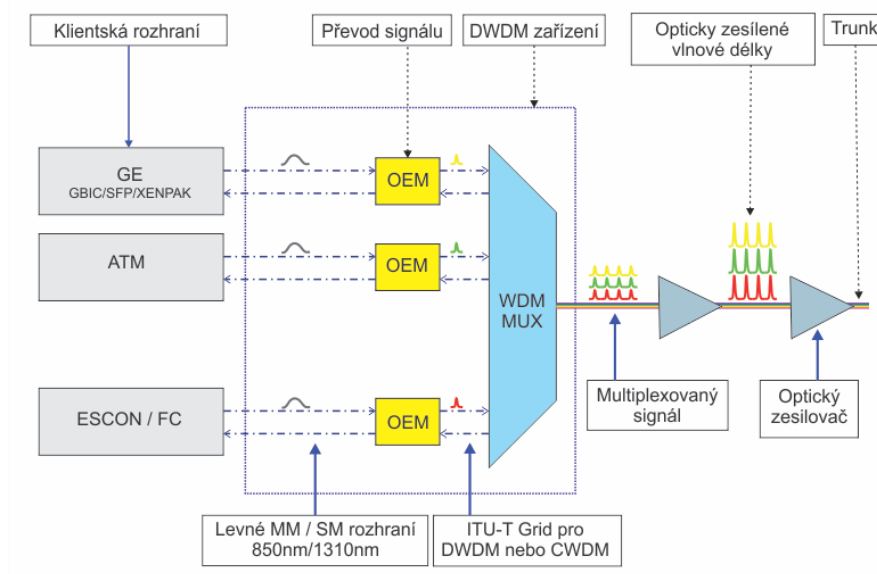


Obr. 2. 2: Blokové schéma uspořádání WDM.

Technologie DWDM a CWDM umožňují vytvořit uvnitř vlákna více přenosových kanálů s různými vlnovými délkami. Vlnové délky těchto kanálů (lambdy) definují doporučení ITU-T G.694.1 a G.694.2. Obě technologie jsou v základním principu obdobné. CWDM využívá méně kanálů, kanály jsou od sebe vzdálenější (2500 GHz v CWDM oproti typickým 50-200 GHz v DWDM). CWDM systémy jsou levnější a ve srovnání s DWDM se hodí pro přenosy o nižších kapacitách na kratší vzdálenosti.

2.3.1 Vlastnosti multiplexovacího systému DWDM

Typické pro systémy DWDM je, že pro jejich činnost je využíváno až 96 kanálů, v každém mohou přenášet data až 40 gigabitovou rychlostí. To dává celkovou kapacitu převyšující 3 terabity za sekundu na vlákne. Přitom vzdálenosti, které je možné překlenout bez obnovování signálu, přesahují 2000 kilometrů. Experimentálně lze dnes přenést několikanásobně vyšší toky dat na vzdálenost stovek kilometrů. Zjednodušené technické provedení DWDM technologie je zachycen na následujícím obrázku – viz obr. 2.3: Grafické znázornění provedení DWDM technologie.

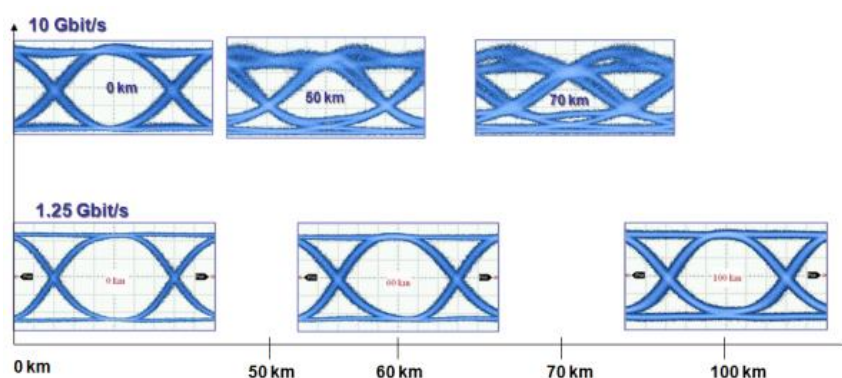


Obr. 2.3: Grafické znázornění provedení DWDM technologie.

Přestože princip DWDM technologie se jeví na první pohled jako velmi jednoduchý, tak optická zařízení, jimiž jsou takovéto kapacity umožňovány, jsou technicky složitá. Vzhledem k vysokým nárokům na přesnost musejí být optická zařízení vyrobená s velkou

precizností a musejí vykazovat vysokou spolehlivost – je nabízena 99,999% dostupnost i vyšší. Musejí se také vyrovnat s řadou fyzikálních nástrah, jako je útlum signálu, šum, chromatická disperze, polarizační disperze, nelineární efekty, vzájemné rušení sousedních kanálů i s některými dalšími. To vyžaduje specializovaný hardware.

Čím vyšší jsou přenosové rychlosti, tím vyšší může být dopad zmíněných vlivů na zkreslení signálu. Další obrázek graficky a přehledně dokládá vliv chromatické disperze na přenášený signál v závislosti na vzdálenosti a modulační rychlosti. Vliv disperze roste se čtvercem modulační rychlosti [7] – viz obr. 2.4: Grafické znázornění růstu vlivu disperze se čtvercem modulační rychlosti.



Obr: 2.4 Grafické znázornění růstu vlivu disperze se čtvercem modulační rychlosti.

Při vysokých rychlostech (10G a především 40G a 100G) je nezbytné pro dosažení požadovaných parametrů kombinovat řadu metod – vysokou přesnost, stabilitu a kvalitu součástí, přesnou a vyváženou kompenzaci některých fyzikálních jevů (zejména chromatických disperzí), propracované typy modulací, např. vícecestavové nebo využívající duální polarizace, pokročilé digitální metody pro opravu chyb a některé další. Oblast vyšších rychlostí (100G, 400G) je postupně aplikována.

V DWDM sítích je využíván služební protokol G.709. Tento protokol zapouzdřuje přenášená data a poskytuje funkce pro provozování, správu, údržbu a zavádění služeb v systému (OAM&P funkce). Zajišťuje také dopřednou opravu chyb v přenášených datech (FEC – Forward Error Correction) ve více či méně propracovaných variantách.

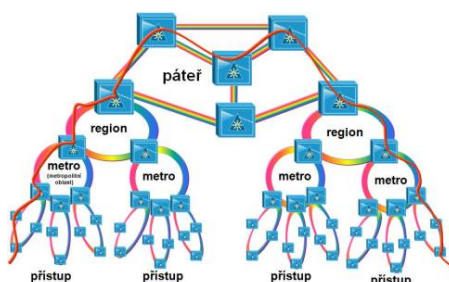
Opravné metody výrazně snižují chybovost přenosu a umožní prodloužit vzdálenosti dosažitelné bez regenerace signálu až na několiknásobek. Mimo jiné dokáže

protokol signalizovat problémy na přenosové trase. Této problematice se diplomová práce bude ještě věnovat v následující kapitole o přenosu IP přes DWDM.

Přestože kapacita přenosu je přitažlivým parametrem sítí s optickými multiplexy, zdaleka není jedinou vlastností, již je nutno vzít do úvahy.

Moderní DWDM systémy musejí podporovat komplexní topologie. To je důležité zejména pro poskytovatele služeb, kteří potřebují pokrýt optickými sítěmi rozsáhlé území – viz obr 2.5: Schematické znázornění růstu vlivu disperze se čtvercem modulační rychlosti, a pružně je rozšiřovat tak, aby mohli průběžně a bezproblémově připojovat nové zákazníky. Přitom musejí být poskytovatelé služeb schopni poskytnout spojení mezi libovolnými body sítě, nabídnout širokou škálu rozhraní, různé rychlosti připojení i rozličné typy služeb.

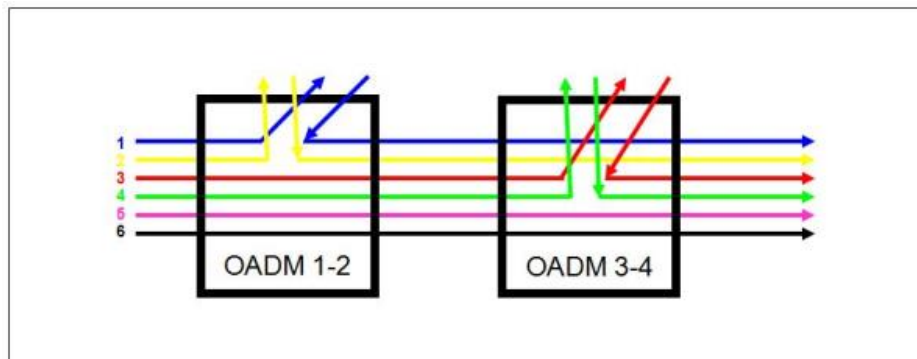
Nabízí se otázka, jaké technologie umožní takovou pružnost topologií? Základem pružnosti je modularita uzlových DWDM zařízení a laditelnost, softwarová konfigurovatelnost a adaptibilita jejich součástí – vysílačů, přijímačů, ad-drop-multiplexorů, ale i zesilovačů nebo vyrovnávacích prvků. Tyto vlastnosti umožňují rychleji zavádět nové služby, snadněji měnit topologie, ztenčit inventář náhradních dílů, a tak v důsledku dosáhnout snížení provozních nákladů. Nyní bude pozornost zacílena na některé laditelné a konfigurovatelné prvky, a to konkrétně na rekonfigurovatelné optické ad-drop-multiplexory.



Obr. 2.5: Schematické znázornění růstu vlivu disperze se čtvercem modulační rychlosti.

Základní optický ad-drop-multiplexor (OADM) dokáže dvě základní operace a je graficky znázorněn na obrázku – viz obr 2.6: Grafické znázornění rekonfigurovatelných optických ad-drop-multiplexorů. Nejprve je odebrána ze signálu obsahujícího množinu vlnových délek určitá podmnožina těchto vlnových délek a vydělené vlnové délky jsou

předány směrem ven, tj. například na vstupy transpondérů. Současně je určitá skupina vlnových délek přidána k přenášeným vlnovým délkám.



Obr. 2.6: Grafické znázornění rekonfigurovatelných optických ad-drop-multiplexorů.

Standardní optické ad-drop-multiplexory (OADM) dokáží pracovat s pevně definovanými vlnovými délkami. Potřeba odbočení jiných vlnových délek vyžaduje výměnu hardwaru, což je v četných případech velmi nepraktické a často to ani není z provozních důvodů možné.

Naproti tomu rekonfigurovatelné optické ad-drop-multiplexory (ROADM) umožňují konfigurovat přidané či odebrané vlnové délky převážně softwarově a na dálku, což výrazně zvyšuje pružnost a pohodlnost obsluhy sítě.

Rekonfigurovatelnými optickými ad-drop-multiplexory (ROADM) je také v mnoha případech umožněna účinná ekvalizace přenášeného spektra tím, že pro každou vlnovou délku obsahují proměnný útlumový člen, jenž nastaví úroveň příslušného kanálu na stejnou hodnotu s ostatními kanály.

2.3.2 Vysílání a přejímání u multiplexovacího systému DWDM

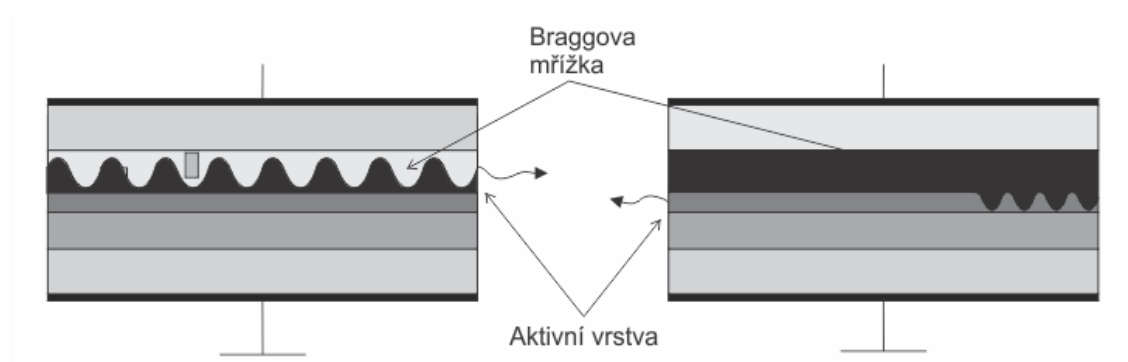
Je možno konstatovat, že u multiplexovacího systému DWDM jsou v praxi převážně pro vysílání a přijímání signálů aplikovány lasery typu DFB (Distributed FeedBack) nebo DBR (Distributed Bragg Reflector). Braggova mřížka (obr 2.7) se u laseru DFB nalézá vedle aktivní vrstvy v celé délce rezonátoru, přičemž mřížkou je tvořena vlnovodná vrstva – viz obr. 2.7: Grafické znázornění příční struktury a) DFB laseru a b) DBG laseru. U laseru DBR je Braggova mřížka taktéž umístěna podél aktivní vrstvy, zastává však funkci jednoho zrcadla rezonátoru. U obou způsobů použití mřížky je dosaženo vlnové

interference, jež je považována za konstruktivní v případě, jestliže perioda mřížky je rovna jejímu sudému násobku. Na základě tohoto principu je provedena vlnová selektivita výstupního svazku a zároveň úpravou toku proudu je možno navíc provést změnu indexu lomu mřížky [8]. Takto je dosaženo přeladění mřížky, jejímž přímým důsledkem je následná změna vlnové délky laseru.

V praxi užívané lasery lze klasifikovat podle různých kritérií. Za kritérium je možno zvolit:

- Typ aktivní vrstvy, jež je možno dále specifikovat jako:
 - aktivní vrstvu MQW (Multiple Quantum Well), kdy je vnitřní část aktivní vrstvy tvořena střídáním tenkých polovodičových vrstev s různými šířkami zakázaného pásma;
 - dvojitý polovodičový heteropřechod, jehož aktivní vrstva se sestává z jednoho polovodiče, jež vykazuje oproti sousedním vrstvám vyšší index lomu.
- Laditelnost, u níž je dále rozlišována:
 - fixní vlnová délka, jež neumožňuje u laseru DBR měnit vlnovou délku;
 - laditelná vlnová délka, jež u laseru DFB umožňuje kontinuální přeladování (cca 3–5 nm) vlnové délky [2].

Podle hlediska laditelnosti je tak možno logicky dospět k závěru, že na rozdíl od laseru DBR, jež je vybaven pouze jednou pevnou vlnovou délkou, laser typu DFB disponuje možností přeladění vlnových délek. Za účelem dosažení širšího pásma přeladění u tohoto typu laseru DFB se proto užívá kombinace jednotlivých sekcí s různou hodnotou sudé periody Braggovy mřížky [2].



Obr. 2.7: Grafické znázornění příčné struktury a) DFB laseru; b) DBR laseru.

2.4 Chromatická disperze – CD

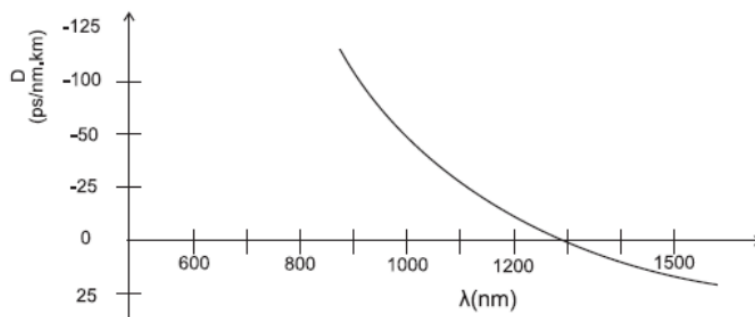
Se vzrůstající potřebou přenosových kapacit a s používáním hustého vlnového multiplexu DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) bylo třeba začít měřit chromatickou disperzi. Při DWDM se najednou šíří složky signálu s rozdílnou vlnovou délkou jinou rychlostí. Tím se budou některé složky vstupního impulsu signálu při průchodu optickým vláknem zpožďovat. Impuls se začne časově roztahovat, a zdeformovaný impuls tak bude zasahovat do vedlejších bitových mezer a dojde ke zkreslení přenášené informace. Velikost disperze optického vlákna udává koeficient chromatické disperze D , definované vztahem (2.3) [6]:

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

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

- D disperze; velikost disperze optického vlák
- t_g změna celkového zpoždění signálu při průchodu vláknem;
- $d(\lambda)$ hodnota udávající průchod vláknem.

Hodnota koeficientu udává rozšíření impulsu v ps, zdroje záření se spektrální polo šířkou 1 nm, po průchodu vláknem 1 km. Obvyklý průběh chromatické disperze je názorně zobrazen na obrázku níže – viz obr. 2.8: Graf s charakteristikou průběhu chromatické disperze.



Obr. 2.8: Graf s charakteristikou průběhu chromatické disperze.

Technologicky lze připravit vlákno, aby se chromatická disperze v oblasti kolem 1,55 μm blížila k nule. Tyto případy vláken DS (Dispersion Shifted) se dělí na vlákna s posunutou disperzní charakteristikou a plochou disperzní charakteristikou [4].

Se stále zvyšujícím používáním systému DWDM vyvstal v praxi u starších položených vláken problém, jak kompenzovat chromatickou disperzi. Nejpoužívanější řešení spočívá v použití DCF (Dispersion Compensation Fiber) s vysokou hodnotou záporné chromatické disperze. Kompenzace trasy se provádí napojením tohoto vlákna na konci trasy [10].

2.5 Polarizační vidová disperze – PMD

PMD (Polarization Mode Dispersion) je zkreslení jednotlivého impulsu procházejícího ve dvou na sebe kolmých polarizačních rovinách. Tento jev je způsobený kruhovou nesymetrií optického vlákna, jež vzniká při montáži nebo výrobě vlákna.

Polarizační vidová disperze na krátkých vzdálenostech přibližně do 10 km je definovaná vztahem (2.4) [4]:

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

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

- l délka trasy
- $\Delta\tau$ zpoždění signálu.

3 NELINÁRNÍ JEVY WDM – SPM, XPM A FWM

Nelineární optické jevy vznikají přirozeně v nelineárním prostředí a jsou řazeny k jedné z mnoha charakteristik optických vláken. Pojmenovány jsou většinou podle řádů či podle svých objevitelů. Jednou z velkých nevýhod přenosových optických systémů je jejich relativně nízká odolnost vůči těmto jevům. To může znamenat závažný problém v optickém přenosu, především pak v systémech s hustým vlnovým multiplexem DWDM, kde jsou jednotlivé kanály mezi sebou řazeny do velmi malých rozestupů (typicky se dnes komerčně používá rozestup 50 GHz), což může vyústit ve velké optické intenzity ve vláknech [3].

