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

SOUBĚH FOTONICKÝCH SLUŽEB V OPTICKÉM VLÁKNĚ
SIMULTANEOUS TRANSMISSION OF PHOTONIC SERVICES IN FIBRE OPTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Michal Látal, DiS.
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Petr Münster, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

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

Student: Bc. Michal Látal, DiS. ***ID:*** 174225
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Souběh fotonických služeb v optickém vlákně

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je teoretický rozbor problematiky přenosu více fotonických služeb (přesný čas, stabilní frekvence, OOK datový signál, POL-MUX datový signál a senzorický signál) jedním optickým vláknem za využití technologie DWDM. Bude analyzován vliv nelineárních jevů a možného vzájemného rušení při odstupu 50 a 100 GHz mezi jednotlivými signály. Na základě teoretického rozboru bude proveden návrh a realizace testovacího zapojení, následně měření a vyhodnocení výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika: Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno: Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] GOVIND P. AGRAWAL. Nonlinear fiber optics. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2001. ISBN 9780080479743.

Termín zadání: 1.2.2019 ***Termín odevzdání:*** 16.5.2019

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

prof. 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 zaměřuje na společný přenos vybraných fotonických služeb jedním jednovidovým optickým vláknem. V práci je rozebrána problematika společného přenosu více fotonických služeb jedním optickým vláknem při využití technologie vlnového multiplexu. Dále je popsán vznik a vliv nelineárních jevů doprovázejících společný přenos fotonických služeb. Kromě běžného datového přenosu s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s je zvažován společný přenos vysokorychlostního datového signál o přenosové rychlosti 200 Gbit/s, přenos přesného času a vysokovýkonného senzorického signálu. Při společném přenosu vybraných fotonických služeb bylo provedeno měření přenosových parametrů pro různé varianty uspořádání společného přenosu. Analyzován byl především vliv nelineárních jevů a možné vzájemné rušení jednotlivých přenosových kanálů při odstupu 50 a 100 GHz mezi jednotlivými signály.

KLÍČOVÁ SLOVA

optické vlákno, společný přenos, přesný čas, přenos dat, přenos senzorického signálů, nelineární jevy, edfa, dwdm, multiplex, bitová chybovost, časové zpoždění

ABSTRACT

Diploma thesis focuses on simultaneous transmission of selected photonic services by one single-mode optical fiber. The thesis deals with the problem of common transmission of multiple photonic services by one optical fiber using the wavelength division multiplex technology. Furthermore, the origin and influence of nonlinear phenomena accompanying the simultaneous transmission of photonic services are described. Except common data transmission with a bitrate of 10 Gbit/s, a common high-speed data signal transmission with a bitrate of 200 Gbit/s, accurate time transmission and high-power sensor signal are considered. During the aimultaneous transmission of selected photonic services, the measurement of the transmission parameters was performed for various variants of the simultaneous transmission arrangement. In particular, the influence of nonlinear phenomena and possible mutual interference of individual transmission channels at 50 and 100 GHz between signals was analyzed.

KEYWORDS

optical fiber, simultaneous transmission, accurate time, data transmission, sensing signal transmission, non-linear effects, edfa, dwdm, multiplex, bit error rate, time delay

LÁTAL, Michal. *Souběh fotonických služeb v optickém vlákně*. Brno, 2019, 85 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, PhD.

Vysázeno pomocí balíčku `thesis` verze 3.03; `http://latex.feec.vutbr.cz`

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Souběh fotonických služeb v optickém vlákně“ 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 a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno ....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

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

Brno ....

podpis autora

Obsah

Úvod **10**

1 Přenos po optickém vlákně **11**
1.1 Optická vlákna . . . 11
1.1.1 Základní popis jednovidového optického vlákna . . . 12
1.1.2 Polarizace světla . . . 13
1.1.3 Vlákno typu G.652 . . . 14
1.1.4 Vlákno typu G.653 . . . 15
1.1.5 Vlákno typu G.655 . . . 16
1.1.6 Vlákno typu G.657 . . . 17
1.2 Lineární parametry optického vlákna . . . 18
1.2.1 Útlum . . . 18
1.2.2 Disperze . . . 21
1.3 Nelineární jevy v optickém vlákně . . . 25
1.3.1 Stimulovaný rozptyl . . . 25
1.3.2 Brillouinův rozptyl . . . 25
1.3.3 Ramanův rozptyl . . . 26
1.3.4 Vlastní fázová modulace . . . 26
1.3.5 Křížová fázová modulace . . . 27
1.3.6 Čtyřvlnné směšování . . . 28

2 Multiplexní systémy **29**
2.1 Techniky multiplexování . . . 29
2.1.1 WDM . . . 29
2.1.2 WWDM . . . 30
2.1.3 CWDM . . . 31
2.1.4 DWDM . . . 31
2.1.5 PDM . . . 33

3 Modulační formáty v datových sítích **35**
3.1 OOK (On-Off Keying) . . . 35
3.2 DP-QPSK (Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying) . . . 36

4 Zdroje a detektory optického záření **37**
4.1 Zdroje optického záření . . . 37
4.1.1 Laserové diody . . . 37
4.1.2 VCSEL . . . 38
4.1.3 DFB . . . 38

4.2 Detektory optického záření 40
4.2.1 Fotodioda PIN 40
4.2.2 Lavinová fotodioda 41

5 Přehled fotonických služeb 42
5.1 Datový signál 42
5.2 Přesný čas 43
5.3 Stabilní frekvence 44
5.4 Senzorický signál 45
5.5 Přenos fotonických služeb v jednom vlákně 45
5.5.1 Jednosměrný přenos optickým vláknem 46
5.5.2 Obousměrný přenos optickým vláknem 48

6 Návrh měření společného přenosu 50
6.1 Přenos přesného času 50
6.2 Přenos datových signálů 51
6.3 Ověřovací měření 52
6.4 Společný přenos jedním optickým vláknem 53
6.5 Přenos zesíleného společného signálu vybraných služeb 54
6.6 Přenos společného signálů se změnou kanálů 55
6.7 Odstup signálů od senzorického signálu 57

7 Výsledky měření 58
7.1 Ověřovací měření přenosu času 58
7.2 Ověřovací měření datového přenosu 59
7.3 Společný přenos časového a datového signálu optickým vláknem . . . 60
7.4 Přenos zesíleného společného signálu vybraných služeb 64
7.5 Přenos společného signálů se změnou kanálů 66
7.6 Odstup signálů od senzorického signálu 69

8 Závěr 71

Literatura 73

Seznam symbolů, veličin a zkratek 76

Seznam příloh 78

A Přehled parametrů ITU-T G.65x 79

B Přenosové parametry pro odstup signálů 83

Seznam obrázků

1.1 Zjednodušené blokové schéma optického spoje 11
1.2 Útlumové ztráty a) vznik absorpce, b) vznik rozptylu 20
1.3 Vznik polarizační vidové disperze 24
2.1 Princip multiplexování 29
2.2 Princip WDM multiplexu 30
2.3 Princip duplexního DWDM systému 33
4.1 Spektrální charakteristiky zdrojů optického záření 39
5.1 Schéma jednosměrného přenosu času a frekvence optickým vláknem . 47
5.2 Schéma obousměrného přenosu času a frekvence optickým vláknem . 48
6.1 Schéma zapojení pracoviště pro měření časového zpoždění 51
6.2 Zjednodušené schéma MUX/DEMUX zařízení 53
6.3 Schéma společného přenosu fotonických služeb optickým vláknem . . 54
6.4 Schéma společného přenosu pro zesílený signál 55
6.5 Schéma společného přenosu se změnou kanálů 56
7.1 Odchylka zpoždění při ověřovacím měření 58
7.2 Odchylka zpoždění při společném přenosu vláknem G.652 61
7.3 Spektrum DWDM signálů 63
7.4 Spektrum zesíleného společného signálu vybraných služeb 65
7.5 Spektrum společného přenosu se změnou kanálů 1. část 67
7.6 Spektrum společného přenosu se změnou kanálů 2. část 67
7.7 Spektrum společného přenosu se změnou kanálů 3. část 68
7.8 Spektrum společného přenosu se změnou kanálů 4. část 68
7.9 Odstup 50 GHz časového signálu od senzorického signálu 70
B.1 Odstup 100 GHz časového signálu od senzorického signálu 83
B.2 Odstup 50 GHz datového signálu 10 Gbit/s od senzorického signálu . 84
B.3 Odstup 100 GHz datového signálu 10 Gbit/s od senzorického signálu 84
B.4 Odstup 50 GHz datového signálu 100 Gbit/s od senzorického signálu 84
B.5 Odstup 150 GHz datového signálu 100 Gbit/s od senzorického signálu 85
B.6 Odstup 50 GHz datového signálu 200 Gbit/s od senzorického signálu . 85
B.7 Odstup 150 GHz datového signálu 200 Gbit/s od senzorického signálu 85

Seznam tabulek

1.1 Přehled vybraných základních vlastností standardu G.652 15
1.2 Přehled hodnot koeficientu chromatické disperze vlákna G.653 16
1.3 Přehled hodnot útlumů pro makroohyby vlákna G.657 18
6.1 Rozdělení fotonických služeb do DWDM kanálů s odstupem 100 GHz 54
6.2 Rozdělení fotonických služeb do DWDM kanálů s odstupem 100 GHz 55
6.3 Rozdělení fotonických služeb do DWDM kanálů s odstupem 100 GHz 56
6.4 Rozdělení DWDM přenosových kanálů s odstupem 50 GHz 57
7.1 Naměřené přenosové parametry pro datový signál 100 Gbit/s 59
7.2 Naměřené přenosové parametry pro společný přenos vláknem G.652 . 60
7.3 Naměřené přenosové parametry pro společný přenos vláknem G.653 . 61
7.4 Naměřené přenosové parametry pro společný přenos vláknem G.657 . 62
7.5 Naměřené přenosové parametry pro zesílený společný signál 64
7.6 Naměřené přenosové parametry pro datový signál 200 Gbit/s 66
7.7 Naměřené přenosové parametry pro datový signál 100 Gbit/s 67
7.8 Naměřené přenosové parametry pro odstup od senzorického signálu . 69
A.1 Přehled základních parametrů standardů G.657 79
A.2 Přehled základních parametrů standardů G.652 80
A.3 Přehled základních parametrů standardů G.653 81
A.4 Přehled základních parametrů standardů G.655 82
B.1 Přenosové parametry pro odstup datového signálu 200 Gbit/s 83
B.2 Přenosové parametry pro odstup datového signálu 100 Gbit/s 83

Úvod

Fotonické služby představují soubor pokročilých služeb optických sítí, které umožňují čistě optický přenos bez potřeby převodu optického signálu na signál elektrický. Fotonické služby jsou tak určeny pro nejnáročnější aplikace založené na komunikaci v reálném čase. Mezi nejčastější fotonické služby využívající přenos v reálném čase patří přenos přesného času a stabilní optické frekvence.

Provoz těchto služeb je podmíněný dostupností temných vláken a přenosových optických sítí převyšujících možnosti běžně poskytované pro přenos například v sítí Internet. Lze tak vyhovět náročnějším aplikacím, které mají přísnější požadavky na přesnost přenosu času nebo stabilní frekvence. Pro některé náročné aplikace, například dálkové řízení strojů, lékařské operace nebo reprodukovatelné vědecké experimenty je nutné dosáhnout extrémně přesného a dlouhodobě stabilního přenosového prostředí v celé trase přenosu, jelikož i malé kolísání zpozdění může v těchto aplikacích způsobit fatální důsledky.

V České republice se problematice fotonických služeb a sítí nejvíce věnuje sdružení CESNET (Czech Education and Scientific NETwork), které rozvíjí národní e-infrastrukturu určenou pro výzkum a vzdělávání. Sdružení CESNET dosáhlo světového prvenství při využití společného páru optických vláken pro přenos 100 Gbit/s datového signálu a současného poskytování fotonických služeb při kterém nedošlo k vzájemnému ovlivňování fotonického a datového optického signálu [1].

Diplomová práce je rozdělena na dvě hlavní části. První část je rozdělena do čtyř kapitol a obsahuje teoretický rozbor problematiky přenosu více fotonických služeb jedním optickým vláknem při využití technologie hustého vlnového multiplexu. Druhá část diplomové práce se zaměřuje na návrh a praktickou realizaci testovacího zapojení vybraných fotonických služeb.

První kapitola diplomové práce se věnuje základním poznatkům a popisu optického přenosu v optickém vlákně. Popisuje základní vlastnosti jednovidových vláken a jeho různých standardů. Dále popisuje lineární a nelineární jevy provázející přenos v optickém vlákně.

Druhá kapitola je zaměřena na multiplexní systémy a modulační formáty využívané v optických datových a komunikačních sítích. Podrobněji popisuje systém hustého vlnového multiplexu.

Třetí kapitola se věnuje popisu zdrojů a detektorů optického záření, popsaný jsou především laserové zdroje optického záření a fotodiody ve funkci detektoru optického záření.

Čtvrtá kapitola přináší přehled jednotlivých typů fotonických služeb a možnosti jak lze fotonické služby přenášet v jednom vlákně.

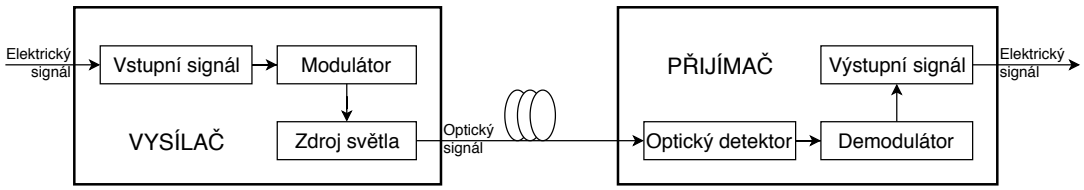
Pátá a šestá kapitola je zaměřena na návrh měření a hodnocení výsledků měření.

1 Přenos po optickém vlákně

Nejčastějším přenosovým prostředím pro přenos optického signálu mezi optickým vysílačem a optickým přijímačem jsou optická vlákna. Mezi vysílačem a přijímačem optického signálu, mohou být i jiná přenosová prostředí umožňující přenos světla, například atmosférický prostor, kosmický prostor, vakuum.

Atmosférické prostředí ovšem není z hlediska spolehlivosti pro optické přenosy příliš vhodné, jelikož se ve většině případů jedná o prostředí nehomogenní, dochází zde k zeslabování světelného záření vlivem absorpce, rozptylem a proměnným indexem lomu prostředí [2].

Kosmický prostor umožňuje bezpečný pohyb družic a je využíván pro přenos mezi družicemi bez výše uvedených problémů.



Obr. 1.1: Zjednodušené blokové schéma optického spoje

1.1 Optická vlákna

Nejvýhodnější se jeví přenosy signálů po optickém vlákně. Tyto přenosy netrpí problémy jako je tomu při přenosech atmosférickým prostředím, ale ani toto prostředí není bezproblémové. Při přenosu optickým vláknem se vlastnosti optického signálu mění, dochází k zeslabení, změnám tvarů a časové polohy přenášených optických impulsů. Výhody přenosu po optickém vlákně jsou především značná šířka přenášeného pásma, malé rozměry a hmotnost, elektrická izolace, bezpečnost přenosu, imunita vůči interferencím a přeslechům, nízké ztráty světelné energie.

Pro výrobu optických vláken je základním materiálem čisté křemičité sklo SiO_2 a další tzv. legovací příměsi jako GeO_2, P_2O_5, B_2O_3. Různou koncentrací těchto příměsí se dosahují požadované parametry optického vlákna, velikost a průběh indexu lomu jádra a pláště vlákna, což výrazně ovlivňuje jeho přenosové vlastnosti [2].

Přenosové vlastnosti jednotlivých optických vláken jsou dány výrobou a závislé na jejich konstrukci. Zjednodušeně rozeznáváme tři základní typy konstrukcí:

- jednovidové vlákno s konstantním indexem lomu jádra
- mnohavidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu jádra
- mnohavidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu jádra

Specifikace jednotlivých typů a kategorií optických vláken jsou obsaženy v normách a doporučeních stanovených mezinárodními organizacemi. Dále navíc ještě existují doplňující výrobní normy a specifikace používané na lokálních trzích.

Organizace odpovědná za mezinárodní normalizaci v oblasti optických komunikací je International Electrotechnical Commission Technical Committee 86 (IEC TC86), která definovala značení standardů založené na zkratkách druhů vláken: OM-Optical Multimode, OS-Optical Singlemode (OM1, OM2, OS1). Značení OM bylo přijato širokou veřejností, na rozdíl od značení OS. Pro značení jednovidových optických vláken se staly nejpoužívanější názvy druhé mezinárodní telekomunikační organizace, International Telecommunication Union (ITU), konkrétně oddělení věnující se normalizačním telekomunikačním řešením (ITU-T) [3].

Doporučení a standardy ITU-T jsou všeobecně známé a používané. Optické přenosové systémy, média, digitální systémy a sítě jsou charakterizovány sérii doporučení G.600-G.699, optická vlákna jsou pak popsány v doporučeních G.650-G.659. Vybraným typům vláken G.65x budou věnovány následují kapitoly.

1.1.1 Základní popis jednovidového optického vlákna

Současným trendem v přenosech po optických vláknech je častější využívání jednovidových optických vláken v porovnání s mnohavidovými, což umožňuje i jejich zvyšující se cenová dostupnost.

Jednovidové optické vlákno SMF (Single Mode Fibre) s konstantním indexem lomu a skokovou změnou indexu lomu pláště se vyznačuje malým průměrem jádra jen 7–9 µm, které dokáže navázat pouze základní vid optického signálu.

Při nasazovaní jednovidových optických vláken je zapotřebí používat kvalitní optické zdroje záření, které dokáží vyzařovat v úzkém spektrálním svazku, typicky laserové diody. Jednovidová optická vlákna běžně přenášejí vlnové délky 1310 nm a 1550 nm, dokáží také pracovat na vlnových délkách v oblasti 1600 nm. Dosahovaný útlum kvalitních jednovidových vláken je téměř na hranici teoreticky dosažitelného minimálního útlumu, daného fyzikálními vlastnostmi optických vláken. Běžný dosahovaný měrný útlum pro vlnovou délku 1310 nm je 0,3 dB/km a pro vlnovou délku 1550 nm 0,2 dB/km. Hodnota výsledného útlumu optického vlákna je v praxi ovlivněna čistotou výroby, spoji a konektory na vlákně, pokládkou kabelu, ohyby a vnějšími vlivy [2].

Jednovidová optická vlákna jsou v telekomunikacích využívána především při vysokorychlostních přenosech na velké vzdálenosti, páteřní, mezistátní a kontinentální spoje a v multiplexních systémech. Přenosové rychlosti jednovidových optických vláken dosahují stovek gigabitů až několik terabitů za sekundu.

1.1.2 Polarizace světla

Světlo je elektromagnetické záření (vlnění) skládající se ze dvou, navzájem kolmých složek (vektorů). První složkou je složka intenzity elektrického pole E a k ní kolmá druhá složka indukce magnetického pole B. Obě tyto složky leží v rovině kolmé ke směru šíření světla. Světlo je označováno jako příčné elektromagnetické vlnění.

Směry vektorů intenzity elektrického pole E a indukce magnetického pole B jsou u přirozeného světla zcela nahodilé, což je dáno zdrojem záření světla, která vyzařuje velké množství fotonů. Takovéto světlo se nazývá nepolarizované [4].

Jelikož jsou vektory intenzity elektrického pole a indukce magnetického pole na sebe navzájem kolmé, je možné při dalším popisu polarizace světla brát v úvahu chování jednoho vektoru, obvykle se volí vektor intenzity elektrického pole E. Pokud vektor E kmitá jen v jedné rovině je světlo lineárně polarizované. Polarizované světlo se od nepolarizovaného liší tím, že vektory E mají v rovině kolmé ke směru šíření světla stejný směr.

Mimo lineárně polarizované světlo existuje i kruhově polarizované světlo, kde koncové body vektoru E opisují, v rovině kolmé na směr šíření světla kružnici. Poloměr této kružnice, tedy velikost vektoru je konstantní, mění se jen jeho směr. Pokud vektor E mění jak svoji velikost tak i směr, koncové body vektoru E opisují elipsu a dochází tak k eliptické polarizaci světla.

Polarizaci světla lze dosáhnout několika způsoby. Odrazem, kdy při odrazu světla dochází k částečné polarizaci, tím že jeden směr vektorů E převažuje. Lomem, podobně jako při odrazu dochází k částečné polarizaci. Dvojlomem, kdy paprsek světla dopadne na krystal a dojde k lomu na dva paprsky. Oba tyto paprsky jsou lineárně polarizované a jejich vektory E jsou na sebe kolmé. Polaroidem, kde dochází k polarizaci světla pomocí speciálních filtrů [5].

Pro polarizaci nepolarizovaného světla se využívá polarizátor. Pro zjištění orientace roviny ve které se polarizované světlo nachází se využívá analyzátor.

Polarizované světlo se využívá pro zkoumání opticky aktivních látek, mechanických napětí a vad v různých objektech, základní princip polarizace světla využívají displeje z kapalných krystalů [4].

1.1.3 Vlákno typu G.652

Doporučení ITU-T G.652 je základní standard popisující geometrické, mechanické a přenosové vlastnosti jednovidového optického vlákna. Vlákno typu G.652 je optimalizováno pro vlnovou délku 1310 nm, kde dosahuje nulové hodnoty chromatické disperze. Vlákno G.652 bylo původně optimalizováno pro oblast vlnových délek 1310 nm, ale může být použito i v oblasti 1550 nm. Tento typ vlákna je celosvětově nejrozšířenějším jednovidovým optickým vláknem. Vlákna jsou typická skokovou změnou indexu lomu na rozhraní jádra a pláště vlákna. Vlákna podporují digitální a analogový přenos.

První vydání doporučení ITU-T G.652 bylo v roce 1984 a nyní definuje čtyři různé verze tohoto vlákna (A, B, C, D). Všechny čtyři varianty vlákna mají stejný průměr vlákna 8–10 µm, průměr pláště 125 µm. Vlákna typu A, B jsou staršího typu, na vlnové délce 1383 nm se nachází lokální maximum útlumu v podobě přítomnosti OH^- iontů vody, které vzniklo při výrobě vlákna. Jedná se o tzv. „water peak“. Vlákna jsou konstruována s nulovou hodnotou disperze v oblasti vlnové délky 1310 nm. Vlákna typu C a D jsou již modernější s potlačením tohoto lokálního maxima, což umožňuje využití těchto vláken v oblasti vlnových délek 1310–1550 nm, např. pro využití CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) [6].

Vlákno typu G.652.A je standardní telekomunikační vlákno původně určené pro přenosové systémy SDH (Synchronous Digital Hyerarchy) s přenosovou rychlostí až 2,5 Gb/s.

Vlákno typu G.652.B je vylepšená varianta vlákna typu A. Vylepšená je hodnota měrného útlumu a koeficient PMD (Polarization Mode Disperzion) což umožňuje přenosy s přenosovou rychlostí až 10 Gb/s.

Vlákno typu G.652.C je varianta vlákna G.652 využívající zredukovanou hodnotu vložného útlumu v oblasti tzv. „water peaku“ ZWP (Zero Water Peak), což umožňuje tento typ vlákna provozovat v celém rozsahu vlnových délek a využít všechna dostupná přenosová pásma.

Vlákno typu G.652.D je standardní jednovidové vlákno se sníženou hodnotou polarizační vidové disperze o proti variantě C, podporující vysokorychlostní přenosy, desítky Gb/s. Vlákno podporuje přenosy v celém rozsahu vlnových délek, někdy je též nazýváno jako All Wave vlákno. V dnešních systémech je jedním z nejoblíbenějších a nejpoužívanějších typů optických vláken, hlavně díky své univerzálnosti (zpětná kompatibilita s všemi vlákny G.652) a ceně [6], [7].

Pro vzájemné porovnání je v tabulce 1.1 stručný přehled vybraných základních vlastností standardu G.652. V tabulce A.2 je podrobný přehled vlastností standardu G.652, včetně jeho variant.

Tab. 1.1: Přehled vybraných základních vlastností standardu G.652

Typ vlákna		**G.652.A**	**G.652.D**	
Vlastnost	Detail	Hodnota		Jednotka
Průměr vidového pole	Vlnová délka	1310	1310	nm
	Rozsah hodnot	8,6–9,5	8,6–9,2	µm
	Tolerance	± 0,6	± 0,4	µm
Průměr pláště	Tolerance	125,0	125,0	µm
		± 1	± 0,7	µm
Měrný útlum α max. hodnoty	1310 nm	0,5	0,4	dB/km
	1550 nm	0,4	0,3	dB/km
	1625 nm	-	0,4	dB/km
Koeficient chromatické disperze	λ_{0min}	1300		nm
	λ_{0max}	1324		nm
	S_{0max}	0,092		ps/nm^2×km
Koeficient polarizační vidové disperze PMD	Q	0,01	0,01	%
	Max PMD$_Q$	0,5	0,2	ps/$\sqrt{km}$

1.1.4 Vlákno typu G.653

Doporučení ITU-T G.653 popisuje jednovidové optické vlákno s nulovou hodnotou disperze pro vlnové délky blízké 1550 nm a úměrně se zvyšující hodnotou disperze s vlnovou délkou. Optické vlákno s posunutou disperzí DSF (Dispersion-Shifted Fibre) je typ vlákna vyrobeného pro optimalizaci nízké hodnoty disperze a nízkého útlumu, vlákno je optimalizováno pro vlnovou délku 1550 nm.

V jednovidovém optickém vlákně typu G.653 je index lomu jádra svým profilem přizpůsoben tak, aby posouval vlnovou délku nulové disperze z $\lambda_{0min} = 1300$ nm na vlnovou délku λ_{0min}=1500 nm.

Optické vlákno typu G.653 má sníženou hodnotu velikosti jádra, je vhodné pro dálkové přenosové systémy využívající vláknové zesilovače dopované erbiem (EDFA Erbium-Doped Fiber Amplifier). Vysoká koncentrace energie ovšem v jádře vlákna způsobuje nelineární jevy. Nejméně žádoucí je čtyřvlnné směšování, vyskytující se v systémech s hustým dělením vlnových délek, které způsobuje intermodulaci nezávislých optických signálů. Hodnoty chromatické disperze mohou být specifické pro některé vlnové délky, tak aby podporovaly systémy multiplexování s hrubým dělením vlnových délek [8].

V důsledku toho se optické vlákno typu G.653 příliš nenasazuje a je často nahrazováno vlákny s posunutou nenulovou hodnotou disperze, vlákny typu G.655.

Podle doporučené ITU-T G.653 se rozlišují dva typy tohoto optického vlákna, G.653.A a G.653.B.

Vzájemné porovnání základních hodnot koeficientu chromatické disperze je v tabulce 1.2. V tabulce A.3 je podrobný přehled vlastností standardu G.653, včetně jeho variant.

