

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

PARAMETRY SÍTÍ FTTX

DIZERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

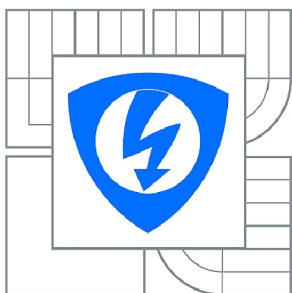
Ing. PETR MÜNSTER

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## **PARAMETRY SÍTÍ FTTX**

PARAMETERS OF FTTX NETWORKS

**DIZERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. PETR MÜNSTER

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2014



## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá parametry sítí FTTx a možnostmi zvýšení limitních hodnot některých vybraných parametrů. První a druhá kapitola popisují nezbytnou teorii pro pochopení výstupů v dalších částech práce. V praktické části byla nejdříve provedena analýza stavu optických vláken v České republice. Na jejich základě byl posouzen vliv polarizační vidové disperze na optické přístupové sítě. Další část práce se pak věnovala aktivním optickým sítím a posouzením způsobů jejich realizace v závislosti na cenách realizace a provozu. Hlavními limitujícími parametry současných pasivních optických sítí jsou šířka pásma a vložný útlum trasy. Pro zvýšení šířky pásma byl navržen a realizován systém založený na optickém časovém multiplexu s šířkou pásma 1,28 Tbit/s. Použitím polarizačního multiplexu je navíc systém více tolerantní k disperzím. V poslední části práce byl ověřen, měřením a simulací, princip vzdáleného zesílení. Na základě získaných výsledků byla v simulačním programu Optisystem navržena síť NG-PON2 s funkčním vzdáleným zesílením a ziskem větším než 10 dB.

## KLÍČOVÁ SLOVA

FTTx, AON, PON, OTDM, vzdálené zesilování

## ABSTRACT

This thesis examines parameters of FTTx networks and possibilities for increases in limit values of some selected parameters. The first and second chapters describe the necessary theory for understanding the outcomes presented in the rest part of the work. In the practical part of this thesis, analysis of the condition of the optical fibers in the Czech Republic is provided. Based on the results, the impact of the polarization mode dispersion on optical access networks was assessed. The next part of this thesis is focused on the active optical networks design, depending on the cost of implementation and operating costs. The main limiting parameters of the current passive optical networks are bandwidth and insertion loss of the optical distribution network. To increase the bandwidth a system based on optical time-division multiplexing with a bandwidth of 1.28 Tbit/s has been designed and created. By using polarization division multiplexing technique the system is also more tolerant to dispersions. In the last part of this thesis, a remote amplification system was verified by measurement and simulation. Based on the obtained results, a NG-PON2 network with a functional remote amplification system with a gain of more than 10 dB has been designed in the OptiSystem software.

## KEYWORDS

FTTx, AON, PON, OTDM, remote pumping

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou doktorskou práci na téma „Parametry sítě FTTx“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího doktorské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené doktorské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně: .....

.....  
(Podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych rád poděkoval svému školiteli prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. za podnětné připomínky, vedení a radu v oblasti zkoumaného tématu a za vstřícné jednání během mého doktorského studia.

Také děkuji sdružení CESNET za technickou podporu a konzultace při řešení disertační práce.

V poslední řadě děkuji svým kolegům za vytvoření přátelského a podnětného prostředí i odborné připomínky.

Chci poděkovat i manželce a rodině za podporu v průběhu celého studia a za trpělivost, kterou se mnou mají.

V Brně: .....

.....  
(Podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering  
and Communication  
Brno University of Technology  
Purkynova 118, CZ-61200 Brno  
Czech Republic  
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

## ACKNOWLEDGEMENT

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

Brno .....

.....