V rámci nelineárních jevů lze vyčlenit jejich typy, konkrétně je rozlišován:

- Ramanův rozptyl SRS;
- Brillouinův rozptyl SBS;
- vlastní fázová modulace – SPM (Self-Phase Modulation);
- vzájemná fázová modulace – CPM (Cross-Phase Modulation);
- čtyřvlnné směšování – FWM (Four Wave Mixing).

V rámci vývoje i následného uvedení do praxe nejnovějších optických sítí v blízké budoucnosti bude zapotřebí s velkou pravděpodobností brát v potaz i tyto nelineární jevy. To znamená, že bude nutno nalézt potřebnou vyrovnanost výhod a nevýhod nelineárních jevů tak, aby byly využity všechny možnosti a potenciál, jež jsou optickým vláknem nabízeny.

Parametry, na nichž v optickém vlákně závisí nelineární jevy, jsou délka vlákna a plocha průřezu vlákna. Tato závislost je dána vztahem (3.1):

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (3.1)$$

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

- L_e efektivní délka;
 L linková délka;
 α útlumová konstanta.

Nelineární jevy ve vláknové optice je možno rozdělit na neelastické jevy, k nimž je

řazen stimulovaný Ramanův rozptyl SRS a stimulovaný Brillouinův rozptyl SBS, a na elastické (parametrické) jevy, jež jsou známy také pod označením Kerrův jev. Jestliže nelineární rušení probíhá mezi pulzy jednoho WDM kanálu, je hovořeno o intrakanálových nelinearitách. Oproti tomu interkanálové (mezikanálové) nelinearity se dějí mezi dvěma a více WDM kanály [49]. Nutno upozornit, že v optickém vlákne s menší disperzí [$D < 10 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$] je dopad interkanálové nelinearity mnohem větší, než je tomu ve vlákne s větší disperzí [12]. Vznik Kerrova jevu je závislý na velikosti intenzity optického záření, s níž se mění výkonově závislý index lomu vlákna $n(\omega, I)$. Pro malé výkonové úrovně je dopad Kerrova jevu minimální, dojde-li však k překročení určité úrovně, Kerrův jev začne hrát podstatnou roli, jejíž příčinou je omezená efektivní oblast optických vláken pohybující se v rozmezí 20 až 110 μm 2. Kerrův jev je definován Kerrovým koeficientem n_2 , jeho velikost se pohybuje v rozmezí 2×10^{-20} až $3,5 \times 10^{-20} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. Závislost indexu lomu na optickém výkonu je dán vztahem (3.2):

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{eff}} \quad (3.2)$$

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

n_2 Kerrův koeficient;

A_{eff} efektivní oblast vlákna.

Aby nedocházelo k výrazným nelineárním jevům a následné degradaci signálu v důsledku změny na intenzitě závislého indexu lomu, je zapotřebí vysílat na nižších výkonových úrovních, nebo lze zvolit optické vlákno s vyšší efektivní oblastí. Vlastní fázovou modulaci SPM (Self-Phase Modulation) lze pak označit jako jeden z dopadů Kerrova jevu. U SPM je přeměněna okamžitá frekvence pulzu u náběžných a sestupných hran pulzu, a dochází tak k frekvenčnímu čirpu [23]. Změna se tedy děje v optické spektrální oblasti, v níž se vytvářejí nové spektrální složky. Tím je rozšiřováno celkové spektrum pulzu.

Ke Kerrovu jevu je také řazena křížová fázová modulace XPM (Cross-Phase Modulation). Podobně jako výkonové změny pulzu způsobovaly SPM, způsobují výkyvy výkonu sousedních kanálů v multikanálovém systému fázovou modulaci (ovlivnění průběhu fáze) zkoumaného kanálu. V časech, kdy dochází k překryvu pulzů, může narůstat intenzita záření na takovou úroveň, že bude docházet k vzájemnému ovlivňování a tím ke změně spektra. Míra XPM rušení je závislá na vzájemné polarizaci kanálů,

nelineárním koeficientu vlákna, rozestupu kanálů a disperzi vláken. V případě stejně polarizovaných kanálů je vliv XPM největší, naopak u ortogonálně polarizovaných kanálů je zaznamenán vliv nejmenší. XPM vymizí při sníženém vysílacím výkonu, čímž je však zkracována maximální překlenutelná vzdálenost kvůli šumu (ASE). XPM je možno potlačit zvětšením rozestupů mezi kanály a vlákny s velkou disperzí. Signál narušený XPM jevem vykazuje kolísání zpoždění (timing jitter), k němuž dochází díky různému příchodu optických pulzů, a amplitudové kolísání (amplitude jitter) a což se projevuje fluktuacemi amplitudy signálu.

Čtyřvlnné směšování FWM (Four-Wave Mixing) je dalším Kerrovým jevem. FWM je proces, v němž jsou interakcí mezi třemi optickými zářeními s různou frekvencí generovány tyto nové spektrální složky dané vztahem (3.3):

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (3.3)$$

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

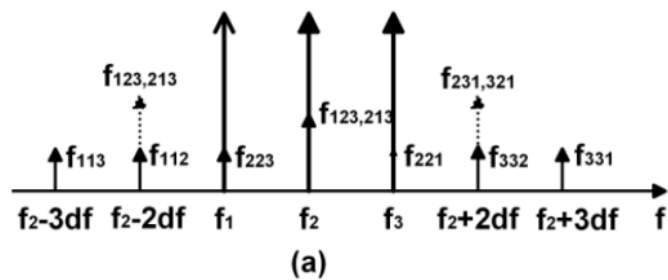
f_i, f_j, f_k původní frekvence;

f_{ijk} nová frekvence.

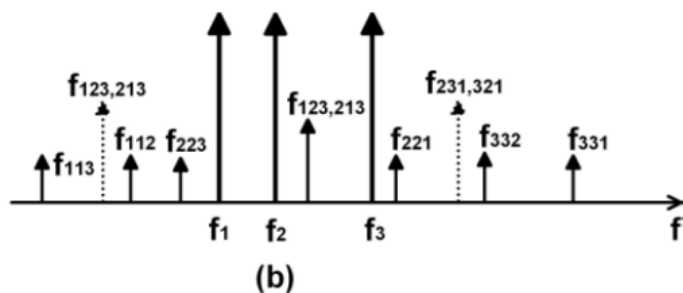
Platí nerovnost $i \neq j \neq k$. V systémech WDM může FWM způsobovat přeslechy a přenosy energie mezi kanály, jež jsou tím intenzivnější, čím:

- jsou výkonové úrovně kanálů větší;
- je počet kanálů větší;
- jsou rozestupy mezi kanály menší [2].

Především v systémech s rovnoměrným rozestupem mezi kanály je kvalita přenosu FWM jevem degradována, protože nově vytvořené složky se zobrazují na frekvencích kanálů – viz obr. 3.1: FWM v systémech s rovnoměrnými rozestupy mezi kanály. Zavedením nerovnoměrných rozestupů kanálů je vliv FWM omezen, dochází tak ke vzniku nových složek mimo frekvence kanálů – viz obr. 3.2: FWM v systémech s nerovnoměrnými rozestupy mezi kanály.



Obr. 3.1: FWM v systémech s rovnoměrnými rozestupy mezi kanály.



Obr. 3.2: FWM v systémech s nerovnoměrnými rozestupy mezi kanály.

Z důvodu zamezení vzniku FWM, je nutno mezi vstupními zářeními splnit podmínku fázového souladu. Platí úměra – čím je fázový nesoulad větší, tím menší má FWM účinnost, poněvadž dílčí příspěvky FWM nelze konstruktivně sčítat. S rostoucí disperzí roste fázový nesoulad a už i při nenulové disperzi je velmi obtížné splnit výše zmíněnou podmínku. To znamená, že vhodným plánováním disperzní mapy lze potlačit FWM a že SMF vlákna si vedou z hlediska FWM lépe než NZ-DSF vlákna, a to především v systémech se značně velkým počtem kanálů.

4 MODULAČNÍ FORMÁTY

Z principu OOK-NRZ přenosu vycházejí systémy, jež jsou specifikovány v doporučení ITU-T G.957, ITU-T G.959.1, ITU-T G.691 a ITU-T G.692 a jež s přihlédnutím k časovému hledisku vzniku jednotlivých generací 40G systému umožňují několik variant modulačních formátů, a to konkrétně:

- duobinární modulace, značená DB, u první generace 40G systémů;
- diferenční fázová modulace s označením (P)DPSK u druhé generace 40G systémů;
- diferenční kvadrurní modulace, vyjádřená zkratkou DQPSK, u třetí generace 40G systémů [15].

U 100G systémů se používají jiné modulační formáty, a to:

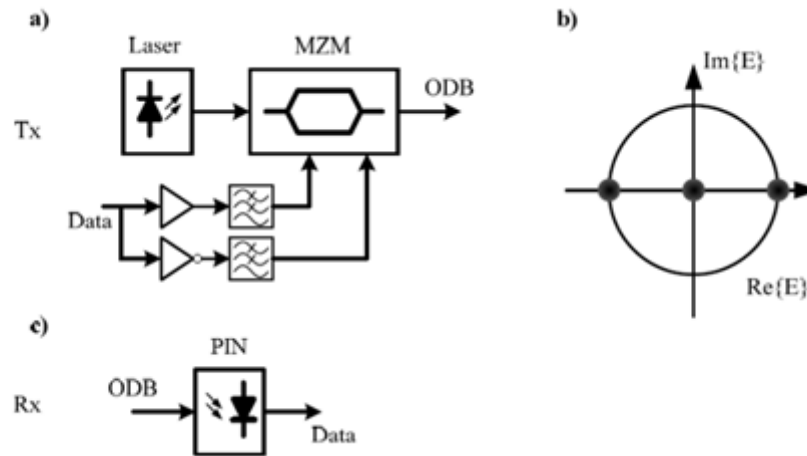
- polarizační modulace PM-QPSK (polarization multiplexed), jež představuje nejrozšířenější verzi modulace koherentní polarizované modulace PM-QPSK(polarization multiplexed), pro níž je užíváno synonymní označení DP-QPSK (dual polarization), jako defaultní 100G modulace;

4.1 Duobinární modulace – DB

Duobinární modulace (DB) z první generace 40G systémů náleží v současné době ve srovnání s ostatními modulačními formáty v praxi k méně užívaným. Lze ji zařadit do kategorie amplitudových modulací, k jejímž základním charakteristikám ve srovnání se systémem klasické NRZ modulace patří podstatně užší spektrum vlnových délek.

Kanály s přenosovou rychlostí 40G a s duobinární modulací jsou schopny vykonávat činnost na rastru 50 GHz. K dalším typickým vlastnostem duobinární modulace náleží její vyšší odolnost vůči úzkospektrálnímu filtrování a vůči chromatické disperzi až do velikosti 300 ps/nm. Tolerance k polarizační vidové disperzi (PMD) a k hodnotě rozdílného skupinového zpoždění (DGD) představuje přibližně 3,5 ps. Vysílací výkony duobinární modulace vykazují kompaktnost s 10G systémy, koexistenci a parametry systému 40G společně s 10G duobinárního systému se v zahraničí zabývali Sharan a Chaubey [18]. Schéma duobinární modulace, tj. vysílač a přijímač, a konstelační

diagram příslušné duobinární modulace je znázorněno na obrázku níže [14] – viz obr. 4.1: Schéma duobinární modulace: a) vysílač; b) konstelační diagram příslušné duobinární modulace; c) přijímač.



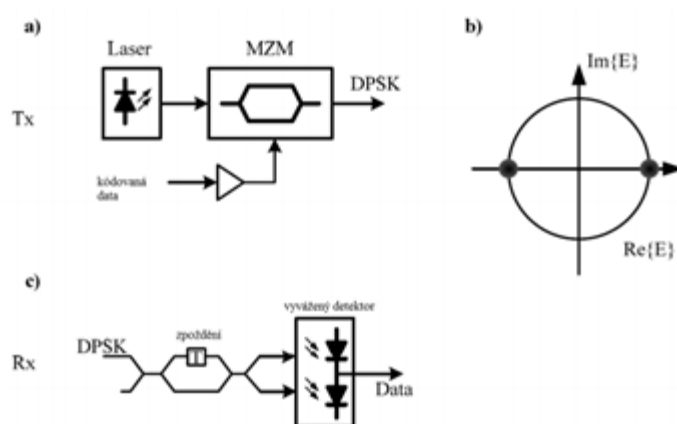
Obr. 4.1 Schéma duobinární modulace: a) vysílač; b) konstelační diagram příslušné duobinární modulace; c) přijímač.

U duobinární modulace je využíván tříúrovňový signál $(1, 0, 1)$, jenž zároveň určuje vstupní bitovou posloupnost. Tato posloupnost je dekodována na posloupnost s opačnou polaritou, tj. $(-1, 0, +1)$, která je modulována systémem MZM, na jehož výstupu je získán optický signál s intenzitou $(1, 0, 1)$. U takto utvořeného optického signálu je provedena změna fáze $(0, 0, \pi)$ – viz obr. 4.1. Použitý elektrický filtr u tohoto vysílače je nastaven na šířku pásma, jež odpovídá 25% bitové rychlosti, přičemž elektrický filtr představuje dolní propust. Za zásadní výhodu duobinární modulace lze uvést fakt, že přijímač pro duobinární modulace je shodný s přijímači NRZ. Naopak za velkou slabinu duobinární modulace je možno označit její omezený dosah, způsobený intrakanálovými nelineárními jevy [14], v důsledku čehož biomodulární modulace vykazuje vyšší parametrické hodnoty na LEAF vláknech oproti hodnotám dosahovaným na SMF vláknech [16].

4.2 Diferenční fázová modulace – (P)DPSK

K modulacím s diferenciálním klíčováním fázovým posunem je řazena diferenční fázová modulace (P)DPSK (Partial Differential PSK), jež v praxi náleží k hojně využívaným typům modulací DPSK.

Významným rysem DPSK modulace je zachování amplitudy signálu a umožnění nekoherentního příjmu. Za další přednost DPSK ve srovnání s jinými modulačními systémy (jako např. se systémem OOK-NRZ) je možno jmenovat vyšší toleranci OSNR až o 3 dB, dále lepší odolnost vůči nelineárním jevům SPM a XPM, díky čemuž systém DPSK umožňuje oproti jiným typům modulací překonávání větší přenosové vzdálenosti [17]. Naopak za mínus DPSK modulace je třeba označit nižší toleranci disperze ve srovnání s DB modulací, přičemž PMD tolerance však zůstává stejná. Na obrázku níže je graficky znázorněno uspořádání vysílače a přijímače a konstelační diagram - viz obr. 4.2: Schéma diferenční fázové modulace: a) vysílač; b) konstelační diagram příslušné duobinární modulace; c) přijímač.



Obr. 4.2: Schéma diferenční fázové modulace: a) vysílač; b) konstelační diagram příslušné duobinární modulace; c) přijímač.

Zpracování vstupního datového signálu je provedeno změnou kódování v optické doméně změnou fáze o hodnotu π pouze při změně vstupního bitu oproti bitu předchozímu. Fáze zůstává stejná, je-li zachována stejná hodnota bezprostředně následujících bitů. Aby byla zajištěna správná funkčnost optického přijímače, je nutno vybavit optický přijímač DPSK modulace zpozdřujícím interferometrem MZDI (Mach-Zehnder Delay Interferometer) a vyváženým detektorem, jenž je tvořen dvěma PIN diodami. Funkčnost přijímače vychází z principu, že vstupní optický signál po vstupu do interferometru MZDI je v něm následně rozdělen do dvou větví, přičemž u jedné z nich poté dochází ke zpoždění signálu o 1 bit, takže zpoždění signálu při rychlosti 40G činí 25 ps. Obě signálové větve, tj. přímá i zpožděná, jsou vedeny do vyváženého detektoru, na jehož výstupu lze sledovat destruktivní interferenci, k níž dochází u stejné fáze, nebo

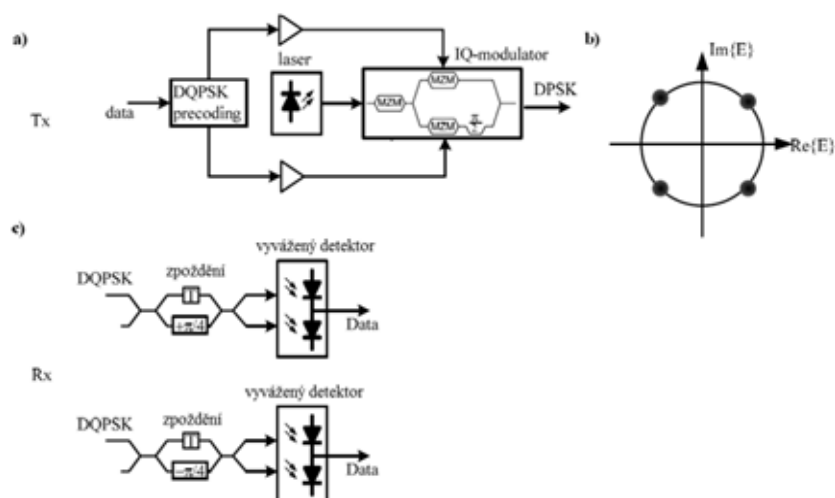
interferenci konstruktivní u rozdílné fáze [13]. Složitější konstrukce přijímače se přímo promítá i do celkově vyšších investičních nákladů na jeho pořízení, což je operátory vnímáno jako mínus tohoto systému.

Pro optimální funkčnost modulace DPSK je zapotřebí užití rastru o hodnotě 50 GHz a úzkopásmové filtrace, jež způsobuje degradaci signálu, zároveň je odstraňováno podstatně širší spektrum vznikající při modulaci DPSK [16]. Za účelem odstranění tohoto širšího spektra je užitá modulace (P)DPSK, v jejímž zpoždujícím interferometru je provedena redukce zpoždění na hodnotu 60–80 % 1 bitu.

4.3 Diferenční kvadrurní modulace – (RZ)DQPSK

U diferenční kvadrurní modulace DQPSK (Differential Quadrature PSK) ve srovnání s výše popsanou modulací (P)DSK přiřazující 1 bit k jednomu symbolu dochází ke kódování 2 bitů na jeden symbol, takže hodnota symbolové rychlosti klesá na polovinu hodnoty datové rychlosti, tj. např. pro 40G představuje rychlost 20 GBaud, přičemž ve frekvenční oblasti optického spektra také dochází k redukci jeho poměrné části. Výsledkem tohoto procesu u modulace DQPSK je posílení její odolnosti vůči polarizační vidové disperzi na hodnotu 6 ps. Redukce optického spektra je pozitivně ovlivňována při implementaci do WDM systémů a spolu s využitím úzkospektrálního filtrování je dosahováno vysoké spektrální účinnosti [13].