Tab. 1.2: Přehled hodnot koeficientu chromatické disperze vlákna G.653

Typ vlákna		**G.653.A**	**G.653.B**	
Vlastnost	Detail	Hodnota		Jednotka
Koeficient chromatické disperze	λ_{min}–λ_{max}	1525–1575	-	nm
	D_{max}	3,5	-	ps/nm^2×km
	λ_{0min}–λ_{0max}	1500–1600	-	nm
	S_{0max}	0,085	-	ps/nm^2×km
	$D_{min}(\lambda)$: 1460–1525 nm	-	$0{,}085\cdot(\lambda-1525)-3{,}5$	ps/nm^2×km
	$D_{min}(\lambda)$: 1525–1625 nm	-	$\frac{3{,}75}{75}\cdot(\lambda-1600)$	ps/nm^2×km
	$D_{max}(\lambda)$: 1460-1525 nm	-	$\frac{3{,}75}{75}\cdot(\lambda-1500)$	ps/nm^2×km
	$D_{max}(\lambda)$: 1525–1625 nm	-	$0{,}085\cdot(\lambda-1575)+3{,}5$	ps/nm^2×km

1.1.5 Vlákno typu G.655

Doporučení ITU-T G.655 popisuje geometrické, mechanické a přenosové vlastnosti jednovidového vlákna s posunutou nenulovou hodnotou chromatické disperze NZ-DSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fibre). Vlákna jsou optimalizována pro použití v přenosovém pásmu 1550 nm. Materiálová disperze těchto vláken byla upravená tak, aby v pásmu 1530–1565 nm vlákna dosahovala velmi malé hodnoty chromatické disperze. Tato malá nenulová hodnota chromatické disperze snižuje riziko projevu vedlejších nelineárních jevů a potlačuje čtyřvlnné směšování.

Ke čtyřvlnnému směšování FWM (Four-Wave Mixing) dochází v optických systémech DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex), kdy se tři vlnové délky promíchají tak, že vznikne čtvrtá vlnová délka, která překrývá a zasahuje do původních signálů [9].

Tento typ vlákna je určen k provozu dálkových vysokorychlostních přenosů a pro využití technologie DWDM.

Vlákno typu G.655.A je využívané pro vysokorychlostní jednokanálové i vícekanálové optické systémy s optickými zesilovači a pro vnitřní instalace budov. V závislosti na vlnové délce kanálu a rozptylové charakteristice vlákna je omezen maximální vysílaný výkon optického signálu. Typická minimální vzájemná vzdálenost kanálů by měla být omezena na 200 GHz.

Vlákno typu G.655.B je využívané pro vysokorychlostní jednokanálové i vícekanálové optické systémy s optickými zesilovači a pro vnitřní instalace budov. V závislosti na vlnové délce kanálu a rozptylové charakteristice vlákna je omezen maximální vysílaný výkon optického signálu, tento vysílaný výkon optického signálu může být vyšší než pro vlákno typu G.655.A. Typická minimální vzájemná vzdálenost kanálů je 100 GHz nebo méně. Koeficient polarizační vidové disperze PMD umožňuje vysokorychlostní přenosy do vzdálenosti 400 km.

Vlákno typu G.655.C je vlastnostmi podobné vláknu G.655.B, ale přísnější požadavky na parametr PMD dovolí vysokorychlostní přenosy na vzdálenosti větší než 400 km. Mnoho podmořských optických tras využívá vlákna typu G.655.B a G.655.C.

Pro vzájemné porovnání je v tabulce A.4 uveden přehled základních vlastností standardů G.655 [9], [10].

1.1.6 Vlákno typu G.657

Doporučení ITU-T G.657 popisuje dvě kategorie jednovidových optických vláken se zvýšenou odolností na ohybové ztráty, makroohyby, v porovnání s vlákny typu ITU-T G.652. Vlákno G.657 bylo původně vyvinuto pro použití v přístupových sítích a ve vnitřních instalacích budov, tedy na koncích přístupových sítí. Obě kategorie A a B obsahují dvě podkategorie, které se liší především v limitní hodnotě poloměru ohybu vlákna. Hodnoty útlumu makroohybů jsou shrnuty v 1.3

Vlákna kategorie A jsou optimalizována pro sníženou hodnotu ztrát makroohyby v porovnání s vlákny G.652.D. a mohou být použita v celé přístupové síti. Vlákna G.657 v této kategorii jsou vhodná pro použití na rozsahu vlnových délek 1260–1625 nm, jsou také kompatibilní s vlákny G.652.D, mají stejné přenosové a propojovací vlastnosti. Tato kompatibilita umožňuje použít vlákna G.657.A pro všechny sítě, pro které jsou specifikována vlákna G.652.D.

- Podkategorie ITU-T G.657.A1 umožňuje minimální poloměr vlákna 10 mm.
- Podkategorie ITU-T G.657.A2 umožňuje minimální poloměr vlákna 7,5 mm.

Vlákna kategorie B jsou optimalizována pro ještě více sníženou hodnotu ztrát makroohyby a jsou tedy používána při velmi malých poloměrech ohybu. Tato vlákna jsou určena pro krátké vzdálenosti (méně než 1000 m) na koncích přístupových sítí, uvnitř budov nebo mezi budovami. Vlákna kategorie B jsou vhodná pro použití na rozsahu vlnových délek 1260–1625 nm, ovšem neposkytují 100% kompatibilitu s vlákny G.652.D. Kompatibilní jsou s vlákny G.657.A v přístupových sítích [11].

- Podkategorie ITU-T G.657.B2 umožňuje minimální poloměr vlákna 7,5 mm.
- Podkategorie ITU-T G.657.B3 umožňuje minimální poloměr vlákna 5 mm.

Pro vzájemné porovnání je v tabulce 1.3 přehled hodnot útlumů pro makroohyby vlákna G.657. V tabulce A.1 je podrobný přehled vlastností standardu G.657.

Tab. 1.3: Přehled hodnot útlumů pro makroohyby vlákna G.657

Typ vlákna		**G.657.A1**		**G.657.A2**			
Vlastnost	Detail	Hodnota					Jednotka
Útlum makroohyby	Poloměr ohybu	15	10	15	10	7,5	mm
	Počet ohybů	10	1	10	1	1	-
	$\lambda = 1550\,\mathrm{nm}$	0,25	0,75	0,03	0,1	0,5	dB
	$\lambda = 1625\,\mathrm{nm}$	1,0	1,5	0,1	0,2	1	dB

Typ vlákna		**G.657.B2**			**G.657.B3**			
Vlastnost	Detail	Hodnota						Jednotka
Útlum makroohyby	Poloměr ohybu	15	10	7,5	10	7,5	5	mm
	Počet ohybů	10	1	1	1	1	1	-
	$\lambda = 1550\,\mathrm{nm}$	0,03	0,1	0,5	0,03	0,08	0,15	dB
	$\lambda = 1625\,\mathrm{nm}$	0,1	0,2	1,0	0,1	0,25	0,45	dB

1.2 Lineární parametry optického vlákna

V lineárním optickém prostředí probíhají lineární optické jevy. Nejčastějšími lineárními optickými jevy ke kterým dochází jsou útlum a disperze. Tyto jevy se vyskytují už při nízkých intenzitách vysílaného optického výkonu. Se vzájemným působením těchto jevů můžeme počítat při navrhování optické trasy, většina těchto jevů se vzájemně ovlivňuje a dohromady sčítá.

1.2.1 Útlum

V optickém vlákně dochází při přenosu světelného signálu ke ztrátám energie signálu neboli útlumu. Výkon signálu postupně klesá se vzdáleností od zdroje signálu. Útlum optického vlákna se udává v jednotkách dB. Je definován jako logaritmické vyjádření podílu vstupního světelného výkonu P_1 k výstupnímu světelnému výkonu P_2 pro danou vlnovou délku λ podle vztahu:

$$A(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} \qquad (dB) \tag{1.1}$$

Útlum optických vláken A udává decibelovou hodnoto ztrát výkonu světelného signálu při šíření prostředím optického vlákna. Příčinou útlumu světelného signálu v optických vláknech je především absorpce a rozptyl světelných paprsků v materiálu jádra vlákna. Útlum může vznikat přímo v materiálu vlákna, na rozhraní prostředí

vlákna, při spojování dvou vláken nebo na mikroohybech a makroohybech způsobených pokládkou optického vlákna. Součtem těchto jednotlivých útlumů je pak celkový útlum optické trasy. Konkretní útlumy jsou závislé na materiálu optického vlákna a na vlnové délce šířícího se světelného signálu [5].

Optická vlákna jsou dále charakterizována měrným útlumem, což je útlum vlákna vztažený na jeden kilometr jeho délky, v jednotkách dB/km.

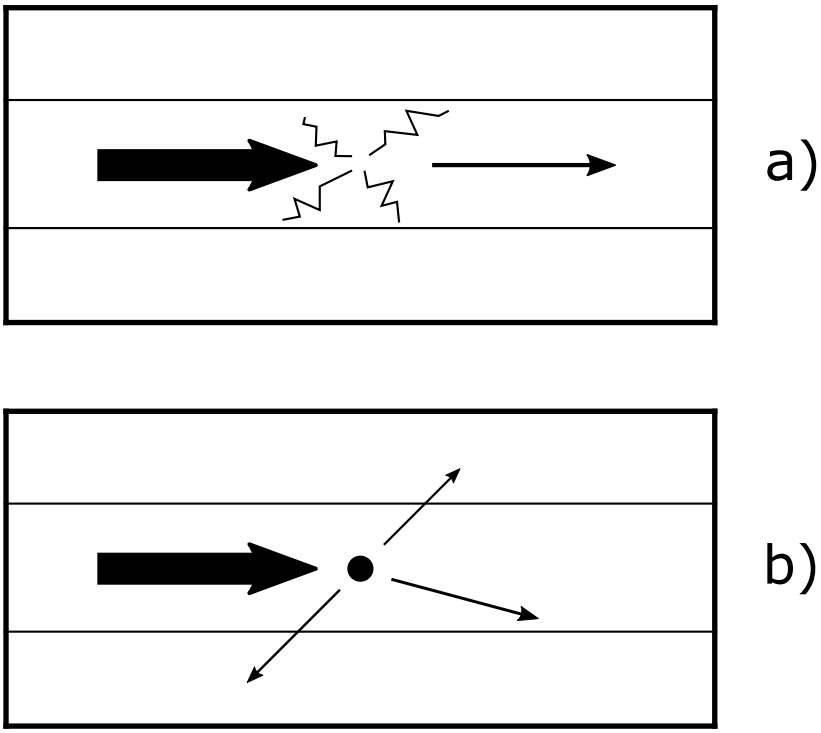
Ztráty absorpcí mají největší podíl na celkovém útlumu optických vláken, jsou způsobeny absorpcí optického záření na molekulárních nečistotách a příměsích v materiálu jádra vlákna (viz obr. 1.2a). Největší vliv příměsí mají ionty kovů železa, mědi, chromu a ionty vody. Přítomnost těchto iontů je ovlivněna čistotou výroby a provedením vnější ochrany. Při výrobě optického vlákna dochází k tepelným chemickým reakcím, na kterých se významně podílí voda. Po těchto úpravách ve vláknu zůstávají ionty OH^-, které na některých vlnových délkách způsobují absorpci optického záření. Lokální maxima útlumu způsobená právě vysokou koncentrací OH^- iontů vody v praxi často označujeme jako „water peak“ [2], [5].

Ztráty rozptylem vznikají na molekulárních nehomogenitách v amorfních materiálech. Amorfní materiály (sklo, plyn, kapaliny) nemají pravidelně uspořádanou svou krystalickou mřížku, tudíž molekuly materiálu jsou náhodně rozloženy a tvoří mikronehomogenity indexu lomu materiálu. Na velikosti těchto nehomogenit závisí velikost rozptylových ztrát. Rozptyl vznikající na nehomogenitách a drobných nečistotách rozměrově menších než je ve srovnání vlnová délka optického záření (viz obr. 1.2b), nazýváme Rayleighův rozptyl. Velikost ztrát způsobených Rayleighovým rozptylem je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky šířeného optického záření. Vliv a velikost útlumu těchto ztrát roste velmi rychle pro krátké vlnové délky blízké ultrafialové oblasti.

Ztráty rozptylem vznikají také na makroskopických nehomogenitách do kterých řadíme rozptyly způsobené bublinkami, makroskopickými nečistotami jako jsou prachové částice nebo nehomogenity šířky jádra, porušení tvarů a rozměrů rozmezí mezi jádrem a pláštěm optického vlákna, poruchy přímočarosti osy vlákna.

Ztráty způsobené Rayleighovým rozptylem jsou přítomny vždy a mají všesměrový charakter, lze je považovat za teoretickou minimální hodnotu útlumu pro danou vlnovou délku. Některé rozptýlené světelné paprsky se odrážejí zpět směrem ke zdroji záření. Této vlastnosti se využívá při vzdáleném měření optické trasy metodou OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) [2], [5].

Ztráty vyzařováním jsou nejčastěji způsobeny lomem šířících se optických paprsků na rozhraní dvou dielektrických prostředí s různými vlastnostmi (jádro-plášť). Při ohýbání optického vlákna dochází ke změně úhlu dopadu a odrazu některých přenášených paprsků, což může mít za následek, že některý paprsek překročí mezní



Obr. 1.2: Útlumové ztráty a) vznik absorpce, b) vznik rozptylu

hodnotu úhlu odrazu a nevrátí se zpátky do jádra, ale pronikne do pláště. Jednou z důležitých vlastností každého optického vlákna je minimální poloměr ohybu vlákna, který je nutné při instalaci vlákna dodržet aby nedocházelo k velkým ztrátám v důsledku ohybu. V místě ohybu je optické vlákno daleko náchylnější na poškození. Hodnoty minimálního poloměru ohybu pro vlákno G.657, které je odolné na makroohyby do poloměru 5 mm jsou uvedeny v tabulce 1.3. Velikost útlumu optického vlákna způsobeného ohybem závisí především na velikosti poloměru ohybu vlákna.

Ztráty na mikroohybech jsou způsobeny poruchami přímočarosti osy vlákna a chybami v geometrii vlákna. Tyto poruchy vznikají při výrobě optického vlákna působením okolních elementů, které narušují a deformují plášť vlákna. Na těchto mikroohybech jsou některé optické paprsky odráženy pod velkým úhlem, unikají tak mimo jádro optického vlákna a dochází ke zvětšení vložného útlumu vlákna.

Ztráty na makroohybech jsou způsobeny běžným zacházením při použití optických vláken. Ke ztrátám na makroohybech a tedy zvýšení útlumu vlákna může nastat při nevhodné manipulaci s optickým vláknem, z důvodů připojení ke zdroji nebo detektoru optického záření, nebo z důvodů špatné pokládky a nerovnosti trasy.

Jev vyzařování je z hlediska optických přenosových aplikací po optických vláknech nežádoucí. Lze jej ale využít při navrhování a konstrukci optických senzorů založených právě na zakřivování optického vlákna [2], [5].

1.2.2 Disperze

Pro optická vlákna je charakteristická, mimo hodnotu útlumu, také hodnota rozšíření impulsu při jeho šíření vláknem. Disperze způsobí, že se šířka impulsu v časové oblasti při přenosu zvětšuje a může tak nastat situace kdy se optické impulsy na výstupu optického vlákna začnou překrývat a projeví se intersymbolová interference ISI (Inter Sybmbol Interference). Disperze je definována jako rozdíl šířky impulsu v polovině jeho výšky na konci a na začátku optického vlákna.

Hodnota disperze v optických vláknech se řadí k nejdůležitějším parametrům, určuje šířku přenášeného pásma a tím i přenosovou rychlost, je závislá na více faktorech od frekvence záření, spektrální šířky zdroje vyzařovaného záření, počtu vyzařovaných vidů, až po různé nelinearity způsobené optickým přenosem. Z toho důvodu je disperze vln hlavní příčinou zkreslení přenášeného optického signálu. Disperze optických vláken je limitující faktor při dosahování vysokých přenosových rychlostí a dosahů přenosových systémů [2], [5].

Materiálová disperze

Příčinou materiálové disperze je frekvenční závislost indexu lomu, která způsobuje frekvenční závislost skupinové a fázové rychlosti šíření optického záření v materiálu, z něhož je optické vlákno vyrobeno. Materiálová disperze je způsobena odlišnými rychlostmi šířících se paprsků, optického záření různých vlnových délek, což je způsobeno nelineární frekvenční závislostí indexu lomu prostředí. Hodnota materiálové disperze je dána vlastnostmi materiálu, z kterého je optické vlákno vyrobeno [2], [5].

Vlnovodná disperze

Vlnovodná disperze je důsledek geometrických vlastností optického vlákna ovlivňujících přenášený signál. Při přenosu optického impulsu optickým vláknem se část optického záření šíří jádrem vlákna a malá část záření se šíří pláštěm vlákna. Optické záření v jádře vlákna se ovšem šíří nižší rychlostí než záření v plášti, kvůli rozdílným hodnotám indexu lomu, což vede k rozšíření optického impulsu v časové oblasti. Vhodnou volbou profilu indexu lomu v jádře optického vlákna lze ovlivnit vlnovodnou disperzi [2], [5].

Chromatická disperze

V optických vláknech se materiálová a vlnovodná disperze kombinují, jejich společné působení se označuje jako chromatická disperze. Jev chromatické disperze nastává při použití zdroje optického záření, který není ideálně monochromatický. Vyzařované optické záření takovéhoto zdroje obsahuje určité spektrum vlnových délek, které se

optickým vláknem šíří rozdílnou rychlostí. Přenášený optický signál je vždy složen z více spektrálních složek, některé se zpožďují oproti jiným, což má za následek časové rozšíření signálu při průchodu vláknem. Na výstupu optického vlákna takto rozšířený signál zasahuje do sousedních signálů a způsobuje zkreslení přenášené informace, zároveň tím klesá energie signálu a snižuje se odstup signálu od šumu. Rozlišovací schopnost detektoru záření na přijímací straně pak není schopna přesně určit, který ze sousedních signálů má být v daném okamžiku detekovaný.

Chromatická disperze se projevuje především u jednovidových vláken využívajících DWDM, kde na konci vlákna dojde k rozšíření optického impulsu v čase a může docházet k interferenci mezi jednotlivými přenášenými bity.

Velikost chromatické disperze optického vlákna určuje tzv. koeficient chromatické disperze. Hodnota koeficientu udává rozšíření impulsu v ps/(nm$^2\times$km).

V současné době se pro kompenzaci chromatické disperze využívají speciální kompenzační vlákna DCF (Dispersion Compensation Fibre) s dostatečným záporným sklonem disperzní charakteristiky vhodným pro kompenzaci konvenčních i NZDF (Non Zero Dispersion Fibre) vláken. Další možná kompenzace je v použití Braggovské mřížky či kombinací kaskád těchto mřížek. Technologie Braggovských mřížek pro vysokorychlostní optické sítě umožňuje kompenzaci jednoho nebo více kanálů současně, vyrovnává sklon disperzní křivky pro přenosové vlákno do kterého vkládá jen minimální vložný útlum, menší než 3,5 dB. Braggovské mřížky se typicky využívají pro rozlehlé metropolitní a dálkové sítě využívající technologii DWDM [2], [5].

Vidová disperze

U mnohavidových vláken je hlavním omezujícím faktorem vidová disperze. Optické signály se v mnohavidových optických vláknech šíří pomoci více vidů (paprsků). Každý vid se ovšem šíří jinou přenosovou rychlostí a prochází jinou dráhou. Jednotlivé vidy svírají určitý úhel s osou vlákna, čím je úhel mezi trajektorií vidu a osou vlákna větší (čím vyšší vid), tím je delší jeho dráha mezi vstupem a výstupem optického vlákna. Menší je naopak jeho podélná rychlost kterou se šíří ve směru osy vlákna. Důsledkem toho se každý vid šíří vláknem různě dlouho, jednotlivé vidy se oproti sobě navzájem zpožďují. Vyšší vidy, bližší svému meznímu kmitočtu se šíří pomaleji než vidy nižší. Pro stejnou vzdálenost od začátku navázání vidů do optického vlákna bude mezi jednotlivými vidy časový rozestup daný rozdílem jejich skupinových zpoždění. Opticky signál, složený z velkého počtu vidů, je pak na výstupu vlákna v časové oblasti rozšířen, liší se tvarem i amplitudou od vstupního signálu [12].

Vidová disperze omezuje šířku přenášeného pásma, přenosovou rychlost a vzdálenost přenosu mnohavidovým optickým vláknem. Vliv vidové disperze, zpoždění jednotlivých vidů, lze ovlivnit zmenšením počtu šířících se vidů, až na jediný vid. Pro jednovidová optická vlákna nehraje vidová disperze žádnou roli. Přenosové vlastnosti jednovidových optických vláken jsou dány chromatickou a polarizační vidovou disperzí. Dalším možným způsobem jak snížit vliv vidové disperze je vyrovnání skupinových rychlostí šíření jednotlivých vidů. Toho lze dosáhnout vhodně zvoleným profilem indexu lomu vlákna, např. pro gradientní vlákna platí, že s rostoucí vzdáleností přenášeného vidu od osy vlákna roste, vlivem zmenšujícího se indexu lomu, rychlost šíření vidu. Dochází tak ke srovnání rychlostí šíření vyšších vidů s vidy nižšími [2], [12].

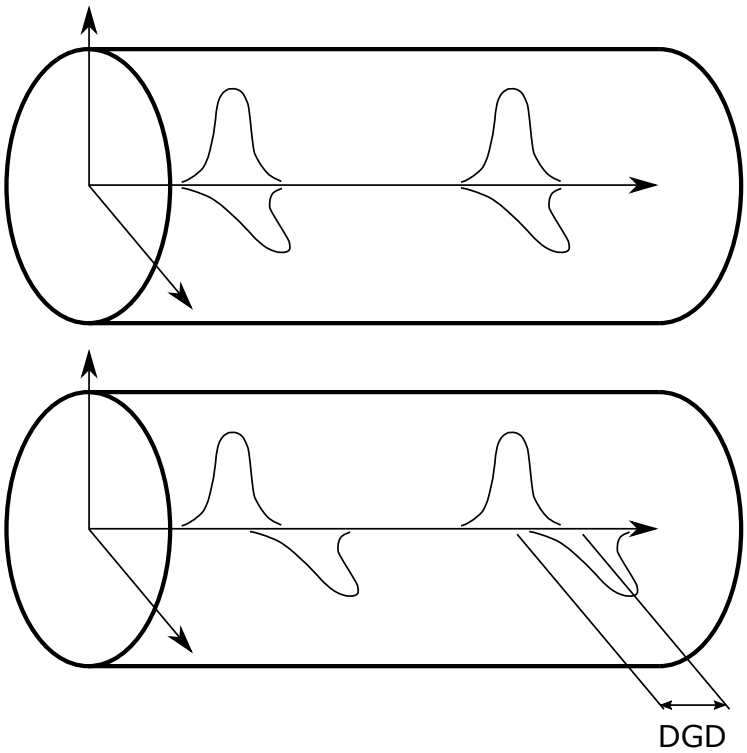
Polarizační vidová disperze

U jednovidových optických vláken se projevuje polarizační vidová disperze. Jediný vid, šířící se jednovidovým optickým vláknem, se šíří ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách. Za ideálních podmínek, tedy při perfektní kruhové symetrii homogenního optického vlákna, bez jakýchkoliv ohybů, bez pnutí a namáhání, za stálé teploty, se oba polarizační vidy šíří stejnou rychlostí. V reálném optickém vlákně vlivem kruhové nesymetrie vlákna, způsobené např. výrobní nedokonalostí, mikroohyby, nevhodnou instalací, mechanickým namáháním nebo nevhodně zvoleným způsobem uložení optického vlákna na místě, kde působí další vnější vlivy (tlak, vítr, vlhkost, otřesy), dochází k šíření obou polarizačních vidů (rovin) rozdílnou rychlostí, což způsobuje vznik polarizační vidové disperze. Rozdíl v šíření obou polarizačních vidů v reálném optickém vlákně je znázorněný na obr. 1.3. Dochází tak k rozšíření optického impulsu v čase a zkreslení optického signálu na výstupu optického vlákna [5].

Důsledek polarizační vidové disperze je stejně, jako u ostatních disperzí časové roztažení optického signálu a omezení maximální šířky přenosového pásma.Vliv polarizační vidové disperze je podobný jako při působení chromatické disperze, jak její hodnota překročí mezní hodnotu, detektor na přijímací straně není schopný správně detekovat logické hodnoty přijatého signálu a tím dochází ke zvyšování chybovosti.

Problematika polarizační vidové disperze začala narůstat v souvislosti s růstem přenosových rychlostí v jednovidových optických vláknech. V 90. letech 20. století byla tato problematika značně studována kvůli jejímu významu pro dálkové optické vysokorychlostní systémy. Do roku 1990 nebyla tato disperze ani známa [13].

Měřítkem polarizační vidové disperze je diferenciální skupinové zpoždění DGD (Diferential Group Delay) mezi oběma polarizačními vidy měřené v pikosekundách. Toto zpoždění se náhodně mění po celé délce vlákna, proto se uvažuje její střední



Obr. 1.3: Vznik polarizační vidové disperze

hodnota $\Delta\tau$. Polarizační vidová disperze je vyjádřena koeficientem PMD jako podíl zpoždění signálu $\Delta\tau$ a délky optické trasy l, viz rovnice 1.2. Pro krátké vzdálenosti, přibližně do 10 km, je polarizační vidová disperze přibližně lineární [14].

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l} \qquad (ps \cdot km^{-1}) \tag{1.2}$$

Pro větší vzdálenosti, více než 10 km, se polarizační vidová disperze nešíří lineárně, ale roste s druhou odmocninou vzdálenosti.

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} \qquad (ps \cdot km^{-1}) \tag{1.3}$$

1.3 Nelineární jevy v optickém vlákně

Při šíření velkého optického výkonu optickým vláknem, nelze vlákno považovat za lineární prostředí. V tomto nelineárním prostředí pak vlivem velkých hustot optických výkonů vznikají nelineární jevy.

Problémy nelineárních optických jevů se začaly, teoreticky i prakticky, řešit až s nástupem systémů vlnového multiplexu, kdy se do delších tras začaly nasazovat optické zesilovače signálu, které několikanásobně zvyšují přenášený optický výkon ve vlákně. Nelineární jevy se projevují při zvyšování optického výkonu v prostředí, kde je energie optického záření soustředěna do malého průřezu. V optických přenosech při využívání vlnových multiplexů, kde se běžně šíří několik desítek kanálů, každý o výkonu několika mW, může při součtu všech výkonů kanálu snadno dojít k přesáhnutí hraniční hodnoty výkonu, který je optické vlákno schopné přenést. Problém nastává především u systémů s hustým vlnovým multiplexem DWDM, kde se jednotlivé kanály řadí mezi sebou do velmi malých rozestupů (běžný rozestup 50 GHz). Takto velké hustoty světelného výkonu jsou příčinou vzniku některých nelineárních jevů ve vlákně [2], [15].

Rozlišujeme několik základních typů nelineárních jevů:

- Stimulovaný rozptyl
- Brillouinův rozptyl SBS – Stimulated Brillouin Scattering
- Ramanův rozptyl SRS – Stimulated Raman Scattering
- Vlastní fázová modulace SPM – Self-Phase Modulation
- Křížová fázová modulace CPM,XPM – Cross-Phase Modulation
- Čtyřvlnné směšování FWM – Four Wave Mixing

1.3.1 Stimulovaný rozptyl

Stimulovaný rozptyl je nelineární fyzikální jev, při kterém dochází k rozptylu optického záření způsobeného srážkami s akusticky nebo tepelně kmitajícími atomy materiálu vlákna. Důsledkem tohoto rozptylu dochází k mírnému posunu vlnových délek optického záření směrem k vyšším hodnotám. Rozptyl optického záření se vždy vyskytuje v optických vláknech a není závislý na velikosti použitého výkonu optického záření. Stimulovaný rozptyl lze rozdělit na stimulovaný Brillouinův rozptyl a stimulovaný Ramanův rozptyl [2].