(author's signature)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# Obsah

---

Úvod	1
<b>1 Optická vlákna a přenos po optickém vlákně</b>	<b>1</b>
1.1 Optické vlákno	1
1.1.1 Mnohovidové optické vlákno s konstantním indexem lomu a skokovou změnou indexu lomu pláště	1
1.1.2 Mnohovidové optické vlákno s proměnným indexem lomu v příčném řezu vláknem (gradientní)	1
1.1.3 Jednovidové optické vlákno s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště	2
1.1.4 Speciální typy optických vláken	3
1.2 Princip přenosu	6
1.2.1 Index lomu	6
1.2.2 Numerická apertura	6
1.2.3 Šíření světla	6
1.2.4 Princip šíření	8
1.3 Lineární optické prostředí a lineární jevy	10
1.3.1 Lineární optické prostředí	10
1.3.2 Útlum optického vlákna	10
1.3.3 Disperze v jednovidových optických vláknech	13
1.4 Nelineární optické prostředí a nelineární jevy	17
1.4.1 Nelineární optické prostředí	17
1.4.2 Jevy druhého řádu	18
1.4.3 Jevy třetího řádu	18
1.4.4 Nelineární optické rozptyly	19
<b>2 Optické přístupové sítě</b>	<b>21</b>
2.1 Multiplexační techniky	22
2.1.1 Vlnový multiplex	22
2.1.2 Časový multiplex	24
2.2 Architektura sítí FTTx	25
2.3 Standardy pasivních optických sítí	26
2.3.1 APON	27
2.3.2 BPON	27
2.3.3 GPON	27
2.3.4 GEAPON	27
2.3.5 10-GEAPON	28
2.3.6 NG-PON1	28
2.3.7 TWDM-PON	28

<b>3</b>	<b>Výsledky práce</b>	<b>30</b>
3.1	Posouzení stavu optických vláken v ČR . . . . .	30
3.1.1	Trasa 1 . . . . .	31
3.1.2	Trasa 2 . . . . .	33
3.1.3	Trasa 3 . . . . .	35
3.1.4	Trasa 4 . . . . .	37
3.1.5	Trasa 5 . . . . .	39
3.1.6	Trasa 6 . . . . .	41
3.1.7	Trasa 7 . . . . .	43
3.1.8	Trasa 8 . . . . .	45
3.2	Posouzení vlivu PMD disperze na sítě FTTx . . . . .	47
3.2.1	Simulační model . . . . .	47
3.2.2	Zhodnocení . . . . .	49
3.3	Porovnání plně optických switchů a media- -konvertorů pro využití v sítích FTTx . . . . .	50
3.3.1	Použitá zařízení . . . . .	51
3.3.2	Měření příkonu jednotlivých zařízení . . . . .	52
3.3.3	Srovnání nákladů pro jednotlivé varianty sítí . . . . .	53
3.3.4	Zhodnocení . . . . .	56
3.4	Návrh a realizace vysokorychlostního optického přenosu založeném na OTDM . . . . .	57
3.4.1	Generování PC-OTDM RZ a NRZ signálu . . . . .	58
3.4.2	Charakteristika PC-OTDM signálu . . . . .	62
3.4.3	Zkušební 1,19Tbit přenos PDM-NRZ-OOK signálu . . . . .	64
3.4.4	Zhodnocení . . . . .	69
3.5	Vzdálené zesilování pro WDM síť a pasivní optickou síť NG-PON2 . . . . .	70
3.5.1	Ověření funkčnosti vzdáleného zesilování . . . . .	75
3.5.2	Návrh obousměrně zesilovaného systému pro NG-PON2 . . . . .	85
3.5.3	Zhodnocení . . . . .	91
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>92</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>99</b>