Snížením hodnoty symbolové rychlosti při využití modulace typu PSK je dosaženo silnějšího ovlivňování XPM jevů. Na obrázku níže je zobrazeno schéma vysílače a přijímače a konstelační diagram DQPSK – viz obr. 4.3: Schéma diferenční kvadrurní modulace: a) vysílač; b) konstelační diagram příslušné duobinární modulace; c) přijímač.



Obr. 4.3: Schéma diferenční kvadraturní modulace: a) vysílač; b) konstelační diagram příslušné duobinární modulace; c) přijímač.

Na vstupu vysílače lze navodit čtyři varianty stavu bitových dvojic, jež odpovídají posunu fáze o hodnotu fáze 0 , $\pi/2$, π nebo $3\pi/2$ a stupni složitosti překódování vstupních dat. V překóderu dochází k rozdělení signálu do dvou paralelních větví procházejících MZM, v němž je proveden fázový posun. Následně obě dvě paralelní větve signálu vstupují do vysílače, přičemž u jedné větve je provedeno trvalé posunutí fáze zpožděním o hodnotu $\pi/2$. V přijímači DQPSK modulace je zajištěno rozdělení signálu pomocí dvou vyvážených detektorů, jež vyčíslují soufázovou a kvadraturní složku. Optický odstup signál–šum (OSNR) má v porovnání s DPSK hodnotu o 1–1,5 dB vyšší při nízkých hodnotách BER, tj. přibližně 10^{-3} . Snížení chybovosti BER vede k rozdílům OSNR mezi hodnotami kódování DPSK a DQPSK, důsledkem čehož je dosažení u OSNR hodnot, vznikajícím u OOK modulací [13].

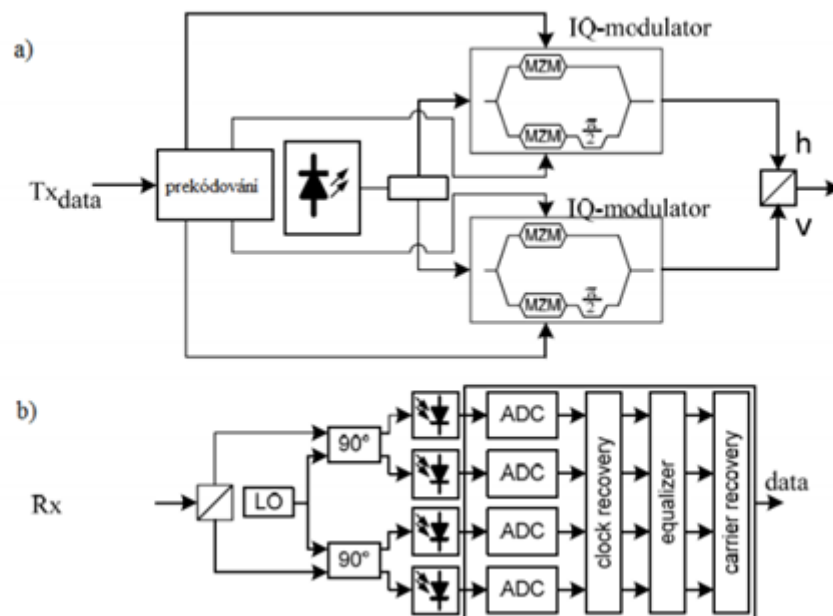
U řady optických systémů je uplatňována RZ varianta DQPSK modulace [19]. Signál RZ-DQPSK je utvářen tak, že MZM je zapojen za NRZ-DQPSK vysílač. Při tomto zapojení je MZM ovládán sinusovým signálem, jehož frekvence se rovná polovině bitové rychlosti přenosu. Signál modulovaný výše popsaným způsobem vykazuje vyšší odolnost proti nelineárním jevům a zároveň i proti polarizační vidové disperzi a vůči odstup signálu od šumu, což jej činí vhodným pro realizaci přenosů na velké vzdálenosti [14].

4.4 Polarizační modulace – PM-QPSK

S požadavkem na zvyšování přenosové rychlosti po optickém vlákně bylo zapotřebí provést navýšení stávající 40G kapacity na požadovanou kapacitu 100G. Reakcí na tento požadavek byla změna modulace, kdy modulace používaná pro 40G byla nahrazena výkonnější modulací PM-QPSK (polarization multiplexed QPSK). Některými autory je tato modulace označována jako DP-QPSK (dual polarization QPSK) [13], [15].

Modulace PM-QPSK je v současnosti považována za základní typ modulace pro 100G. Oproti předchozímu typu modulace je u modulace PM-QPSK uplatněna čtyřnásobná redukce bitové rychlosti. To znamená, že pro jeden symbol jsou využívány 4 bity. Tohoto modulačního principu je dosaženo pomocí polarizačního multiplexu.

Modulátor PM-QPSK využívá dvou nezávislých QPSK modulátorů. Výstupy z těchto modulátorů procházejí polarizačním slučovačem, v němž je provedeno sloučení signálů do dvou vzájemně ortogonálních polarizačních rovin – viz obr. 4.4: Schéma PM-QPSK modulace: a) vysílač; b) koherentní přijímač s DSP.



Obr. 4.4: Schéma PM-QPSK modulace: a) vysílač; b) koherentní přijímač s DSP.

Překódování není výhradní podmínkou přenosu, může však být ve vysílači využito.

Koherentním přijímačem, jenž je vybaven DSP, je zajištěn zpětný proces dekódování signálu. To znamená, že dochází k rozdělení vstupního signálu pomocí polarizačního rozdělovače, v němž jednotlivé polarizační roviny, posunuté o 90° , jsou poté v hybridních vazebních členech sdruženy s výstupem místního optického oscilátoru [20].

Na fotodiody dopadá zmodulovaný optický signál, z něhož vychází elektrický signál a ten je v rychlých ADC převodnících zpracován a následně odeslán do koherentního přijímače s koherentním DSP. Zásluhou digitálního zpracování signálu v procesoru DSP je, že již není zapotřebí zajištění fázové synchronizace místního oscilátoru s příchozím signálem.

Modulace PM-QPSK vykazuje vyšší citlivost a tolerance k polarizační vidové disperzi nabývá hodnotu 25 ps. Tato modulace umožňuje nahradit chromatickou disperzi až do výše hodnoty 50 000 ps/nm [14].

V praxi bylo prokázáno, že při společném provozování systémů s 40G s modulací PM-QPSK a systémů s 10G s modulací OOK-NRZ dochází kvůli nízké symbolové rychlosti u systémů 40G k depolarizaci jejich kanálů, takže zároveň mezi kanály obou systémů dochází ke vzniku vzájemné modulace fáze, tudíž tato kombinace uvedených souběžných systémů je považována za nevhodnou [11].

4.5 Modulační formáty systémů s rychlostí do 100G na jeden kanál optického vlákna

Modulační formáty, jež jsou předmětem zájmu této diplomové práce, se dělí z hlediska přenosové rychlosti do dvou základních skupin:

- modulační formáty s přenosovou rychlostí do 100G na jeden kanál optického vlákna;
- modulační formáty s přenosovou rychlostí nad 100G na jeden kanál optického vlákna.

Nyní bude podán teoretický výklad k problematice zvyšování přenosové rychlosti optických systémů pomocí modulačních formátů.

Je nutno vzít v potaz skutečnost, že elektrické či elektricko-optické komponenty

potřebné k výrobě vysílačů a přijímačů pro přenos signálu prostřednictvím optického vlákna na potřebných vysokých frekvencích jsou v současné době finančně nákladné [6]. Např. u binárního modulačního formátu OOK s přenosovou rychlostí 100G na jeden kanál optického vlákna je šířka pásma nad 70 GHz. Negativum spočívající ve vysoké finanční náročnosti na pořízení tohoto řešení lze do jisté úrovně eliminovat použitím digitální koherentní detekce v přijímači a použitím pokročilých modulačních formátů ve vysílači. Jako pozitivum tohoto řešení pro futurum je možno vyzdvihnout jeho zlepšenou optickou spektrální účinnost, jež bude možno docílit prostřednictvím využití úzkého optického spektra spolu s polarizační multiplexací. Pro úplnost je nutno podotknout, že popsané řešení však přináší komplikace v podobě poměrně složitého postupu při uplatnění koherentního systému dodavateli DWDM systémů. Výrobci DWDM systémů provádějí praktické implementace koherentních systémů tak, že vyvíjejí každý svůj vlastní uzavřený DWDM systém [7]. Další možností, jak zmenšit modulační rychlost představuje využití modulace s více nosnými vlnovými délkami, jež je možno produkovat optickou či elektrickou cestou. Jako signály OFDM jsou označovány vícenásobné subnosné v případě, že u nich dojde k frekvenčně ortogonálnímu multiplexování, přičemž každou subnosnou je možno modulovat prostřednictvím modulací BPSK, QPSK či užitím vícecestavových elektrických signálů. Odolnost chromatické disperze a polarizační disperze je dána tím, že subnosná transportuje signál s menší bitovou rychlostí. Nevýhodou OFDM signálů je potřeba náročnějšího vysílače ve srovnání s modulačními formáty o jedné nosné. Pro rychlosti do 112G na jeden kanál optického vlákna jsou nejčastěji využívány signály s jednou nosnou a polarizačním multiplexováním, a to u PM-QPSK, PM-8PSK, PM-8QAM, PM-16QAM, 64QAM a PM, 28, 18,7, 18,7, 14 a 9,33 Gbaud [6]. Na trhu jsou již k dispozici elektrické a optické prvky pro přijímače a vysílače o těchto modulačních rychlostech.

U rychlostí přesahujících 100G je klíčový vícecestavový formát, jenž je vybudován na principu M-QAM schématu a koherentního příjmu s využitím modulačního formátu a jednou či více subnosnými. Rozhodnutí o využití formátu s jednou nosnou či více nosnými je podmíněno snahou o získání co nejvyšší spektrální účinnosti.

4.6 Modulační formáty systémů s rychlostí 100G na jeden kanál optického vlákna

V odborné literatuře je jako jedna z nejdůležitějších vlastností vícecestavových modulačních formátů uváděn požadavek na odstup signálu od šumu (OSNR) u rychlosti 112G na jeden kanál optického vlákna, kdy chybovost (BER) vykazuje hodnotu 1×10^{-3} .

V tabulce 4.1 jsou prezentovány vedle požadavku na odstup signálu od šumu (OSNR) také modulační formát, vypočtený výsledek požadavků na OSNR a výsledek OSNR získaný měřením – viz tab. 4.1: Přehled teoretických a měřením získaných OSNR požadavků u vícecestavových formátů [26]. Měřením bylo prokázáno, že existuje faktický rozdíl mezi teoretickými předpoklady a měřením získanými hodnotami. Na základě porovnání teoretických předpokladů i naměřených hodnot je možno vyvodit parciální závěr, že za nejvýhodnější modulační formát je možno považovat PM-QPSK s digitální koherentní detekcí, jejíž výhoda spočívá v nízkých OSNR požadavcích a v poměrně jednoduché sestavě vysílače.

Tab. 4.1: Přehled teoretických a měřením získaných OSNR požadavků u vícecestavových formátů.

Modulační formát	Požadavek na OSNR [dB] (teoretický)	Požadavek na OSNR [dB] (naměřený)
PM-QPSK	13	15,8
PM-8PSK	16,6	19
PM-8QAM	15	17,9
PM-16QAM	17	20
PM-64QAM	21,5	26,4

Pokročilé formáty se řadí k poměrně často experimentálně ověřovaným výzkumným úkolům a takto získané výsledky jsou prezentovány na vědeckých světových fórech. Jejich komparace je provedena v tabulce – viz tab. 4.2: Komparace měřením získaných hodnot bitové rychlosti, spektrální účinnosti a přenosové kapacity u vybraných modulačních formátů. Tyto porovnávané měřením získané hodnoty bitové rychlosti, spektrální účinnosti a přenosové kapacity u vybraných modulačních formátů byly zaznamenány u modulačních formátů s rychlostí 100G na jeden kanál optického vlákna.

Pokročilé modulační formáty jsou založeny na dostupnosti optických modulátorů s nejnovějšími syntézními postupy. Univerzální přijímač umožňuje zjistit a následně zpracovat všechny modulační formáty. V odborné literatuře je nazýván přijímačem front-end.

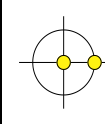
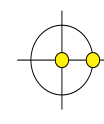
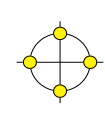
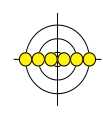
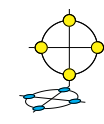
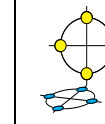
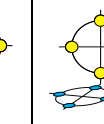
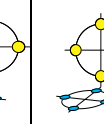
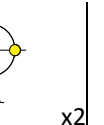
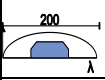
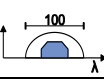
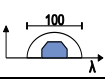
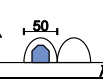
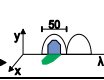
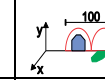
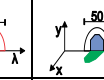
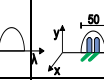
Tab. 4.2: Komparace měření získaných hodnot bitové rychlosti, spektrální účinnosti a přenosové kapacity u vybraných modulačních formátů.

Modulační formát	Bitová rychlost na kanál [G]	Spektrální účinnost [b/Hz/s]	Kapacita [TG]
PM-RZ-8QAM	114	4	32
PM-RZ-DQPSK	160	3,2	25,6
PM-RZ-8PSK	114	4	17
PM-QPSK	112	2	16,4
PM-QPSK	112	2	15,5
PM-O-QPSK	111	2	13,5
PM-16QAM	112	6,2	1

Podrobnější komparaci ve srovnání s předchozím porovnáním daných modulačních formátů s rychlostí 100G na jeden kanál optického vlákna přináší tabulka níže [26] – viz Tab. 4.3: Podrobnější komparace vybraných modulačních formátů. Také tato komparace prokázala ve shodě s předchozím srovnáním, že nejvhodnějším formátem s rychlostí 100G na jeden kanál optického vlákna je modulace PM-QPSK s očekávaným přenosem signálu do vzdálenosti 1500 km a s odhadovanou chybovostí (BER) v hodnotě 4×10^{-3} , jež disponuje nejvyšší tolerancí k odstupu signálu od šumu (OSNR < 15 dB) a s vysokou odolností k chromatické disperzi a polarizační vidové disperzi. Shodné parametry jsou vykázány taktéž u modulace PM-OFDM-QPSK s očekávaným přenosem signálu do vzdálenosti 2 000 km při stejné chybovosti. Nevýhoda tohoto modulačního formátu spočívá v nekompatibilitě s 10G a 40G systémy a další mínus představuje absence možnosti užití filtrace prostřednictvím rekonfigurovatelného optického add-drop multiplexeru (ROADM) [27].

Za výhody tohoto modulačního formátu PM-QPSK je naopak možno vyčíslit dostupnost jeho komponentových prvků pro výstavbu přijímačů a vysílačů, dále přijatelná výkonová spotřeba a cenová dostupnost. Nevýhody PM-OFDM-QPSK je navíc třeba doplnit o vyšší výkonovou spotřebu o nutnost existence dvou 50G rozhraní pro bezproblémový chod.

Tab. 4.2: Podrobnější komparace vybraných modulačních formátů.

Modulační formát	OOK	OOK-VSB	DQPSK	RZ-DPSK-3ASK	PM-DQPSK	OP-FDM-RZ-DQPSK	PM-QPSK	PM-OFDM-QPSK	
koh./nekoh.	nekoh.	nekoh.	nekoh.	nekoh.	nekoh.	nekoh.	koh.	koh.	
bitů/symbol	1	1	2	2,5	2 x 2	2 x 2	2 x 2	2 x 2 x 2	
modulační rychlost[Gbd]	112	112	56	44	28	28	28	14	
konstelace									 x2
DWDM grid [GHz]									
spektrální účinnost [bit/s/Hz]	0,5	1	1	2	2	1	2	2	
OSNR tolerance [db] při BER = 4×10^{-3}	17,5	18,5	15,5	>20	15,5	15,5	<15	<15	

U formátu s rychlostí 100G na jeden kanál se nejčastěji používá modulační formát PM-QPSK. Negativum v případě aplikování QPSK modulace spočívá v nutnosti použít dvakrát vyšší modulační rychlost. Za pozitivum modulačního formátu PM-QPSK oproti modulačnímu formátu OFDM je třeba označit dobrý poměr ceny a složitost implementace, další devizu tvoří oproti modulaci OFDM schopnost pracovat s koherentní detekcí a používat DPS (Digital Signal Processor). U dalších formátů 40G systémů jsou rozdíly v parametrech ve srovnání s ostatními modulačními formáty, jako např. s modulací DPSK a (Q)PSK, menší. Kupříkladu u fázové modulace PSK je vykazován o 3 dB nižší odstup signálu od šumu, jenž je specifikován jako OSNR požadavky, než jako tomu je u modulace OOK (On off Keying). K této situaci dochází z důvodu, že modulace PSK má lepší vlastnosti v rovině odolnosti oproti modulaci OOK a zároveň disponuje větší odolností vůči nelineárním jevům.

Z důvodu redukce modulační rychlosti až o polovinu je ve srovnání DPSK jako

výhodnější hodnocena modulace QPSK. Při použití technologie typu RZ jsou zlepšeny OSNR požadavky nelinearity a PMD účinky. Je-li použit u této technologie RZ s čirpem (označované jako CRZ), bude navíc kompenzováno fázové skreslení, jež je způsobeno nelineárními účinky. Takto je dosaženo lepšího přenášeného výkonu a z tohoto důvodu je využíván modulační formát CRZ – DQPSK ((lit 10). Z výše uvedených důvodů se pro systémy 40G a zároveň i pro 100G systémy jeví jako nejvýhodnější modulace DPSK, DQPSK a koherentní QPSK (PM-QPSK).

4.7 Modulační formáty systémů s rychlostí nad 100G na jeden kanál optického vlákna

Pro systémy nad 100G [9] jsou k nejčastěji využívaným modulacím pro rychlosti 200, 400 a 1000G řazeny formáty PM-QPSK, PM-8QAM, PM-16QAM, PM-32QAM, PM-64QAM, PM-256QAM. Funkci referenčního modulačního formátu plní rychlost 100G. Hledisko nosných slouží k dalšímu členění v rámci formátu 100G PM-QPSK, a to na:

- modulační formát s jednou nosnou;
- modulační formát s více nosnými.