1.3.2 Brillouinův rozptyl

Vliv Brillouinova rozptylu je dominantní nelineární jev objevující se v optických vláknech. Brillouinův rozptyl je neelastický rozptyl na akustických vlnách materiálu, vzniká interakcí pole optického záření a akustického vlnění. Při dostatečně

velkém vstupním výkonu se optické záření rozptyluje na akustické vlně. Akustické vlnění je způsobeno přítomností tepelných fononů, vznikajících tepelným kmitáním krystalické mřížky materiálu jádra vlákna. Rozptýlená vlna je spektrálně posunuta o cca 10 GHz a šíří se ve zpětném směru, ubírá tak energii dopředně se šířícímu optickému záření [2].

Hodnota Brillouinova rozptylu udává množství energie, které nezpůsobí ztráty v optickém vlákně. Překročením této limitní hodnoty a také v závislosti na úhlu rozptylu je většina energie optického záření rozptýlena ve zpětném směru a odražena zpět do vysílače.

Brillouinův rozptyl má významný vliv především u optických signálů s úzkou šířkou spektrální čáry, typicky laserové diody. Lze jej účinně potlačit rozšířením spektra signálu, snížením koherentní délky signálu, omezením použití optických laserových zdrojů záření a optických zesilovačů [16].

1.3.3 Ramanův rozptyl

Příčinou vzniku Ramanova rozptylu je vzájemná interakce fotonů světla s vysokofrekvenčními kmitajícími molekulami křemenného skla optického vlákna. Šířící se foton o určité energii $E_1 = h \cdot f_1$ narazí na kmitající molekulu o určité frekvenci f_m, tato molekula absorbuje část energie fotonu. Z principu zachování energie vyplývá, že foton má nyní jinou frekvenci f_2, které odpovídá energie $E_2 = h \cdot f_2$. Rozptýlené fotony záření mají jinou frekvenci (vlnovou délku) než fotony záření dopadajícího, důsledkem je frekvenční posuv. Počet fotonů se nemění, fotony se pouze rozptylují z původního směru šíření a šíří se oběma směry, ztrácejí část své energie a zvětšují svoji vlnovou délku [17].

Limitní hodnota výkonu optického záření Ramanova jevu je závislá na použitém materiálu optického vlákna, na počtu, středním výkonu a vzájemném odstupu jednotlivých optických kanálů. Ramanův rozptyl takto omezuje vlastnosti vícekanálových WDM (Wavelength Division Multiplex) systémů, kde dochází k zeslabení energie kanálů na kratších vlnových délkách a zesílení kanálů na vyšších vlnových délkách. Tuto skutečnost lze ovšem prakticky využít v jednovidových telekomunikačních systémech, kde se stimulovaného Ramanova jevu efektivně využívá jako zesilujícího prvku na zesílení užitečného signálu, optické Ramanovské zesilovače [17].

1.3.4 Vlastní fázová modulace

V optických vláknech se při přenosech dostatečně velkého optického výkonu začne projevovat tzv. Kerrův optický jev, tedy že při průchodu optického záření vhodným prostředím dochází ke změně indexu lomu látky úměrné intenzitě procházejícího záření. Důsledkem tohoto jevu jsou právě nelineární jevy, např. nestabilita optického

svazku. Index lomu jádra vlákna se tak stává závislý na intenzitě záření šířícího se optickým vláknem. Jelikož nelze zajistit stabilní intenzitu optického záření, kolísání intenzity optického signálu mění index lomu prostředí, což má za následek modulaci okamžité fáze optické vlny šířící se vláknem. Tento jev se nazývá vlastní fázová modulace [2].

Růst a pokles výkonu na hranách optického impulsu způsobí změny jeho fáze šíření, s měnící se fází signálu se bude měnit i jeho okamžitá frekvence a objeví se tzv. frekvenční chirping, změna energie mezi náběžnou a sestupnou hranou. Projevuje se tím, že frekvence spektrálních složek optického impulsu na náběžné hraně se sníží (vlnová délka se zvýší) a na sestupné hraně impulsu se frekvence spektrálních složek zvýší. Náběžná hrana impulsu způsobí posun k vyšším vlnovým délkám, sestupná hrana naopak posun k nižším vlnovým délkám.

K vlivu těchto efektů se přidává vliv chromatické disperze. V materiálových oblastech s normální disperzí se optické signály s vyšší vlnovou délkou šíří vyšší rychlostí než signály na kratších vlnových délkách, což způsobí že se náběžná hrana impulsu bude šířit rychleji než sestupná hrana. Výsledný efekt na přenášený impuls je jeho rozšíření v časové oblasti.

V oblastech materiálu s anomální disperzí kladná hodnota chromatické disperze urychluje spektrální složky impulsu s nižší vlnovou délkou. Může nastat případ, kdy sestupná hrana signálu časově předstihne náběžnou hranu signálu. Což by mělo za následek vysokou modulační nestabilitu. Záporná hodnota chromatické disperze toto nezpůsobuje [17].

Vliv působení vlastní fázové modulace lze minimalizovat volbou hodnot výkonů, které nezpůsobují nelineární změnu indexu lomu.

1.3.5 Křížová fázová modulace

U vícekanálových optických systémů, systémů využívajících vlnový multiplex, dochází ke křížové fázové modulaci, kdy jeden optický signál vlnové délky fázově moduluje signál jiné vlnové délky. Narůst nebo pokles výkonu v jednom konkrétním kanálu zapříčiní změny indexu lomu vlákna, které ovlivní nejen tento, ale i ostatní společně se šířící kanály [13].

Podobně jako vlastní fázová modulace je křížová fázová modulace založena na principu Kerrova jevu. Křížová fázová modulace je vždy doprovázena vlastní fázovou modulací, ta nastává protože, index lomu v nelineárním vlákně závisí nejen na intenzitě konkrétního světelného paprsku, ale také na intenzitě ostatních společně se šířících paprsků [18].

Když se dvě nebo více optických polí, které mají různé vlnové délky, současně šíří vláknem, vzájemně se ovlivňují z důvodů nelinearit optického vlákna. Křížová

fázová modulace je závislá na vzájemné polarizaci kanálů, nelineárním koeficientu vlákna, rozestupu kanálů a disperzi vláken.

Vliv křížové fázové modulace je největší pro stejně polarizované kanály, naopak pro kanály polarizované ortogonálně je vliv nejmenší. Omezit její vliv lze snížením vysílacího výkonu za cenu kratšího dosahu signálu, zvětšením rozestupů mezi kanály a vlákny s vysokou hodnotu disperze. Přenášený opticky signál na výstupu vlákna vykazuje kolísání zpoždění a amplitudové kolísání [17], [18].

1.3.6 Čtyřvlnné směšování

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, při navázání limitně vysokého optického výkonu do optického vlákna, dochází ve vlákně k nelineárním jevům. Čtyřvlnné směšování je druhem nelineárního optického jevu, Kerrova jevu, při němž interakcí signálů dvou a více vlnových délek vznikají signály nových vlnových délek.

Čtyřvlnné směšování nastává při střetu tří dostatečně silných optických signálů o různých vlnových délkách, frekvencích f_i, f_j, f_k. Prostředí optického vlákna způsobí, že vznikne čtvrtá vlnová délka s frekvencí f_{ijk}, pro kterou platí:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \qquad (Hz) \tag{1.4}$$

kde $f_i \neq f_j \neq f_k$

Čtyřvlnné směšování se vyskytuje jen ve vlnových multiplexních systémech, kde způsobuje značné problémy. Nově vzniklé optické signály mohou interferovat s užitečnými signály a tím tak snižovat jejich kvalitu přenosu. Výsledný dopad čtyřvlnného směšování na DWDM přenosy je kriticky závislý na hodnotě disperze, odstupu přenášených kanálů a na vstupním výkonu navázaným do vlákna [18].

2 Multiplexní systémy

2.1 Techniky multiplexování

Optické přenosové systémy se potýkají se stále se zvyšujícími datovými toky a zvyšují se tak i nároky na počet přenášených kanálů. Bylo by tak obrovským plýtváním přenosové šířky pásma, kdyby byl přes optické vlákno přenášen jen jeden datový tok.

Multiplexní optoelektronické systémy umožňují způsob vícenásobného využití přenosového média. Multiplexování zvyšuje přenosovou kapacitu optického vedení bez nutnosti dalšího rozšiřování počtu optických vláken. Slučování více optických svazků do jedné přenosové cesty se provádí v multiplexeru, naopak vydělení jednotlivých optických svazků se provádí v demultiplexeru, princip je na obrázku 2.1.

Mezi nejzákladnější techniky multiplexování patří:

- Prostorový (vláknový) multiplex (SDM Space Division Multiplex)
- Časový multiplex (TDM Time Division Multiplex)
- Frekvenční multiplex (FDM Frequency Division Multiplex)
- Polarizační multiplex (PDM Polarization Division Multiplex)

V telekomunikacích využívajících pro přenos optická vlákna se frekvenční multiplex FDM označuje jako vlnový multiplex WDM [2].

Obr. 2.1: Princip multiplexování

2.1.1 WDM

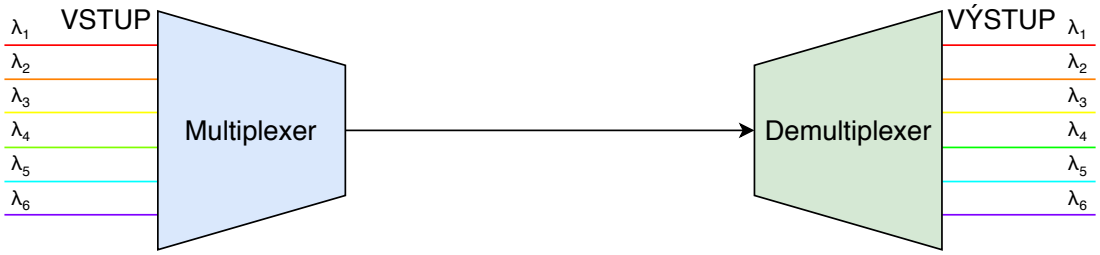
Vlnový multiplex je technologie umožňující optickým přenosovým systémům sdružovat více optických signálů (kanálů) o různých nosných vlnových délkách do jednoho optického vlákna.

Podle doporučení ITU-T je schváleno několik standardů, podle kterých lze rozdělit pásmo použitelných vlnových délek s ohledem na šířku jednotlivých kanálů. Každému kanálu je tak přiřazena určitá vlnová délka a určitá šířka spektra.

Nosné vlny optických signálů odpovídající jednotlivým kanálům lze rozmístit rovnoměrně v celém pásmu propustnosti optického vlákna s ohledem na jeho minima útlumu a disperze a také na dostupnosti zdrojů optického záření příslušné vlnové délky. Při použití kvalitních zdrojů záření lze vytvářet kanály v užším rozsahu spektra. Pro tyto účely se používají výhradně laserové diody, které mají až 1000× užší vyzařovací spektrum než luminiscenční diody [2].

Multiplexování kanálů s velmi blízkými vlnovými délkami je potřeba ošetřit dostatečným odstupem mezi blízkými vlnovými délkami. Jednotlivé kanály jsou od sebe frekvenčně odděleny. V závislosti na rozložení hustoty jednotlivých kanálů použitých v jednom optickém vlákně se rozděluje multiplex na:

- WWDM (Wide Wavelength Division Multiplex) široký vlnový multiplex
- CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) hrubý vlnový multiplex
- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) hustý vlnový multiplex



Obr. 2.2: Princip WDM multiplexu

2.1.2 WWDM

Technologie širokého vlnového multiplexu vetšinou využívá čtyři vlnové délky, v oblasti 850 nm pro vícevidová optická vlákna nebo v oblasti vlnových délek 1300 a 1310 nm pro optická vlákna jednovidová nebo vícevidová.

Pro široký vlnový multiplex je typický odstup vlnových délek minimálně 25 nm, takovýto rozestup jednotlivých kanálů umožňuje využití relativně méně kvalitních zdrojů optického záření.

Využití širokého vlnového multiplexu je především pro slučování komunikačních kanálů, umožňuje také použití optických zesilovačů a stávajících optických aktivních i pasivních prvků. Technologie je často využíváno pro přenos gigabitového a 10gigabitového ethernetu, je také často nasazována u optických tras přístupových sítí „poslední míle“, kde dokáže efektivně a levně znásobit přenosovou kapacitu stávajících optických vláken [2].

2.1.3 CWDM

Vlnový multiplex s hrubým („řidkým“) dělením kanálů, využívá větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály, než je tomu u klasické technologie DWDM. Standardizační komise vydala doporučení ITU-T G.694.2 podle kterého definuje osmnáct vlnových délek (1271–1611 nm) s velikostí odstupu jednotlivých vlnových délek přenosových kanálů 20 nm a s přípustnou tolerancí ± 6–7 nm. Toto doporučení umožňuje maximalizovat počet přenosových kanálů a použít pro technologii CWDM jako zdroje záření laserové diody bez potřeby jejich chlazení.

Využívat všechny vlnové délky technologie CWDM je možné jen s optickými vlákny typu „Metro“, což odpovídá optickým vláknům podle standardu ITU-T G.652.C (více v kapitole 1.1.3). Optická vlákna standardu G.652.C jsou vyrobena bez lokálního navýšení útlumu v oblasti vlnových délek 1360–1450 nm. Pokud je technologie CWDM nasazována na již stávající optické trasy, kde je většinou k dispozici jen standardní jednovidové optické vlákno základního standardu G.652, je k dispozici jen dvanáct přenosových kanálů, právě mimo oblast vlnových délek 1360–1450 nm.

Uplatnění technologie CWDM je především v metropolitních optických sítích, kde přináší hlavně ekonomické výhody v lepší využitelnosti stávající infrastruktury. Další výhodou je právě možnost použít levnější a tím méně kvalitní nechlazené zdroje optického záření. Nejčastější využití CWDM nachází v dvoubodových spojích nebo v kruhových topologiích. V přístupových sítích pak zvládá přenášet gigabitový ethernet až do vzdáleností 80 km [2], [19].

2.1.4 DWDM

Technologie hustého vlnového multiplexu je jedna z nejdokonalejších používaných v optických a optoelektronických přenosových systémech. Technologie byla vyvinuta za účelem zvýšení přenosové kapacity stávajících optických tras, překlenutí větších vzdáleností a co nejhustšího rozestupu vlnových délek. Umožňuje minimální odstupy mezi jednotlivými přenosovými kanály a dokáže tak do jednoho optického vlákna navázat desítky vlnových délek. Přenosové kanály jsou optickým vláknem přenášeny paralelně a nezávisle na sobě, což několikanásobně zvyšuje přenosovou kapacitu optické trasy.

Aby bylo možné technologii DWDM plnohodnotně využívat je potřeba používat vysoce kvalitní optické komponenty v celé optické trase. Klíčové jsou především jednovidové úzkopásmové laserové zdroje záření u kterých je vyžadovaná co nejužší spektrální vyzařovací charakteristika. Těmto požadavkům nejlépe odpovídají chlazené lasery typu DFB (Distributed FeedBack) s extrémně úzkou spektrální čárou.

Dalšími klíčovými komponenty jsou erbiem dopované vláknové zesilovače EDFA, multiplexní, demultiplexní jednotky a vysoce selektivní spektrální filtry [2].

Hlavní nevýhodou těchto optických komponent je vysoká citlivost na kmitočtovou a teplotní stabilitu, což je jedním z důvodů, proč je tato jinak velice efektivní technologie spojena s vysokými finančními náklady na pořízení jednotlivých komponent, vybudování či nasazení do stávající optické trasy.

Podle doporučení ITU-T G.694.1 jsou specifikovány jednotlivé přenosové kanály v oblasti vlnových délek od 1490 nm (200,95 THz) do 1620 nm (186,00 THz). Doporučení G.694.1 dále stanovuje normalizovaný referenční kmitočet 193,1 THz, od kterého se odvozuje spektrum kmitočtů s rozestupy jednotlivých kanálů v rozsahu 100 GHz (odstup 0,8 nm), 50 GHz (0,4 nm), 25 GHz (0,2 nm) a 12,5 GHz (0,1 nm). Kmitočty ostatních přenosových kanálů pro rozestup 50 GHz lze vypočítat podle vztahu 2.1 a pro rozestup 100 GHz dle vzathu 2.2 [15], [20].

$$f_n = 193,1 + n \cdot 0,05 \qquad (THz) \tag{2.1}$$

$$f_n = 193,1 + n \cdot 0,1 \qquad (THz) \tag{2.2}$$

kde:

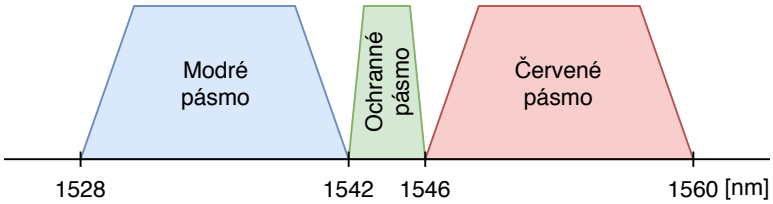
f_n	je označení pro kmitočet kanálu
n	je libovolné kladné nebo záporné celé číslo, včetně nuly

Pro správnou funkci a kvalitu přenosu je nutné zajistit, aby nedocházelo k odchylování nosné vlnové délky kanálu od definované vlnové délky o více než 0,2 odstupu nosných vlnových délek. To odpovídá toleranci ± 0,16 nm pro 100 GHz rozestupy.

Hustý vlnový multiplex umožňuje přenést až 96 (teoreticky i více) datových kanálů po jednom optickém vlákně. V každém kanálu je možné přenášet data až 40gigabitovou rychlostí, což dává celkovou kapacitu systému převyšující tři terabity na vlákno. Dosah takovýchto multiplexních systémů běžně dosahuje 200 km bez potřeby použití zesilovače. Experimentálně lze přenášet několikanásobně vyšší datové toky na vzdálenosti stovek kilometrů. Pro překlenutí větších vzdáleností je pak potřeba desítky kanálů zesílit nejlépe erbiem dotovanými vláknovými zesilovači. Při využití těchto zesilovačů je možné dosáhnout vzdálenosti přesahující 2000 km bez potřeby obnovení signálu na vyšší vrstvě [18].

Nasazení technologie hustého vlnového multiplexu se také využívá pro obousměrný provoz po jednom optickém vlákně. V takovémto případě je potřeba řešit, jakým způsobem oddělit přijímaný a vysílaný signál, neboť by mohlo docházet k vzájemným přeslechům mezi kanály, zkreslením a dalším nepříznivým vlivů ovlivňujícím přenos. Přenosové pásmo je rozděleno na dvě subpásma (modré a červené), každé

pro jeden směr přenosu. Mezi těmito subpásmy je nutné zavést ochranné pásmo (typická šířka 4 nm), které izoluje a zabraňuje rušení mezi jednotlivými kanály. Počet použitelných přenosových kanálů duplexního DWDM systému klesne na polovinu počtu použitých vlnových délek [15].



Obr. 2.3: Princip duplexního DWDM systému

Pro provoz duplexních DWDM systémů je jedním z nejjednodušších způsobů využití optických cirkulátorů, které umí rozdělit obousměrný signál z jednoho vlákna do dvou vláken. Optický cirkulátor je vlnově nezávislý, ovšem jeho využití společně s EDFA zesilovači přináší zhoršení optického šumu v trase vlivem zpětného rozptylu světelného signálu, což znemožňuje jeho použití pro delší vzdálenosti s více zesilovači.

Při nasazování optických zesilovačů výkonů do optické trasy je nutné dbát na to, aby bylo možné výkony jednotlivých kanálů sjednotit. Výkonové zesilovače jsou velmi často součástí jak multiplexeru, kde se starají o jednotnou kanálovou výkonovou úroveň, tak i demultiplexeru, kde jsou především pro zesílení a vyrovnání výkonových úrovní jednotlivých kanálů, tak, aby se proces demultiplexace maximálně usnadnil.

Pro multiplexní systémy, využívající pro přenos desítek přenosových kanálů, je velmi nepříjemným průvodním jevem čtyřvlnné směšování FWM, popsané v kapitole 1.3.6. Čtyřvlnné směšování je zásadním omezujícím faktorem právě pro hustý vlnový multiplex, kde je velmi pravděpodobné, že dojde k ovlivnění tří a více vlnových délek (kanálů) a může tak vzniknout čtvrtá ovlivňující vlnová délka podle vztahu 1.4.

Hustý vlnový multiplex je technologii první vrstvy a je tedy nezávislý na přenášeném protokolu. Je možné přenášet protokoly různých aplikací s různou rychlostí přenosu a multiplexovat je společně do jednoho optického vlákna [2].

2.1.5 PDM

Polarizační multiplex vytváří multiplexní systém na základě dvojí polarizace světelného paprsku šířícího se optickým vláknem. Polarizační multiplex využívá dvou ortogonálních polarizačních rovin laserového paprsku, s použitím digitální modulace, např. QPSK pro každou polarizační rovinu, více v kapitole 3.2.

Hlavní princip polarizačního multiplexu spočívá v rozdělení světelného signálu na dvě složky ve dvou polarizačních rovinách, kde každá z nich přenáší data nezávislá

na datech v rovině druhé. Rozdělení světelného signálu probíhá v děliči světelného signálu, který je označován jako splitter, kdy se z jednoho zdroje rozděluje více signálů, nebo jako coupler, který spojuje více signálů do jednoho.

Polarizační multiplex PDM, někdy označován jako duální polarizační multiplex, je modulační formát navržený především pro vysokorychlostní systémy s rychlostí 100 Gbit/s na kanál. Využívaný je především v koherentních systémech v kombinaci s koherentní detekcí, kde umožňuje zdvojnásobit spektrální efektivitu optického přenosu [21].

Nevýhodou nasazovaní systémů polarizačního multiplexu jsou vysoké požadavky na hodnoty polarizační vidové disperze PMD (skupinové zpoždění DGD). Problém této technologie představují především změny ve skupinovém zpoždění jednotlivých vidů polarizace při průchodu signálu optickou trasou a výsledná polarizace optického signálu. Vzájemné posunutí polarizačních rovin, viz obrázek 1.3, je praktickým problémem při nasazovaní polarizačního multiplexu v rozsáhlých vysokorychlostních optických přenosových systémech. Vznik skupinového zpoždění jednotlivých polarizačních rovin je způsoben odlišnými fyzikálními a geometrickými vlastnostmi optického vlákna a podmínkami podél vlákna.

Technologie polarizačního multiplexu je velice perspektivní technologii, kterou lze zvýšit přenosovou kapacitu již položených optických vláken na dvojnásobek. Technologie je využívána pro přenos více fotonických služeb jedním optickým vláknem. Jelikož je polarizační multiplex velmi citlivý na vliv polarizační vidové disperze, realizace takovýchto systémů může být velmi nákladná. Především je důležité volit vysoce koherentní optoelektronické prvky schopné zpracovávat polarizačně multiplexovaný signál na straně vysílací i přijímací [22].

3 Modulační formáty v datových sítích

Při návrhu optických komunikačních systémů je důležitým krokem rozhodnutí, jak by měl být elektrický bitový datový tok převeden na optický bitový tok. Pro převedení elektrického signálu na signál optický se používají elektro-optické modulátory.

3.1 OOK (On-Off Keying)

Nejjednodušší používaná technika využívá optické impulsy tak, že pokud je elektrický signál vysílán v určitém časovém okně (slotu), odpovídá to logické hodnotě „1“, pokud není elektrický signál vysílán, odpovídá to hodnotě logická „0“. Na základě logického stavu „1“ nebo „0“ je optický signál zapnutý nebo vypnutý. Tato technika je speciálním druhem amplitudové digitální modulace a nazývá se modulace OOK.

Modulaci OOK lze rozlišit na dva základní formáty, RZ (Return-to-Zero) a NRZ (Non-Return-to-Zero). Nejjednodušším modulačním formátem je NRZ. Optický impuls formátu NRZ se generuje během celé doby trvání jednoho bitu. Ve formátu RZ je doba každého optického impulsu kratší než doba bitového slotu, poloviční oproti formátu NRZ, amplituda optického impulsu se vrací k nulové hodnotě dříve, než skončí doba trvání bitu.

Výhodou NRZ formátu je relativně malá šířka pásma pro vysílač i přijímač, což umožňuje jednoduchou konstrukci vysílače a přijímače. Optické impulsy mají úzké optické spektrum, tato zredukovaná spektrální šířka zlepšuje odolnost vůči disperzi. Úzké optické spektrum NRZ impulsu je také výhodné pro lepší realizaci WDM a DWDM systémů [23].

Zredukovaná spektrální šířka přináší i nevýhody, má za následek nárůst intersymbolové interference mezi jednotlivými impulsy. Dlouhé sekvence stejných bitových hodnot navíc mohou způsobit ztrátu synchronizace signálu. Formát NRZ není příliš vhodný pro vysokorychlostní a dálkové přenosové systémy.

Formát RZ je typický tím, že se amplituda optického pulsu vrací do neutrální hodnoty (nulové napětí) v polovině doby trvání bitu. Těchto návratů k neutrální hodnotě se využívá pro signalizaci a synchronizaci signálu. Formát RZ dále umožňuje zvýšení odolnosti vůči nelineárním jevům, potlačení vlivu intersymbolové interference, potlačení účinků polarizační vidové disperze a zvýšení citlivosti přijímače.

Nevýhodou je větší spektrální šířka formátu RZ oproti formátu NRZ. Velká spektrální šířka snižuje odolnost vůči disperzi a zároveň tak klesá spektrální účinnost WDM a DWDM systémů využívajících RZ formát. Modulační formát RZ je používaný pro dálkové vysokorychlostní optické přenosové systémy.

Formát NRZ byl používán především z důvodu ohledu na šířku pásma přenosových komunikačních systémů. Šířka pásma optických komunikačních systémů je nyní dostatečně velká pro použití formátu RZ bez větších problémů [24].

3.2 DP-QPSK (Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying)

Trendem současné doby je použití multiplexace na úrovni vytváření symbolů z datových toků. Multiplexací tedy není myšleno násobení přenosové rychlosti použitím více vlnových délek, ale násobení symbolové rychlosti využitím polarizačního multiplexu. Modulační (symbolová) rychlost udává počet signálových prvků (symbolů) přenesených za sekundu.

Kvadraturní klíčování fázovým posuvem s dvojí polarizací DP-QPSK je technika digitální modulace používaná v optických vláknech. Využívá dvou ortogonálních polarizačních rovin laserového paprsku, s použitím QPSK modulace pro každou polarizační rovinu [21].

QPSK modulace dokáže přenést dvojici bitů dat (dibit) na signálový prvek, symbol, DP-QPSK tuto hodnotu zdvojnásobuje a dokáže tak přenést čtyři bity dat na jeden symbol. DP-QPSK používá přepínání polarizace dvou různých QPSK signálů, čímž se dvojnásobně zlepšuje spektrální účinnost.

DP-QPSK je modulace využívaná především v systémech polarizačního multiplexu, používá se také u DWDM sítí s přenosy nad 100 Gb/s v kombinaci s koherentní detekcí a samoopravnými kódy [25].

4 Zdroje a detektory optického záření

Jednou z klíčových částí celého optického přenosového systému je zdroj optického záření na vysílací straně vlákna a detektor optického záření na straně přijímací. Důležitým požadavkem je vzájemná kompatibilita parametrů zdrojů a detektorů optického záření s vlastnostmi přenosových prostředí, optických vláken.