# Seznam obrázků

---

1.1	Průřezy vláken: mnohovidové optické vlákno (vlevo), gradientní optické vlákno (uprostřed), jednovidové optické vlákno (vpravo) [33]. . . . .	2
1.2	Princip navázání optického paprsku do vlákna. . . . .	7
1.3	Lom světelného paprsku. . . . .	7
1.4	Odraz světelného paprsku. . . . .	7
1.5	Jednoosý dvojlomový krystal. . . . .	8
1.6	Princip šíření optického paprsku jako elektromagnetické vlnění [50]. . . . .	9
1.7	Závislost útlumu na vlnové délce se zobrazením absorpčních ztrát. . . . .	11
1.8	Vlákno se sníženými $OH^-$ ionty: Závislost útlumu na vlnové délce se zobrazením absorpčních ztrát [58]. . . . .	12
1.9	Zobrazení rozptylů vznikajících ve vlákne. . . . .	13
1.10	Závislost útlumu na vlnové délce pro různé poloměry ohybu [58]. . . . .	14
2.1	Rozdělení optických přístupových sítí podle typu spojení. . . . .	21
2.2	Zjednodušené schéma principu WDM přenosu. . . . .	23
2.3	Zjednodušená schémata principů ETDM (nahore) a OTDM (dole). $E_1-E_n$ značí elektrické signály, $O_1-O_n$ značí optické signály. . . . .	24
2.4	Rozdělení optických přístupových sítí podle místa ukončení optického vlákna. . . . .	26
2.5	Vývoj standardů PON [46]. . . . .	26
2.6	Koexistenční schéma NG-PON2 s dalšími technologiemi. WDM značí vlnové multiplexování, KE představuje koexistenční element, OS je optický rozbočovač. . . . .	29
2.7	Zobrazení rozsahů vlnových délek jednotlivých standardů. . . . .	29
3.1	OTDR průběh trasy č. 1. . . . .	32
3.2	Spektrální profil vlákna. . . . .	32
3.3	OTDR průběh trasy 2 pro vlnovou délku 1 310 nm. . . . .	34
3.4	Spektrální profil vlákna. . . . .	34
3.5	OTDR průběh trasy 3 pro vlnovou délku 1 310 nm. . . . .	36
3.6	Spektrální profil vlákna. . . . .	36
3.7	OTDR průběh trasy 4 pro vlnovou délku 1 310 nm. . . . .	38
3.8	Spektrální profil vlákna. . . . .	38
3.9	OTDR průběh trasy 5 pro vlnovou délku 1 310 nm. . . . .	40
3.10	Spektrální profil vlákna. . . . .	40
3.11	OTDR průběh trasy 6 pro vlnovou délku 1 310 nm. . . . .	42
3.12	Spektrální profil vlákna. . . . .	42
3.13	OTDR průběh trasy 7 pro vlnovou délku 1 310 nm. . . . .	44
3.14	Spektrální profil vlákna. . . . .	44
3.15	OTDR průběh trasy 8 pro vlnovou délku 1 310 nm. . . . .	46
3.16	Spektrální profil vlákna. . . . .	46
3.17	Závislost PMD limitu na délce vlákna pro PMD koeficienty 5 a 10 ps. . . . .	48

3.18	Schéma zapojení modelu NG-PON s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s. . . .	48
3.19	Závislost dělicího poměru na maximální délce vlákna pro daný model. . .	49
3.20	Model sítě s použitím media-konvertorů. . . . .	50
3.21	Model s použitím optických switchů. . . . .	50
3.22	Media-konvertor TP-Link MC 111CS. . . . .	51
3.23	Switch Edge-Core ES3528M-SFP. . . . .	52
3.24	Spotřeba media-konvertorů TP-Link. . . . .	53
3.25	Spotřeba jednotlivých switchů při plném zatížení a bez zatížení. . . . .	54
3.26	Princip činnosti generování PC-OTDM signálu založeného na CPR. . . .	58
3.27	Experimentální zapojení PC-OTDM generátoru signálu. . . . .	59
3.28	Autokorelační křivka 640 Gbit/s fázově nekorelačního OTDM RZ-OOK signálu v L-pásmu. . . . .	60
3.29	Filtreační funkce pro převod PC-OTDM RZ na PC-OTDM NRZ. . . . .	60
3.30	Spektra 640Gbit fázově nekorelačního OTDM signálu v L-pásmu, 640Gbit PC-OTDM RZ a PC-OTDM NRZ signály. . . . .	61
3.31	Diagramy oka optického vzorkování pro 640Gbit PC-OTDM RZ (vlevo) a NRZ (vpravo) signály. . . . .	61
3.32	Tolerance k přísné filtraci 640Gbit PC-OTDM NRZ. Vliv obdélníkového filtrování na BER. . . . .	62
3.33	Tolerance k přísné filtraci 640Gbit PC-OTDM NRZ. Závislost power penalty NRZ signálu s BER $3,8 \cdot 10^{-3}$ pro obdélníkovou filtraci s různou šířkou pásma na optimální případ RZ. Vložený obrázek: spektrum 640Gbit/s PC-OTDM NRZ signálu za obdélníkovým filtrem s šířkou pásma 800 GHz. . .	63
3.34	Optické spektrum fázově nekorelovaného 640Gbit signálu s obdélníkovou filtrací 700 GHz. . . . .	63
3.35	Tolerance k disperzi 640Gbit PC-OTDM NRZ signálu v porovnání s 640Gbit RZ signálem. . . . .	64
3.36	a) Experimentální zapojení pro zkušební přenos 1.19Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signálu. PC: polarizační kontrolér, WDM: rozbočovač/slučovač pro vlnový multiplex (v C i L-pásmu), HNLF: vysoce nelineární optické vlákno, POL: polarizér, CW: kontinuální vlna, OBF: optický filtr typu pásmová propust, Pol. Mux: polarizační multiplexor, WSS: vlnově selektivní switch, Pol. Demux: polarizační demultiplexor, CRU: jednotka obnovy hodinového signálu, NOLM: nelineární smyčkové zrcadlo. b) Trasa instalovaného vlákna. . . . .	65
3.37	Optická spektra 1,28Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signálu s 10GHz řídicím signálem v kanálu před (nahore) a po (dole) přenosu testovací trasou. . . . .	66
3.38	Extrahovaný 10GHz řídicí signál. . . . .	67
3.39	640Gbit PC-OTDM NRZ-OOK signál v 640Gbit přijímači. . . . .	67
3.40	Opticky navzorkovaný diagram oka 640Gbit PC-OTDM NRZ-OOK signálu po přenosu testovací trasou. . . . .	68
3.41	Měření BER 640Gbit PC-OTDM NRZ-OOK signálu zpět-zpět, 640Gbit PC-OTDM NRZ-OOK signálu po přenosu trasou, a 1,28Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signálu po přenosu trasou (TM a TE). . . . .	68
3.42	Měření BER pro všech 128 přítoků (TM a TE) při přijímacím výkonu -37 dBm. . . . .	69