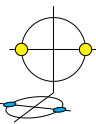
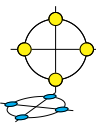
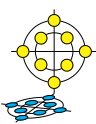
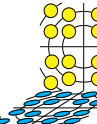
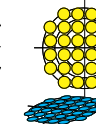
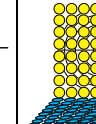
4.7.1 Modulační formáty s jednou nosnou – QAM přenosy

Použití více stavových modulačních formátů je nezbytným předpokladem k dosažení potřebné 100G rychlosti a vyšších rychlostí. Za účelem docílení přenosové rychlosti 200G na jeden kanál je v současnosti využívána společná činnost QAM schématu a polarizačního multiplexování, konkrétně PM-16QAM. Schéma QAM je založeno na M-QAM nebo 2m QAM, kde m vyjadřuje počet bitů přenesených v jednom časovém slotu/symbolu a m zároveň představuje celé číslo. PM-2m-QAM je formát, u něhož lze přenést 2 x m bitů za symbol, a je získán pomocí přídatku polarizačního multiplexování.

Pro modulace PM-QAM jsou k dispozici různé konstelace, jejichž přehled je sestaven do tabulky – viz Tab. 4.4: Porovnání modulačních formátů pro systémy nad 100G (Penalty OSNR jsou vztaženy k stejným bitovým rychlostem – PM-BPSK slouží jako reference) [9]. Zároveň platí, že při navýšení počtu symbolů dochází u Euklidovských vzdálenosti mezi symboly k značnému snížení vzdálenosti, přičemž

existuje přímý vztah mezi navyšováním počtu symbolů proporcionalně k zvyšování bitové chybovosti, jež se negativně promítá do navyšení poměru odstupů signálu od šumu (OSNR). Výše již zmíněná tabulka – viz Tab. 4.4 v přehledu přináší i teoretické charakteristiky penalty odstupů signálu od šumu za splnění podmínky stejné bitové rychlosti u všech formátů. Dále je nutno vzít v úvahu Shannonovu teorii, jíž bylo prokázáno, že odstup signálu od šumu (OSNR) nebývá vyšších hodnot, je-li navyšena spektrální účinnost. Shannonova teorie byla dále uplatněna při jevech, jako je např. kapacitní limit optických vláknových přenosů a sítí, chybovost u klasických vláken, jež je přímým důsledkem zvýšení hodnoty spontánní emise, a nelinearity CD a vlákna, jež vychází z Kerrova jevu. Snaha o optimalizaci spektrální účinnosti signálů je neustále předmětem výzkumných šetření. Jako možné řešení těchto snah se jeví optimalizace prostřednictvím Nyquistova filtrování, jež je označováno zkratkou (N-WDM). Jeho podstata spočívá v optimalizaci spektrální účinnosti signálů M-QAM. Vhodnost využití Nyquistova filtrování bylo mimo jiné potvrzeno u podmorských přenosů signálů, jejichž činnost je postavena na konfiguraci PM-RZ-QPSK. Nedílnou součástí Nyquistova filtrování je kanálová rozteč s označením N-WDM, jež denuncuje kanálovou rozteč – $f_n = 1$, jíž je vyjádřen poměr WDM gridu k modulační rychlosti. Faktor kanálové rozteče může být i v jiném poměru, a to např. $f_n = 1,56$, je-li u systémů 100G symbolová rychlost 32 Gbaud, jež zároveň odpovídá přenosové rychlosti 128G [9]. Při symbolové rychlosti 28 Gbaud je dosahováno přenosové rychlosti 112G.

Tab. 4.3: Porovnání modulačních formátů pro systémy nad 100G.

Modulační formát	PM-BPSK	PM-QPSK	PM-8QAM	PM-16QAM	PM-32QAM	PM-64QAM
bit/symbol	2 x 1	2 x 2	2 x 3	2 x 4	2 x 5	2 x 6
konstelace						
Penalta OSNR [dB]	0	0	2	4	6	8,5

Pozn.: Penalty OSNR jsou vztažené k stejným bitovým rychlostem – PM-BPSK slouží jako reference).

Přehled modulačních formátů M-QAM je uveden v tabulce níže – viz tab. 4.5:

Přehled M-QAM možností pro 400G a 1000G s využitím jako reference systému 100G (PM-QPSK) a 200G (PM-16QAM) [9]. Pro tyto případy je uvažováno s hodnotou kanálové rozteče $f_n = 1,56$, jež přímo ovlivňuje spektrální účinnost. Konkrétně u systémů 400G s modulací PM-256QAM bude spektrální maximální účinnost dat omezena hodnotou 8 bit/s/Hz při celkové kapacitě v C-pásmu je vyjádřena hodnotou přibližně 35 Tb. Za této situace je třeba vzít v úvahu, že spektrální účinnost o hodnotě 8 bit/s/Hz je možno zachovat i na nižších modulacích M-QAM (např. PM-128QAM, PM-64QAM, popř. i PM-32QAM) za předpokladu, že kanálová rozteč f_n bude mít lepší parametry než 1,56, tj. že se blíží hodnotě 1.

Tab. 4.4: Přehled M-QAM možností pro 400G a 1000G s využitím jako reference systému 100G(PM-QPSK) a 200G (PM-16QAM).

Modulační formát	PM-QPSK	PM-16QAM	PM-QPSK	PM-8QAM	PM-16QAM	PM-32QAM	PM-64QAM	PM-256QAM	PM-32QAM	PM-64QAM
bitová rychlost [Gb/s]	100	200	400						1000	
Symbolová rychlost [Gbd]	28–32	28–32	112–128	75–85	56–64	45–51	37–43	28–32	112–128	93–107
bit/symbol	4	8	4	6	8	10	12	16	10	12
kanálová rozteč	50	50	200	133	100	80	67	50	200	166
SE* [bit/s/Hz]	2	4	2	3	4	5	6	8	5	6
počet C-pásmových kanálů	88	44	22	33	44	55	66	88	22	26
celková kapacita [Tb/s]	8,8	17,6	8,8	13,3	17,6	22	26,4	35	22	26
OSNR [db] min. bit.rychlost	12,2	19,2	18,2	20,2	22,2	24,2	26,7	>30	28,2	30,7
OSNR [dB] max. bit.rychlost	9,8	16,8	15,8	17,8	19,8	21,8	24,3	>30	25,8	28,3

Je-li zapotřebí zachovat symbolovou hodnotu na vysoké úrovni, pak je nutno nasadit systémy s více nosnými, jež pracují s nižší modulační rychlostí. V tabulce 3.4 jsou zahrnuty hodnoty OSNR, jež zároveň:

- přihlížejí k minimální a maximální symbolové rychlosti;
- vztahují se k referenční OSNR s hodnotou 8,2 dB Pro 40G PM-QPSK;
- jsou omezeny u minimální přenosové rychlosti s Q-faktorem 8,5 dB (max. BER = $3,8e^{-3}$);
- jsou limitovány u maximální symbolové rychlosti s Q-faktorem 6,4 dB (max. BER = $1,8e^{-2}$);

V rámci dílčího shrnutí je třeba uvést, že u maxima modulační rychlosti představuje čistý odstup signálu od šumu (OSNR) zisk vyšší o 2,4 dB.

U hodnot symbolových rychlostí vyšších než 100G je jedním z omezujících faktorů rychlost převodu signálu v digitálně-analogovém (DA) a analogově-digitálním (AD) převodníku [9]. V blízké době bude s největší pravděpodobností v reálu implementováno využití symbolové rychlosti 43 Gbaud pro přenosovou rychlost 400G s jedno nosnou modulací PM-64QAM.

4.7.2 Modulační formáty s více nosnými – OFDM přenosy

V této kapitole bude krátce přistoupeno k teoretickému výkladu o formátu s více nosnými, pro jehož označení je užívána zkratka OFDM a nejrozšířenější jeho varianta je nazývána jako O-OFDM. Skladba vysílače a přijímače se shoduje se systémy QAM. V předchozí kapitole byla zmíněno osvědčené užití Nyquistova filtrování pro podmořské přenosy signálů vycházejících z konfigurace PM-RZ-QPSK. Obdobně jsou experimentální šetření prováděna pro oblast využití polarizačního multiplexování u modulace O-OFDM a PM-O-OFDM pro podmořský přenos signálů, jejichž výsledkem je docílení terabitových rychlostí přenosu signálů na jeden kanál. V rámci prováděných výzkumů byl také testován přenos na jednovidovém vlákně (SMF) 1 Tb, kdy byl uplatněn PM-OFMD pro rychlost 112G DQPSK kanály do vzdálenosti 768 km, dále OFDM pro dosah 454 km u rychlosti 253G spolu s subnosnými, po nichž je přenášen signál QPSK, a rychlost 400G s modulací 8 QAM na vzdálenost přesahující 3 560 km [19].

4.7.3 Shrnutí k modulačním formátům systému WDM

Výpočty i experimentálním měřením byla prokázána přímá závislost mezi bitovou rychlostí a přenosovou vzdáleností. Tento vztah je podmíněn fyzickými parametry konkrétního použitého systému. Jedná se především o tato omezení [10]:

- nižší hodnoty odstupu pro signál od šumu (OSNR);
- nižší úroveň tolerance vůči disperzi;
- vyšší hodnoty pro nelineární účinky;
- vyšší úroveň polarizační vidové disperze (PMD).

Nyní budou teoreticky objasněny vzájemné vztahy mezi jednotlivými typy omezení přenosového systému. První dílčí závěr, jenž je možno vyvodit, se týká zvyšování rychlosti, přičemž platí úměra – čím je vyšší rychlost, tím je:

- vyšší požadavek na OSNR;
- nižší tolerance vůči disperzi a PMD;
- silnější účinky nelinearit [10].

Další dílčí závěr platí pro využití více stavových modulačních formátů a polarizační multiplexování, jež lze uvádět do provozu díky technickému vývoji v oblasti digitálních koherentních detekcí, jimiž je zajišťována spektrální účinnost. Digitalizace přenosu signálu kromě jiného se pozitivně promítá do nižších nároků na hardware, interferenční chybovost a hladinu šumu.

A poslední dílčí závěr se vztahuje k odolnosti signálu s více nosnými modulacemi k chromatické disperzi (CD) a k polarizační vidové disperzi (PMD), kdy pro lepší odstup signálu od šumu (OSNR) jsou využívány nižší hodnoty bitové rychlosti na jednotlivé subnosné přenášející signál.

Zcela na závěr této kapitoly je zapotřebí připomenout fakt, že pro modulační formáty 100G je nejvhodnější formát PM-QPSK [6], [9], [10], [11]. Nejúčelnější řešení pro 400G představuje využití dvou nosných o rychlosti 200G s modulací PM-16QAM. Pro terabitové rychlosti připadá jako teoreticky nejvýhodnější pro futurum aplikace modulace O-OFDM, přestože je toto řešení s ohledem na současné technologické možnosti považováno za obtížně proveditelné. Proto je dosud pro terabitové rychlosti užívána modulace M-QAM s vysokými konstelacemi.

5 MĚŘENÍ PARAMETRŮ NA 10G A 100G

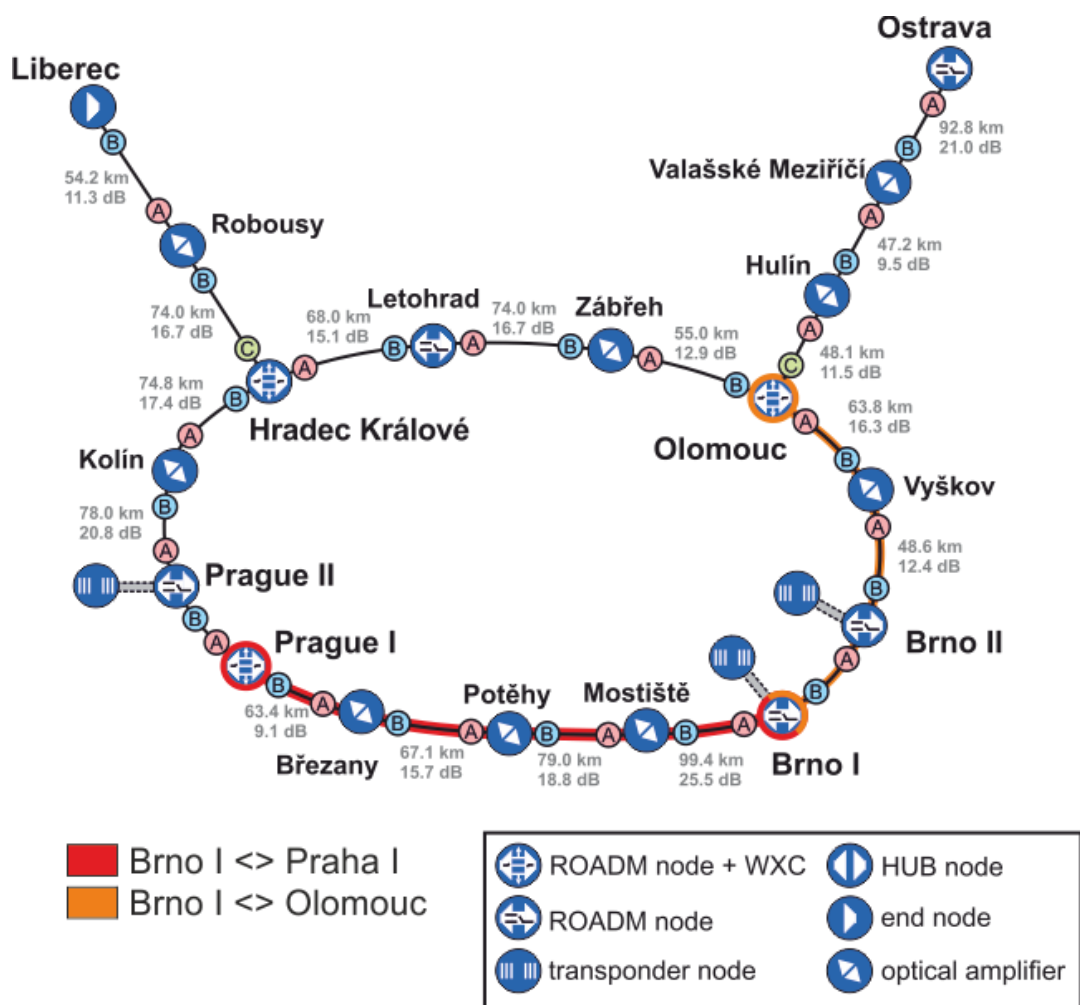
Předmětem praktické části diplomového úkolu je experimentální měření parametrů DWDM systému v rámci akademické laboratorní sítě CESNET. Systém DWDM, pracující na optické transportní síti (SMF), je určen pro komunikaci po více optických vláknech prostřednictvím optických komponentů, na nichž jsou připojena různá zařízení s příslušnými komunikačními aplikacemi.

Experimentální měření se sestává z několika etapových kroků. Nejdříve je provedeno spektrální měření optické sítě, jehož cílem bylo praktické seznámení s transportní topologií akademické laboratorní sítě CESNET. Teprve poté je pozornost experimentálního měření zaměřena na vliv polarizačního filtru a kontroleru na odstup signálu od šumu (OSNR), přičemž zkoumání tohoto vlivu zároveň představuje i hlavní cíl této diplomové práce. Měření jsou prováděna na optické síti při rychlostech 10G a 100G, a to z důvodu absence měřicí techniky pro vyšší rychlosti.

5.1 Topologie akademické sítě CESNET

Jádrem akademické sítě CESNET je DWDM infrastruktura s desítkami přenosových kanálů o rychlostech 100G, 10G a 1G. Její budování bylo započato v roce 2005 a je neustále inovována, modifikována a modernizována. První nasazení přenosového systému DWDM bylo v akademické síti CESNET provedeno na trase Praha – Brno. Přenosový systém DWDM v rámci infrastruktury akademické sítě je založen na koncepci kombinace přenosových optických prvků vlastní konstrukce – řady CzechLight s komerčními zařízeními. V roce 2013 bylo jádro sítě povýšeno na rychlost 100G. Akademická síť CESNET je díky použitým komponentům schopna průběžně reagovat na aktuální požadavky ohledně potřebného navyšování přenosové kapacity a přenosové rychlosti optických kanálů [21].

Celá stávající akademická síť CESNET je graficky znázorněna na obrázku – viz obr. 5.1: Grafické znázornění přenosového systému akademické transportní optické sítě CESNET.



Obr. 5.1: Grafické znázornění přenosového systému akademické transportní optické sítě CESNET.

5.1.1 Rozšíření otevřeného přenosového systému akademické sítě CESNET o pásmo L

Osazení trasy Praha – Brno akademické sítě CESNET bylo provedeno svobodným, tj. nezávislým, systémem pracujícím v pásmu L, jehož vlnová délka je dána hodnotou 1570–1605 nm a jenž funguje vedle stávajícího svobodného systému v pásmu C s hodnotou vlnové délky 1530–1565 nm. Pro slučování systémů (MUX) a oddělování systémů (DEMUX) pracujících v pásmu L a v pásmu C jsou využívány termálně stabilní mřížky AWG, jež vykazují nízký vložený útlum. Chromatická disperze (CD) u těchto zařízení funguje na zákonitostech daných vláknových Braggových mřížek. Navržené optické zesilovače CLA jsou české provenience a díky podpoře dlouhých optických vláken erbiem dovolují vedle pásma C dosažení zisků i v pásmu L [22].

5.2 Měření optického spektra přenosového systému DWDM

Elementárním cílem je realizace měření světelného spektra na trasách Praha 1 – Brno 1 a Brno 1 – Olomouc v rámci přenosového systému DWDM (viz výše obr. 5.1: Grafické znázornění přenosového systému akademické transportní optické sítě CESNET) a zjištění, zda u optického spektra přenosového systému DWDM jsou splněny doporučení ITU. Doporučením ITU jsou vymezeny frekvenční hodnoty pro jednotlivé přenosové optické nosné kanálů dle frekvenčního plánu, v němž je normalizován frekvenční kmitočet 193,1 THz korespondující vlnové délce 1552,52 nm na kryptonové spektrální čáře.

V návrhu ITU je doporučeno dodržovat odstup jednotlivých přenosových optických nosných kmitočtů kanálů 100 GHz, jež odpovídají vlnové délce 0,8 nm a n násobkům ($n \times 100$ GHz), kde n je počet kanálů. Vývoj přenosových optických systémů s sebou nese i změny v oblasti spektrální hustota, takže jednotlivé odstupy kanálu byly v nedávné minulosti postupně zmenšovány, a to z odstupu 100 GHz na 50 GHz (0,4 nm) či 25 GHz (0,2 nm). U nejnovějších systémů je v současnosti experimentálně ověřován odstup kanálů na hodnotě 10 GHz.

Přenosový systém DWDM je charakterizován spektrem signálu, jež určuje:

- celkový výkon přenášeného optického spektra;
- výkonová vyrovnanost přenášeného optického spektra kanálů;
- spektrální odstup přenosového systému kanálů;
- přeslech nebo též izolace přenosového systému kanálů, především v rámci sousedních kanálů.