4.1 Zdroje optického záření

Hlavním úkolem optického zdroje záření je převod elektrické energie na energii světelnou, optické záření. Zdroj optického záření může provádět požadovanou modulaci optického signálu, nebo je původním signálem modulován až v modulátoru záření. Nejčastěji se jedná o optoelektronický prvek nebo obvod.

V současnosti, vysokorychlostní optické přenosy kladou vysoké požadavky na konstrukci a vlastnosti zdrojů optického záření. Pozornost je kladena především na požadavky: účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, konstantní výkon, snadná modulovatelnost v širokém rozsahu frekvencí, vysoká monochromatičnost (koherence generovaného záření), úzká vyzařovací směrová charakteristika, snadnost navázání generovaného záření do optického vlákna, vysoká spolehlivost a životnost, nízká cena, malé rozměry a váha [2]. Tyto požadavky splňují především kvalitní polovodičové laserové diody LD (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation Diode), které mají úzkou spektrální čáru, na rozdíl od luminiscenčních diod LED (Light Emitting Diode) i vyšší vyzařovací výkon a vysokou účinnost vazby na optické vlákno.

4.1.1 Laserové diody

Laserové diody jsou zdrojem vysoce koherentního elektromagnetického záření ve viditelné, ultrafialové nebo infračervené oblasti elektromagnetického spektra. Laserové diody generují optické záření stimulovanou emisí, kdy jeden elektron budí druhý a vzniká tak řetězová reakce, kterou se emitovaná energie násobí.

Takto vyzářené světlo má určité vlastnosti, mezi které patří právě vysoká koherence, vysoká monochromatičnost a úzká spektrální čára [2].

Laserové diody fungují při nízkých proudech v propustném směru podobně jako hranově emitující luminiscenční diody. Po dosažení prahového proudu se výkon stimulovaného záření prudce zvýší a laserová dioda přechází z režimu nekoherentního záření do režimu stimulované emise a začíná emitovat koherentní záření. Po překročení prahového proudu je závislost vyzařovaného výkonu na velikosti proudu lineární.

Polovodičové laserové diody jsou velmi citlivé na teplotu. S rostoucí teplotou roste i prahový proud a klesá tak výstupní výkon.

Vyzařovací spektrum laserových diod je velmi úzké (desetiny až jednotky nm), jsou tak vhodné pro přenos signálu optickým vláknem na velké vzdálenosti, nebo v multiplexních systémech, kde je šířka vyzařovaného spektra důležitým parametrem. Jsou to jediné zdroje optického záření použitelné v polarizačním multiplexu. Spektrum laserových diod je závislé na teplotě, spektrum se s rostoucí teplotou posouvá k vyšším hodnotám vlnových délek [4].

4.1.2 VCSEL

Polovodičová laserová dioda typu VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) emituje světlo kolmo k aktivnímu povrchu laseru. Emitovaná světlo je ve formě kruhového svazku, který může být navázán do jednovidového optického vlákna s vysokou účinností.

Výroba VCSEL není příliš složitá, lze relativně snadno vytvářet čipy s velkým množstvím VCSEL blízko sebe. Jelikož vyzařují z horní části čipu, je možné je testovat během výrobního procesu, což snižuje náklady na výrobu.

Dříve navržené VCSEL pracovaly na vlnové délce 800 nm, dnešní technologie umožňuje VCSEL pracovat v širším rozsahu vlnových délek od 650 do 1600 nm.

Nevýhodou VCSEL je, že kvůli malým rozměrům aktivní oblasti mohou vyzařovat výkon jen v řádech několika miliwattů.

Využívají se většinou jako zdroje optického záření pro lokální a metropolitní optické sítě, kde nahrazují LED diody. Jsou také vhodné pro systémy vlnových multiplexů, lze je jednoduše doladit na požadovanou vlnovou délku. Dále je možné vytvořit dvojrozměrné pole VCSEL tak, že každý laser pracuje na jiné vlnové délce. Takovéto zdroje obsahující více integrovaných laserů jsou v moderních WDM optických sítích vyžadovány. Účinnost takovýchto zdrojů může být až 80 %.

Vlastnosti VCSEL vedou k rychlému nasazování této technologie v řadě aplikací jako jsou různé laserové produkty, počítačové myši, laserové tiskárny, metoda rozpoznání obličeje nebo inteligentní skla automobilů, brýlí, mobilních telefonů [26].

4.1.3 DFB

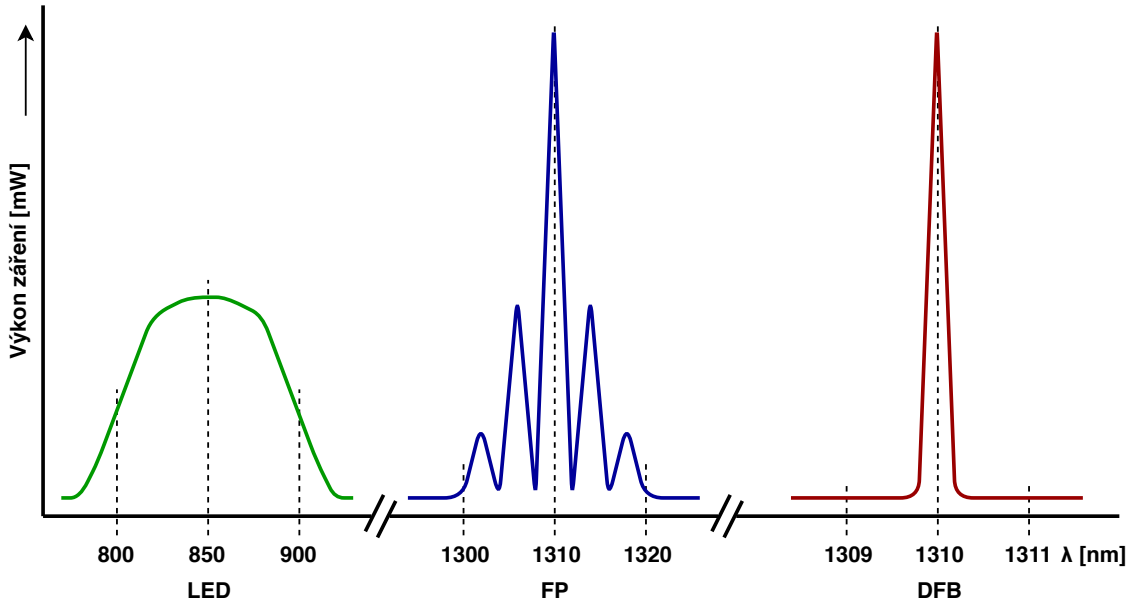
Polovodičové laserové diody s rozprostřenou zpětnou vazbou DFB (Distributed FeedBack) jsou tvořeny rezonátorem bez dvojice zrcadel (jak je tomu u většiny standardních laserových diod), ale pomocí prostorových periodických struktur (Braggovských difrakčních mřížek v blízkosti PN přechodu). Jejich funkce je založena na

periodické změně indexu lomu ve směru šíření. Zpětná vazba je realizována Braggovským rozptylem, který zajistí, že šířící se elektromagnetické vlny optickým rezonátorem jsou trvale navázány do opačného směru. Vyzařovaná vlnová délka je určena mřížkovou konstantou.

Polovodičové lasery DFB jsou hranově emitující a dokáží emitovat optické záření v rozsahu vlnových délek 800–2800 nm. Mají velice úzkou spektrální čáru s eliminací postranních laloků, laditelnost laseru je možná s přesností několika nanometrů. Výstupní výkony jsou však jen několik desítek miliwattů.

Hranově vyzařující laserové diody je možné otestovat, na rozdíl od plošně vyzařujících laserových diod, až když je proces výroby dokončen. Pokud tedy dojde k nějakému výrobnímu problému s jednotlivými kontakty mezi vrstvami, nefunkčnost součástky se zjistí, až je laserová dioda vyrobena. Tím dochází ke ztrátě času zbytečným zpracováním součástky, která už je znehodnocena.

DFB lasery patří mezi nejkvalitnější druh laserových zdrojů optického záření. Tepelně stabilizované DFB lasery je možné využít jako zdroje optického záření pro multiplexní systémy DWDM, kde vykazují vysokou stabilitu [26].



Obr. 4.1: Spektrální charakteristiky zdrojů optického záření

Na obrázku 4.1 jsou vidět spektrální charakteristiky výše zmíněných zdrojů optického záření. LED zdroje optického záření dosahují šířky spektra až 100 nm, laserové diody typu FP (Fabry-Perot) dosahují šířky spektrální čáry okolo 3 nm a DFB diody s velmi úzkou spektrální čárou dosahují šířky spektrální čáry užší než 1 nm.

4.2 Detektory optického záření

Úlohou optického přijímače je detekce a následná demodulace optického signálu. Detektory optického záření detekují optický signál, přemění ho na signál elektrický a obnoví tak data přenášená prostřednictvím optického záření. Elektrický signál je pak vhodný pro další zpracování.

Detektory optického záření se používají pro detekci záření, které dopadá na jejich povrch. Dopadající záření na povrch detektoru je absorbováno ve formě fotonů a následně transformováno na elektrický proud. Tak se z původního optického signálu stane signál elektrický. Kvalita jednotlivých typů detektorů optického záření je posuzována právě podle účinnosti tohoto převodu.

Hlavním prvkem detektoru optického záření je fotodetektor (fotodioda), který transformuje světelnou energii na energii elektrickou na základe vnějšího nebo vnitřního fotoelektrického jevu. Základním mechanismem procesu fotodetekce je optická absorpce, kdy v závislosti na velikosti energie dopadajících fotonů vzrůstá elektrická vodivost. Foton dopadající na plochu fotodetektoru je absorbován polovodičovým přechodem, což vede ke generování volného elektronu z valenčního do vodivostního pásu a současně je generována díra ve valenčním pásu. Dochází tak ke generování volného páru, elektron a díra. Přiložením elektrického pole do obvodu detektoru začne tímto obvodem protékat elektrický proud, úměrný velikosti dopadající energie.

Požadavky na detektory optického záření jsou podobné jako pro zdroje optického záření, musí splňovat určité požadavky z hlediska svých parametrů a vzájemné kompatibility s ostatními prvky podílejících se na optickém přenosu. Největší důraz je kladen na účinnost převodu záření, vysokou citlivost v pásmu vlnových délek optických zdrojů záření, krátkou dobu odezvy, dostatečnou šířku přenášeného kmitočtového pásma, malý vlastní šum, stabilitu při změně teploty a napájecího napětí, minimální rozměry vhodné pro připojení přímo na vlákno, nízkou cena a vysokou spolehlivost [5], [26].

Pro telekomunikační účely v optických sítích se využívají výhradně polovodičové detektory, především fotodiody typu PIN a lavinové fotodiody APD (Avalange-Photoiode).

4.2.1 Fotodioda PIN

Fotodioda PIN je tvořena přechodem PN s velkou vodivostí, který je oddělen slabě dotovanou vrstvou I, nedotovaný polovodič. Střední vrstva I má mnohonásobně větší měrný odpor než dotované vrstvy P a N.

V ochuzené oblasti je rovnoměrně rozložené silné elektrické pole, které zvětšuje kvantovou a spektrální účinnost a je tak možné zvýšit napětí na přechodu PN.

Zvýšení napětí výrazně zvyšuje rychlost elektronů a děr vzniklých fotoelektrickým jevem. Rozšíření ochuzené zvětšuje plochu, která slouží k zachycení dopadajícího záření. Rozšíření dále redukuje kapacitu přechodu a tím i časovou konstantu, díky tomu jsou fotodiody PIN velmi rychlé.

Fotodiody PIN dokáží detekovat i velmi malé hodnoty výkonu signálu, jsou tak vhodné pro optické komunikační systémy na kratší vzdálenosti a lokální sítě.

PIN diody se aplikují do optických systémů, kde je potřebná rychlá reakce. Díky rychlé odezvě a vysoké citlivosti dokáží detekovat široké spektrum signálů. Jsou tak v praxi velmi rozšířené a využívané pro WDM a DWDM systémy. Účinnost PIN diod se pohybuje mezi 60–80 % [26].

4.2.2 Lavinová fotodioda

Lavinové fotodiody APD jsou velmi citlivé polovodičové detektory záření, založené na principu lavinového efektu. Fotony záření dopadají na PN přechod, kde dopadají na páry elektron-díra a rozdělí je. Přiložené vysoké napětí ve zpětném směru vytváří silné elektrické pole, kterým jsou elektrony urychlovány a získají tak dostatečnou energii k excitaci nových nosičů. Proces, kdy vzniklé páry opět narážejí a vytváří další páry se nazývá nárazová ionizace. Tento proces se stále opakuje a může tak dojít k rozdělení několika stovek párů, vzniká tak lavinový efekt v nárůstu počtu nosičů náboje.

Multiplikace (násobení) nosičů náboje je náhodný jev, při kterém současně vzniká přídavný šum. Lavinový efekt je vyjádřen multiplikačním činitelem, který udává průměrný počet rozdělených párů elektron-díra, po dopadu jednoho fotonu. Velikost multiplikačního činitele je závislá na přiloženém napětí, velikosti elektrického pole a teplotě. Hodnota multiplikačního činitele se pohybuje v mezích několika desítek až několika set. Pro zachování stálé hodnoty multiplikačního činitele je potřeba používat kvalitních stabilizačních obvodů [2].

Výhodou lavinových fotodiod APD je velmi vysoká citlivost v porovnání s PIN diodami. Lavinový efekt umožňuje vybudit dostatečný proud i pro slabý optický signál, který lze snadno zpracovat elektronickými obvody následujícími za fotodiodou, detektorem. Lavinové fotodiody jsou vhodné pro detekci širokopásmových optických signálů, využívají se u dálkových přenosových optických systémů a pro optická měření vzdáleností.

Nevýhodou lavinových fotodiod může být komplikovanější a nákladnější výrobní proces, vznik a větší úroveň šumu zapříčiněná multiplikací počtu nosičů náboje, nutnost vysokého předpětí 200–500 V [5].

5 Přehled fotonických služeb

Dlouhou dobu byla optická vlákna využívána hlavně na vysokorychlostní přenos dat na velké vzdálenosti. V současné době je trendem optimálně využít kapacity již položených optických vláken, tím i snížit náklady. Optimálně využít jedno vlákno dokáže technologie WDM, která je navržena pro přenos dat pomocí desítek nebo stovek vlnových délek. Přenos dat ovšem není jedinou aplikací využívající optické sítě. Aplikace jako je přenos přesného času, stabilní frekvence nebo senzorické signály jsou stále častěji přenášeny paralelně s datovými signály.

Fotonické služby zahrnují soubor pokročilých služeb využívajících pro svůj přenos optické sítě, které umožňují čistě optický přenos bez převodu optického signálu na elektrický. Klasické optické sítě obsahují množství elektronických prvků převádějících optický signál na elektrický signál a zpět na optický signál (OEO Optical-Electrical-Optical). Převod OEO vnáší do přenosového optického systému zpoždění, které je navíc časově náhodně proměnlivé (jitter). To znemožňuje využití takovýchto systémů pro některé náročnější aplikace, závislé na kolísání zpoždění [1].

Nároky fotonickcých služeb umožňují budovat optické sítě, které značně převyšují možnosti poskytované běžným Internetem. Nasazení fotonických služeb umožní optické síti přenášet celou řadu nových aplikací. Optická síť, budována se záměrem na poskytování fotonických služeb, musí zajistit čistě optický přenos, vyhrazenou přenosovou kapacitu, nízké a garantované zpoždění a jeho rozptyl, vyšší bezpečnost, vyšší spolehlivost (minimum OEO). Takto budované optické sítě jsou vhodné pro náročnější aplikace vyžadující vysokou reprodukovatelnost, umožňující komunikaci v reálném čase, včetně procesů s náročnými požadavky na dobu odezvy sítě.

Přesný čas a stabilní frekvence jsou speciální aplikace, vhodné pro přenos přes optické sítě. Přenos těchto aplikací je zkoumán pro zlepšení parametrů přenosového systému, jako je celkový dosah, přesnost a stabilita.

Fotonické přenosy přesného času a velmi stabilní optické frekvence jsou sdíleny s datovými přenosy. Preferován je především obousměrný provoz jedním vláknem paralelně s 10, 100 a 300 Gbit/s daty ve vyhrazeném pásmu [1].

5.1 Datový signál

Přenos datových signálů je jedním z nejčastějších přenosů v telekomunikačních sítích. S nástupem nových internetových služeb a převodem stávajících služeb telefonie a digitální televize na internetový protokol, rostou požadavky především na šířku přenosového pásma. Stávající měděné rozvody již dosáhly svých limitů, maximální dosažitelné vzdálenosti, maximální přenosové rychlosti i maximální šířky přenoso-

vého pásma. Nejlepší vhodnou volbou pro budování telekomunikačních sítí s dostatečně velkou šířkou přenosového pásma pro datové provozy jsou optická vlákna.

Technologie, které umožňují přenášet data v telekomunikačních optických sítích s vysokou přenosovou rychlostí, se v dnešní době stávají nezbytné, jak v oblasti páteřních sítí tak i v přístupových sítích. Pro plné využití přenosové kapacity optických sítí může být přenos datových signálů realizován pomocí techniky multiplexování, např. vlnovým multiplexem WDM.

Vlastnosti optických přenosových systémů mohou být ovlivněny nelineárními jevy a disperzemi. Vlastnosti a parametry přenosových systémů je potřeba kontrolovat, měřit a v případě nutnosti provést kompenzaci. Velký vliv na přenášená data má i volba modulačního formátu kterým jsou přenášená data modulována. Zvolený modulační formát má především vliv na maximální dosažitelnou vzdálenost signálu a přenosovou rychlost.

Mezi základní modulační formáty využívané pro přenos datových signálu po optickém vlákně patří OOK modulace NRZ a RZ, které byly popsány v kapitole Modulační formáty v datových sítích 3.1.

5.2 Přesný čas

Čas je základní a velice důležitá fyzikální veličina. Udává vzdálenost mezi dvěma událostmi v časoprostoru, je tak velmi podstatnou složkou struktury vesmíru. Čas jako takový je velmi obtížné, až nemožné si představit, lze jej ovšem měřit. Dříve se k měření času využívala poloha Slunce či Měsíce vůči Zemi. Dnes se nejpřesnější čas udává pomocí atomových hodin.

Základní jednotkou času je v celosvětově používané soustavě jednotek SI sekunda. Přesná definice jednotky času je velice významná v oblasti vědy a techniky. Pro snadnou realizaci a reprodukovatelnost byla přijata definice sekundy vztažená k přesné hodnotě určené vlastnostmi atomu cesia, která je přirozeně neměnná.

Sekunda, symbol s, je jednotkou času. Její velikost je určena stanovením číselné hodnoty frekvence hyper-jemného rozštěpení základního stavu atomu Cesia 133 v klidu a při teplotě 0 K, aby se rovnala přesně 9 192 631 770, je-li vyjádřena v jednotce soustavy SI s^{-1}, což je rovno Hz [27].

Mezinárodní atomový čas TAI (Temps Atomique International) je definován pomocí atomové sekundy, několika nejpřesnějšími atomovými hodinami po světě. Je tak nezávislý na poloze a rotaci Země.

Koordinovaný světový čas UTC (Coordinated Universal Time), který využíváme v běžném životě, je odvozen od TAI vkládáním přestupných sekund. Časová stupnice UTC je spravována Mezinárodním úřadem pro váhy a míry ve spolupráci s Mezinárodní službou pro rotaci Země. Vytváří základy pro koordinovanou distribuci eta-

lonových frekvencí a časových signálů. Frekvence UTC je shodná s frekvencí TAI, liší se ale celistvým počtem sekund. Časová stupnice UTC se upravuje vkládáním či odebíráním sekund, kladných nebo záporných přestupných sekund, k zajištění přibližné shody [27].

V České republice se o distribuci přesného času stará sdružení CESNET, provozující fotonickou službu porovnávající národní časové standardy mezi Ústavem fotoniky a elektroniky Akademie věd České republiky v Praze a Spolkovým ústavem pro metrologii a měřičství ve Vídni. Tato služba poskytuje přesný čas ve stupnici UTC a slouží k synchronizaci hodin jiných počítačů a zařízení. Odchylky atomových hodin v obou ústavech jsou porovnávány pomocí přesných světelných pulsů přenášených po optických vláknech. Pro smysluplné porovnávání, je nutné zajistit extrémně přesné, deterministické a dlouhodobě stabilní chovaní celé přenosové optické trasy. Jelikož i malé kolísání zpoždění, jitter, které je běžné v paketové síti Internetu, má při těchto přenosech fatální důsledky [1].

5.3 Stabilní frekvence

Frekvence je fyzikální veličina, která udává určitý počet opakování periodického děje za daný časový interval. V mnoha aplikacích je význam této veličiny významnější, než význam času. Jelikož je možné pomocí frekvence získat základní jednotku času. Distribuce a reprodukovatelnost stabilní frekvence je ovšem ovšem ovlivněna větším množstvím vnějších vlivů, než je tomu při distribuci přesného času a je tak potřeba tyto vlivy kompenzovat.

Stabilní frekvence je charakteristická vlastnost oscilátoru, která určuje, jak dobře dokáže produkovat stejnou frekvenci v daném časovém intervalu. Stabilita neznamená, zda je frekvence správná nebo špatná, ale pouze zda zůstane stejná.

Fotonické sítě dovolují přenášet službu vysoce stabilní optické frekvence, především díky vysoce stabilním koherentním laserovým zdrojům optického záření. Využívají se tzv. normály optické frekvence, což jsou lasery s vysoce stabilní vlnovou délkou, resp. optickou frekvenci. Ty slouží jako základ pro laserové interferometry, které v kombinaci s vysoce koherentním laserem a kvalitní detekční technikou slouží pomocí stabilní frekvence k měření vzdáleností na hodnoty atomů. Díky existenci a rozvoji fotonických sítí lze zajistit přenos stabilní optické frekvence z vysoce stabilního laseru do všech míst, kam jsou vedena optická vlákna pro telekomunikace [27].

5.4 Senzorický signál

Optické vláknové senzory jsou nejčastěji založeny na principu modulace světelného paprsku, vedeného optickým vláknem, přímými fyzikálními podněty z okolí polohy vlákna. Modulovaný světelný paprsek je následně detekován a vyhodnocen ve snímacím zařízení.

Samotná optická vlákna jsou citlivá na akustické vibrace a teplotní změny, při vhodné konfiguraci tak může senzorický systém sledovat změny podél tras vláken.

Nejrozšířenější metoda detekce senzorických signálů je založena na principu optické časové reflektometrie a využívá Rayleighův zpětný rozptyl. Aby byl zpětně odražený signál dostatečně citlivý, je potřeba použít velmi úzký laserový paprsek. Rayleighův zpětný rozptyl je citlivý na akustické i mechanické podněty, jelikož úzký laserový signál detekuje i menší změny indexu lomu v optickém vlákně způsobené vnějšími vlivy [28].

Další metody detekce senzorických signálů mohou být založeny na změnách intenzity, fáze, polarizace nebo vlnové délky signálu.

Při detekci senzorických signálů může nastat situace, kdy je úroveň výkonu měřeného zpětně odraženého impulsu příliš nízká a nelze ji správně detekovat. Využívány jsou proto vysoko výkonové impulsní signály, které ovšem mohou významně ovlivnit současný přenos více aplikací v jednom vlákně. Je tak nutné analyzovat a zvážit možnou interakci mezi jednotlivými službami a vytvořit optimální kanálové rozestupu mezi signály. Vyšší úroveň výkonu senzorických signálů může také způsobit více nelineárních jevů ovliňujících přenos, především u optických vláken s posunutou disperzí [28].

5.5 Přenos fotonických služeb v jednom vlákně

Vysoce kvalitní optická vlákna, velmi stabilní vysoce koherentní lasery a rostoucí infrastruktura fotonických sítí přináší v posledních letech vhodné alternativní médium pro přenos aplikací, vysoce závislých na časovém zpozdění šířených signálů. Výhodou fotonických sítí je především možnost přenášet optický signál na velké vzdálenosti, s využitím kvalitních optických zesilovačů, bez nutnosti převodu optického signálu na elektrický a zpět.

Fotonické sítě představují unikátní medium, které dovoluje využívat vysoce koherentní laserové zdroje záření o vlnové délce (optické frekvenci) určené s maximální přesností a zároveň s absolutní stabilitou v řádu několika Hz. Stabilní signál z laserových normálů optické frekvence a času lze přenášet na vzdálenosti v řádu několika stovek kilometrů.

Myšlenka vybudovat samostatnou optickou (fotonickou) přenosovou síť pro přenos přesného času a stabilní frekvence, nebo jen senzorického signálu je z praktického hlediska zcela nesmyslná a nereálná, především z finančně nákladných důvodů. Při budování nových optických sítí se již dopředu počítá s jejich budoucí rozšířitelností a využitím. V nově budovaných optických sítích se tak na trasách vyskytují „temná vlákna“, v nichž neprobíhá žádný provoz a slouží jako záložní trasy přenosového systému.

Díky těmto vláknům lze zakomponovat přenos fotonických služeb do již fungující optické sítě. Především proto, že temná vlákna mohou využít zdroje optického záření jakékoliv vlnové délky, což je velmi výhodné pro provoz fotonických služeb, které nepoužívají běžné telekomunikační zdroje optického záření.

Další možností jak využít celé spektrum přenosových kapacit optických sítí je vlnový multiplex WDM. Přenosové spektrum je rozděleno do kanálů, kde každý kanál využívá přesně dané frekvenční pásmo, podle standardu ITU-T G.694.1 pro hustý vlnový multiplex DWDM a G.694.2 pro hrubý vlnový multiplex CWDM. Techniky multiplexování byly popsány v kapitole 2 Multiplexní systémy.

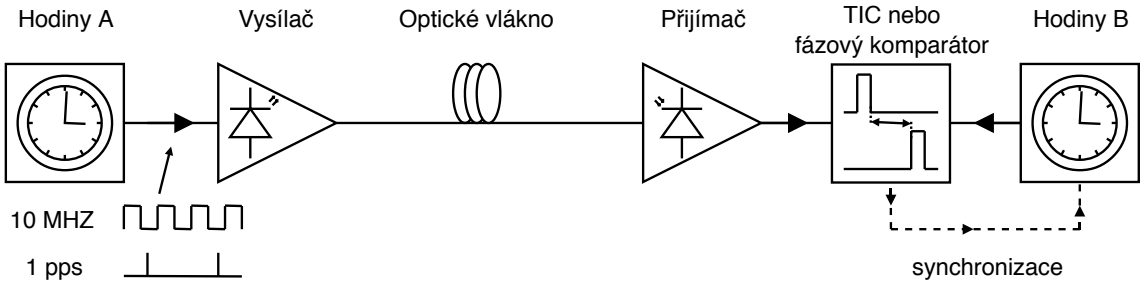
Vlnový multiplex je velmi citlivý na interference mezi jednotlivými kanály. Při použití levnějších nebo méně kvalitních prvků optické trasy může docházet k mezikanálové interferenci, která významně ovlivňuje přenos v ostatních kanálech. Velmi citlivý je na toto rušení přenos stabilní frekvence.

Přenos více služeb optickým vláknem lze také realizovat díky sdílení přenosové kapacity. Přenos synchronizační informace přesného času není kontinuální, informace o synchronizaci je posílána jednou za sekundu, je tak možné maximalizovat využití optického vlákna přenosem běžných datových signálů v mezerách mezi synchronizačními informacemi [27], [29].