3.43	Schéma energetických hladin erbia. . . . .	72
3.44	Schéma zapojení erbiem dopovaného vláknového zesilovače. . . . .	74
3.45	Závislost výstupního výkonu na velikosti vstupního výkonu při použití čerpací laserové diody o výkonu 25 mW a erbiového vlákna o délce 4 m. . . . .	76
3.46	Schéma zapojení pro ověření výstupního výkonu zesilovacího systému na vstupním výkonu užitečného signálu. Čerpací laserová dioda s vlnovou délkou 1 490 nm a výkonu 25 mW, délka EDF 4 m. . . . .	77
3.47	Schéma zapojení experimentálního měření jednosměrného systému s jednosměrným zesilováním. . . . .	77
3.48	Výstup OSA měřený na výstupu optického slučovače 2. . . . .	78
3.49	Výstup OSA měřený za optickým rozbočovačem 1:4. Červený průběh značí ODN s EDF vláknem a černý průběh je bez EDF vlákna. . . . .	79
3.50	Výstup OSA měřený za optickým rozbočovačem 1:256. Červený průběh značí ODN s EDF vláknem a černý průběh je bez EDF vlákna. . . . .	79
3.51	Schéma zapojení jednosměrného systému s jednosměrným zesilováním v prostředí Optisystem. . . . .	80
3.52	Zobrazení spekter datového a čerpacího signálu za optickým slučovačem (vlevo) a na konci ODN (vpravo). . . . .	80
3.53	Schéma zapojení experimentálního měření obousměrného systému s jednosměrným zesilováním. . . . .	81
3.54	Výstup OSA pro sestupný směr (měřený bod 2). . . . .	81
3.55	Výstup OSA pro vzestupný směr (měřený bod 1). . . . .	82
3.56	Schéma zapojení experimentálního měření obousměrného systému s obousměrným zesilováním. . . . .	82
3.57	Výstup OSA měřený za optickým rozbočovačem 2. . . . .	83
3.58	Výstup OSA měřený za optickým rozbočovačem 1:256. Červený průběh značí ODN s EDF vláknem a černý průběh je bez EDF vlákna. . . . .	83
3.59	Výstup OSA zobrazující signál z laseru Koheras Adjustik před navázání do optického slučovače 1:256. . . . .	84
3.60	Výstup OSA zobrazující signál z laseru Koheras Adjustik před navázání do optického slučovače 1:256. . . . .	84
3.61	Obecné schéma zapojení obousměrného systému pro zesilování NG-PON2. . . . .	85
3.62	Schéma zapojení obousměrného systému pro zesilování NG-PON2 v prostředí Optisystem. . . . .	86
3.63	Zobrazení spekter datového a čerpacího signálu za optickým izolátorem (vlevo) a po 20 km optického vlákna (vpravo). . . . .	87
3.64	Zobrazení spekter datového a čerpacího signálu před EDF (vlevo) a za EDF (vpravo). . . . .	87
3.65	Zobrazení spekter datového a čerpacího signálu za optickým rozbočovačem (vlevo) a za filtrem (vpravo). . . . .	88
3.66	Oko rozhodnutí pro sestupný signál. . . . .	88
3.67	Zobrazení spektra datového signálu pro vzestupný směr za optickým izolátorem (vlevo) a po 20 km optického vlákna (vpravo). . . . .	89
3.68	Výstup z OSA pro vzestupný směr za optickým slučovačem (vlevo) a před EDF vláknem (vpravo). . . . .	90
3.69	Výstup z OSA pro vzestupný směr za optickým slučovačem (vlevo) a před EDF vláknem (vpravo). . . . .	90