Jedním ze základních požadavků kladených na přenosový systém DWDM je stabilita a bezporuchovost během provozu. Z tohoto důvodu je sledována časová stabilita, tj. vyrovnanost vlnové délky všech optických nosných a výkonu.

Aby se zdařil přenos signálu prostřednictvím jednoho kanálu, je bezpodmínečně nutno kontrolovat dodržování parametrů pro jednotlivé kanály DWDM, a to konkrétně:

- výkon v kanálu, jenž je defaultně označen jako jeho výkonové maximum;
- odstup signál/šum pro daný kanál;
- vlnová délka výkonového maxima;
- střední vlnová délka;

- nominální vlnová délka;
- spektrální šířka kanálu, jež je zpravidla definována z 3 dB poklesu [24].

Odstup signálu od šumu (OSNR) je možno správně interpretovat v případě, že je explicitně uveden bod měření úrovně šumu, tj. buď na minimální hodnotě odstupu mezi kanály při pevném odladění od nosné (v rámci zvolené vzdálenosti, např. vzdálenost $\pm 0,8$ nm od nosné), nebo je šum implementován na frekvenci nosné kanálu.

Vzhledem ke skutečnosti, že v současné době v rámci přenosů DWDM neustále rostou nároky na odstup signálu od šumu, stoupají zároveň i nároky kladené na přenosovou rychlost v kanálu. Tento fakt je možno doložit na příkladu přenosových systémů, kdy pro systém STM-16 (2,5G) je za účelem zajištění kvalitního přenosu nárokován požadavek na odstup signálu od šumu 18–20 dB, pro systém STM-64 (10G) hodnota signálu od šumu nabývá hodnoty přibližně 22 dB, a pro kvalitní přenos signálu prostřednictvím STM-256 (40G) je již nutno zajistit nárůst odstupu signálu od šumu na hodnotu asi 25 dB.

Vlnová délka kanálu pro úspěšný přenos, tj. vlnová délka maximálního výkonu, se nesmí odchylovat od předepsané neboli nominální vlnové délky o hodnotu větší než $\pm 0,2$ odstupu nosných. Z výše uvedeného pro případ odstupu nosných 100 GHz tak logicky vyplývá, že hodnota vlnové délky musí vykazovat toleranci v rozmezí ± 20 GHz, jež je relevantní hodnotě $\pm 0,16$ nm.

Pro šířku přenášeného optického signálu v jednom kanále je vykazována přímá závislost na šířce vstupního modulačního signálu. Dojde-li při modulaci k chybě, může dojít ke změně šířky přenášeného optického signálu, jež se projevuje jejím nežádoucím rozšířením. Aby bylo eliminováno riziko těchto chyb na minimum, jsou pro systém DWDM nasazovány externí modulátory za účelem náhrady laserů s přímou modulací lasery injekčním proudem. I přes skutečnost, že jsou v současné době používány progresivní modulační systémy, je i tak neustále šířka pásma optického signálu pro jeden kanál 0,02 nm při přenášeném signálu o rychlosti 2,5G a při rychlosti signálu 10G je šířka pásma přenášeného optického signálu pro jeden kanál 0,08 nm.

5.2.1 Měřicí technika pro měření signálu na optických zařízeních

Důležitým parametrem, jenž je měřen na optických zakončeních standardu pro digitální komunikaci pomocí laseru nebo LED diody (SDH), je měření výkonu optického signálu

prostřednictvím přenosového systému DWDM. Měřicím přístrojem je komplexně měřen optický výkon jako celek dle úrovně konkrétní hodnoty spektrální citlivosti pro daný měřicí přístroj, jejíž rozsah činí 850–1650 nm. Kvůli tomu, že je měřicím přístrojem měřeno celé optické spektrum, není možno z naměřeného výsledku zjišťovat např. úroveň šumu a stejně tak i ostatní parametry týkající se jednotlivých částí optického spektra.

Při měření je třeba bezpodmínečně dodržet podmínku, jež spočívá v zamezení přebuzení fotodetektoru vysokou úrovní signálu z přenosového systému DWDM. Nedodržení této podmínky může vést k poškození měřiče výkonu. Specificky nakonfigurované měřiče jsou schopny měřit optický výkon až do úrovně +18 dBm, +20 dBm či +26 dBm.

Za účelem zjištění spektrálního rozložení výkonu optického signálu u systému DWDM jsou využívány buďto optické spektrální analyzátoři OSA (Optical Spectrum Analyzer), nebo měřiče vlnových délek MWM (Multi Wavelength Meter) [26].

Optický spektrální analyzátor OSA vykazuje sice velkou citlivost pro měření optického výkonu, tj. od úrovně –80 dBm, na druhou stranu však je jeho nedostatkem selektivní způsob měření, tzn. měření výkonu pro určitou konkrétní vlnovou délku.

Měření měřičem vlnových délek MWM je založeno na vzorkování měřeného optického signálu a k jeho digitálnímu zpracování je využívána Fourierova transformace znázorňující optické spektrum.

Metoda měření pomocí MWM umožňuje vysokou selektivitu na straně jedné, ale zároveň na straně druhé disponuje nízkou citlivostí pro měření optického výkonu, od příznačné úrovně výkonu –45 dBm. To znamená, že metoda měření MWM nadává možnost měřit nízké úrovně optického výkonu.

Měření s neustále se modernizujícím systémem DWDM je průběžně inovováno, a tak je nutností aktualizovat i technické normy pro měření a vyvíjet novou měřicí techniku. Modernizací systému DWDM je rozuměno především:

- zahušťování optického spektra;
- rozšiřování DWDM přenosů z 3. okna optického pásma C (rozsah 1525–1560 nm) i do 4. okna optického pásma L (rozsah 1565–1620 nm);
- n násobné zvyšování počtu kanálů.

Modernizace těchto servisních přístrojů respektuje dva základní vývojové trendy, a to praktičnost, spočívající v mechanické odolnosti měřicích přístrojů, a komfortnost obsluhy měřicího přístroje, jež je dána jeho softwarovým vybavením a způsobem vyhodnocení naměřených hodnot.

5.2.2 Chybovost BER v optickém spektru systému DWDM

Vyhodnocení chybovosti BER (Bit Error Rate) je prováděno poměrně jednoduchou metodou, jež zhodnocuje kvalitu přenosu a jež je postavena na principu vyhodnocení kvalitativních parametrů přenosu. Chybovost BER je charakterizována poměrem počtu příchozích chybových bitů versus kompletní počet příchozích bitů. Je vyjádřena vztahem(5.1) [1]:

$$BER = \frac{N_{chyb}}{N_{celk}} \quad (5.1)$$

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

N_{chyb} počet příchozích chybových bitů;

N_{celk} celkový počet příchozích bitů.

V doporučení ITU-T je navrženo jako optimum, že hodnota BER příchozího signálu nemůže být nižší než 10^{-12} . Poněvadž získání těchto nízkých hodnot při měření je však v reálné situaci velice obtížné, je na interval spolehlivosti aplikována chybovost BER [25].

5.2.3 Optický odstup signálu od šumu – OSNR

Parametrem optického odstupu signálu od šumu (OSNR) je dán poměrem optický výkon signálu P_s versus výkon šumu P_N v mW (5.2) [26]:

$$OSNR = 10\log\left(\frac{P_s}{P_N}\right) \quad (5.2)$$

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

OSNR optický odstup signálu od šumu (dB);

P_s výkon signálu (mW);

P_N výkon šumu (mW).

Optický šum signálu ovlivňuje citlivost a správnost detekce prováděnou přijímačem signálů. Základní zdroje šumu jsou tvořeny zesilovači signálu, přičemž hladina celkové úrovně šumu je závislá na počtu a umístění zesilovačů na přenosové trase a na křivce jejich zesílení [16]. Nežádoucí účinky zesilovačů signálu je možno eliminovat pomocí optického filtru, jenž je osazen před přijímač. Pomocí parametru OSRN nelze určit hodnoty XPM a SPM, jelikož jejich působení v rámci optického šumu signálu je v optice neměřitelné. Teprve převodem na elektrický signál lze u těchto jevů naměřit příslušné hodnoty [26].

5.2.4 Zobrazení kvality přijímaného optického signálu – oko rozhodnutí

Grafické zobrazení kvality přijímaného optického signálu je provedeno metodou oko rozhodnutí, tj. diagramem, v jehož rámci je proveden výběr mezi logickými hodnotami „0“, „1“ – viz obr. 5.2: Grafické znázornění oka rozhodnutí s vyznačením jeho hlavních charakteristik.

Na polohu vzorkovacího okamžiku je působeno šířkou oka. Ve výpočtu číselného vztahu tvaru oka je uplatněn tzv. Q faktor, vzorec pro výpočet tvaru oka je dán vztahem (5.3) [8]:

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (5.3)$$

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

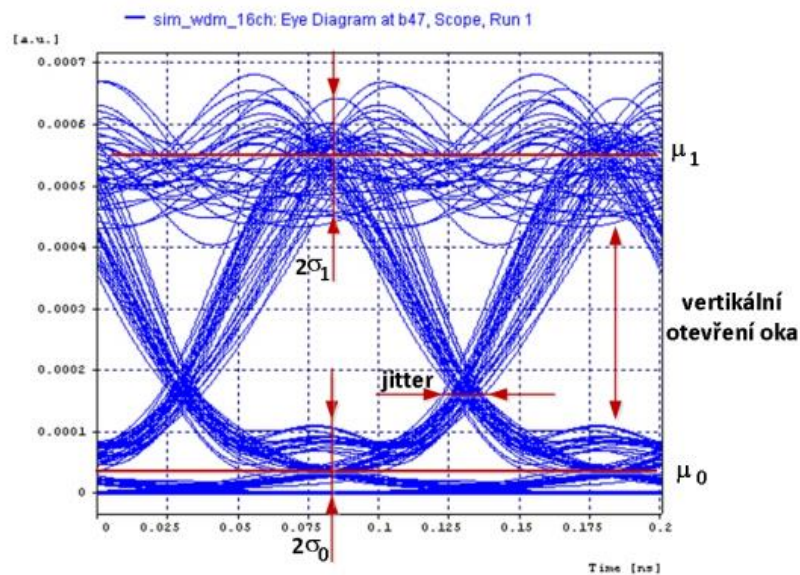
μ_0 střední hodnota vyhodnocovaných symbolů (0);

μ_1 střední hodnota vyhodnocovaných symbolů (1);

σ_0 rozptyl hodnot vyhodnocovaných symbolů (0);

σ_1 rozptyl hodnot vyhodnocovaných symbolů (1).

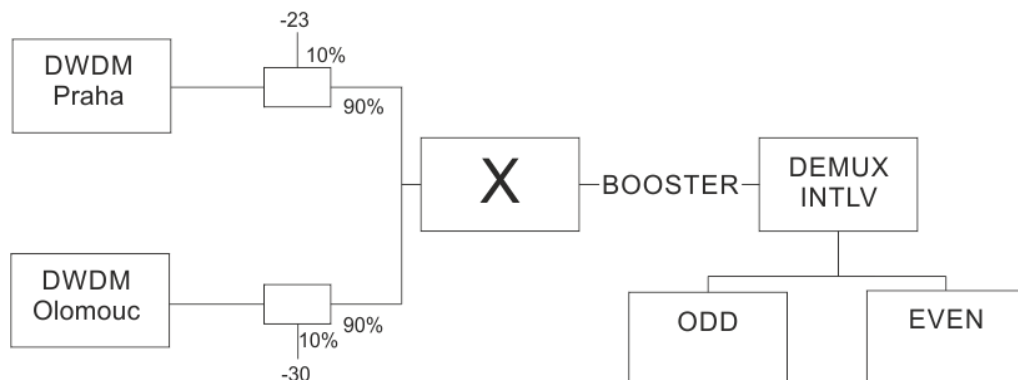
Oko rozhodnutí je využíváno také pro stanovení odstupů optického signálu od šumu – OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) pro pásmo příslušného optického kanálu v přijímači po následném převodu z optického signálu na elektrický signál [3]. Odstup signálu od šumu – OSNR při využití Q faktoru u ok rozhodnutí je použitelné i u více stavových modulací.



Obr. 5.2: Grafické znázornění oka rozhodnutí s vyznačením jeho hlavních charakteristik.

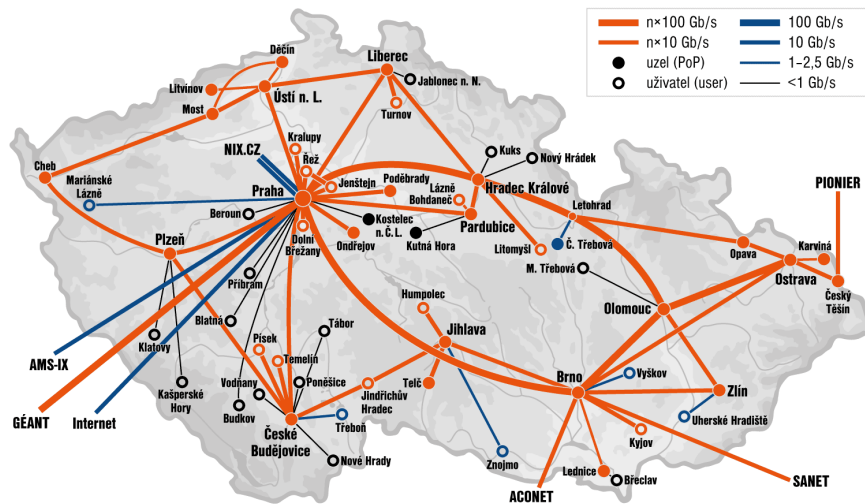
5.2.5 Měření optického spektra v systému DWDM na optické akademické přenosové síti CESNET

Při vlastním měření optického spektra je využita topologie optické akademické sítě CESNET, v jejímž rámci jsou vybrány dvě trasy, a to trasa Praha 1 – Brno 1 o délce v jednom směru 308 km a v celkové délce 616 km trasy Brno 1 – Praha 1 ve smyčce a trasa Brno 1 – Olomouc o délce v jednom směru 112 km a v celkové délce smyčky 224 km, s přenosovými systémy DWDM. Zapojení obou tras je graficky znázorněno na obr. 5.3: Blokové schéma spektrálního měření na trasách Praha 1 – Brno 1 a Brno 1 – Olomouc prostřednictvím přenosových systémů DWDM.



Obr. 5.3: Blokové schéma spektrálního měření na trasách Praha 1 – Brno 1 a Brno 1 – Olomouc prostřednictvím přenosových systémů DWDM.

Vstupy a výstupy do zařízení MUX a DEMUX jsou pro jednotlivé vlnové délky vyvedeny pomocí optických patchcordů na optický patch panel. Měření je prováděno na vlnových délkách v rozsahu 1529 nm – 1565 nm optického pásma C. Měření bylo provedeno laserovým generátorem a optickým zesilovačem neboli pumpou KEOPSYS s pevně nastaveným ziskem 6,7 dB. Měření bylo provedeno tak, že nejprve bylo přistoupeno k proměření optického spektra za účelem seznámení se s topologií akademické transportní optické sítě CESNET. Takto byly určeny jednotlivé vlnové délky optického spektra a zároveň byly definovány jejich parametry. Trasa měřeného zapojení je graficky znázorněna na obr. 5.4: Grafické znázornění měřených tras v akademické transportní optické síti CESNET.



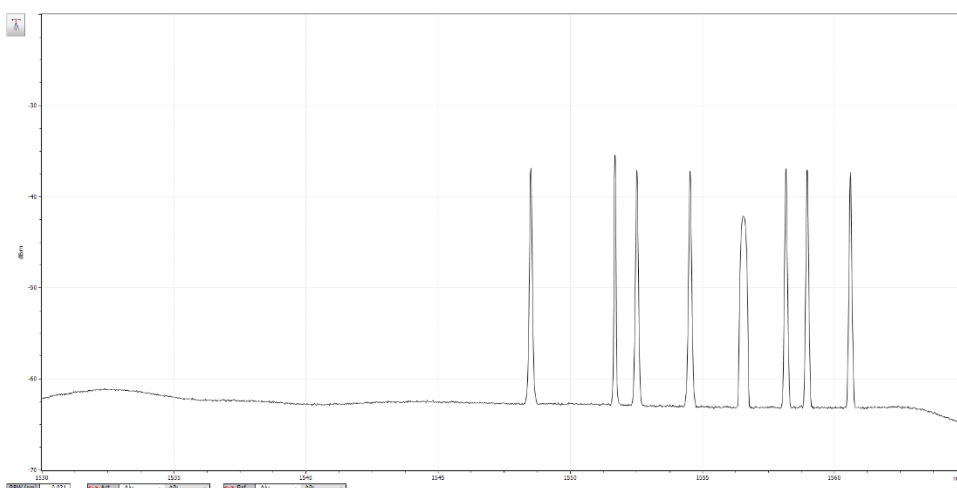
Obr. 5.4: Grafické znázornění měřených tras v akademické transportní optické síti CESNET.

Při měření byl využit optický spektrální analyzátor OSA, jehož parametry, pozitiva a negativa jsou komentovány v přechodí kapitole teoretické části diplomové práce. Pomocí generátoru neboli pumpy KEOPSYS na vstupu optického slučovače MUX a na výstupu DEMUX měřeného spektrálním analyzátozem OSA byl proveden sken obou tras, tj. Praha 1 – Praha 1 a Brno 1 – Olomouc, zapojených ve smyčce. Obr. 5.5 zobrazuje připojení měřicích optických přístrojů – generátoru KEOPSYS a spektrálního analyzátoru OSA – na optický patch panel s ukončením optických obou tras – viz obr. 5.5: Názorné zobrazení připojení měřicích optických přístrojů – generátoru KEOPSYS a spektrálního analyzátoru OSA – na optický patch panel s ukončením optických obou tras.

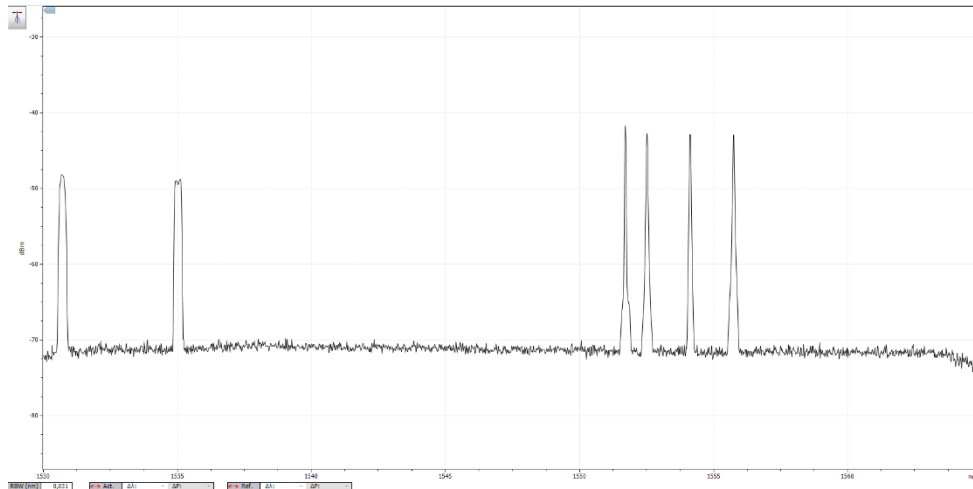


Obr. 5.5: Názorné zobrazení připojení měřicích optických přístrojů – generátoru KEOPSYS a spektrálního analyzátoru OSA – na optický patch panel s ukončením optických obou tras.