5.5.1 Jednosměrný přenos optickým vláknem

Jednosměrný přenos patří mezi základní a nejjednodušší metodu přenosu přesného času a stabilní frekvence. Jak je znázorněno na obrázku 5.1, na vysílací straně je signál z hodin A, nejčastěji jeden impuls za sekundu 1 PPS (Pulse Per Second) pro přenos času nebo vlna 10 MHz pro přenos frekvence, vhodně modulován pro přenos optickým vláknem k přijímacím hodinám B. V závislosti na konkrétním řešení přenosu může být před optickým přenosem zavedena další konverze nebo kódování formátu proti chybám, zejména pro časový signál, který může být reprezentován jako prostý optický impuls nebo jako komplexní paket s časovou známkou. Na přijímací straně je optický signál zpětně převeden na signál elektrický a přijatý hodinami B.

Zpoždění τ_{AB} způsobené přenosem optickým vláknem nelze eliminovat, je dáno fyzikální podstatou rychlosti světla šířícího se jádrem optického vlákna a pohybuje



Obr. 5.1: Schéma jednosměrného přenosu času a frekvence optickým vláknem

se v jednotkách mikrosekund na kilometr. Vzdálené hodiny B a lokální hodiny A mohou zpoždění kompenzovat čítačem časových intervalů TIC (Time Interval Counter) nebo v případě přenosu frekvence fázovým komparátorem. Zpoždění přenosu může být dopředu snadno stanoveno například pomocí metody OTDR. Pokud je vyžadována vysoká přesnost jednosměrného přenosu, musí být známy fyzické polohy (souřadnice) obou hodin, aby bylo možné zpoždění trasy τ_{AB} vypočítat. Pro přenos stabilní frekvence je důležitá především stabilita zpoždění přenosové trasy [27], [29].

Právě stabilita zpoždění je hlavním problémem při jednosměrném přenosu. Nestabilita zpoždění je způsobena především změnami teploty optického vlákna, případně mechanickým namáháním částí vlákna.

Vycházíme-li ze základní rovnice pro určení zpoždění vlákna:

$$\tau = l \times \frac{n_g}{c}, \tag{5.1}$$

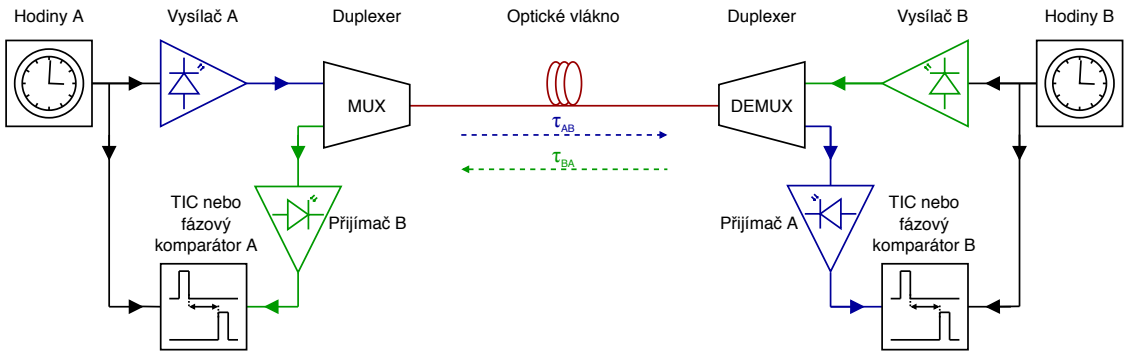
kde l je délka vlákna, n_g je skupinový index lomu a c je rychlost světla ve vakuu, můžeme vyjádřit změnu zpoždění $\Delta\tau$ jako:

$$\Delta\tau = \frac{l}{c}\frac{\partial n_g}{\partial T}\Delta T + l\alpha\frac{n_g}{c}\Delta T + lD\Delta\lambda, \tag{5.2}$$

kde T označuje teplotu vlákna, $\alpha = \frac{\partial l}{\partial T}$ je koeficient tepelné roztažnosti vlákna, $D = \frac{\frac{\partial n_g}{\partial \lambda}}{c}$ je koeficient chromatické disperze vlákna a λ je vlnová délka zdroje optického záření. První člen rovnice se vztahuje k teplotní závislosti indexu lomu, druhý člen k teplotní roztažnosti vlákna a třetí k chromatické disperzi vlákna, která souvisí s možnou odchylkou vlnové délky zdroje záření. První dva členy rovnice popisují teplotní citlivost zpoždění vlákna. Je tedy zřejmé, že změny teploty vlákna výrazně ovlivňují přesnost zpoždění při přenosu přesného času a frekvence [30].

5.5.2 Obousměrný přenos optickým vláknem

Pro některé aplikace, pracující v reálném čase, není v mnoha případech jednosměrný přenos dostatečně přesný. Jak již bylo zmíněno, největší problém při přenosu způsobuje stabilita zpoždění. Pro velmi přesné přenosy je tak třeba využít jiných přenosových metod, které dokáží redukovat vliv stability proměnného zpoždění šíření signálu. Jednou z možností je obousměrný optický přenosový systém znázorněný na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Schéma obousměrného přenosu času a frekvence optickým vláknem

Obousměrný optický přenos porovnává hodnoty z obou hodin, vysílače i přijímače. Princip obousměrného přenosu optickým vláknem je velmi podobný metodě TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer), která je využívána geostacionárními telekomunikačními družicemi. Tato metoda využívá plně duplexní spojení obou stran přenosového systému, lze tak dosáhnout vyšší přesnosti časového přenosu. Optické signály přesného času nebo frekvence jsou generovány hodinami na obou stranách přenosového systému a současně jsou přenášeny v obou směrech přes společné optické vlákno zakončené duplexery. Duplexery mohou být realizovány pomocí optických cirkulátorů, směrových optických couplerů nebo více portových optických filtrů [27].

Při přenosu času se využívají čítače časových intervalů TIC, na obou stranách přenosového systému, které porovnávají čas lokálních hodin se zpožděným optickým časovým signálem ze vzdálených hodin. Zpoždění detekována pomocí TIC, mají tvar:

$$TIC_A = clock_A - (clock_B - \tau_{BA}) \tag{5.3}$$

$$TIC_B = clock_B - (clock_A - \tau_{AB}) \tag{5.4}$$

kde τ_{AB} a τ_{BA} jsou zpoždění optického vlákna v obou směrech. Zpoždění způsobená ve vysílači, přijímači a duplexerech jsou zanedbána.

Porovnáním získaných zpoždění obou lokálních čítačů a jejich rozdílem, lze vypočítat rozdíl hodin jako:

$$clock_A - clock_B = \frac{TIC_A - TIC_B}{2} + \frac{\tau_{BA} - \tau_{AB}}{2} \tag{5.5}$$

Tato metoda vychází z předpokladu, že zpoždění šíření optického signálu je v obou směrech přenosu totožné a zároveň také závisí na podmínkách okolního prostředí, především na teplotě. V ideálním případě je druhý člen pravé strany rovnice 5.5 roven nule a porovnání hodin tak není ovlivněno zpožděním přenosem optickým vláknem [29], [30].

6 Návrh měření společného přenosu

Praktická část této diplomové práce se zaměřuje na vliv přenosu více fotonických služeb jedním optickým vláknem. Přenos více fotonických služeb v jednom optickém vlákně přináší řadu problémů. Jednotlivé fotonické služby je potřeba multiplexovat do jednoho vlákna, je tak nutné zvolit vhodné rozložení přenosových kanálů, dále je potřeba zvolit vhodný vysílací výkon jednotlivých služeb, tak aby se jednotlivé fotonické služby vzájemně neovlivňovali a předcházelo se tak vzniku nelineárních jevů ovlivňujících přenos.

Pro praktické měření společného přenosu jedním optickým vláknem byly, v různé kombinaci, vybrány fotonické služby: přenos přesného času, senzorický optický signál a přenos datových optických signálů 1, 10, 100 a 200 Gbit/s.

Při společném přenosu byly sledovány hlavní přenosové parametry jednotlivých služeb. Pro přenos času byla sledována především stabilita zpoždění přenosu a celková doba zpoždění, při přenosu datových signálu bylo sledováno více parametrů, uvedených dále v kapitole, především ale bitová chybovost BER (Bit Error Rate).

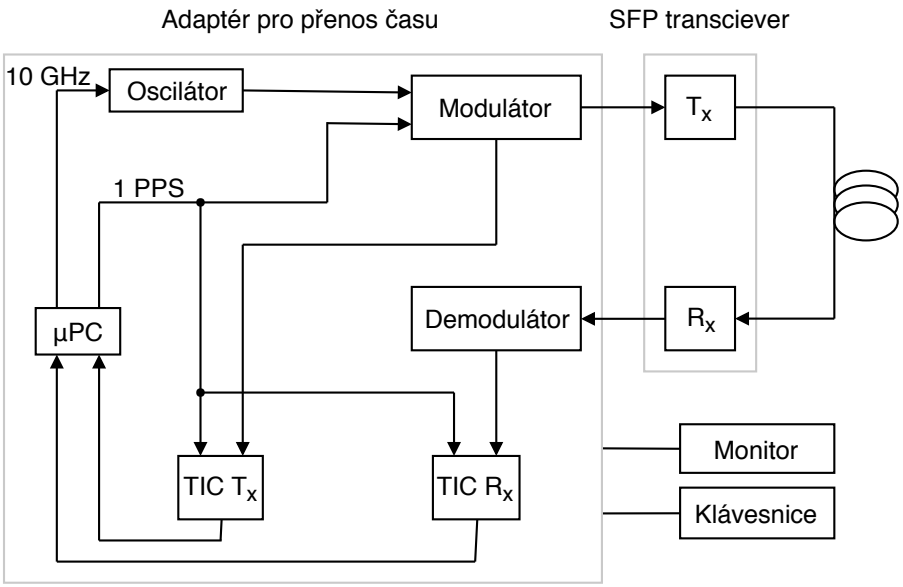
Měření společného přenosu fotonických služeb probíhala přes jednovidová optická vlákna typu G.652, G.653 a G.657 o různých délkách.

6.1 Přenos přesného času

Přenos přesného času byl realizován pomocí adaptéru vyvinutého ve spolupráci se sdružením CESNET a Ústavem fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR.

Adaptér pro přenos času se skládá z ovládacího mikropočítače, na kterém funguje linuxový operační sytém Debian 6 Squeeze, který je hlavní řídící jednotkou celého systému. Pro získání přesného pulsu 1 PPS obsahuje adaptér krystal a oscilátor generující přesnou frekvenci 10 MHz. Pro modulaci a demodulaci vysílaného signálu je adaptér osazen programovatelným hradlovým polem FPGA (Field Programmable Gate Array) s čipem Virtex 5 od společnosti Xilinx. Vysílání a příjem optického signálu zpracovává jednovidový SFP (Small Form-factor Pluggable) transceiver.

Jak je znázorněno na obrázku 6.1, signál pro přenos času je nejdříve generován oscilátorem a následně modulován v modulátoru signálem 1 PPS. Modulačním signálem 1 PPS jsou současně aktivovány dva čítače časových intervalů TIC Tx a TIC Rx. Při vysílání výstupního signálu z modulátoru, modulátor zastaví čítač TIC Tx a ten odešle informaci o zaznamenaném počtu intervalů, čase, ke zpracování mikropočítačem. Výstupní signál z modulátoru je pomocí Tx SFP transceiveru vysílán přes optické vlákno. Optický časový signál je přijímán pomocí Rx SFP transceiveru a odeslán na vstup demodulátoru. Příchozí signál na demodulátoru zastaví čítač TIC Rx a zaznamenaný čas čítačem odešle na zpracování do mikropočítače [31].



Obr. 6.1: Schéma zapojení pracoviště pro měření časového zpoždění

V mikropočítači je hodnota celkového zpoždění, od vysílání po příjem optického signálu, získána odečtením hodnoty čítače TIC Tx od hodnoty čítače TIC Rx.

6.2 Přenos datových signálů

Přenos datových signálů 1 a 10 Gbit/s byl realizován pomocí měřící platformy FTB-1 společnosti EXFO. Funkce této platformy umožňují generovat datový signál, který je pak vysílán přes optickou trasu a následně datový signál přijímat a vyhodnocovat jeho chybovost po průchodu optickou trasou. Tato platforma disponuje volnými sloty pro transceivery SFP využitelnými jako zdroje datového optického signálu. Pro datové optické signály byl použit transceiver SFP společnosti AscentOptics s označením AO+−DTXX-R80 10G DWDM Tunable, který je schopný vysílat optický datový signál s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s do vzdálenosti 80 km.

Datové signály 100 a 200 Gbit/s byly realizovány pomocí optického koherentního přenosového systému Coriant Groove G30, který umožňuje vysokorychlostní přenos dat pomocí laditelných DWDM rozhraní s volitelnou přenosovou rychlostí (100, 150 a 200 Gbit/s) a modulačním formátem. Výhodou tohoto systému je možnost přenášet všechny tři rychlosti obousměrně po jednom vlákně. Veškerá nastavení vysílaného datového optického signálu a výsledná vyhodnocení parametrů přenosu byla prováděna příkazy prostřednictvím příkazové řádky vzdáleného přístupu nebo prostřednictvím grafického webového rozhraní.

6.3 Ověřovací měření

Pro ověření přípravku pro přenos času bylo provedeno ověřovací měření zpoždění času. K přípravku bylo ve smyčce připojeno jednovidové optické vlákno typu G.652 o délce 21 169 metrů. Po přihlášení do systému pro přenos času byl spuštěn program pro měření zpoždění. Část výstupu měřícího programu je vidět ve výpise 6.1, poslední hodnota na řádku 6 a 14 je hodnota zpoždění optické trasy v nanosekundách.

Výpis 6.1: Část výpisu programu pro měření zpoždění

```
1  # 56 7e d8 9c 5d 5a 48 81 start
2  # 56 7e d8 9c 5d 5b f9 81 start
3  * Interpolator #2 rate : 177, avg: 176.21
4  # 56 7e d8 9c 5d 70 9d 41 Ch 0
5  # 56 7e d8 9c 5d aa 46 21 Ch 1
6  2 1167856257.437159 54103.854831 53.794 200.029 146.234
7  # 56 7e d8 9c 5d ab f6 21 Ch 1
8  * Interpolator #2 rate : 176, avg: 176.20
9  # 56 7e f0 73 e1 5e 49 81 start
10 # 56 7e f0 73 e1 5f fc 81 start
11 * Interpolator #2 rate : 179, avg: 176.34
12 # 56 7e f0 73 e1 74 9e 41 Ch 0
13 # 56 7e f0 73 e1 ae 45 21 Ch 1
14 2 1167856258.437159 54103.854843 53.796 200.058 146.262
15 # 56 7e f0 73 e1 af f5 21 Ch 1
```

Pro ověření datového přenosu 1 Gbit/s bylo k měřící platformě EXFO FTB-1 ve smyčce připojeno jednovidové optické vlákno typu G.652 o délce 21 169 metrů. Nastavení výstupního datového optického signálu byla prováděna pomocí dotykové obrazovky, která sloužila také k zobrazení naměřených hodnot přenosových parametrů. Datový signál 100 Gbit/s generovaný zařízením Coriant Groove 30G byl navázán do smyčky jednovidového optického vlákna typu G.653 o délce 7 089 metrů. Jak již bylo popsáno nastavení vysílaného signálu a vyhodnocení přenosových parametrů probíhalo přes příkazovou řádku vzdáleného přístupu k zařízení.

Ověřovací měření bylo provedeno pro jednotlivé datové signály a jejich parametry přenosu. Mezi nejdůležitější parametry pro hodnocení kvality přenosu patří bitová chybovost BER, která udává poměr chybně přijatých bitů ku celkovému počtu přijatých bitů za určitou dobu měření. Dalším významným parametrem sloužícím k hodnocení výkonu je Q-faktor. Q-faktor vyjadřuje kvalitu signálu s ohledem na odstup signálu od šumu SNR (Signal to Noise Ratio), zahrnuje tak všechny fyzické poruchy signálu. Poruchy vzniklé při přenosu snižují kvalitu signálu a způsobují bi-

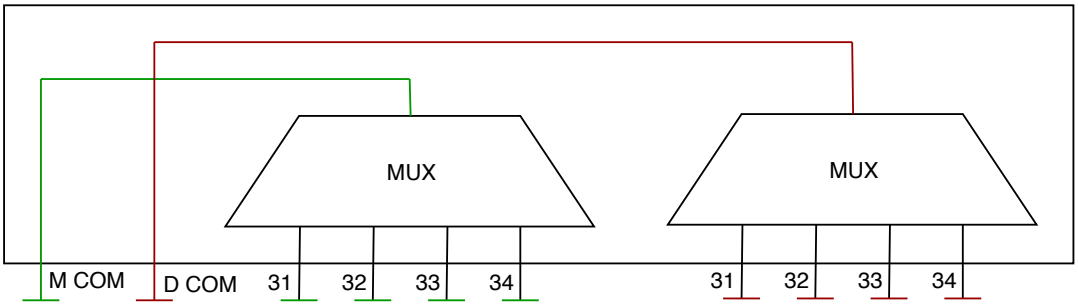
tové chyby. Vyšší hodnota Q-faktoru znamená lepší odstup signálu od šumu, a tím i nižší hodnotu BER.

Dalšími sledovanými parametry přenosu jsou diferenciální skupinové zpoždění DGD, které vyjadřuje vzájemné zpoždění dvou ortogonálních polarizačních rovin a koeficient chromatické disperze D, který udává změnu skupinového zpoždění signálu t_g při průchodu optickým vláknem v závislosti na vlnové délce.

6.4 Společný přenos jedním optickým vláknem

Pro společný přenos dvou a více fotonických služeb přes jedno optické vlákno, je potřeba optické signály jednotlivých služeb sloučit v jeden optický signál, k tomu byl použit vlnový multiplexer. Na přijímací straně je pak potřeba signály jednotlivých služeb rozlišit a vyvázat ze společného signálu pomocí vlnového demultiplexeru.

Při praktickém měření bylo využíváno zařízení kombinující dvojici multiplexerů pod označením, 100GHz 8-CH DWDM MUX/DEMUX. Zjednodušeně se jedná o dva multiplexery, které lze, spojením jejich výstupů, zapojit jako multiplexer a demultiplexer. Zjednodušené schéma části MUX/DEMUX zařízení je na obrázku 6.2. Každý z multiplexerů obsahuje osm vstupních portů a jeden společný výstupní port.



Obr. 6.2: Zjednodušené schéma MUX/DEMUX zařízení

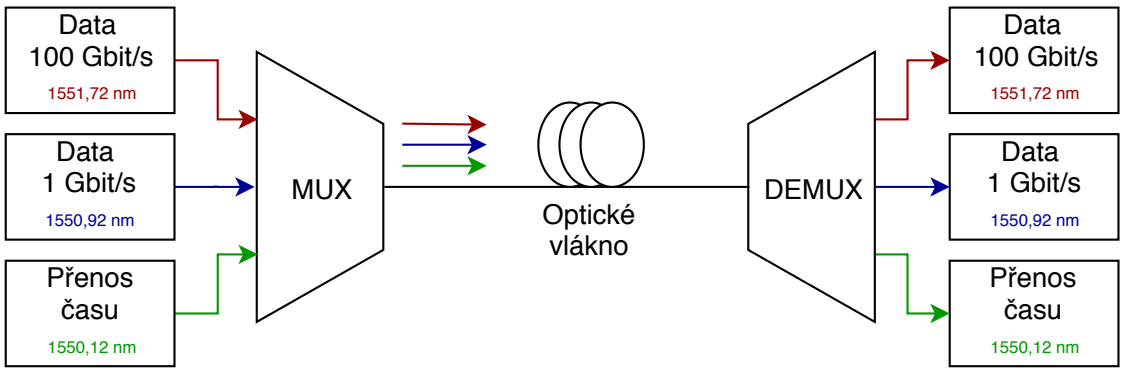
Oba multiplexery fungují zároveň jako frekvenční filtry, bylo tedy nutné dbát na správné kanálové oddělení jednotlivých signálů. Kanály pro jednotlivé služby byly rozděleny podle doporučení ITU-T G.694.1 s odstupem kanálů 100 GHz, jak je znázorněno v tabulce 6.1. Pro společný přenos tří fotonických služeb byly zvoleny sousední DWDM kanály 32, 33 a 34 s odstupem vlnové délky 0,8 nm.

Výstupní signály zařízení fotonických služeb byly přivedeny na příslušné vstupní porty jednoho multiplexeru, tak aby odpovídaly zvolenému kanálovému rozdělení. Společný přenos fotonických služeb probíhal vždy přes jedno jednovidové optické vlákno typu G.652, G.653 nebo G657, které bylo připojeno na výstupy multiplexerů,

Tab. 6.1: Rozdělení fotonických služeb do DWDM kanálů s odstupem 100 GHz

Kanál	Frekvence [GHz]	Vlnová délka [nm]	Služba
32	193 200	1551,72	Data 100 Gbit/s
33	193 300	1550,92	Data 1 Gbit/s
34	193 400	1550,12	Přenos času

jak je zobrazeno na obrázku 6.3. Tímto zapojením se z jednoho multiplexu stal demultiplexer, kde na jeho výstupních portech lze očekávat jednotlivé fotonické služby příslušné danému kanálu. Z výstupních portů demultiplexeru byly jednotlivé optické signály přiváděny zpět do svých zdrojových zařízení, které vyhodnocovali přenosové parametry přijatých optických signálů.



Obr. 6.3: Schéma společného přenosu fotonických služeb optickým vláknem

6.5 Přenos zesíleného společného signálu vybraných služeb

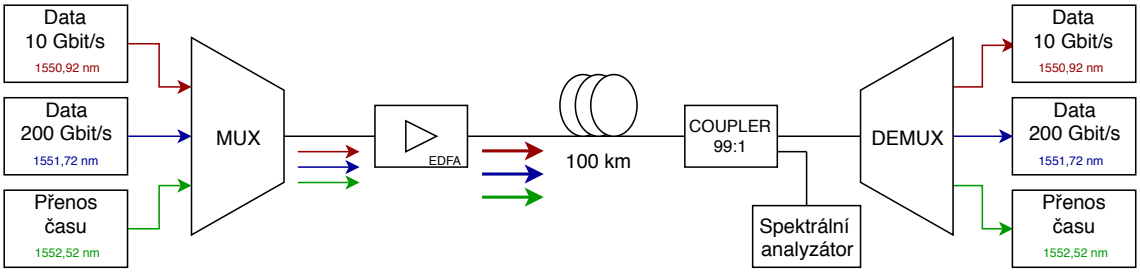
V dalším praktickém měření byl ověřen vliv zesílení optického zesilovače na společný přenos tří vybraných fotonických služeb. Pro toto měření byly vybrány fotonické služby přenosu času a dva datové signály. Datový signál o rychlosti 10 Gbit/s, generovaný měřící platformou EXFO FTB-1 a datový signál o rychlosti 200 Gbit/s, generovaný optickým koherentním přenosovým systémem Coriant Groove G30. Pro jednotlivé služby byly přiděleny DWDM kanály s odstupem 100 GHz, jak udává tabulka 6.2. Vybraný optický zesilovač Kaopsys KPS-BT-C-21-Bo-FA je určený pro vlnové multiplexy pracující v pásmu 1530–1565 nm.

Na obrázku 6.4 je vidět podrobné schéma měření zobrazující přenášené služby a nastavení nosné vlnové délky pro každou z nich. Optické signály pro jednotlivé

Tab. 6.2: Rozdělení fotonických služeb do DWDM kanálů s odstupem 100 GHz

Kanál	Frekvence [GHz]	Vlnová délka [nm]	Služba
31	193 100	1552,52	Přenos času
32	193 200	1551,72	Data 200 Gbit/s
33	193 300	1550,92	Data 10 Gbit/s

služby byly navázány do sousedních DWDM kanálů. Tyto signály byly společně multiplexovány ve standardním telekomunikačním multiplexeru. Společný optický signál byl dále zesílen optickým výkonovým zesilovačem, v rozsahu 10–15 dBm. Společný optický signál byl dále navázán do optického vlákna typu G.652.D o délce 100 km. Část přenášeného společného optického signálu byla na konci trasy vyvázána pomocí optického děliče výkonu s dělícím poměrem 99:1. Vyvázaná část přenášeného společného signálu sloužila jako zdroj pro optický spektrální analyzátor, pomocí kterého byly jednotlivé optické signály sledovány, zda u nich nedochází ke vzniku nelineárních jevů. Společný přenášený signál byl dále demultiplexován a jednotlivé optické signály přenášených služeb byly přivedeny zpět do svých zdrojových zařízení, kde byly vyhodnoceny přenosové parametry přijatých optických signálů.



Obr. 6.4: Schéma společného přenosu pro zesílený signál

6.6 Přenos společného signálů se změnou kanálů

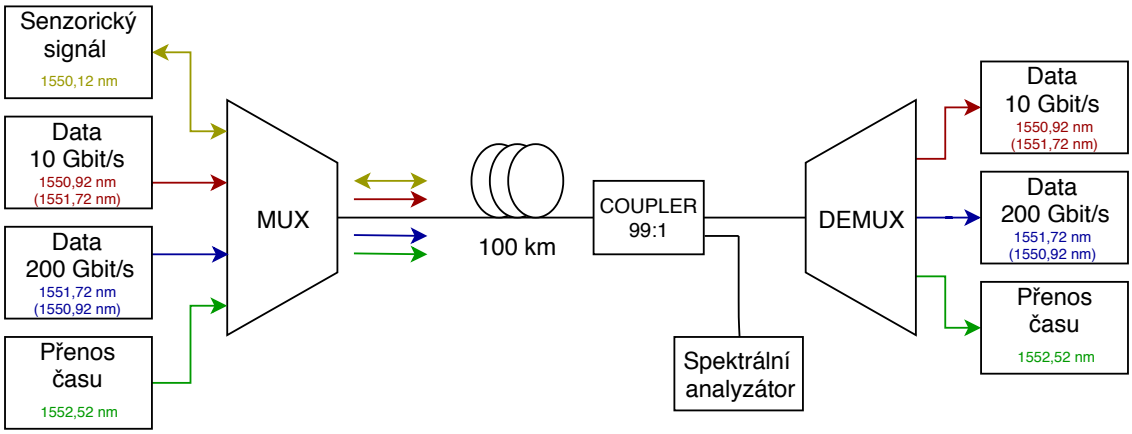
Ve třetím praktickém měření byl ověřen vliv změny přenosového DWDM kanálu na společný přenos vybraných fotonických služeb a jejich přenosové parametry. Pro společný přenos byly vybrány fotonické služby přenosu času, dva datové signály a senzorický signál. Datový signál o rychlosti 10 Gbit/s, generovaný měřící platformou EXFO FTB-1 a datový signál o rychlosti 100 a 200 Gbit/s, generovaný optickým koherentním přenosovým systémem Coriant Groove G30. Senzorický signál byl realizován generátorem vysokovýkonných pulsů o průměrném výkonu 4 dBm, dobou trvání pulsu 200 ns a opakovací frekvencí 1 kHz.