# Úvod

---

Optické a opticko-metalické sítě, vzhledem ke svým ekonomickým a technologickým výhodám, nachází ve výstavbě přístupových sítí stále větší uplatnění – zvláště v hustě osídlených oblastech.

Přestože se zdá být současná přenosová rychlost 10 Gbit/s plně dostačující pro optické přístupové sítě, během několika let bude vše jinak. Kromě stále rostoucích požadavků na větší šířku pásma pro data a video, se postupně začínají objevovat i nové služby, které spadají pod kategorii chytrá domácnost. Předpokladem chytré domácnosti je napojení většiny systémů v domácnosti do veřejné sítě. Všechny systémy, počínaje topením, přes obsluhu oken až po kontrolu lednice, bude možné řídit a kontrolovat vzdáleně.

S rozvojem nových služeb a rostoucími požadavky uživatelů se objevují nové trendy výstavby optických sítí, kde je snaha dostat optické vlákno co nejbližší k objektu uživatele. Takové sítě se jeví do budoucna jako nejvíce perspektivní. Na rozdíl od metalických vedení je zde limitace dána především aktivními prvky na jednotlivých koncích vlákna, namísto limitací samotného přenosového vedení.

Tato práce se zabývá parametry optických přístupových sítí, jejich limity, omezeními a možnou kompenzací vybraných parametrů. Vzhledem k obsáhlosti dané problematiky bylo nutné představit v práci alespoň základy z teorie optických vláken a principu přenosu po optickém vlákně. Tyto základy jsou představeny v první kapitole a jsou nezbytně nutné pro pochopení dalších kapitol.

Druhá kapitola je zaměřena na optické přístupové sítě, jejich základní dělení a techniky přenosu dat. Dále jsou zde představeny multiplexační techniky, které se používají v optických přístupových sítích a jejich hlavní parametry. Jelikož je v posledních letech snaha o realizaci co nejefektivnějších sítí, jsou na závěr uvedeny standardy pasivních optických sítí. Díky tomu čtenář získá ucelenou představu o vývoji optických přístupových sítí.

Praktická část práce je rozdělena do pěti podkapitol, přičemž první podkapitola posuzuje aktuální stav optických vláken/kabelů v České republice. Na vzorku 8 tras bylo provedeno měření základních přenosových parametrů a provedeno jejich vyhodnocení. Vzorek zahrnuje trasy s délkami od 4 do 100 km a výsledky byly využity k posouzení vlivu jednotlivých parametrů na přenosové vlastnosti optických přenosových sítí. Jedním z důležitých parametrů, který limituje maximální dosah sítě a její šířku pásma, je polarizační vidová disperze. Tento lineární jev je teoreticky popsán a vysvětlen v první kapitole disertační práce. Měřením bylo zjištěno, že některá starší optická vlákna mohou dosahovat i hodnot řádově vyšších než jsou doporučené limitní hodnoty. Taková vlákna mohou v budoucnu představovat velký problém při nasazování systému s rychlostmi nad 10 Gbit/s. V praktické části je proto provedeno posouzení vlivu polarizační vidové disperze na optické přístupové sítě.