Výsledky měření na trase Praha 1 – Brno 1 dokládají, že na této trase o délce ve smyčce 616 km je v provozu celkem sedm systémů o rychlosti 10G a jeden systém o rychlosti 40G. Na trase Brno 1 – Olomouc o délce ve smyčce 224 km jsou využívány dva systémy o rychlosti 40G a čtyři systémy o rychlosti 10G. Grafické znázornění rozložení spektra na optickém spektrálním analyzátoru na obou trasách akademické transportní optické sítě CESNET je zobrazeno na obr. 5.6: Grafické znázornění rozložení spektra na optickém spektrálním analyzátoru na trase Praha 1 – Brno 1 a obr. 5.7: Grafické znázornění rozložení spektra na optickém spektrálním analyzátoru na trase Brno 1 – Olomouc.



Obr. 5.6: Grafické znázornění rozložení spektra na optickém spektrálním analyzátoru na trase Praha 1 – Brno 1.



Obr. 5.7: Grafické znázornění rozložení spektra na optickém spektrálním analyzátoru na trase Brno 1 – Olomouc.

5.3 Zkoumání možnosti aplikování polarizace pro zlepšení odstupu optického signálu od šumu – OSNR

Výše podaný teoretický výklad se zabývá kromě jiného i důležitostí kvality přenosu signálu v rámci komunikace prostřednictvím optické sítě jako významného identifikátoru celkové úspěšnosti přenosu. Ani u akademické transportní optické sítě CESNET tomu není jinak. Cílem prováděných experimentálních měření v akademické transportní optické síti CESNET pomocí systému DWDM je ověření nasazení fixní polarizace do přenosového řetězce a zjištění, jak a do jaké míry je v systému DWDM ovlivňována kvalita přenášeného optického signálu. Měření bylo realizováno za předpokladu, že nasazení fixní polarizace povede ke zlepšení kvality odstupu signálu od šumu – OSNR, a zároveň tak dojde ke zlepšení Q faktoru.

V této podkapitole diplomové práce bude postupně přistoupeno k vymezení principu maticového otáčení signálu, k ozřejmění konkrétní varianty maticového otáčení signálu v Stokesově prostoru a dále bude vyložena podstata polarizačního analyzátoru a jeho vlivu na přenos optického signálu.

5.3.1 Maticové otáčení signálu

Princip maticového otáčení signálu využívá polarizace světla při přenosu signálu

optickým, jež je označována jako otáčení Stokesova vektoru. Za tímto účelem jsou sestaveny vzorce matic ozřejmující podstatu a vlastnosti otáčení optického signálu, a to osu otáčení \hat{r} a úhel otáčení ϕ . Stokesovy matice, jež vzešly z Jonesových vektorů, jsou v této práci využity pro nastavování tvaru přenášeného optického signálu co nejlepší kvality v přenosovém médiu, jež je fixně nastaveno polarizačním kontrolerem a filtrem [29].

5.3.2 Matice otáčení signálu v Stokesově prostoru

Za základní rotace ve Stokesově prostoru jsou považovány rotace, jež otáčejí Stokesovými vektory kolem osy 1, 2 a 3 v Poincarého kulovém prostoru. Matici vystihující činnost při otáčení vektoru, konkrétně pro otáčivý tvar R , je možno vyjádřit vztahem (5.4) [29]:

$$\begin{aligned} R &= (\cos\phi)I + (1 + \cos\phi)\hat{r}\hat{r} + (\sin\phi)\hat{r}x, \\ &= \hat{r}\hat{r} + (\sin\phi)\hat{r}x - (\cos\phi)(\hat{r}x)(\hat{r}x), \end{aligned} \quad (5.4)$$

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

- R otáčivý tvar ($^\circ$);
- \hat{r} Stokesuv vektor
- ϕ úhel potočení

Pro libovolný Stokesův vektor \hat{s} , $R\hat{s}$ je dáno pravotočivé otáčení \hat{s} pod úhlem ϕ pravděpodobným směrem \hat{r} .

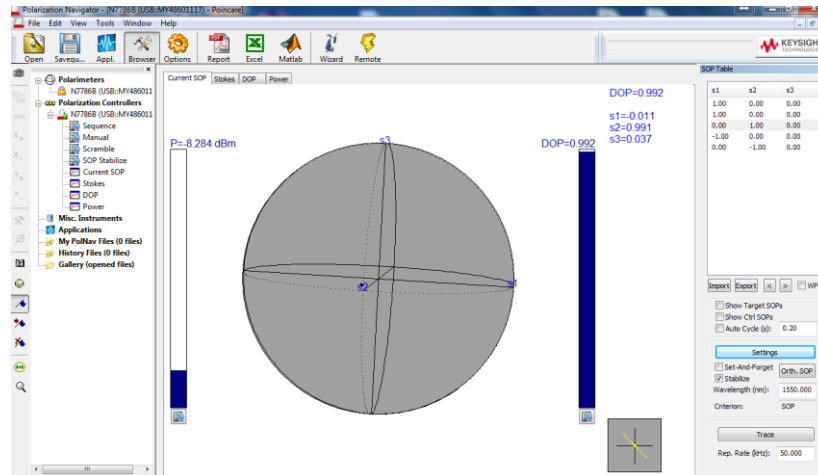
5.3.3 Polarizační analyzátor a jeho vliv na přenos optického signálu

Fixní nastavení hodnoty polarizace bylo provedeno pomocí analyzátoru Agilent N7781B, jímž je zajišťováno měření polarizace prostřednictvím detailní vizualizace na Poincarého kouli. Na obr. 5.8 je zachycen printscreen softwarového zpracování výstupu analyzátoru Agilent N7781B na modelu Poincarého koule.

Analyzátor Agilent N7781B umožňuje provádět tyto typy měření:

- stupeň polarizace (DOP);
- Stokesovy vektory;
- detekovaný výkon graficky zobrazený v čase;
- polarizační přeslech (PER);

- zachování polarizace optického vlákna (PMF);
- polarizační přeslechy na konektorech a svárech [30].



Obr. 5.8: Printscreens softwarového zpracování výstupu analyzátoru Agilent N7781B na modelu Poincarého koule.

Dynamický polarizační kontroler je sjednocen s polarizačním kontrolerem v analyzátoru, jenž pracuje s LiNbO₃ modulátory. S využitím tohoto analyzátoru Agilent N7781B je možno provádět nejrůznější varianty měření díky jeho funkční variabilitě ve vztahu k polarizaci měřeného optického signálu. Tato variabilita je umožněna ručním nastavením polarizačního kontroleru jako polarizačního skrambleru a polarizačního stabilizátoru [30].

5.4 Měření aplikace polarizace s cílem zlepšení OSNR

Měření prováděná v rámci diplomového úkolu původně vycházelo z předpokladu, týkajícího se využití polarizačního filtru za účelem zkvalitnění přenosu signálu včetně snížení jeho zkreslení. Tento předpoklad po provedení experimentálního měření vytčených variant na obou trasách bylo však zapotřebí přehodnotit. Následně byl proto formulován předpoklad, jež byl i poté měřením prokázán, a to – manuálním nastavováním pomocí měřicího ústrojí analyzátoru Agilent N7781B a dynamického polarizačního kontroleru není možno dosáhnout zkvalitnění přenosu optického signálu.

Nyní bude provedeno bližší popis zvoleného postupu při experimentálním měření.

Optický signál po průchodu optickou trasou byl pomocí polarizačního analyzátoru Agilent N7781B, jenž pracoval v režimu polarizačního kontroleru a filtru, upravován. Podstata úpravy výstupního optického signálu je založena na změnách v nastavení polarizačního filtru s otočením polarizace o 180° , a to s následným otestováním ve třech topologiích:

- I. topologie – referenční trasa byla provedena na vzdálenost 35 m v datovém sále CESNET v Brně.
- II. topologie – trasa Praha 1 – Brno 1 o celkové délce 308 km;
- III. topologie – trasa Brno 1 – Praha 1 ve smyčce o celkové délce 616 km.

Posun polarizace byl proveden pomocí Stokesových vektorů, jež nastavují orientaci polarizačního filtru. Poté byla realizována optimalizace polarizačního filtru pomocí Poitcarého kulového prostoru. Takto byla získána optimální konfigurace, jež minimalizovala útlum přenosu optického signálu. Následně byl porovnán vliv polarizačního filtru na kvalitu výstupního optického signálu u všech třech topologií.

Na všech třech proměřovaných trasách topologií byl změřen vliv nastavení zvoleného polarizačního filtru s cílem ověřit, zda a jak se projeví vliv polarizačního filtru při automatické korekci útlumu optického signálu a při splnění podmínky fixního nastavení polarizačního filtru.

Měření získané hodnoty byly ověřovány pomocí osciloskopu Agilent 86100C, na jehož displeji bylo zobrazováno oko rozhodnutí, na němž byla vyhodnocována kvalita signálu a jeho zkreslení.

5.4.1 I. topologie – referenční trasa na vzdálenost 35 m v datovém sále CESNET v Brně

Blokové schéma I. topologie je znázorněno na obrázku – viz obr. 5.9: Blokované schéma I. topologie.



Obr. 5.9: Blokované schéma I. topologie.

V I. topologii bylo realizováno měření trasy o délce 35 m v rámci lokálního datového sálu. První sada měření proběhla bez polarizačního filtru, a byla tak získána referenční hodnota útlumu přenášeného optického signálu $-4,08$ dBm. Po instalaci polarizačního filtru se hodnota útlumu zvýšila na $-10,44$ dBm. Přes oko rozhodnutí bylo pozorováno zhoršení útlumu i zkreslení optického signálu. Na obr. 5.10 je grafické znázornění oka rozhodnutí: a) bez připojení polarizačního filtru b) s připojením polarizačního filtru.

Měřením i okem rozhodnutí bylo prokázáno, že vložení polarizačního filtru mělo na tak krátkou vzdálenost negativní vliv, tudíž došlo k nárůstu šumu v optickém signálu. Naměřené hodnoty jsou zaneseny do tabulky – viz tab. 5.1: Hodnoty naměřené v I. topologii; tab. 5.2: Podrobný rozpis oka rozhodnutí I. topologie.

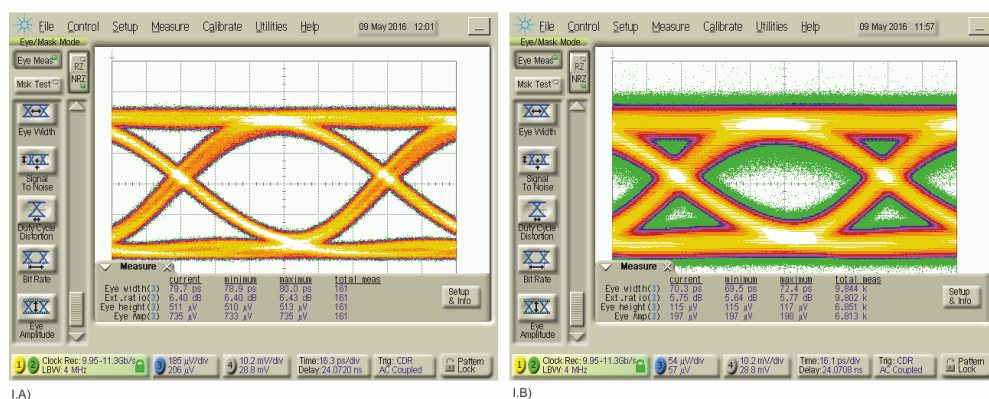
Tab. 5.1: Hodnoty naměřené v I. topologii.

Topologie I	
s polarizačním filtrem	$-10,44$ dB
bez polarizačního filtru	$-4,08$ dB

Tab. 5.2: Podrobný rozpis oka rozhodnutí I. topologie.

Topologie I – s polarizačním filtrem				
	Current	Minimum	Maximum	Totale meas
Eye width	70,3 ps	69,5 ps	72,4 ps	9,844 k
Eye ratio	5,73 dB	5,64 dB	5,77 dB	9.802 k
Eye height	115 μ V	115 μ V	117 μ V	6.851 k
Eye amp	197 μ V	197 μ V	198 μ V	6.813 k

Topologie I – bez polarizačního filtru				
	Current	Minimum	Maximum	Totale meas
Eye width	79,7 ps	78,9 ps	80,0 ps	161
Eye ratio	6,40 dB	6,40 dB	6,43 dB	161
Eye height	511 μ V	510 μ V	513 μ V	161
Eye amp	735 μ V	733 μ V	735 μ V	161



Obr. 5.10: Grafické znázornění oka rozhodnutí. I. topologie: a) bez připojení polarizačního filtru b) s připojením polarizačního filtru.

5.4.2 II. topologie – trasa Praha 1 – Brno 1 o celkové délce 308 km

Blokové schéma II. topologie je zobrazeno na obr. 5.11: Blokové schéma II. topologie.



Obr. 5.11: Blokové schéma II. topologie.

Ve II. topologii byla provedena úprava úrovně optického signálu použitého v I. topologii, tj. byla realizována korekce spočívající ve zvýšení hodnoty úrovně optického signálu. Ve II. topologii byl signál na trase Praha 1 – Brno 1 o celkové délce 308 km. První sada měření proběhla bez polarizačního filtru a bez korekce (bez zesílení), a byla tak získána referenční hodnota útlumu přenášeného optického signálu $-13,40$ dBm. Po instalaci polarizačního filtru byla však výstupní úroveň signálu nízká a z důvodu nízké citlivosti detektoru ji nebylo možno změřit. Proto byla následně provedena korekce (zesílení) signálu o $6,5$ dB. Poté bylo realizováno nové měření. U zapojení bez polarizačního filtru byla změřena hodnota úrovně optického signálu $-4,11$ dBm. Po instalaci polarizačního filtru se hodnota útlumu zvýšila na $-9,48$ dBm. Na obr. 29 je grafické znázornění oka rozhodnutí: a) bez připojení polarizačního filtru a bez zesílení b) bez polarizace a s korekcí (zesílením) c) s připojením polarizačního filtru s korekcí (zesílením). Měřením bylo prokázáno, že hodnota útlumu optického signálu se zvýšila. Naměřené hodnoty jsou zaneseny do tabulky – viz Tab. 5.3: Hodnoty naměřené ve

II. topologii; Tab. 5.4 Podrobný rozpis oka rozhodnutí II. topologie. Obrázek znázorňuje oko rozhodnutí – obr. 5.12: Grafické znázornění oka rozhodnutí: a) bez připojení polarizačního filtru a bez zesílení; b) bez polarizace a s korekcí (zesílením); c) s připojením polarizačního filtru s korekcí (zesílením).

Tab. 5.3: Hodnoty naměřené ve II. topologii.

Zapojení II. topologie	Naměřená hodnota útlumu (dBm)
bez polarizačního filtru bez zesílení	-13,40 dBm
s polarizačním filtrem bez zesílení	neměřitelné hodnoty
bez polarizačního filtru se zesílením	-4,11 dBm
s polarizačním filtrem se zesílením	-9,48 dBm

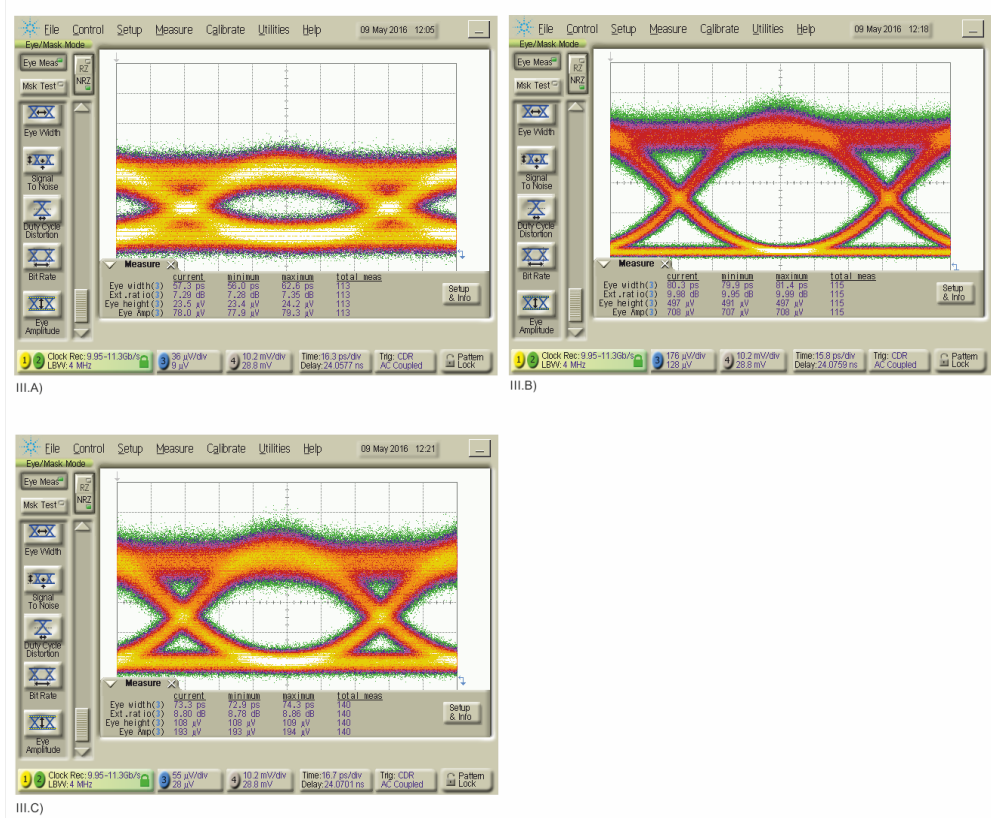
Tab. 5.4: Podrobný rozpis oka rozhodnutí II. topologie.