Tab. 6.3: Rozdělení fotonických služeb do DWDM kanálů s odstupem 100 GHz

Kanál	Frekvence [GHz]	Vlnová délka [nm]	Služba
31	193 100	1552,52	Přenos času
32 (33)	193 200 (193 300)	1551,72 (1550,92)	Data 200 Gbit/s
33 (32)	193 300 (193 200)	1550,92 (1551,72)	Data 10 Gbit/s
34	193 400	1550,12	Senzorický signál

V první části měření byly pro jednotlivé služby přiděleny DWDM kanály s odstupem 100 GHz, v druhé části měření byly přenášené služby na 32. a 33. DWDM kanálu prohozeny, jak znázorňuje tabulka 6.3.

Na obrázku 6.5 je vidět podrobné schéma měření. Jednotlivé přenášené služby byly navázány do sousedních DWDM kanálů společného multiplexu a společné přeneseny jedním optickým vláknem typu G.652.D o délce 100 km. Část přenášeného společného optického signálu byla opět na konci trasy vyvázána pomocí optického děliče výkonu. Vyvázaná část přenášeného společného signálu sloužila jako zdroj pro optický spektrální analyzátor, pomocí kterého byly jednotlivé optické signály sledovány. Společný přenášený signál, mimo signál senzorický, byl dále demultiplexován a jednotlivé optické signály přenášených služeb byly přivedeny zpět do svých zdrojových zařízení. Jelikož je senzorický signál založen na principu optické časové reflektometrie a využívá Rayleighův rozptyl, nebyl demultiplexován společně s ostatními signály. Ve zdrojových zařízeních jednotlivých přenášených služeb byly vyhodnoceny přenosové parametry přijatých optických signálů.



Obr. 6.5: Schéma společného přenosu se změnou kanálů

V druhé části měření byly pro datové signály prohozeny DWDM kanály, což znamenalo i přeladění jejich nosné vlnové délky (frekvence). Měření dále proběhlo stejným postupem, jak bylo popsáno v předchozím odstavci.

Stejný postup měření platí i pro třetí a čtvrtou část měření, kde byl datový signál o rychlosti 200 Gbit/s nahrazen datovým signálem o rychlosti 100 Gbit/s a opět byly datové signály na svých DWDM kanálech prohozeny.

6.7 Odstup signálů od senzorického signálu

V posledním praktickém měření byl ověřen vliv odstupu datových signálů a časového signálu od senzorického signálu. Měření probíhalo obdobně jako v předchozích měřeních jen s tou výjimkou, že byl použit 80kanálový DWDM multiplexer s kanálovými rozestupy 50 GHz (KAIAM DMX-W80-HH0-AT1).

Společně se senzorickým signálem, který byl přenášen na vlnové délce 1550,12 nm, které odpovídá přenosový DWDM kanál 51, byly jednotlivě přenášeny datové signály o rychlosti 200, 100 a 10 Gbit/s a časový signál s postupně rostoucím odstupem od senzorického signálu. Postupný odstup přenášených optických signálů byl realizován přeladěním nosné vlnové délky (frekvence) signálu, čímž došlo i ke změně přenosového kanálu, přenosové kanály byly rozděleny dle doporučení ITU-T G.694.1 s odstupem jednotlivých kanálů 50 GHz (0,4 nm), jak je znázorněno v tabulce 6.4.

Společný přenos vybraných fotonických služeb probíhal přes jedno jednovidové vlákno typu G.652.D o délce 50 km.

Tab. 6.4: Rozdělení DWDM přenosových kanálů s odstupem 50 GHz

Kanál	**Frekvence [GHz]**	**Vlnová délka [nm]**	**Služba**
51	**193 400**	**1550,12**	**Senzorický signál**
50	193 450	1549,72	
49	193 500	1549,32	
48	193 550	1548,92	
47	193 600	1548,52	

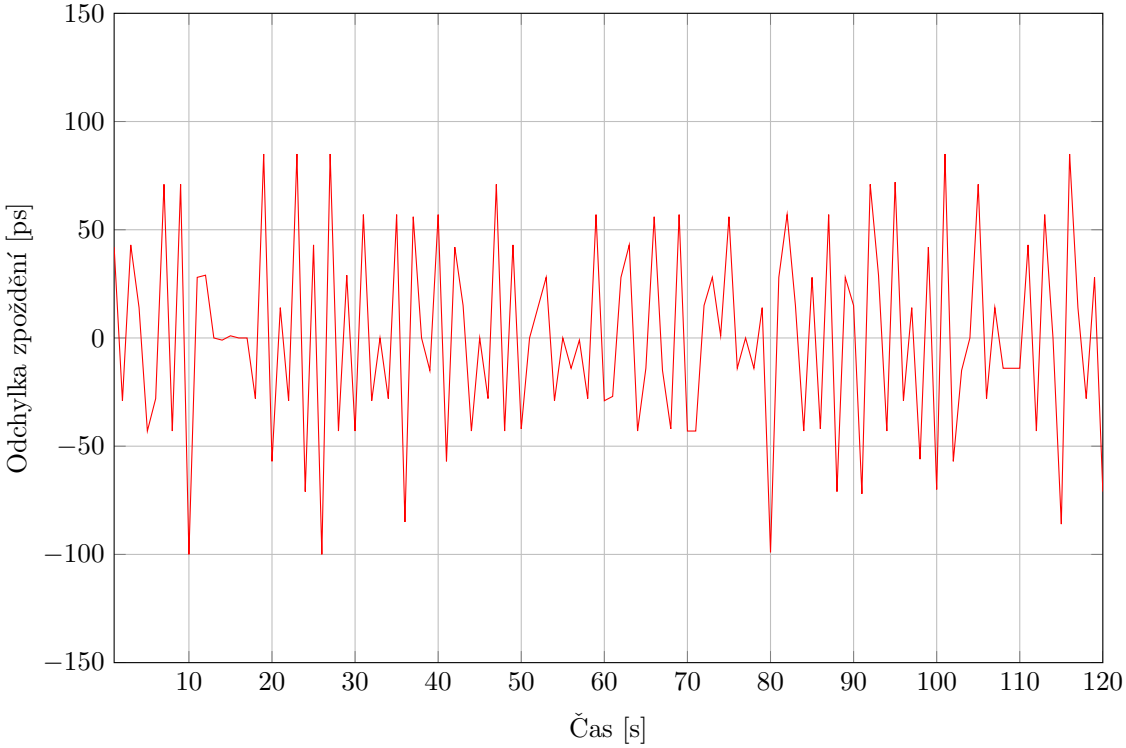
V první části tohoto měření byl ověřen vliv odstupu od senzorického signálu pro datový signál 200 Gbit/s. Měření probíhalo postupně pro odstup od senzorického signálu v rozsahu 50–200 GHz s krokem odstupu 50 GHz. Další části měření probíhaly obdobně pro datový signál 100 Gbit/s a 10 Gbit/s. V poslední části měření byl ověřen vliv odstupu od senzorického signálu pro signál přenosu času.

Sledovány byly především přenosové parametry jednotlivých služeb, ale také, zda nedochází ke vzniku nelineárních jevů nebo k vzájemnému ovlivnění přenášených fotonických služeb ve vedlejších přenosových kanálech. Hlavním sledovaným přenosovým parametrem byla změna bitové chybovosti v závislosti na odstupu od senzorického signálu.

7 Výsledky měření

7.1 Ověřovací měření přenosu času

Ověřovací měření přípravku pro přenos času potvrdilo funkčnost navrženého měření. Měření probíhalo po dobu dvou minut s jedno sekundovým měřícím intervalem. Pro ověřovací měření bylo použito jednovidové optické vlákno typu G.652 o délce 21 169 metrů. Při měření se časové zpoždění pohybovalo přibližně v rozmezí t_{min} = 103 686,075 ns až t_{max} = 103 686,205 ns. Rozdíl maximálního a minimálního zpoždění byl 0,13 ns a průměrná hodnota zpoždění pak byla 103 686,142 ns.



Obr. 7.1: Odchylka zpoždění při ověřovacím měření

Z naměřených hodnot ověřovacího měření lze stanovit odchylku mezi po sobě jdoucími hodnotami. Hodnoty této odchylky v závislosti na čase jsou vyneseny do grafu na obrázku 7.1. Z grafu je možné vidět, že odchylka zpoždění nepřekročila hodnotu 100 ps a průměrná hodnota odchylky byla 43 ps.

7.2 Ověřovací měření datového přenosu

Ověřovací měření datového přenosu bylo rozděleno na dvě nezávislá měření. První měření, kde generátorem zdrojových dat byla měřící platforma FTB-1 a druhé měření, kde byl zdrojem dat systém Coriant.

Při prvním měření byla měřící platforma FTB-1 osazena SFP transceiverem pracujícím na vlnové délce 1550,92 nm a frekvenci, odpovídající 33. DWDM kanálu, 193,3 THz. K transceiveru bylo do smyčky připojeno jednovidové optické vlákno typu G.652 o délce 21 169 metrů. Měřící platforma generovala datový tok 1 Gbit/s a zároveň vyhodnocovala přenosové parametry, především parametr BER.

Dokud bylo optické vlákno ponecháno v klidu, naměřená chybovost BER se rovnala nule, zdánlivě šlo tedy o bezchybný přenos. Při vystavení optického vlákna vlivům, jako je malý poloměr ohybu nebo tlak, se začala projevovat zvýšená chybovost a byla tedy zaznamenána nenulová hodnota parametru BER.

Druhé měření probíhalo na systému Coriant Groove G30, který byl nastaven tak, aby generoval datový tok 100 Gbit/s při použití modulačního formátu DP-QPSK. Dále bylo nutné zajistit aby datový přenos probíhal na 32. DWDM kanálu, frekvenci 193,2 THz. K systému Coriant bylo do smyčky připojeno jednovidové optické vlákno typu G.653 o délce 7 089 metrů. Sledované přenosové parametry byly vyhodnoceny systémem Coriant a zaznamenány do tabulky 7.1

Tab. 7.1: Naměřené přenosové parametry pro datový signál 100 Gbit/s

	Jednotka	**Průměrná hodnota**	**Minimální hodnota**	**Maximální hodnota**
CD	ps/nm	0,5	-3	4
DGD	ps	4	3	5
OSNR	dB	15,4	15,3	15,5
Q	dB	9,7	9,7	9,7
BER	Bit-ratio	1,094E−03	1,029E−03	1,159E−03

Z naměřených hodnot je vidět, že bylo použito vlákno typu DSF, tedy vlákno s posunutou disperzí. Hodnota chromatické disperze se průměrně pohybovala okolo 0,5 ps, což odpovídá i předpokladům doporučení ITU-T G.653 pro danou délku optického vlákna. Poměrně stabilní byla hodnota diferenciálního skupinového zpoždění, která se pohybovala v intervalu 3–5 ps. Stejně stabilní byla i hodnota optického odstupu signálu od šumu, která se pohybovala v intervalu 15,3–15,5 dB. Naměřená hodnota Q-faktoru byla po celou dobu měření konstantních 9,7 dB. Naměřené hodnoty parametru BER ukazují poměrně vysokou chybovost, která odpovídá výskytu minimálně jednoho chybného bitu na tisíc přenesených bitů.

7.3 Společný přenos časového a datového signálu optickým vláknem

Společný přenos časového signálu a datových signálů proběhl podle schématu 6.3, kdy jednotlivé fotonické služby byly navázány do příslušných DWDM kanálů, podle tabulky 6.1. Společný přenos a měření přenosových parametrů probíhal postupně vždy pro jedno jednovidové optické vlákno typu G.652, G.653 a G.657. Současně s přenosem probíhalo i vyhodnocení přenosových parametrů.

Pro časový signál bylo hlavním sledovaným parametrem časové zpoždění signálu při přenosu optickým vláknem.

Pro datové signály byly sledovány především parametry chromatické disperze, skupinového zpoždění, optický odstup signálu od šumu, Q-faktor a bitová chybovost.

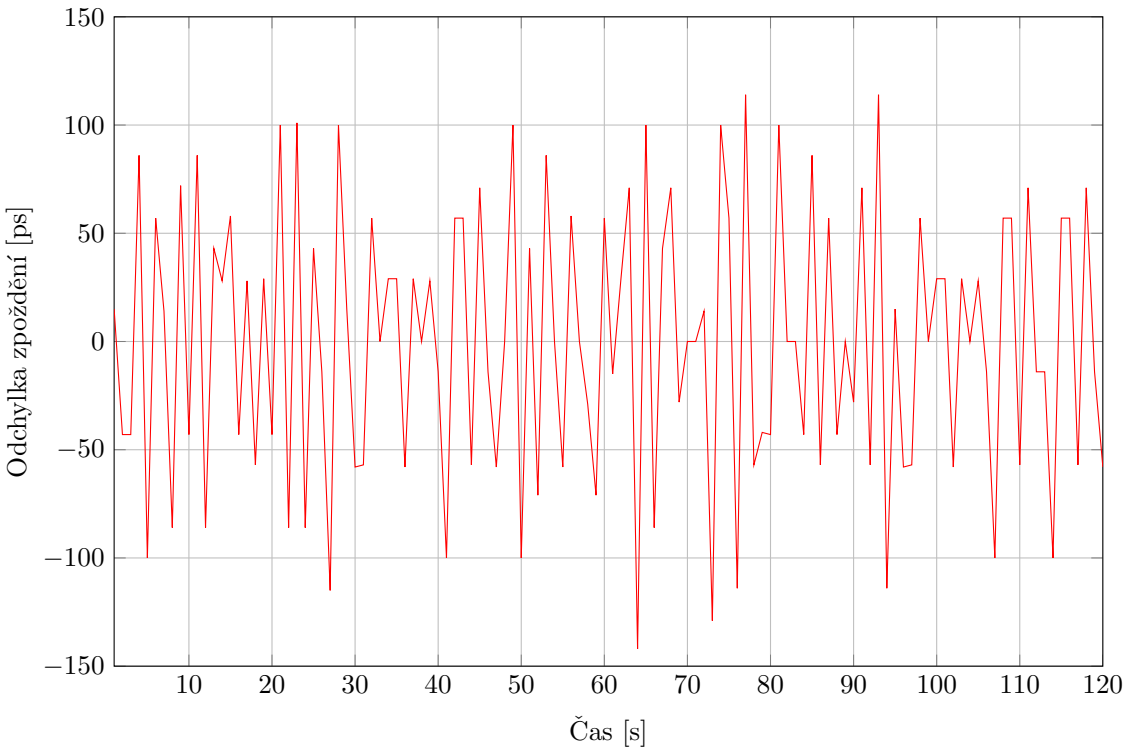
Sledované přenosové parametry a časová zpoždění, pro jednotlivá optická vlákna, byla vyhodnocena jednotlivými systémy a zaznamenána do tabulek naměřených hodnot.

Měření časového zpozdění pomocí přípravku pro přenos času proběhlo bez problémů. Pomocí programu pro měření zpoždění a skriptu pro zaznamenávání hodnot v operačním systému přípravku. Jak je vidět z hodnot zpoždění v tabulkách naměřených hodnot, odchylka od průměrné hodnoty zpoždění se vždy pohybovala v řádech pikosekund. Průměrná hodnota zpoždění, pro všechny typy optických vláken, odpovídala přibližně teoretickému zpoždění daného délkou vlákna a rychlostí šíření světelného paprsku jádrem vlákna.

Tab. 7.2: Naměřené přenosové parametry pro společný přenos vláknem G.652

	Typ vlákna	**G.652**		
Data 100 Gbit/s	**Jednotka**	**Průměrná hodnota**	**Minimální hodnota**	**Maximální hodnota**
CD	ps/nm	351,28	347,00	354,00
DGD	ps	3,84	3,00	4,00
OSNR	dB	16,05	15,90	16,20
Q	dB	10,54	10,50	10,60
BER	Bit-ratio	3,51E−04	3,38E−04	3,74E−04
Zpoždění	ns	103 720,671	103 720,800	103 720,571

Průměrná hodnota zpoždění při společném přenosu a při ověřovacím měření se lišila přibližně o 34,53 ns, tato změna zpoždění vlákna mohla být způsobena teplotní závislostí indexu lomu. Společný přenos více optických signálů hodnotu zpoždění přímo neovlivnil.



Obr. 7.2: Odchylka zpoždění při společném přenosu vláknem G.652

Na obrázku 7.2 je znázorněna odchylka dvou po sobě jdoucích hodnot. Z grafu je možné vidět, že odchylka zpoždění nepřekročila hodnotu 150 ps a průměrná hodnota odchylky zpoždění byla 24 ps.

Průběh odchylky zpoždění byl pro všechna měřená vlákna přibližně stejný. Odchylka zpoždění v žádném z měření nepřekročila hodnotu 150 ps.

Tab. 7.3: Naměřené přenosové parametry pro společný přenos vláknem G.653

	Typ vlákna	**G.653**		
Data 100 Gbit/s	**Jednotka**	**Průměrná hodnota**	**Minimální hodnota**	**Maximální hodnota**
CD	ps/nm	4,29	1,00	13,00
DGD	ps	2,67	2,00	3,00
OSNR	dB	20,76	20,70	20,90
Q	dB	14,84	14,70	14,90
BER	Bit-ratio	1,39E−08	7,52E−09	2,41E−08
Zpoždění	ns	35 056,828	35 056,747	35 056,892

Jelikož byly naměřené hodnoty bitové chybovosti pro datový signál 1 Gbit/s pro všechna měřená optická vlákna stále nulové, nejsou zaznamenány do tabulek naměřených hodnot. Dosáhnout nulové chybovosti při datových optických přenosech je téměř nemožné, i přesto ale nelze považovat naměřené hodnoty za chybné. Je proto potřeba se při dalším měření zaměřit na vhodnou volbu měřicí aplikace a její správně nastavení v měřicí platformě FTB-1.

Tab. 7.4: Naměřené přenosové parametry pro společný přenos vláknem G.657

	Typ vlákna	**G.657**		
Data 100 Gbit/s	**Jednotka**	**Průměrná hodnota**	**Minimální hodnota**	**Maximální hodnota**
CD	ps/nm	353,30	350,00	356,00
DGD	ps	5,06	5,00	6,00
OSNR	dB	20,10	20,00	20,20
Q	dB	14,41	14,40	14,50
BER	Bit-ratio	5,88E−08	4,06E−08	1,00E−07
Zpoždění	ns	98 410,123	98 410,085	98 410,172

Naměřené hodnoty přenosových parametrů pro datový signál 100 Gbit/s, vysílaný prostřednictvím zařízení Coriant Groove G30 ukazují, jak volba optického vlákna dokáže ovlivnit tyto parametry. Znatelné rozdíly byly především u parametru chromatické disperze, kdy při použití optického vlákna G.653 bylo dosaženo hodnot průměrně 4,29 ps/nm, oproti průměrným hodnotám při použití optických vláken G.652 a G.657, které byly 351,28 a 353,30 ps/nm.

Ostatní přenosové parametry jako diferenciální skupinové zpoždění, optický odstup signálu od šumu a Q-faktor se při použití různých typů optických vláken již významně neměnili. Průměrné hodnoty jednotlivých parametrů se vždy pohybovaly jen v malém rozsahu maximálních a minimálních hodnot.

Oproti ověřovacímu měření bylo však dosaženo poměrně lepších hodnot parametru BER. Aby bylo vůbec možné optický signál kvalitně přijímat je potřeba dosáhnout hodnoty BER minimálně v řádu 10^{-3}, ideální hodnoty bitové chybovosti BER by se měly pohybovat v řádech 10^{-9} a nižších.

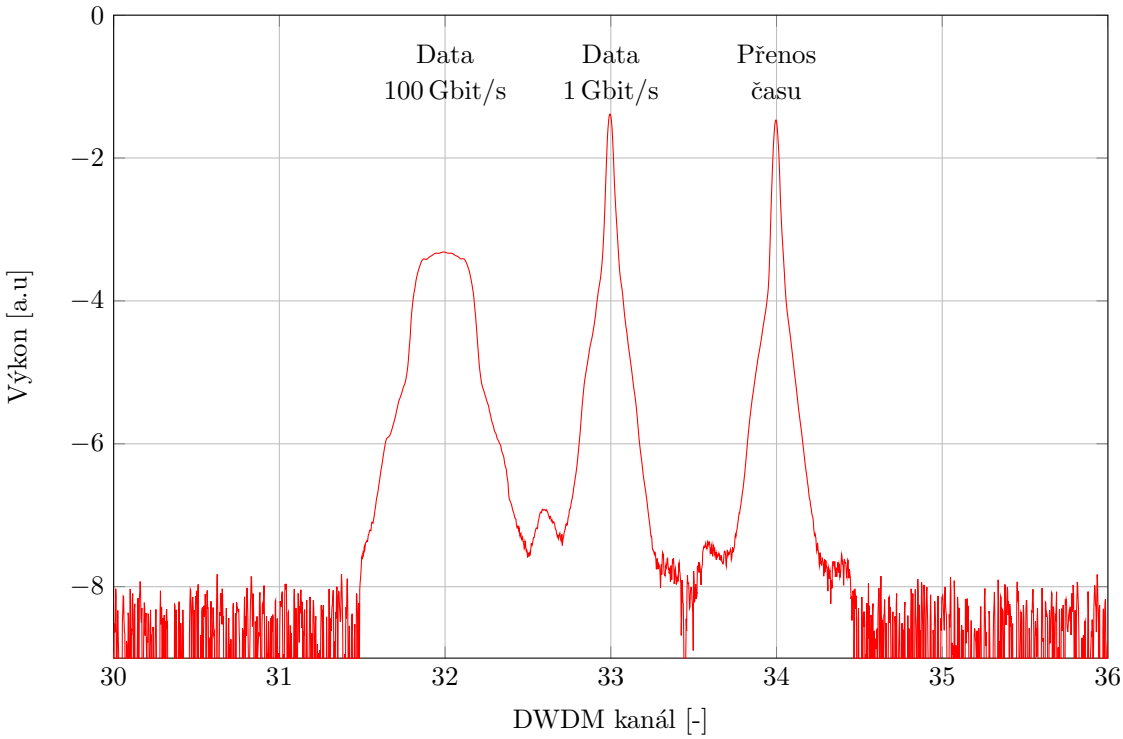
Při hodnocení naměřených přenosových parametrů pro jednotlivá vlákna je nutné vzít v potaz délky použitých vláken, jelikož se některé z přenosových parametrů mohou s délkou vlákna měnit. Podle naměřených přenosových parametrů dopadlo nejlépe vlákno typu G.653 o délce 7 089 m, které je ale zároveň nejkratší z použitých vláken. Při porovnání naměřených přenosových parametrů pro vlákna, přibližně stejné délky, typu G.652 o délce 21 169 m a G.657 o délce 20 088 m vychází příznivěji svými přenosovými parametry pro společný přenos vlákno typu G.657.

Pro optické vlákno typu G.652 byla z měřených vláken naměřena nejvyšší chybovost přenosu, ta dosahovala průměrně $3{,}15 \cdot 10^{-4}$, což odpovídá přibližně třem chybným bitům na deset tisíc přijatých bitů.

Nejlepšího poměru chybně přijatých bitů k celkově přijatým bitům bylo dosaženo pro optické vlákno typu G.653, kde bitová chybovost dosahovala průměrně hodnoty $1{,}39 \cdot 10^{-8}$. Tato hodnota bitové chybovosti je pro účely optické datové komunikace již přijatelná, odpovídá přibližně čtrnácti chybně přijatým bitům na miliardu přijatých bitů. Pro vlákno G.653 byla zaznamenána nejnižší chybovost v rámci celého měření, $7{,}52 \cdot 10^{-9}$, s ohledem na délku vlákna.

Vlákno typu G.657 dosahovalo řádově stejných hodnot bitové chybovosti jako vlákno G.653. Během měření přenosových parametrů byla naměřena průměrná bitová chybovost $5{,}88 \cdot 10^{-8}$, maximální hodnota bitové chybovosti se pak pohybovala v řádu 10^{-7}.

Pomocí optického spektrálního analyzátoru OSA20 společnosti Yenista (nyní EXFO) bylo zobrazeno spektrum společného přenosu časového a datových signálů v DWDM kanálech. Na obrázku 7.3 je znázorněno spektrum DWDM signálů s vyznačením jejich centrální vlnové délky odpovídající rozdělení DWDM kanálů s odstupem 100 GHz podle tabulky 6.1.



Obr. 7.3: Spektrum DWDM signálů

7.4 Přenos zesíleného společného signálu vybraných služeb

Hlavním sledovaným přenosovým parametrem pro datové signály byla bitová chybovost BER, dále byly pro datový signál 200 Gbit/s sledovány parametry chromatické disperze, skupinového zpoždění, optický odstup signálu od šumu a Q-faktor. Pro časový signál byla vyhodnocována doba časového zpoždění signálu při přenosu optickým vláknem. Sledované přenosové parametry a časová zpoždění v závislosti na zesílení optického zesilovače byla vyhodnocena jednotlivými systémy a zaznamenána do tabulky naměřených hodnot 7.5.

Tab. 7.5: Naměřené přenosové parametry pro zesílený společný signál

	Data 10 Gbit/s	**Data 200 Gbit/s**					**Přenos času**
EDFA	**BER**	**DGD**	**CD**	**OSNR**	**Q**	**BER**	**Zpoždění**
[dBm]	[Bit-ratio]	[ps]	[ps/nm]	[dB]	[dB]	[Bit-ratio]	[ns]
10	1,36E-09	2	1684	18,2	7,3	9,88E-03	495 986,118
11	7,06E-11	2	1686	18,7	7,3	9,69E-03	495 986,734
12	1,41E-12	2	1685	18,8	7,4	8,86E-03	495 987,628
13	3,49E-13	2	1687	19,1	7,5	8,34E-03	495 988,699
14	3,31E-13	2	1687	19,5	7,6	7,92E-03	495 989,771
15	<1,00E-14	3	1687	20,2	7,7	9,52E-03	495 992,371

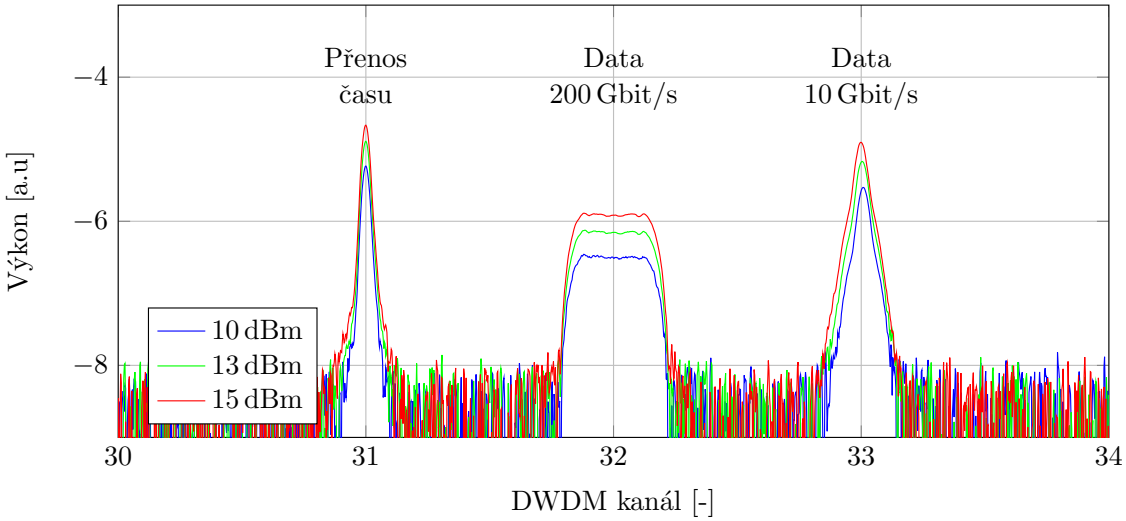
Průměrná naměřená bitová chybovost v případě datového signálu 10 Gbit/s vykazovala jasnou úměru s postupným zesilováním společného signálu optickým zesilovačem. Nejnižší bitové chybovosti dosahoval datový signál pro zesílení optickým zesilovačem 15 dBm, kdy bitová chybovost dosahovala minimální hraniční hodnoty 1,00E-14, kterou ještě dokáže měřící platforma FTB-1 detekovat.