Dalším důležitým parametrem, který limituje aktuální optické přístupové sítě je maximální přenosová rychlost. Aktuální kombinace časového a vlnového multiplexu nabízí

dostatečnou šířku pásma pro několik dalších let. Metodou skládání časových kanálů s přenosovými rychlostmi 10 Gbit/s do více vlnových kanálů lze realizovat sítě s přenosovými rychlostmi desítek Gbit/s. Časový multiplex je zde vytvářen v elektrické oblasti. Realizace multiplexování v elektrické oblasti může do budoucna představovat problém, z důvodu limitace elektrických prvků, pro další nárůst přenosových rychlostí jednotlivých kanálů. V předposlední kapitole byl proto navržen a realizován systém založený na časovém optickém multiplexu s přenosovou rychlostí 1,19 Tbit/s. Systém navíc využíval obou ortogonálních složek světelné vlny, čímž bylo dosaženo lepších tolerancí k disperzím.

Posledním a aktuálně nejvíce limitujícím parametrem optických přístupových sítí je vložný útlum trasy. Ten limituje maximální dosah sítě a počet uživatelů, které je možné do sítě připojit. Každý prvek vnáší do přenosové trasy určitou hodnotu vložného útlumu, přičemž je nutné vždy zaručit, aby celková hodnota útlumu nepřekročila maximální útlumovou bilanci systému. Zvýšení hodnoty útlumové bilance lze realizovat: zvýšením výstupního výkonu vysílačů, použitím citlivějších fotodektektorů nebo použitím optických zesilovačů. První dvě možnosti se jeví jako nejsnáze realizovatelné, avšak při hlubším zkoumání zjistíme, že při vyšších vysílacích výkonech mohou na signály působit nelineární jevy a degradovat přenos. Citlivější fotodektektory pak vnáší do signálu více šumu a jsou finančně nákladnější. Použitím optických zesilovačů na trase lze vhodně kompenzovat ztráty výkonu na optických prvcích a překlenout tak větší vzdálenosti nebo zvýšit dělicí poměr. Pro pasivní optické sítě je toto řešení však nevhodné z důvodu nutnosti aktivního elektrického napájení na trase. V poslední části práce je představen systém vzdáleného zesilování, který umožňuje zesílení signálů na trase bez nutnosti aktivního elektrického napájení.

## 1.1 Optické vlákno

Zjednodušeně lze říci, že optické vlákno je přenosové médium tvořené buď speciálními skly nebo plasty a umožňující přenos informace mezi vysílačem a přijímačem. Na rozdíl od metalického vedení zde nenesou informaci elektrony, ale fotony.

Každé optické vlákno se skládá ze 4 částí – jádro o velikosti řádově jednotek až desítek  $\mu\text{m}$ , plášť, primární ochrana a sekundární ochrana. Světelný paprsek přenášený optickým vláknem je uvězněn uvnitř jádra vlákna díky principu totálního odrazu.

Podle principu šíření světelného paprsku rozlišujeme v telekomunikacích 3 základní typy optických vláken, přičemž jednotlivé typy mají i rozdílné parametry rozměrů. Tyto vláknové struktury šířícího se elektromagnetického pole pak můžeme popsat pomocí Maxwellových rovnic a odpovídajícími okrajovými podmínkami. Více informací lze nalézt například v literaturách [34], [33], [52], [53] nebo [54].

### 1.1.1 Mnohovidové optické vlákno s konstantním indexem lomu a skokovou změnou indexu lomu pláště

Jádro vlákna je tvořeno materiálem s konstantním indexem lomu, díky svým rozměrům je schopno přenášet více vidů pomocí odrazů, které se mění skokem (cik-cak) [22]. Pro buzení se převážně používají luminiscenční diody. U těchto vláken se útlum pohybuje v rozmezí 5–20 dB/km [33]. Kvůli velkému útlumu se tato vlákna nejvíce využívala pro komunikaci na krátké vzdálenosti (řádově jednotky km). Rozměry vlákna jsou zobrazeny na obr. 1.1 vlevo. Průměr jádra je  $D_j = 50\text{--}200 \mu\text{m}$  a průměr pláště je  $D_p = 120\text{--}300 \mu\text{m}$  [38].