Topologie II – s polarizačním filtrem bez zesílení				
	Current	Minimum	Maximum	Totale meas
Eye width	57,3 ps	56,0 ps	62,6 ps	113
Eye ratio	7,29 dB	7,28 dB	7,35 dB	113
Eye height	23,5 μ V	23,4 μ V	24,2 μ V	113
Eye amp	78 μ V	77,9 μ V	79,3 μ V	113

Topologie II – bez polarizačního filtru bez zesílení				
	Current	Minimum	Maximum	Totale meas
Eye width	80,3 ps	79,9 ps	81,4 ps	115
Eye ratio	9,89 dB	9,95 dB	9,99 dB	115
Eye height	497 μ V	491 μ V	497 μ V	115
Eye amp	708 μ V	707 μ V	708 μ V	115

Topologie II – bez polarizačního filtru se zesílením				
	Current	Minimum	Maximum	Totale meas
Eye width	73,3 ps	72,9 ps	74,3 ps	140
Eye ratio	8,80 dB	8,78 dB	8,86 dB	140
Eye height	108 μ V	108 μ V	109 μ V	140
Eye amp	193 μ V	193 μ V	194 μ V	140

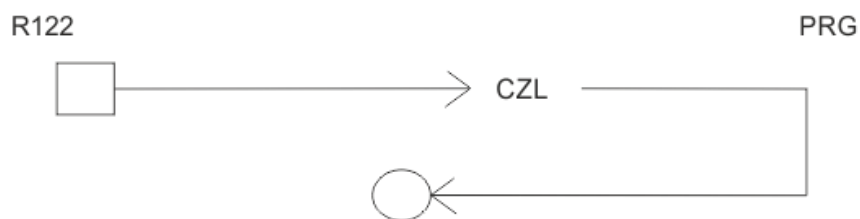
V posledním kroku byl signál přenášen pomocí polarizačního filtru a kontroleru přes nastavený polarizační filtr a zde byla obdržena hodnota útlumu snížená na $-9,48$ dB.



Obr. 5.12: Grafické znázornění oka rozhodnutí. II. topologie: a) bez připojení polarizačního filtru a bez zesílení; b) bez polarizace a s korekcí (zesílením); c) s připojením polarizačního filtru s korekcí (zesílením).

5.4.3 III. topologie – trasa Brno 1 – Praha 1 ve smyčce o celkové délce 616 km

Blokové schéma III. topologie je zobrazeno na obr. 5.13: Blokové schéma III. topologie.



Obr. 5.13: Blokové schéma III. topologie.

Ve III. topologii byla provedena ve shodě s II. topologií úprava úrovně optického signálu použitého v I. topologii, tj. byla realizována korekce spočívající ve zvýšení

hodnoty úrovně optického signálu. Ve III. topologii byl signál na trase Brno 1 – Praha 1 ve smyčce o celkové délce 616 km. První sada měření proběhla bez polarizačního filtru a bez korekce (bez zesílení), a byla tak získána referenční hodnota útlumu přenášeného optického signálu $-13,65$ dBm. Po instalaci polarizačního filtru byla však výstupní úroveň signálu nízká a z důvodu nízké citlivosti detektoru ji nebylo možno změřit. Proto byla následně provedena korekce (zesílení) signálu o $5,5$ dB. Poté bylo realizováno nové měření. U zapojení bez polarizačního filtru byla změřena hodnota úrovně optického signálu $-4,14$ dBm. Po instalaci polarizačního filtru se hodnota útlumu zvýšila na $-9,66$ dBm. Na obr. 5.14 je grafické znázornění oka rozhodnutí: a) bez připojení polarizačního filtru a bez zesílení b) bez polarizace a s korekcí (zesílením) c) s připojením polarizačního filtru s korekcí (zesílením). Měřením bylo prokázáno, že hodnota útlumu optického signálu se zvýšila. Naměřené hodnoty jsou zaneseny do tabulky – viz Tab. 5.5: Hodnoty naměřené ve III. topologii; a Tab. 5.6: Podrobný rozpis oka rozhodnutí III. topologie. III. topologie ve srovnání s II. topologií obsahuje dvojnásobný počet EDFA zesilovačů.

Tab. 5.5: Hodnoty naměřené ve III. topologii.

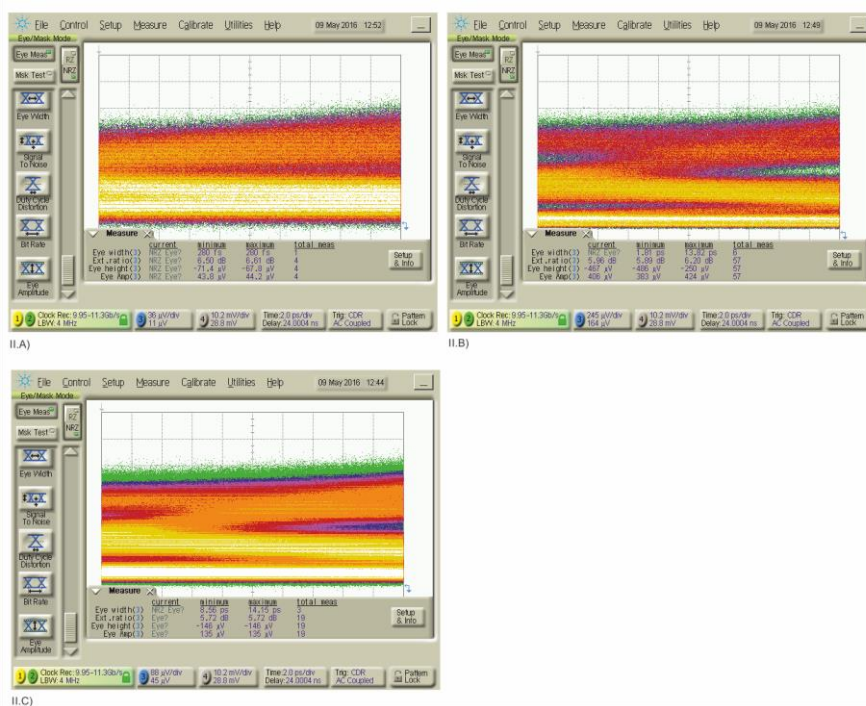
Zapojení III. topologie	Naměřená hodnota útlumu (dBm)
bez polarizačního filtru bez zesílení	$-13,65$ dBm
s polarizačním filtrem bez zesílení	neměřitelné hodnoty
bez polarizačního filtru se zesílením	$-4,14$ dBm
s polarizačním filtrem se zesílením	$-9,60$ dBm

Tab. 5.6: Podrobný rozpis oka rozhodnutí III. topologie.

Topologie III – s polarizačním filtrem se zesílením				
	Current	Minimum	Maximum	Totale meas
Eye width	–	$8,56$ ps	$14,15$ ps	3
Eye ratio	–	$5,72$ dB	$5,72$ dB	19
Eye height	–	-146 μ V	-146 μ V	19
Eye amp	–	135 μ V	135 μ V	19

Topologie III – bez polarizačního filtru bez zesílení				
	Current	Minimum	Maximum	Totale meas
Eye width	–	280 fs	280 fs	1
Eye ratio	–	6,50 dB	6,61 dB	4
Eye height	–	-71,4 μ V	-67,8 μ V	4
Eye amp	–	43,8 μ V	44,2 μ V	4

Topologie III – bez polarizačního filtru se zesílením				
	Current	Minimum	Maximum	Totale meas
Eye width	–	1,81 ps	13,82 ps	6
Eye ratio	5,96 dB	5,89 dB	6,20 dB	57
Eye height	-467 μ V	-486 μ V	-250 μ V	57
Eye amp	406 μ V	383 μ V	424 μ V	57



Obr. 5.14: Grafické znázornění oka rozhodnutí. III. topologie: a) bez polarizace a bez zesílení; b) bez polarizace se zesílením; c) polarizováno se zesílením.

5.5 Shrnutí výsledků měření aplikace polarizace s cílem zlepšení OSNR

V provedeném experimentálním měření všech tří topologií byly naměřeny měřicím přístrojem analyzátor WWWW a pomocí osciloskopu Agilent 86100C a diagramu oka rozhodnutí hodnoty odstupe signálu od šumu, jež ovlivňují kvalitu přenášeného optického signálu.

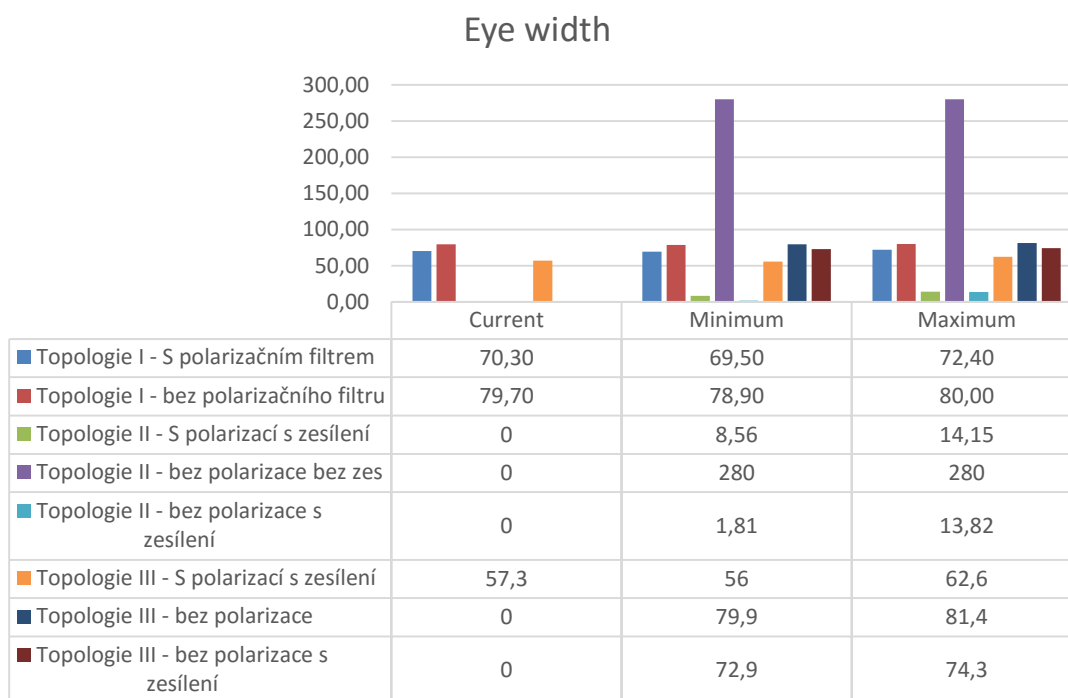
V rámci měřicí soustavy byl uplatněn fixně nastavený polarizační filtr a kontroler, přičemž byly experimentálním měřením zjišťovány hodnoty jejich vlivu útlumu optického signálu u tří zvolených topologií, a to u I. topologie – referenční trasa byla provedena na vzdálenost 35 m v datovém sále CESNET v Brně, u II. topologie – trasa Praha 1 – Brno 1 o celkové délce 308 km a u III. topologie – trasa Brno 1 Praha 1 ve smyčce o celkové délce 616 km.

Během měření byly naměřené hodnoty průběžně zaznamenávány do záznamového listu a následně byly zpracovány do tabulkových přehledů. Opakovaně byly prováděny printscreeny displeje osciloskopu Agilent 86100C. Na základě analýz naměřených hodnot a porovnání diagramu oka rozhodnutí byl vyvozen hlavní závěr – fixně nastavená filtrační polarizace a filtrační kontroler ani v jednom případě provedených sad experimentálního měření nepotvrdil teoretický předpoklad, že vliv fixně nastavené filtrační polarizace a filtračního kontroleru zvýší kvalitu přenášeného optického signálu, a zvýší tak odstup signálu od šumu.

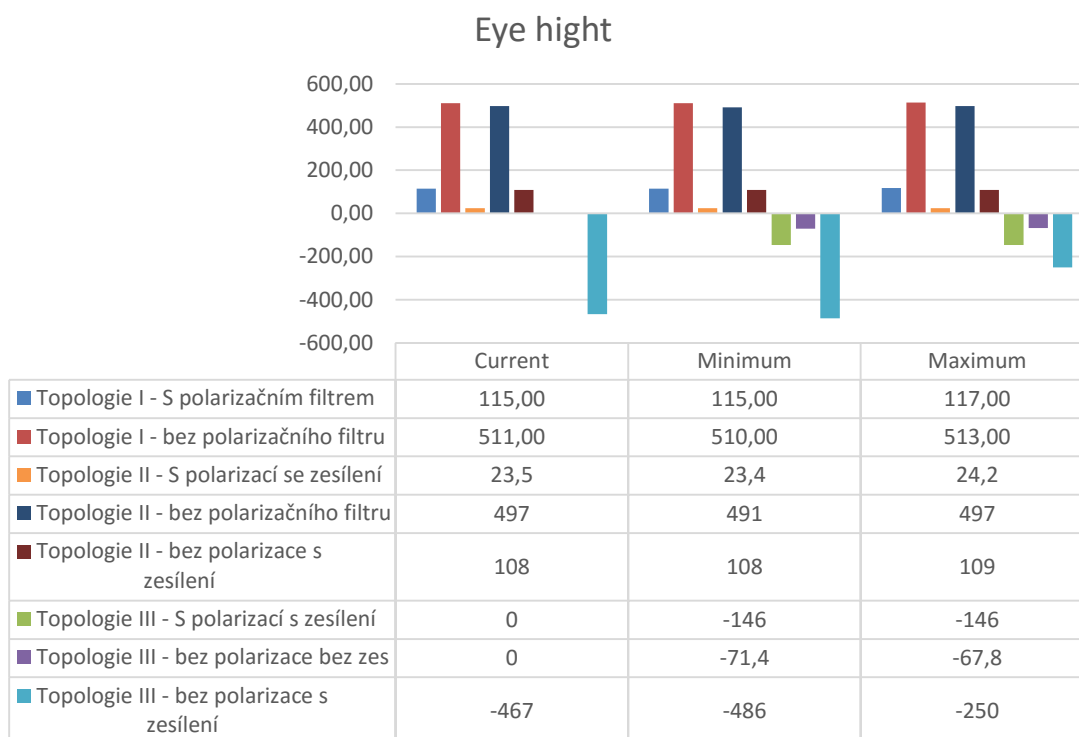
Diplomový úkol, jenž si kladl za cíl ověřit působení výše uvedených komponentů, tj. fixně nastavené filtrační polarizace a filtračního kontroleru, na zvýšení přenosové rychlosti multiplexovacího systému DWDM, a to pro rychlost 100G a 400G.

Degradace optického signálu mohla být způsobena samotným polarizačním kontrolerem (filtrem), poněvadž tento pracuje na elektromagnetickém principu a nezvládá reagovat na požadované instrukce z filtračního polarizačního kontroleru.

Získané naměřené hodnoty diagramu oka rozhodnutí, a to výška a šířka, jsou graficky znázorněny v grafech – viz obr. 5.14: Graf zobrazující šířku diagramu oka rozhodnutí; obr. 5.15: Graf zobrazující délku diagramu oka rozhodnutí.



Obr. 5.15: Graf zobrazující šířku diagramu oka rozhodnutí.



Obr. 5.16: Graf zobrazující délku diagramu oka rozhodnutí.

Hlavní důvody pro migraci na vyšší rychlosti vyplývají z požadavku na enormně se zvyšující kapacitu a kvalitu optického přenosu dat. Z tohoto důvodu jsou postupně zakládána datová centra, v nichž jsou tyto vysokorychlostní přenosy zajišťovány. Nejsilněji je přenosová kapacita ovlivňována rozsahem multimediálních potřeb. Odborná studie [31] jasně dokládá, že tlak na zvyšování přenosové kapacity optických přenosových systémů je způsoben neustálým nárůstem obrazových aplikací neboli video obsahu. Studie poukazuje na fakt, že budování infrastruktury optických přenosových sítí zaostává a nestíhá reagovat na nárůst poptávky po službách, jež jsou poskytovány po internetu. To má za důsledek snižování kapacity internetu oproti optimálním potřebám. Tento nevyhovující stav přenosové kapacity přenosu po optických sítích se snaží operátoři a poskytovatelé internetových služeb řešit nasazováním nových technologií s vyšší rychlostí, jsou však omezovali součáskovou základnou a cenou komponentů.

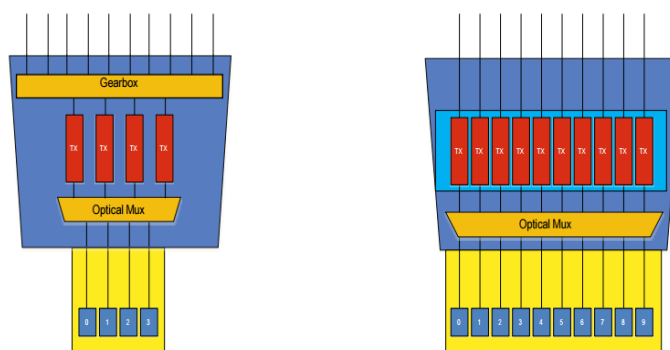
5.6 Návrh možného řešení klientského rozhraní pro 100G

V současné době je možno v rámci technického řešení navýšení kapacity optických přenosových systémů využívat tyto typy klientského rozhraní:

1. CFP Form Factor (86 x 127 x 14 mm):
 - ER4 100G, 40 km v SMF (4 x 25G WDM, střed na 1305 nm);
 - LR4 100G, 10 km v SMF (4 x 25G WDM, střed na 1305 nm);
 - SR10 100G 100 m v MMF (850 nm paralelní optika, 10 x 10G);
 - LR10 100G, 10 km v SMF (10 x 10G WDM, střed na 1550 nm).
2. CXP Form Factor (asi 20 x 54 x 11 mm):
 - 100G, 100 m na OM3 MMF (850 nm paralelní optika, 10 x 10G);
 - 100G, 10 m na aktivním kabelu.
3. QSFP Form Factor (18.4 x 72 x 8.5 mm):
 - 40G, 100 m na OM3 MMF (850 nm paralelní optika, 4 x 10G);
 - 40G, 10 m na aktivním kabelu.

Obrázek 5.16 zobrazuje grafické znázornění porovnání rozhraní pro rychlosti 10G a 25G – viz obr. 5.16: Blokové schéma rozhraní LR-4 (4 x 25G) a LR-10 (10 x 10G).

Konektorové rozhraní pro rychlost 100G je možné využít v kombinaci 4 x 25G nebo 10 x 10G.



Obr. 5.17: Blokové schéma rozhraní LR-4 (4 x 25G) a LR-10 (10 x 10G).