Pro datový signál 200 Gbit/s byly naměřeny řádově poměrně stejné hodnoty bitové chybovosti. Průměrné naměřené hodnoty bitové chybovosti se v závislosti na zesílení optickým zesilovačem lišily jen velmi nevýrazně v hodnotě mantisy, řádově byly stejné. Podobně hodnoty skupinového zpoždění a chromatické disperze se nijak výrazně nelišily v závislosti na zesílení společného signálu. Závislost na zesílení společného signálu se projevila u průměrných naměřených hodnot optického odstupu signálu od šumu a Q-faktoru, které spolu úzce souvisí. Z naměřených průměrných hodnot vidět zkvalitnění těchto přenosových parametrů v závislosti na zesílení společného signálu.

Při přenosu časového signálu byly sledovány přesné časové hodnoty zpoždění a odchylky po sobě jdoucích hodnot zpoždění. Jak ukazuje tabulka naměřených hodnot, odchylka od průměrné hodnoty se vždy pohybovala v jednotkách nanosekund.

Průměrná hodnota zpoždění, pro všechny hodnoty zesílení, odpovídala přibližně teoretickému předpokladu pro dobu šíření optického signálu danou trasou. Rostoucí trend v hodnotách časového zpoždění je způsoben postupným zahřátím vlákna, při vyšší teplotě optického vlákna dochází k prodloužení doby šíření optického signálu optickým vláknem.

Na obrázku 7.4 je zobrazeno spektrum společného přenosu časového a datových optických signálů s vyznačením odpovídajících DWDM kanálů pro tři různé hodnoty zesílení optickým výkonovým zesilovačem. Z grafu optického spektrálního analyzátoru je vidět zesílení jednotlivých optických signálů po průchodu optickým výkonovým zesilovačem.



Obr. 7.4: Spektrum zesíleného společného signálu vybraných služeb

Z naměřených přenosových parametrů a především z grafu optického spektrálního analyzátoru lze odvodit, že při společném přenosu časového a datových optických signálů nedošlo k vzájemnému ovlivnění přenosových kanálů, které by nějak výrazně ovlivnilo stabilitu některé z přenášených fotonických služeb. Postupným zesilováním výkonu optického zesilovače docházelo ke zlepšení některých přenosových parametrů pro datové signály. Především šlo o bitovou chybovost pro datový signál 10 Gbit/s a hodnotu odstupu optického signálu od šumu a Q-faktor pro datový signál 200 Gbit/s.

7.5 Přenos společného signálů se změnou kanálů

Hlavním sledovaným přenosovým parametrem pro datové signály byla bitová chybovost BER, dále byly pro datové signály 100 a 200 Gbit/s sledovány parametry chromatické disperze, skupinového zpoždění, optický odstup signálu od šumu a Q-faktor. Pro časový signál byla vyhodnocována doba časového zpoždění signálu při přenosu optickým vláknem.

Tab. 7.6: Naměřené přenosové parametry pro datový signál 200 Gbit/s

	Data 10 Gbit/s	**Data 200Gbit/s**					**Přenos času**
DWDM	**BER**	**DGD**	**CD**	**OSNR**	**Q-faktor**	**BER**	**Zpoždění**
kanál	[Bit-ratio]	[ps]	[ps/nm]	[dB]	[dB]	[Bit-ratio]	[ns]
32	<1,00E-14	2	1660	19,0	7,5	8,77E-03	495 874,341
33	8,38E-09	1	1685	18,3	6,7	1,52E-02	495 882,946
34	**Senzorický signál**						

Naměřené hodnoty přenosových parametrů pro první a druhou část měření jsou zaznamenány v tabulce 7.6. Z naměřených hodnot bitové chybovosti pro datové signály vychází pro přenos těchto signálů lépe přenosový DWDM kanál 32, na kterém bylo při společném přenosu vybraných fotonických služeb dosaženo nižší bitové chybovosti pro oba datové signály. Pro datový signál 200 Gbit/s byly také naměřeny lepší hodnoty ostatních přenosových parametrů pro tento kanál.

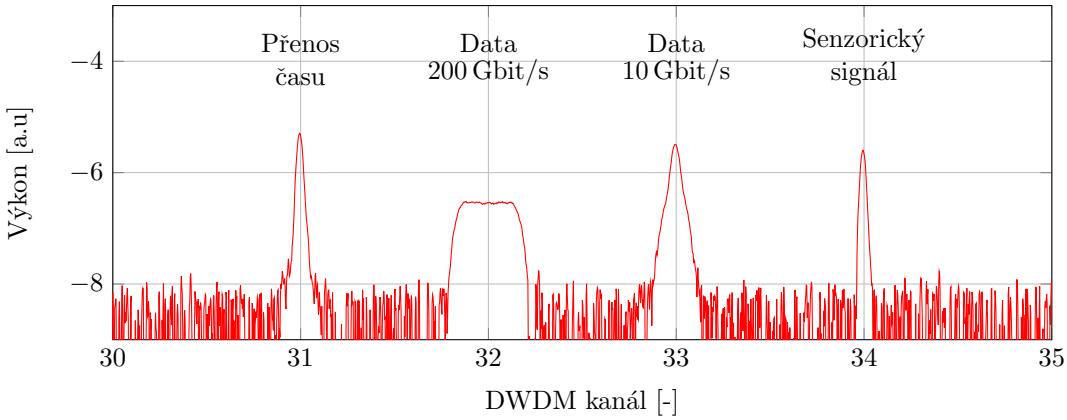
Přenosový DWDM kanál 33, sousedící s kanálem 34, na kterém byla provozována služba senzorického signálu, byl pravděpodobně náchylnější na vznik bitové chybovosti při společném, vedlejším, přenosu datového a senzorického signálu.

Průměrná hodnota časového zpoždění, pro první i druhou část měření, odpovídala přibližně teoretickému předpokladu pro dobu šíření optického signálu danou trasou, s odchylkou v řádech nanosekund. Vzájemný rozdíl naměřených hodnot, pro první a druhou část měření, je způsoben především časovým odstupem jednotlivých měření, mezi kterými se vlákno postupně, vlivem okolní teploty a vysokovýkonných pulsů, zahřálo a změnilo své přenosové charakteristiky. Změna přenosových kanálů pro datové signály neměla žádný vliv na dobu zpoždění časového optického signálu.

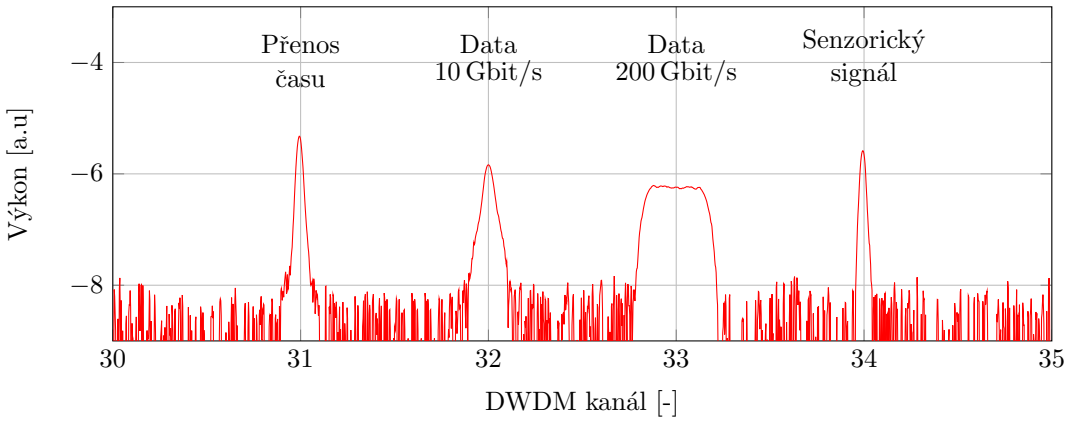
Optické spektrum pro první část měření je zobrazeno na obrázku 7.5, kde je vidět rozdělení přenášených fotonických služeb do přenosových DWDM kanálů. Podobně je tomu pro obrázek 7.6, kde pro druhou část měření byly prohozeny přenosové kanály pro datové signály.

Na obou obrázcích optického spektra je také vidět, že nedošlo k žádnému výraznému vzájemnému ovlivnění jednotlivých přenášených fotonických služeb.

Třetí a čtvrtá část měření dopadla obdobně jako první a druhá část. Naměřené hodnoty pro třetí a čtvrtou část měření jsou zaznamenány v tabulce 7.7.



Obr. 7.5: Spektrum společného přenosu se změnou kanálů 1. část



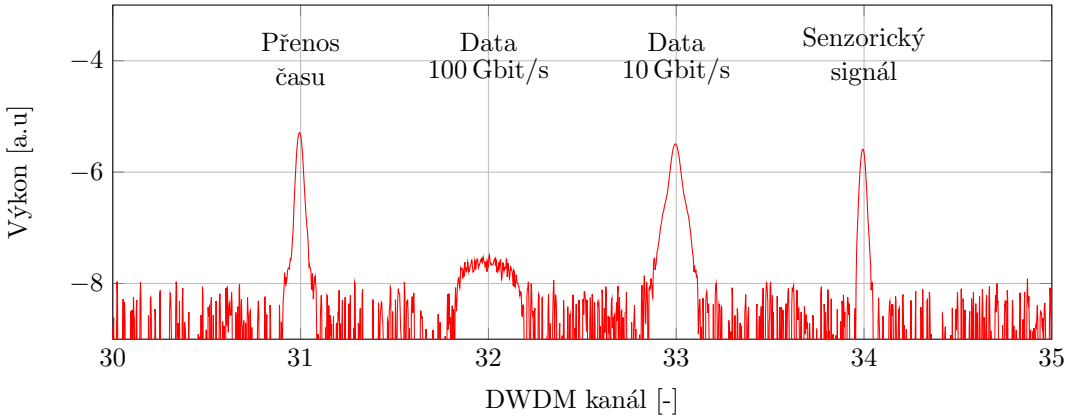
Obr. 7.6: Spektrum společného přenosu se změnou kanálů 2. část

Tab. 7.7: Naměřené přenosové parametry pro datový signál 100 Gbit/s

	Data 10 Gbit/s	**Data 100Gbit/s**					**Přenos času**
DWDM	**BER**	**DGD**	**CD**	**OSNR**	**Q-faktor**	**BER**	**Zpoždění**
kanál	[Bit-ratio]	[ps]	[ps/nm]	[dB]	[dB]	[Bit-ratio]	[ns]
32	<1,00E-14	4	1667	13,7	8,0	5,69E-03	495 875,688
33	5,00E-09	4	1693	12,1	6,0	2,25E-02	495 881,235
34	**Senzorický signál**						

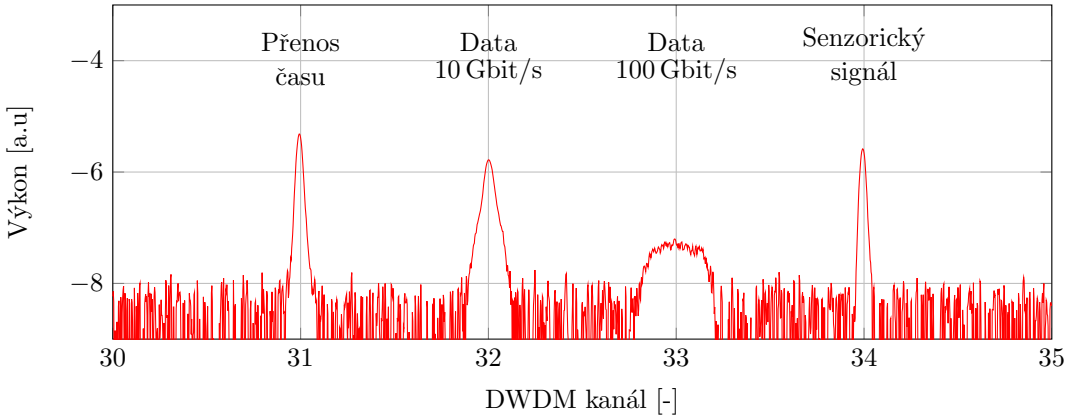
Z průměrných naměřených hodnot bitové chybovosti pro datové signály vychází pro společný přenos těchto signálů lépe přenosový DWDM kanál 32, na kterém bylo při společném přenosu vybraných fotonických funkcí dosaženo nižší bitové chybovosti pro oba datové signály. Podobně jako v předchozí části měření byly pro datový signál 100 Gbit/s naměřeny lepší hodnoty ostatních přenosových parametrů pro tento kanál, oproti hodnotám pro kanál 33.

Průměrná hodnota časového zpoždění odpovídala přibližně teoretickému předpokladu, pro obě části měření. Odchylky doby zpoždění od průměrné hodnoty doby zpoždění se pohybovaly v řádech nanosekund. Na vzájemném rozdílu naměřených hodnot časového zpoždění se opět projevil vliv změny teploty optického vlákna. Změna přenosových kanálů pro datové signály neměla žádný vliv na dobu zpoždění časového optického signálu.



Obr. 7.7: Spektrum společného přenosu se změnou kanálů 3. část

Optické spektrum pro třetí část měření je zobrazeno na obrázku 7.7 a pro čtvrtou část měření, po výměně přenosových kanálů, na obrázku 7.8. Oba spektrální grafy zobrazují rozdělení přenášených fotonických služeb do přenosových DWDM kanálů. Z grafů získaných optickým spektrálním analyzátorem je vidět, že nedošlo k žádnému výraznému vzájemnému ovlivnění jednotlivých přenášených fotonických služeb.



Obr. 7.8: Spektrum společného přenosu se změnou kanálů 4. část

7.6 Odstup signálů od senzorického signálu

Poslední praktické měření mělo za úkol ověřit vliv odstupu vybraných fotonických služeb od senzorického signálu, na jejich přenosové parametry. Sledovány byly především hodnoty bitové chybovosti pro datové signály a kolísání doby zpoždění časového signálu. Dále bylo sledováno, zda nedochází ke vzniku nelineárních jevů a vzájemnému rušení signálů přenášených služeb.

Naměřené průměrné hodnoty bitové chybovosti pro datové signály a doba zpoždění pro časový signál byly zaznamenány do tabulky 7.8.

Tab. 7.8: Naměřené přenosové parametry pro odstup od senzorického signálu

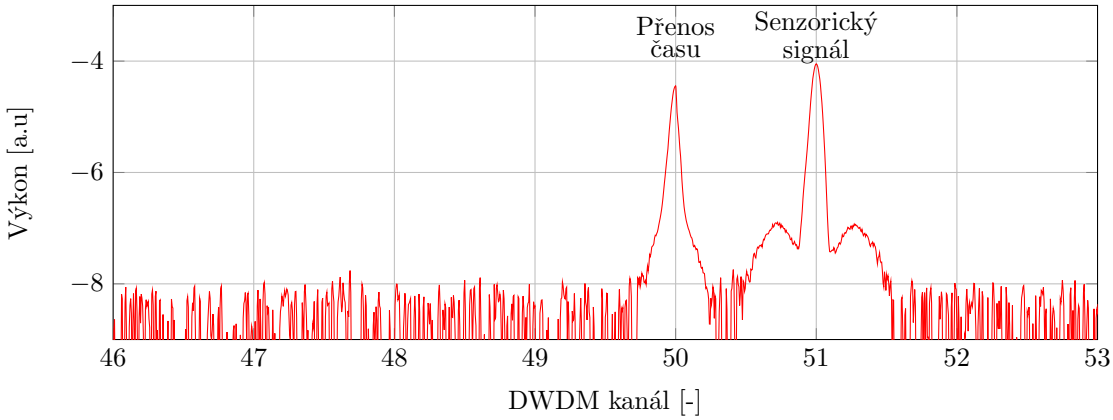
		Data 200 Gbit/s	**Data 100 Gbit/s**	**Data 10 Gbit/s**	**Přenos času**
DWDM	**Odstup**	**BER**	**BER**	**BER**	**Zpoždění**
kanál	**[GHz]**	[Bit-ratio]	[Bit-ratio]	[Bit-ratio]	[ns]
50	**50**	2,78E-05	4,53E-05	X	X
49	**100**	2,77E-05	4,55E-05	<1,00E-14	247 485,240
48	**150**	2,77E-05	4,51E-05	<1,00E-14	247 485,226
47	**200**	2,76E-05	4,50E-05	<1,00E-14	247 485,268

Z naměřených průměrných hodnot bitové chybovosti pro datové signály 200 a 100 Gbit/s lze vidět, že se jejich průměrná bitová chybovost s postupným odstupem snižovala. Změna průměrné hodnoty bitové chybovosti není příliš výrazná, měnila se jen mantisa, nikoliv například řád chybovosti. Přesto jde o hodnoty stále v limitu dle ITU-T G.975.1. Doporučení ITU-T G.975.1 stanovuje limit chybovosti BER v řádu 10^{-3} pro který lze využít dopředné opravné algoritmy FEC (Forward Error Correction). Aplikací opravných algoritmů je přenosový systém schopen opravit chybná data a dosáhnout tak nižší chybovosti v řádech 10^{-9}–10^{-15}, ovšem za cenu vyšší latence a redundance dat až 25 %, způsobené především přídavným kódováním, dekódováním a prokládáním v závislosti na použitých metodách [32].

Pro datový signál 10 Gbit/s byly naměřeny průměrné hodnoty bitové chybovosti řádově nižší než 10^{-14}, což byly zároveň hraniční hodnota měřící platformy EXFO FTB-1, kterou lze ještě rozpoznat. Hodnotu průměrné bitové chybovosti pro odstup 50 GHz od senzorického signálu se nepodařilo změřit z důvodu blíže nespecifikované chyby při začátku přenosu, která neumožnila vyhodnotit přenosové parametry. Příčinou mohl být nedostatečný odstup přenosového kanálů, který mohl být ovlivněn vedlejším přenosovým kanálem, kde byl provozován vysokovýkonný senzorický signál.

Služba přenosu času při ověřování vlivu odstupu přenosových kanálů od senzorického signálu dopadla podobně jako datový signál 10 Gbit/s. Průměrné hodnoty zpoždění časového signálu se podařilo bezproblémově naměřit pro hodnoty odstupu 100, 150, 200 GHz. Průměrná hodnota zpoždění časového signálu byla 247 485 ns, což přibližně odpovídá teoretickému předpokladu pro zvolenou délku vlákna, 50 km. Odchylky zpoždění od průměrné hodnoty zpoždění signálu se pohybovaly v řádech desetin nanosekund.

Pro hodnotu odstupu 50 GHz nebyl přípravek pro přenos přesného času schopný vyhodnotit dobu zpoždění s přenášeného signálu. Příčinou mohl být opět vysokovýkonný senzorický signál, provozovaný na sousedním přenosovém kanále.



Obr. 7.9: Odstup 50 GHz časového signálu od senzorického signálu

Na obrázku 7.9 jsou zachyceny optické signály pro přenos času a senzorický signál s kanálovým rozestupem 50 GHz, optický spektrální analyzátor tak dokázal časový signál ve svém skenovaném spektru rozpoznat, ale přípravek pro přenos přesného času nebyl schopný vyhodnotit dobu zpoždění.

Na senzorickém signálu je také patrný vznik Brillouinova rozptylu, který je jedním z nelineárních jevů doprovázejícím úzkospektrální a vysokovýkonné optické signály, například právě signály pro optické senzorické systémy. Ke vzniku Brillouinova rozptylu dochází při nadkritické hodnotě vstupního výkonu do optického vlákna. Ke vzniku Brillouinova rozptylu mohla přispět také omezená šířka přenosového DWDM kanálu spolu s generovanými vysokovýkonnými pulsy.

Naměřené hodnoty ostatních přenosových parametrů pro datové signály 100 a 200 Gbit/s jsou umístěny v příloze B. V příloze B jsou také umístěny grafické výstupy z optického spektrálního analyzátoru pro kanálové odstupy vybraných fotonickcýh služeb od senzorického signálu.

8 Závěr

Cílem diplomové práce bylo rozebrat problematiku přenosu více fotonických služeb jedním vláknem při využití technologie DWDM a provést návrh a realizaci testovacího zapojení pro vybrané typy služeb. Těchto cílů bylo dosaženo nejdříve v teoretické části, kde byla popsána problematika přenosu optického signálu jednovidovým optickým vláknem a lineární a nelineární jevy doprovázející tento přenos. Dále byla popsána problematika multiplexních systémů a modulačních formátů pro optické signály a jejich vhodné využití v optických přenosových sítích. Popsány byly také vhodné laserové zdroje optického záření a detektory optického záření. V poslední kapitole teoretické části byly popsány jednotlivé fotonické služby a typy přenosů vybraných fotonických služeb v jednom optickém vlákně.

Praktické měření bylo rozděleno na dvě části, v první části proběhlo ověřovací měření, které potvrdilo funkčnost navrženého měření pro jednotlivé služby. V druhé části pak probíhala měření společného přenosu více služeb v jednom optickém vlákně. Byl ověřen možný přenos datových signálů a časového signálu ve společném optickém vlákně, testována byla vlákna G.652, G.653 a G.657, s DWDM kanálovými odstupy 100 GHz. Dále byla provedena měření ověřující vliv zesílení výkonového zesilovače na společný signál pro vybrané fotonické služby. V dalším měření byl ověřen vliv volby DWDM přenosového kanálů pro datové signály vůči ostatním společně přenášeným fotonickým službám. V posledním měření byl ověřen vliv odstupu přenosového DWDM kanálů od vysokovýkonného senzorického signálu.

Při přenosu časového signálu byly sledovány přesné časové hodnoty zpozdění, především odchylky po sobě jdoucích hodnot zpozdění tohoto signálu. Pro vyhodnocení přenosových parametrů při přenosu datových signálů byly sledovány parametry koeficientu chromatické disperze, diferenciálního skupinového zpoždění, optický odstup signálu od šumu, Q-faktor a především bitová chybovost.

Z naměřených maximálních a minimálních hodnot přenosových parametrů je vidět, že se hodnoty během celého měření nijak významně neměnily a nekolísaly do extrémů. Z výsledků měření lze také odvodit že, pro odstup DWDM přenosových kanálů 100 GHz, nedocházelo k výraznému vzájemnému ovlivnění jednotlivých přenášených fotonických služeb jedním optickým vláknem, které by narušilo úspěšný přenos těchto služeb.

Jinak tomu bylo v případě odstupu DWDM přenosových kanálů 50 GHz od přenosového kanálu přenášejícího vysokovýkonný senzorický signál. Pro přenos časového signálu a datového signálu 10 Gbit/s byl odstup 50 GHz od vedlejšího přenosového kanálu, přenášejícího senzorický signál, pravděpodobně nedostatečný. Zdrojová zařízení pro časový a datový signál nebyla schopna vyhodnotit přenosové parametry takto provozovaných služeb.

Vliv na společný přenos vybraných fotonických služeb s odstupem přenosových kanálů 50 GHz mohl mít vznik nelineárních jevů, konkrétně vznik Brillouinova rozptylu. Ke kterému došlo pravděpodobně navázáním vysokovýkonného senzorického signálu do velmi úzkého přenosového DWDM kanálu. V případě časového a datového signálu 10 Gbit/s došlo pravděpodobně k ovlivnění vedlejšího kanálu, který nebyl schopný přenášet požadované služby a nebylo tak možné tyto služby měřit a provozovat.

Všechna měření probíhala v laboratorních, poměrně stabilních podmínkách.

Na základě provedených měření je vhodné pro úspěšný společný přenos těchto vybraných fotonických služeb volit minimální doporučený odstup 100 GHz jednotlivých DWDM přenosových kanálů.

Literatura

[1] CESNET E-infrastruktura, 2013 *100 Gb/s a fotonické služby po společném vlákně* [online]. Praha: CESNET. Dostupné také z: https://bit.ly/2znBcKM

[2] FILKA, Miloslav, 2017. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání.* Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol. ISBN 978-808-6785-141.

[3] DIPOL, 2012. *Optické standardy* [online]. 1 [cit. 2018-10-24]. Dostupné z: https://www.dipolnet.cz/opticke_standardy_bib327.html

[4] NAVRÁTIL, Jiří a Pavel LORENZ, 2015. *Elektrotechnika: Optoelektronika* [online]. Olomouc: MŠMT [cit. 2019-5-15]. ISBN MSMT-7521/2015-40. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/ucebnice

[5] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH, 2015. *Optoelektrotechnika* [online]. 1 [cit. 2018-10-24]. Brno: MŠMT. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: https://publi.cz/books/185/Cover.html

[6] *G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, 2016. Version 9. Geneva, Switzerland: ITU-T, 28 s. Dostupné také z: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/en

[7] STAVDAS, Alexandros A, 2010. *Core and metro networks.* 1st ed. Chichester, U.K.: Wiley. ISBN 978-047-0512-746.

[8] *G.653: Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable*, 2010. Version 7. Geneva, Switzerland: ITU-T, 22 s. Dostupné také z: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.653/en

[9] SENIOR, John M a M. Yousif JAMRO, 2009. *Optical fiber communications: Principles and practice.* 3rd ed. New York: Financial Times/Prentice Hall. ISBN 978-013-0326-812.

[10] *G.655: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*, 2009. Version 5. Geneva, Switzerland: ITU-T, 26 s. Dostupné také z: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655/en

[11] *G.657: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*, 2016. Version 5. Geneva, Switzerland: ITU-T, 24 s. Dostupné také z: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657/en

[12] SCHRÖFEL, Josef a Karel NOVOTNÝ, 1986. *Optické vlnovody*. Praha: SNTL/ALFA. ISBN DT 6213728.

[13] AGRAWAL, Govind P., 2001. *Nonlinear fiber optics*. 3rd ed. San Diego: Academic Press. ISBN 9780080479743.

[14] PRAT, Josep, 2003. *First and Second Order PMD Characterization* [online]. Piscataway: IEEE, s. 4 [cit. 2018-10-29]. ISBN 90-365-1990-X. Dostupné z: `http://photonics-benelux.org/proc03/s03p125.pdf`

[15] ŠIFTA, Radim, 2011. *DWDM v přístupových sítích*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

[16] ŽÁČEK, Martin, 2008. *Nelineární charakter optického prostředí*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Přinosil.

[17] STÍSKAL, Radoslav, 2006. *Vplyv disperzie v optických vláknach G.652-655 na prenášaný signál pri prenosových rýchlostiach vyšších ako 2,5 Gbit/s*. Žilina: Diplomová práce. Žilinská univerzita v Žilině. Vedoucí práce Ing. Branislav Lihosit.

[18] GRENAR, David, 2016. *Řešení nasazení DWDM systémů na 100G a 400G*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

[19] *G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*, 2013. Version 2. Geneva, Switzerland: ITU-T, 12s. Dostupné také z: `https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2/en`

[20] *G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, 2012. Version 2. Geneva, Switzerland: ITU-T, 16s. Dostupné také z: `https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en`

[21] JAKOUBEK, Petr, 2015. *Využití polarizačního multiplexu v optických přístupových sítích*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Radim Šifta.