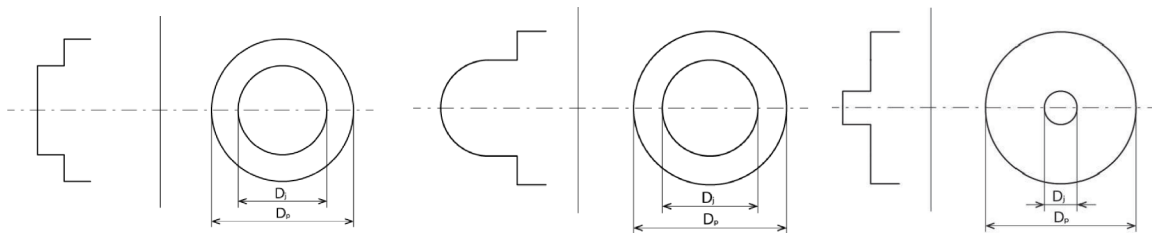
### 1.1.2 Mnohovidové optické vlákno s proměnným indexem lomu v příčném řezu vláknem (gradientní)

Jádro vlákna vykazuje postupnou změnu indexu lomu, díky čemuž se paprsky nešíří skokově, jako v předchozím případě, ale plynule. Index lomu jádra je nejvyšší ve středu a postupně klesá směrem k plášti [38]. Gradientního profilu je dosaženo použitím vrstvené struktury jádra, kdy každá vrstva obsahuje různé příměsi. Výsledkem je jádro s postupnou změnou indexu lomu, které minimalizuje vliv intermodální disperze. Přestože se jednotlivé vidy šíří různými dráhami, na výstupu vlákna se sejdou přibližně ve stejný čas. To je způsobeno tím, že paprsky šířící se podél osy jádra ve středu jádra (základní vid) urazí kratší dráhu, ale jejich fázová rychlost je menší (z důvodu většího indexu lomu ve středu jádra). Vlny šířící se dál od osy jádra urazí delší dráhu, ale jejich fázová rychlost je větší díky menšímu indexu lomu vrstev blíže k plášti jádra [54]. Z geometrického pohledu se

jednotlivé paprsky nešíří cik-cak způsobem, jak tomu bylo u vláken se skokovou změnou indexu lomu, ale sinusově, spirálovitě nebo axiálně. Útlum gradientních optických vláken se pohybuje v rozmezí 2,5–5 dB/km [33]. Díky menšímu útlumu se tato vlákna využívala více než klasická mnohovidová vlákna, avšak díky lepším parametrům a téměř shodným finančním nákladům se dnes nejvíce používají jednovidová optická vlákna. Rozměry vlákna jsou zobrazeny na obr. 1.1 uprostřed. Průměr jádra je  $D_j = 50 \mu\text{m}$  a průměr pláště je  $D_p = 125 \mu\text{m}$  [38].

### 1.1.3 Jednovidové optické vlákno s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště

Jak již název napovídá, světelná vlna se šíří pouze jediným světelným videm, nazývaným také základní vid. Pokud existuje v optickém vlákně pouze jedna prostorová struktura elektromagnetického pole. Schopnost vést pouze jediný vid téměř bez odrazů je dána rozměry vlákna (jádro je velmi malého průměru), případně velmi malým rozdílem indexů lomu jádra a pláště. Pro buzení se používají laserové diody, jejich útlum se pohybuje kolem 0,25 dB/km pro pásma C a L [33]. Díky velmi nízké hodnotě útlumu se tato vlákna nejvíce využívají pro komunikaci na dlouhé vzdálenosti. Rozměry vlákna jsou zobrazeny na obr. 1.1 vpravo. Průměr jádra je  $D_j = 7\text{--}9 \mu\text{m}$  a průměr pláště je  $D_p = 125 \mu\text{m}$  [38].



Obr. 1.1: Průřezy vláken: mnohovidové optické vlákno (vlevo), gradientní optické vlákno (uprostřed), jednovidové optické vlákno (vpravo) [33].