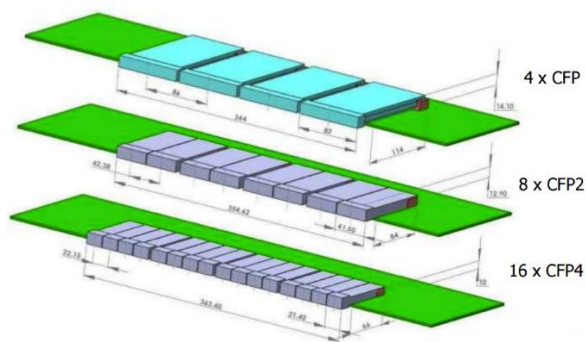
Jako klientské rozhraní jsou v současnosti používána rozhraní s těmito parametry:

- Rozhraní LR-4, jež charakterizuje:
 - konfigurace 4 x 25G nebo 4 x 28G na optický kanál;
 - užití Gearboxu;
 - požadavek vysokého příkonu (až 24W).
- Rozhraní LR-10, jež charakterizuje:
 - konfigurace 10,2G nebo 11,2G na optický kanál;
 - absence Gearboxu.

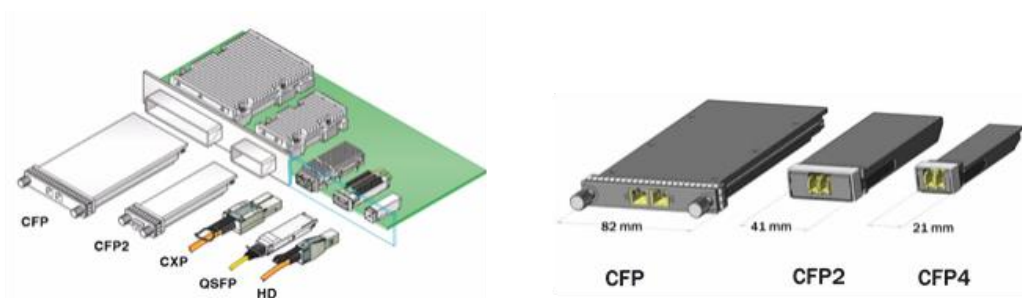
Rozhraní LR-10 je ve srovnání s rozhraním LR-4 z konstrukčního hlediska jednodušší, což logicky přináší snížení finančních nákladů na jeho pořízení. Změny rychlosti vedou ke změně rozhraní, což v praxi vyžaduje provedení fyzické výměny rozhraní a zároveň výrazně ovlivňuje nasazování nových systémů pro vyšší rychlosti – viz obr. 5.17: Blokové schéma rozhraní LR-4 a LR-10 s jednotlivými typy konektorů. Různé typy modulů pro rychlosti 100G jsou na obrázku níže – viz obr. 5.18: Zobrazení různých typů modulů pro rychlosti 100G.

Neustále se zvyšující požadavky na rozhraní dokládá fakt, že v současnosti je zaznamenáván roční nárůst požadavků na zvýšení přenosové rychlosti prostřednictvím optických systémů na její 1,5 násobek. Zvyšování přenosové rychlosti spolu s kapacitou je řešeno v přímé souvislosti s nároky na škálovatelnost a zvyšování výkonu spolu

s požadavkem na minimalizaci těchto komponentů. Celý tento proces má za následek zahušťování portů. Popsaný trend v optických přenosových systémech by se měl promítnout do nižších pořizovacích nákladů a také do snížení energetické náročnosti, tj. do nižší spotřeby elektrické energie. Minimalizace zahušťování vede k nežádoucímu zvyšování teploty, tj. k zahřívání zařízení, což přináší nutnost řešit kromě jiného chlazení komponentů.



Obr. 5.18: Blokové schéma rozhraní LR-4 a LR-10 s jednotlivými typy konektorů.



Obr. 5.19: Zobrazení různých typů modulů pro rychlosti 100G.

Pro systém DWDM je z důvodu velmi malých vzdáleností mezi jednotlivými kanály zapotřebí nasadit speciální chlazené DFB EML lasery s úzkou spektrální šířkou paprsku, a to v poloze, v níž lasery neovlivňují sousední kanály. DFB EML lasery sice spadají do vyšší cenové kategorie produktů, na druhou stranu však je lze využít pro rychlost 10G i pro vyšší rychlosti a zároveň jsou lasery schopny eliminovat vysoké disperze, jež jsou průvodním jevem těchto rychlostí. Obr. 5.18: Zobrazení různých typů modulů pro rychlosti 100G.

5.7 Návrh možného řešení linkového rozhraní pro 100G

Vysokorychlostní fázově modulované signály u rychlostí 40G, 100G, 400G a 1T podporují především modulační formáty OOK, BPSK, PSK, QPSK, DPSK, DQPSK, APSK, 16-QAM. Rozhodující dosah pro konkrétní rychlost je dána typem a kvalitou laseru a způsobem modulace a jejich poměrem vůči CD a PMD. Moduly využívají různých technologií a charakterizují je různé parametry:

- Přímá modulace – chirp (DML – Direct Modulated Laser);
- Nepřímá modulace – externí modulátor (EML – Externally Modulated Laser);
- NRZ (Non Return to Zero);
- RZ (Return to Zero) – pro rychlosti 40G a výše;
- ODB (Optical Duo Binary);
- DPSK (Differential Phase-Shift Keying);
- DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying);
- DP-QPSK/PM-QPSK (Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying).

5.8 Návrh povýšení multiplexovacího systému DWDM

Podmínky pro upgrade neboli povýšení multiplexovacího systému DWDM na vyšší rychlosti musí splňovat určité základní požadavky, a to realizovatelnost technologickou a ekonomické ukazatele. Kritérium pro výběr upgradu je založeno na poměru této technologické realizovatelnosti a ekonomických ukazatelů a je nutno pečlivě zvolit optimální poměr mezi těmito hodnotami.

U již realizovaných systémů DWDM pracujících s nižšími rychlostmi je upgrade na 100G snadnější, poněvadž jako nedílnou součást povýšení lze uplatnit stávající, již nainstalované, technologie. Pro navýšení systému DWDM na rychlost 100G je lépe uzpůsoben systém DWDM 10G, jenž umožňuje škálovatelnost a uplatnění tak n násobků rychlosti 10G až do maximální povýšené hodnoty rychlosti, tj. na úroveň 100G.

Přechod na rychlosti 400G a vyšší je velmi finančně nákladný, a proto je třeba důkladně zvážit ekonomické ukazatele. Pro tyto vyšší rychlosti je vyvíjena technologie OFDM, jež pracuje na principu ortogonální multiplexu s frekvenčním dělením.

To znamená, že je možno nasadit více kanálů. Tato technologie OFDM je ve stádiu vývoje a experimentálního ověřování, nebyla dosud aplikována do plného a tzv. ostrého provozu optických přenosových sítí. S vývojem této moderní technologie je nedílně spojen i vývoj multiplexorů a demultiplexorů. Cena této technologie na trhu je z výše uvedených důvodů poměrně vysoká.

Trend ve vývoji povýšení této technologie je z ekonomických důvodů zaměřen především na využití stávajících, tj. již realizovaných, optických přenosových systémů.

6 ZÁVĚR

Pro současný stav přenosových optických systémů je typický požadavek na jejich neustálý vývoj, zdokonalování a zvyšování jejich technických parametrů, a to zejména zvyšující se nároky na spektrální účinnost a úroveň kvality přenášeného optického signálu po optických systémech. Nynější situace ukazuje, že původní předpoklad a tvrzení ohledně pro futurum dostatečně naddimenzované kapacity optických sítí vzal za své.

Díky technologickému vývoji a růstu rychlostních limitů u nově vyvíjených elektronických obvodů je možno aplikovat vícecestavové fázové modulační systémy, jež při zachování stejné přenosové rychlosti umožňují snížit modulační rychlost a naopak při zachování modulační rychlosti umožňují zvýšit přenosovou rychlost.

Za účelem kompenzace nežádoucího vlivu CD a PMD jsou využívány u těchto systémů elektronické kompenzátory disperze EDC. Pro rychlosti 100G je nyní nejvhodnější formát PM-QPSK.

U přenosových systémů je dána propustnost technologickými limity uzlů, jejichž technologické vybavení (IP směrovače apod.) v současnosti zaostává za dosažitelnou rychlostí optických přenosových systémů.

Při náhradě technologie v uzlech za přepínače pracující v režimu optického přepínání, tj. jako je „Optical Packet Switching“ anebo „Burst Switching“, je dosud ve stádiu vývoje a experimentálního testování. Vyloučení komponentů (IP směrovače apod.), jež převádějí optický signál na elektrický signál a zpět, v rámci celé přenosové trasy v optické síti, na níž by bylo realizováno pouze optické zpracování signálu, zatím nebylo technologicky v praxi realizováno.

LITERATURA

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] FILKA, Miroslav. *Přenosová média. Skripta laboratoře*. Brno: VUT FEKT, 2003.
- [3] ŠIFTA, Radim. *DWDM v přístupových sítích. Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011. Vedoucí práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [4] *694.1 : Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid* [online]. ITU, 2002 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-200206-S/en>.
- [5] *G.694.2 : Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid* [online]. ITU, 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-200206-S/en>.
- [6] BOHÁČ, Luboš, Miroslav KARÁSEK a Jan RADIL. Optimalizace přenosu NRZ dat s rychlostí 10Gb/s po vláknech G.652 bez linkových zesilovačů: simulace a experiment: In *Optické komunikace O. K. In: Optimalizace přenosu NRZ dat s rychlostí 10Gb/s po vláknech G.652 bez linkových zesilovačů: simulace a experiment*. Praha: Agentura Action, 2003, s. 77-82. DOI: 80-86742-03-2. ISBN 80-86742-03-2.
- [7] *Vlnové multiplexy CWDM/DWDM: Ing. Jan Brouček, CSc.* [online]. Profiber, 2010 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.profiber.cz>.
- [8] MAKOVEJS, Sergej. *High-speed optical fibre transmission using advanced modulation formats* [online]. London, 2011 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://discovery.ucl.ac.uk/1324549/1/1324549.pdf>. Disertace. UCL.
- [9] BOHÁČ, Leoš. *Optické přenosové systémy: Fyzikální limity optické přenosové trasy* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/160.pdf. ČVUT.
- [10] RAJAN, Ginu. *Optical fiber sensors: advanced techniques and applications*. Boca

- Raton: CRC Press, Taylor, 2015. ISBN 978-148-2228-250.
- [11] UDD, Eric a William B. SPILLMAN. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2011. ISBN 978-047-0126-844.
- [12] LATAL, Jan, Petr KOUDELKA a František HANÁČEK. Nový způsob měření pomocí vláknově optických senzorů s frekvenční změnou na výstupu. *Elektrorevue* [online]. Brno: VUT, 2009 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/file.php?id=200000301-6ddca6ed6a>.
- [13] WINZER, P.J. a R.-J. ESSIAMBRE. *Advanced Optical Modulation Formats* [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/JPROC.2006.873438. ISBN 10.1109/JPROC.2006.873438. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1634536>.
- [14] WUTH, T., M.W. CHBAT a V.F. KAMALOV. *Multi-rate (100G/40G/10G) Transport Over Deployed Optical Networks* [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/OFC.2008.4528299. ISBN 10.1109/OFC.2008.4528299. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4528299>.
- [15] SCHMIDT, Ted, Christian MALOUIN, Ross SAUNDERS, JIN HONG a Roberto MARCOCCIA. *Mitigating channel impairments in high capacity serial 40G and 100G DWDM transmission systems* [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/LEOSST.2008.4590529. ISBN 10.1109/LEOSST.2008.4590529. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4590529>.
- [16] TAN, Antoine a Erwan PINCEMIN. *Performance Comparison of Duobinary Formats for 40-Gb/s and Mixed 10/40-Gb/s Long-Haul WDM Transmission on SSMF and LEAF Fibers* [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/JLT.2008.929117. ISBN 10.1109/JLT.2008.929117. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4785437> .
- [17] HEISMANN, Fred a Pavel MAMYSHEV. *43-Gb/s NRZ-PDPSK WDM Transmission with 50-GHz Channel Spacing in Systems with Cascaded Wavelength-Selective Switches* [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI:

- 10.1364/OFC.2009.OThC1. ISBN 10.1364/OFC.2009.OThC1. Dostupné z:
<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2009-OThC1>.
- [18] SHARAN, Lucky a V K CHAUBEY. *Design and simulation of long-haul 32 × 40 Gb/s Duobinary DWDM link in the presence of non-linearity with under-compensated dispersion* [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/ICP.2012.6379838. ISBN 10.1109/ICP.2012.6379838. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6379838>
- [19] CHANDRASEKHAR, S., XIANG LIU, D. KILPER, C.R. DOERR, A.H. GNAUCK, E.C. BURROWS a L.L. BUHL Terabit Transmission at 42.7-Gb/s on 50-GHz Grid Using Hybrid RZ-DQPSK and NRZ-DBPSK Formats Over 16 ,times, 80 km SSMF Spans and 4 Bandwidth-Managed ROADMs [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/JLT.2007.913019. ISBN 10.1109/JLT.2007.913019. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4413091>
- [20] SAVORY, Seb, Digital filters for coherent optical receivers. Opt. Express [online]. 2008 [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-16-2-804>.
- [21] *Topologie sítě CESNET: CESNET* [online]. 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://www.cesnet.cz/sluzby/pripojeni/topologie/>.
- [22] *Vláknová infrastruktura a její propojení: CESNET* [online]. 2011 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://archiv.cesnet.cz/doc/2011/zprava/opticke-site.html>.
- [23] PARKER, T.R. a M. FARHADIROUSHAN. *Femtometer resolution optical wavelength meter* [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/68.917847. ISBN 10.1109/68.917847. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=917847>.
- [24] *Optické spektrální analyzátory pro měření moderních DWDM přenosů* [online]. Profiber, 2014 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: https://www.cesnet.cz/wp-content/uploads/2014/08/Broucek_OSA_pro_moderni_DWDM.pdf.
- [25] BIN ZBOU, S.R. PRAMOD a H.T. MOUFTAH. *Adaptive BER-assured routing in translucent optical networks*. DOI: 10.1109/HPSR.2004.1303470. ISBN

- 10.1109/HPSR.2004.1303470. Dostupné také z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1303470>.
- [26] MENGCHI CHEN a SHANHONG YOU. *Analysis of OSNR monitoring in optical fiber communication system* [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/ICOCN.2014.6987140. ISBN 10.1109/ICOCN.2014.6987140. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6987140>.
- [27] SUSSKIND, Suzanne a Eunezio Antonio DE SOUZA. *40 Gb/s RZ DQPSK transmission with SPM and ASE suppression by dispersion management* [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/IMOC.2009.5427622. ISBN 10.1109/IMOC.2009.5427622. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5427622>
- [28] KAUR, Inderpreet a Neena GUPTA. *Comparative analysis of hybrid TDFA-EDFA and hybrid EDFA-TDFA configurations for 96 channels DWDM system for S C bands* [online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876485. ISBN 10.1109/ICTON.2014.6876485. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6876485>.
- [29] CHE, Di, An LI, Xi CHEN, Qian HU, Yifei WANG a William SHIEH. *Stokes Vector Direct Detection for Linear Complex Optical Channels*[online]. [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/JLT.2014.2364311. ISBN 10.1109/JLT.2014.2364311. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6936845>.
- [30] *N7781B Benchtop Polarization Analyzer* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.keysight.com/en/pd-1365420-pn-N7781B/polarization-analyzer-high-speed-polarimeter-with-1-megasamples-sec?cc=CZ&lc=eng>
- [31] *The Internet Singularity, Delayed: Why Limits in Internet Capacity Will Stifle Innovation on the Web* [online]. nemertes.com [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: https://www.nemertes.com/studies/internet_singularity_delayed_why_limits_internet_capacity_will_stifle_innovation_web

ABECEDNÍ PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

AON (Active Optical Network)	aktivní optická síť
APD (Avalanche-Photodiode)	lavinové fotodiody
APC (Angle Polish Connector)	úhlový optický konektor
APON (ATM Passive Optical Network)	standard PON
BER (Bit Error Rate)	bitová chybovost
BW (Band Width)	šířka pásma
CATV (Cable Analog Television)	kabelová TV
CD (Chromatic Dispersion)	chromatická disperze
CIR (Committed Information Rate)	garantovaná přenosová
CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex)	hrubý vlnový multiplex
DEMUX (demultiplexor)	demultiplexor
DFB (Disturbed FeedBack)	DFB laser
DOP (Degree of Polarization)	stupeň polarizace
DPS (Digital Signal Processor)	digitální signálový procesor
DPSK (Differential Phase-shift keying)	vztažné klíčování
DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex)	hustý vlnový multiplex
FBG (Fiber Bragg Gratings)	vláknové Braggovské mřížky
FEC (Forward Error Correction)	dopředný opravný kód
FFT (Fast Fourier Transform/Transformation)	rychlá Furierova transformace
FWM (Four-Wave Mixing)	čtyřvlnné směšování
GVD (Group Velocity Dispersion)	skupinová rychlost disperze

IEC (International Electrotechnical Commission)	Mezinárodní elektrotechnická komise
IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
ITU (International Telecommunication Union)	Mezinárodní telekomunikační unie
LD (Laser Diode)	laserová dioda
MMF (Multi-mode Optical Fiber)	vícevidové optické vlákno
MUX (Multiplexor)	Multiplexor
MZM Mach (Zehnder Modulator)	Mach Zehnder modulátor
NRZ (Non Return to Zero)	signál bez návratu k nule
ODB (Duobinary Modulation for Optical Systems)	vlnový multiplex
OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing)	ortogonální multiplex s frekvenčním dělením
ONU (Optical Network Unit)	optická ukončovací jednotka
ONT (Optical Network Terminal)	optické síťové zakončení
OSA (Optical Spectrum Analyzer)	spektrální analyzátor
OSNR (Optical Signal to Noise Ratio)	odstup optického signálu od šumu
PC (Polarization Controller)	polarizační kontrolér
PCD (Polarization Chromatic Dispersion)	polarizačně závislá chromatická disperze
PMD (Polarization Mode Dispersion)	polarizační vidová disperze
PMF (Polarization-Maintaining Fiber)	polarizaci zachovávající vlákno
PSK (Phase-shift Keying)	klíčování fázovým posuvem
PSP (Principal States of Polarization)	princip polarizačních stavů
QAM (Quadrature amplitude modulation)	kvadrurní amplitudová modulace

ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) multiplexer	rekonfigurovatelný add/drop
RZ (Return to Zero)	signál s návratem k nule
SFP (Small Form-factor Pluggable)	optické rozhraní
SMF (Single-mode Optical Fiber)	jednovidový optický kabel
SOP (State Of Polarization)	stav polarizace
WDM (Wavelength Division Multiplex)	vlnový multiplex
XPM (Cross-Phase modulation)	křížová fázová modulace

Seznam příloh

1) DVD obsahující elektronickou verzi práce:

GRENAR, D. *Řešení nasazení DWDM systémů na 100G a 400G*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 89 s. Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.