[22] YAO, Steven, Bo ZHANG, Alan WILLNER a Junfeng JIANG, 2007. *All-optic scheme for automatic polarization division demultiplexing* [online]. Optical Society of America, 8 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: `https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-15-12-7407&id=138168`

[23] AL-AMRI, Mohammad D., Mohamed M. EL-GOMATI a Suhail M. ZUBAIRY, 2016. *Optical Communication: Its History and Recent Progress: Optics in our*

time [online]. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg [cit. 2018-11-07]. ISBN 978-331-9319-025. Dostupné z: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-31903-2

[24] ČERTÍK, Filip, 2011. *Modulačné techniky v optickom prenosovom médiu* [online]. Bratislava: Posterus [cit. 2018-11-07] ISSN 1338-0087. Studenská práce. Slovenská Technická Univerzita. Vedoucí práce Doc. Ing Rastislav Róka, PhD. Dostupné z: http://www.posterus.sk/?p=11599&output=pdf.

[25] LUCKI, Michal, *Nové trendy v elektronických komunikacích: Optické sytémy a sítě* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: https://publi.cz/books/241/Cover.html

[26] AGRAWAL, Govind P., 2002. *Fiber-optic communication systems*. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience. ISBN 04-712-1571-6.

[27] NIST, *Time and Frequency from A to Z*. Physical Measurement Laboratory [online]. 2016 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/popular-links/time-frequency-z

[28] DVOŘÁK, Milan, 2014. *Optické senzory* [online]. [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/clanky/optik_ten/opticke_senzory.pdf

[29] HEDEKVIST, Per Olof a Sven-Christian EBENHAG, 2012. *Time and Frequency Transfer in Optical Fibers*. Recent Progress in Optical Fiber Research [online]. InTech, [cit. 2018-11-26]. DOI: 10.5772/27345. ISBN 978-953-307-823-6. Dostupné z: https://bit.ly/307Ok2z

[30] ŚLIWCZYŃSKI, Łukasz, Przemysław KREHLIK a Marcin LIPIŃSKI, 2010. *Optical fibers in time and frequency transfer*. Measurement Science and Technology [online]. 21(7) [cit. 2018-11-27]. DOI: 10.1088/0957-0233/21/7/075302. ISSN 0957-0233. Dostupné z: http://stacks.iop.org/0957-0233/21/i=7/a=075302?key=crossref.5090936e280242cad1473de767396c14

[31] DOSTAL, Jiff a Vladimir SMOTLACHA, 2013. *Atomic clock comparison over optical network*. In: 2013 IEEE 20th International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS) [online]. IEEE, 2013, s. 682-685 [cit. 2018-12-14]. DOI: 10.1109/ICECS.2013.6815506. ISBN 978-1-4799-2452-3. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/document/6815506/

[32] *G.975.1: Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems*, 2005. Version 1 Geneva, Switzerland: ITU-T, 58 s. Dostupné také z: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.975.1/en

Seznam symbolů, veličin a zkratek

A	útlum
D	koeficient chromatické disperze
T	teplota
α	koeficient tepelné roztažnosti
c	rychlost světla
$clock_X$	hodiny
f_n	kmitočet kanálu
l	délka trasy
λ	vlnová délka
n	libovolné kladné nebo záporné číslo, včetně nuly
n_g	skupinový index lomu
τ	časové zpoždění
$\Delta\tau$	změna časového zpoždění
τ_{XY}	časové zpoždění optického vlákna ve směru
TIC_X	čítač časových intervalů
APD	**A**valanche **P**hoto**D**iode – Lavinová fotodioda
BER	**B**it **E**rror **R**ate – Bitová chybovost
CD	**C**hromatic **D**ispersion – Chromatická disperze
CESNET	**C**zech **E**ducation and **S**cientific **NET**work – národní počítačová síť určená pro vědu, výzkum, vývoj a vzdělávání
CWDM	**C**oarse **W**avelenght **D**ivision **M**ultiplex – Hrubý vlnový multiplex
DCF	**D**ispersion **C**ompesation **F**ibre – Disperzi kompenzující vlákno
DFB	**D**istributed **F**eed**B**ack – Dioda s rozprostřenou zpětnou vazbou
DGD	**D**iferential **G**roup **D**elay – Rozdílové skupinové zpoždění
DP-QPSK	**D**ual-**P**olarization **Q**uadrature **P**hase **S**hift **K**eying – Kvadraturní klíčování fázovým posuvem s dvojí polarizací
DSF	**D**ispersion-**S**hifted **F**ibre – Vlákno s posunutou disperzí
DWDM	**D**ense **W**avelenght **D**ivision **M**ultiplex – Hustý vlnový multiplex
EDFA	**E**rbium-**D**oped **F**iber **A**mplifier – Vláknový zesilovač dopovaný erbiem
FDM	**F**requency **D**ivision **M**ultiplex – Frekvenční multiplex
FEC	**F**orward **E**rror **C**orrection – Dopředný samoopravný kód
FP	**F**abry-**P**erot – Laserová dioda typu Fabry-Perot
FPGA	**F**ield **P**rogrammable **G**ate **A**rray – Programovatelné hradlové pole
FWM	**F**our **W**ave **M**ixing – Čtyřvlnné směšování
ISI	**I**nter **S**ymbol **I**nterference – Mezisysmbolová interference
ITU-T	**I**nternational **T**elecommunication **U**nion – Mezinárodní

	telekomunikační organizace, standardizace telekomunikací
LD	**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation **D**iode – Zesilování světla stimulovanou emisí záření
LED	**L**ight **E**mitting **D**iode – Světlo emitující dioda
NRZ	**N**on-**R**eturn-**t**o-**Z**ero – Bez návratu k nule
NZDF	**N**on **Z**ero **D**ispesion **F**ibre – Vlákno s nenulovou hodnotou chromatické disperze
NZ-DSF	**N**on-**Z**ero **D**isperzion **S**hifted **F**ibre – Vlákno s posunutou nenulovou hodnotou chromatické disperze
OEO	**O**ptical-**E**lectrical-**O**ptical – Opticko-elektrický převod
OOK	**O**n-**O**ff **K**eying – Amplitudová digitální modulace
OSNR	**O**ptical **S**ignal to **N**oise **R**atio – Optický odstup signálu od šumu
OTDR	**O**ptical **T**ime **D**omain **R**eflectometry – Metoda optické reflektometrie v časové oblasti, měření zpětného rozptylu
PDM	**P**olarization **D**ivision **M**ultiplex – Polarizační multiplex
PMD	**P**olarization **M**ode **D**ispersion – Polarizační vidová disperze
PPS	**P**ulse **P**er **S**econd – Počet pulsů za sekundu
RZ	**R**eturn-**t**o-**Z**ero – Návrat k nule
SBS	**S**timulated **B**rillouin **S**cattering – Stimulovaný Brillouinův rozptyl
SDH	**S**ynchronous **D**igital **H**ierarchy – Synchronní digitální hierarchie
SDM	**S**pace **D**ivision **M**ultiplex – Prostorový multiplex
SFP	**S**mall **F**orm-factor **P**luggable – Optický vložný transceiver
SMF	**S**ingle **M**ode **F**iber – Jednovidové optické vlákno
SNR	**S**ignal to **N**oise **R**atio – Odstup signálu od šumu
SPM	**S**elf-**P**hase **M**odulation – Vlastní fázová modulace
SRS	**S**timulated **R**aman **S**cattering – Stimulovaný Ramanův rozptyl
TAI	**T**emps **A**tomique **I**nternational – Mezinárodní atomový čas
TDM	**T**ime **D**ivision **M**ultiplex – Časový multiplex
TIC	**T**ime **I**nterval **C**ounter – Čítač časových intervalů
TWSTFT	**T**wo-**W**ay **S**atellite **T**ime and **F**requency **T**ransfer – Obou směrný satelitní přenos času a frekvence
UTC	**U**niversal **T**ime **C**oordinated – Koordinovaný světový čas
VCSEL	**V**ertical-**C**avity **S**urface-**E**mitting **L**aser – Plošně vyzařující laser
WDM	**W**avelenght **D**ivision **M**ultiplex – Vlnový multiplex
WWDM	**W**ide **W**avelenght **D**ivision **M**ultiplex – Široký vlnový multiplex
XPM	**C**ross-**P**hase **M**odulation – Křížová fázová modulace
ZWP	**Z**ero **W**ater **P**eak – Oblast nulového water peaku

Seznam příloh

A Přehled parametrů ITU-T G.65x **79**

B Přenosové parametry pro odstup signálů **83**

A Přehled parametrů ITU-T G.65x

Tab. A.1: Přehled základních parametrů standardů G.657

Typ vlákna		**G.657.A**	**G.657.B**	
Vlastnost	Detail	Hodnota		Jednotka
Průměr vidového pole	Vlnová délka	1310		nm
	Rozsah hodnot	8,6–9,2		µm
	Tolerance	± 0,4		µm
Průměr pláště	Tolerance	125,0		µm
		± 0,7		µm
Nesoustřednost jádra	Maximálně	0,5		µm
Nekruhovost pláště	Maximálně	1,0		%
Mezní vlnová délka	Maximálně	1260		nm
Měrný útlum α max. hodnoty	1310–1625 nm	0,40		dB/km
	1338 ±3 nm	0,40		dB/km
	1530–1565	0,30		dB/km
Pevnost v tahu	Minimálně	0,69		GPa
Koeficient chromatické disperze	λ_{0min}	1300	1250	nm
	λ_{0max}	1324	1350	nm
	S_{0min}	0,073	-	ps/nm^2×km
	S_{0max}	0,092	0,11	ps/nm^2×km
Koeficient polarizační vidové disperze PMD	Výrobních délek	20	20	cables
	Q	0,01	0,01	%
	Max PMD$_Q$	0,20	0,50	ps/$\sqrt{km}$

Tab. A.2: Přehled základních parametrů standardů G.652

Typ vlákna		**G.652.A**	**G.652.B**	**G.652.C**	**G.652.D**	
Vlastnost	Detail	Hodnota				Jednotka
Průměr vidového pole	Vlnová délka	1310			1310	nm
	Rozsah hodnot	8,6–9,5			8,6–9,2	µm
	Tolerance	± 0,6			± 0,4	µm
Průměr pláště	Tolerance	125,0			125,0	µm
		± 1			± 0,7	µm
Nesoustřednost jádra	Maximálně	0,6				µm
Nekruhovost pláště	Maximálně	1,0				%
Mezní vlnová délka	Maximálně	1260				nm
Měrný útlum α max. hodnoty	1310 nm	0,5	0,4	0,4	0,4	dB/km
	1550 nm	0,4	0,35	0,3	0,3	dB/km
	1625 nm	-	0,4	0,4	0,4	dB/km
Útlum makroohyby	Poloměr ohybu	30				mm
	Počet ohybů	100				–
	$\lambda = 1625$ nm	0,1				dB
Pevnost v tahu	Minimálně	0,69				GPa
Koeficient chromatické disperze	λ_{0min}	1300				nm
	λ_{0max}	1324				nm
	S_{0max}	0,092				ps/nm^2×km
Koeficient polarizační vidové disperze PMD	M	20	20	20	20	cables
	Q	0,01	0,01	0,01	0,01	%
	Max PMD$_Q$	0,5	0,2	0,5	0,2	ps/$\sqrt{km}$

Tab. A.3: Přehled základních parametrů standardů G.653

Typ vlákna		**G.653.A**	**G.653.B**	
Vlastnost	Detail	Hodnota		Jednotka
Průměr vidového pole	Vlnová délka	1550		nm
	Rozsah hodnot	7,8–8,5		µm
	Tolerance	± 0,8–0,6		µm
Průměr pláště	Tolerance	125,0		µm
		± 1		µm
Nesoustřednost jádra	Maximálně	0,8	0,6	µm
Nekruhovost pláště	Maximálně	2,0	1,0	%
Mezní vlnová délka	Maximálně	1270		nm
Měrný útlum α max. hodnoty	1550 nm	0,35		dB/km
Útlum makroohyby	Poloměr ohybu	30	30	mm
	Počet ohybů	100	100	-
	$\lambda = 1625$ nm	0,5	0,1	dB
Pevnost v tahu	Minimálně	0,69		GPa
Koeficient chromatické disperze	λ_{min}–λ_{max}	1525–1575	-	nm
	D_{max}	3,5	-	ps/nm^2×km
	λ_{0min}–λ_{0max}	1500–1600	-	nm
	S_{0max}	0,085	-	ps/nm^2×km
	$D_{min}(\lambda)$: 1460–1525 nm	-	$0{,}085\cdot(\lambda-1525)-3{,}5$	ps/nm^2×km
	$D_{min}(\lambda)$: 1525–1625 nm	-	$\frac{3{,}75}{75}\cdot(\lambda-1600)$	ps/nm^2×km
	$D_{max}(\lambda)$: 1460-1525 nm	-	$\frac{3{,}75}{75}\cdot(\lambda-1500)$	ps/nm^2×km
	$D_{max}(\lambda)$: 1525–1625 nm	-	$0{,}085\cdot(\lambda-1575)+3{,}5$	ps/nm^2×km
Koeficient polarizační vidové disperze PMD	Výrobních délek	20	20	cables
	Q	0,01	0,01	%
	Max PMD$_Q$	0,5	0,2	ps/$\sqrt{km}$

Tab. A.4: Přehled základních parametrů standardů G.655

Typ vlákna		**G.655.A**	**G.655.B**	**G.655.C**	
Vlastnost	Detail	Hodnota			Jednotka
Průměr vidového pole	Vlnová délka	1550			nm
	Rozsah hodnot	8–11			µm
	Tolerance	± 0,7			µm
Průměr pláště	Tolerance	125,0			µm
		± 1			µm
Nesoustřednost jádra	Maximálně	0,8			µm
Nekruhovost pláště	Maximálně	2,0			%
Mezní vlnová délka	Maximálně	1450			nm
Měrný útlum α	1550 nm	0,35	0,35	0,35	dB/km
max. hodnoty	1625 nm	-	0,4	0,4	dB/km
Útlum makroohyby	Poloměr ohybu	30			mm
	Počet ohybů	100			-
	$\lambda = 1550\,\mathrm{nm}$	0,5			dB
Pevnost v tahu	Minimálně	0,69			GPa
Koeficient chromatické disperze	λ_{min} a λ_{max}	1530–1565	TBD	TBD	nm
	D_{min}	0,1	TBD	TBD	ps/nm^2×km
	D_{max}	6,0	TBD	TBD	ps/nm^2×km
	Sn	+ −	+ −	+ −	-
Koeficient polarizační vidové disperze PMD	Výrobních délek	20	20	20	cables
	Q	0,01	0,01	0,01	%
	Max PMD$_Q$	0,5	0,5	0,2	ps/$\sqrt{km}$

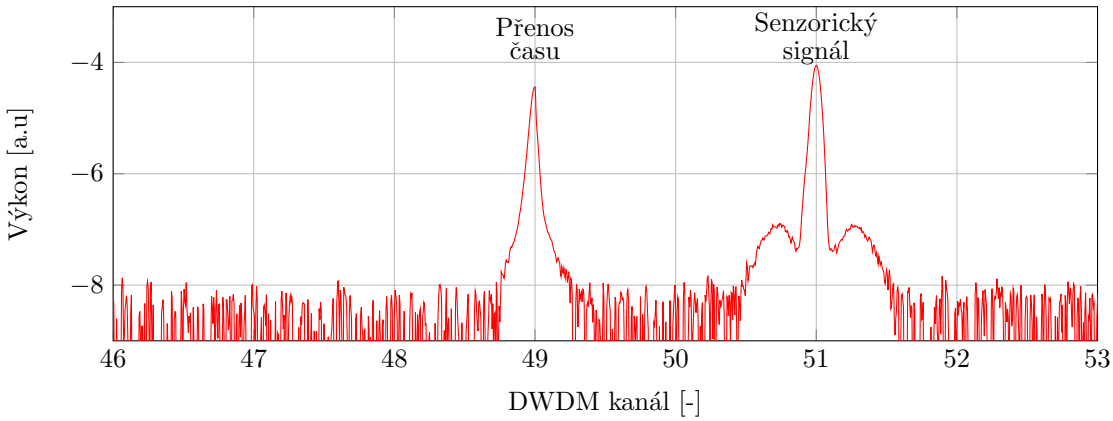
B Přenosové parametry pro odstup signálů

Tab. B.1: Přenosové parametry pro odstup datového signálu 200 Gbit/s

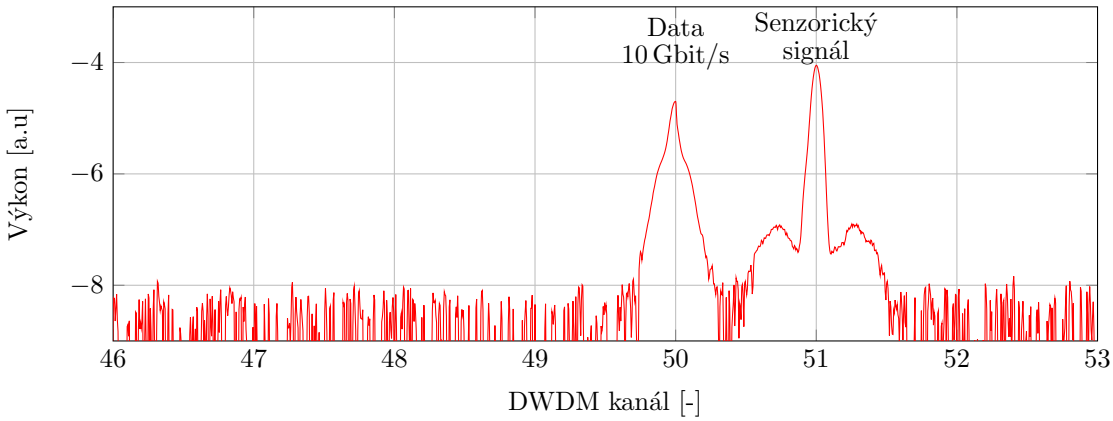
Odstup	**GHz**	**50**	**100**	**150**	**200**
CD	ps/nm	6	7	10	9
DGD	ps	831	828	826	823
OSNR	dB	21,8	21,6	22,0	22,0
Q	dB	8,9	8,9	8,9	8,9
PRE-BER	Bit-ratio	2,55E-03	2,42E-03	2,75E-03	2,81E-03
POST-BER	Bit-ratio	2,78E-05	2,77E-05	2,77E-05	2,76E-05

Tab. B.2: Přenosové parametry pro odstup datového signálu 100 Gbit/s

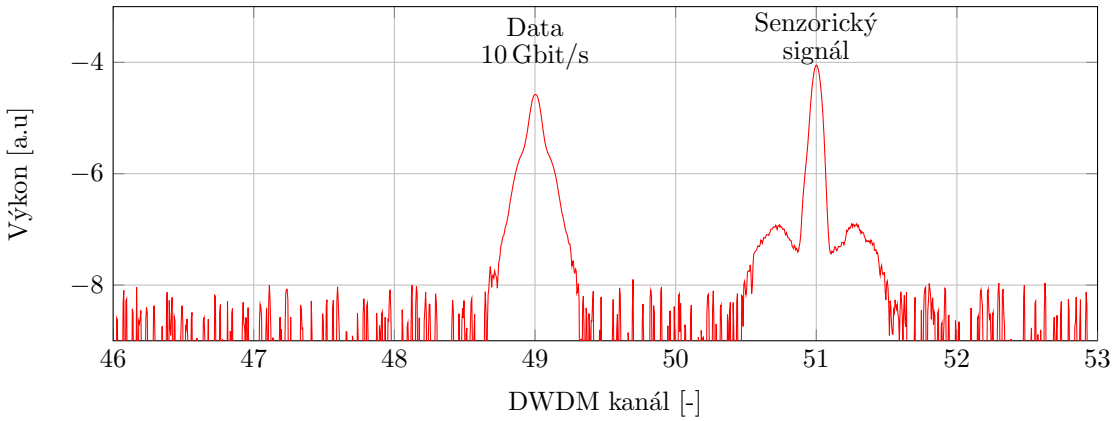
Odstup	**GHz**	**50**	**100**	**150**	**200**
CD	ps/nm	9	8	9	8
DGD	ps	823	824	822	822
OSNR	dB	19,5	19,8	19,9	20,4
Q	dB	12,3	12,3	12,3	12,3
PRE-BER	Bit-ratio	1,87E-05	1,70E-05	1,79E-05	1,82E-05
POST-BER	Bit-ratio	4,53E-05	4,55E-05	4,52E-05	4,50E-05



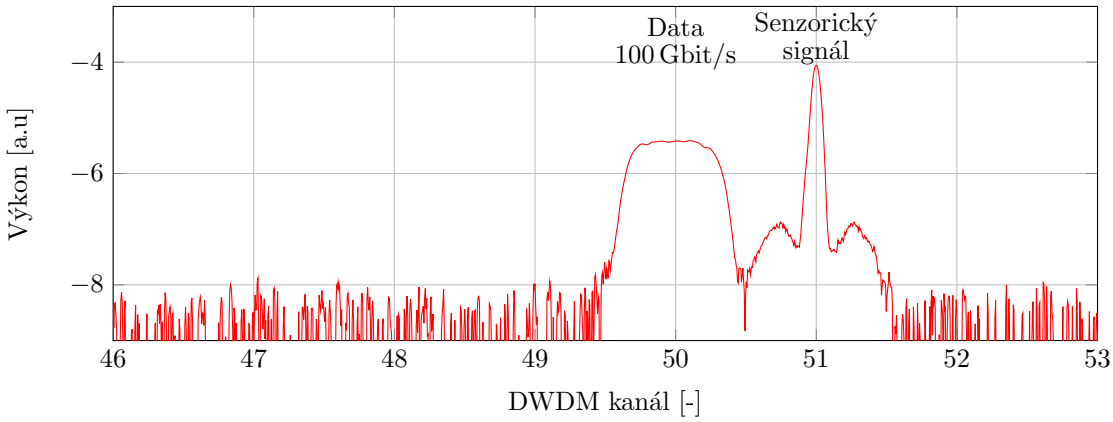
Obr. B.1: Odstup 100 GHz časového signálu od senzorického signálu



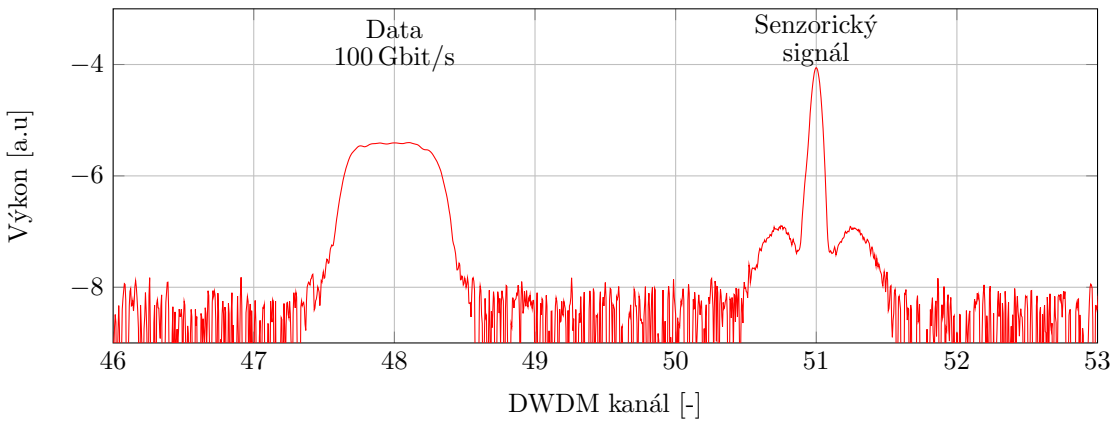
Obr. B.2: Odstup 50 GHz datového signálu 10 Gbit/s od senzorického signálu



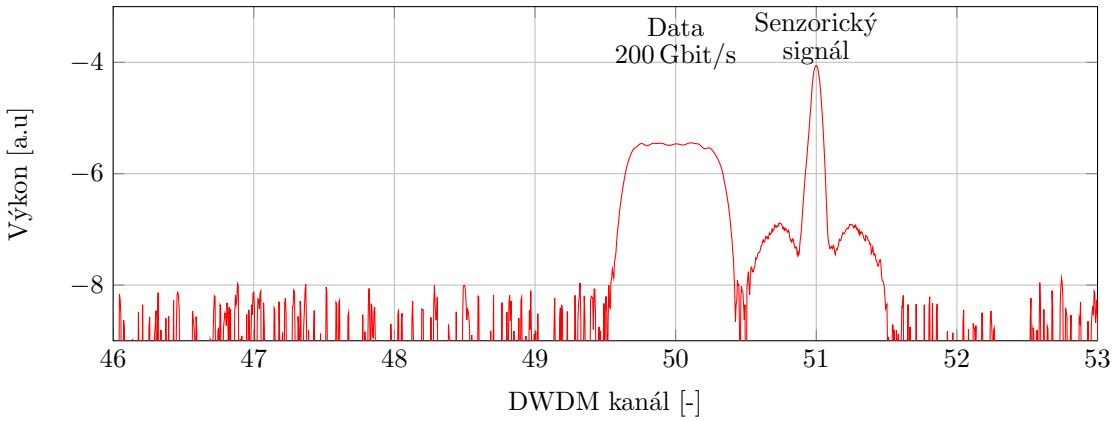
Obr. B.3: Odstup 100 GHz datového signálu 10 Gbit/s od senzorického signálu



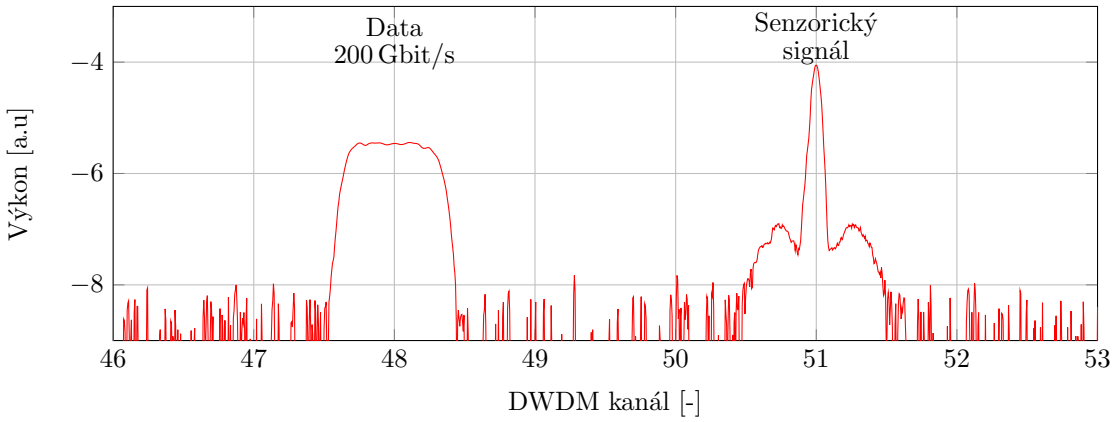
Obr. B.4: Odstup 50 GHz datového signálu 100 Gbit/s od senzorického signálu



Obr. B.5: Odstup 150 GHz datového signálu 100 Gbit/s od senzorického signálu



Obr. B.6: Odstup 50 GHz datového signálu 200 Gbit/s od senzorického signálu



Obr. B.7: Odstup 150 GHz datového signálu 200 Gbit/s od senzorického signálu