Světelný paprsek se šíří ve vlákně, pokud je splněna podmínka  $v < 2,405$ , kde  $v$  udává normalizovanou frekvenci danou rovnicí [23]:

$$v = \frac{2\pi D_j}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1.1)$$

kde  $\lambda_0$  je vlnová délka světelného paprsku ve vlákně,  $n_1$  je index lomu jádra a  $n_2$  je index lomu pláště.

Pokud je normalizovaná frekvence  $v$  větší, pak vlákno nefunguje jako jednovidové, protože přenáší více vidů. Detailnější popis šíření elektromagnetických vln v dielektrických vláknech, spolu s odvozením rovnice 1.1, lze nalézt například v literatuře [51].

V jednovidových vláknech neexistuje intermodální disperze (blíže v kapitole 1.3.3), díky čemuž jsou optické pulzy na konci vlákna jen mírně zkresleny. I proto jsou jednovidová vlákna vhodná pro přenos informací, bez nutnosti průběžného zesilování, na dlouhé vzdálenosti (cca 80–140 km). Mírné zkreslení výstupních optických pulzů způsobují další jevy, jako jsou chromatická disperze, polarizační vidová disperze, útlum způsobený disperzí a absorpcí skla a dalšími jevy [26].

	Charakteristika	Rozsah vlnových délek	Aplikace
G.652.A	Maximální PMD = $0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$ .	Oblasti 1310 a 1550 nm (O a C pásma).	Podpora aplikací jako jsou v G.957 a G.691 do STM-16, 10 Gbit/s do 40 km (Ethernet), a STM-256 pro G.693.
G.652.B	Specifikován maximální útlum na 1625 nm, max PMD = $0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$ .	1310, 1550 a 1625 nm (O a C+L pásma).	Podpora některých aplikací s vyššími přenosovými rychlostmi do STM-64 v G.691 a G.692 a některé STM-256 aplikace v G.693 a G.959.1.
G.652.C	Specifikován maximální útlum na 1383 nm ( $\leq$ než na 1310 nm), max PMD = $0,5 \text{ ps}/\sqrt{km}$ .	Od O po C pásma.	Podobné jako u G.652.A, ale tento standard umožňuje přenos v části rozsahu rozšířených vlnových délek od 1360 do 1530 nm. Vhodné pro CWDM systémy.
G.652.D	Specifikován maximální útlum od 1310 do 1625 nm, specifikován maximální útlum od 1383 nm ( $\leq$ než na 1310 nm), max PMD = $0,2 \text{ ps}/\sqrt{km}$ .	Širokopásmové pokrytí (od O po L pásma).	Podobné jako u G.652.B, ale tento standard umožňuje přenos v části rozsahu rozšířených vlnových délek od 1360 do 1530 nm. Vhodné pro CWDM systémy.

Tab. 1.1: Standard G.652: Charakteristika jednojádrových optických vláken [3].

Multiplexačními technikami lze přenášet pomocí jednoho optického vlákna více kanálů současně. Přenosové rychlosti pak mohou dosáhnout řádově jednotky až desítky Tbit/s. Nejběžnější multiplexace budou popsány v kapitole 2.1.

### 1.1.4 Speciální typy optických vláken

Kromě základních typů telekomunikačních vláken uvedených výše, existují ještě další typy vláken [17], [51].

- **Polarizaci zachovávající optická vlákna** – v některých aplikacích, jako jsou např. vláknové interferometry, vláknové lasery, vláknové senzory, externí vláknové modulátory nebo koherentní přenosy, je nezbytné zachovat konstantní polarizaci světla v optických vláknech. Kromě toho, ve všech optických vláknech, ve větší nebo menší míře, útlum závisí na polarizaci a zhoršuje podmínky šíření v optických vláknech. V PM (Polarization Maintenance) vláknech, kde dvojlom byl úmyslně vytvořen, se stav polarizace nemění chaoticky. Odlišné optické osy způsobují, že náhodné změny kolísání hustoty a dočasné změny optických os se staly zanedbatelnými a jsou zakryty hlavním efektem – záměrně vytvořeným dvojlomem.

	Charakteristika	Rozsah vlnových délek	Aplikace
G.657.A	Při poloměru ohybu 15 mm a 10 otočkách maximální útlum 0,25 dB na 1 550 nm a 1 dB na 1 625 nm.	Širokopásmové pokrytí (od O po L pásmo).	Optimalizace pro instalaci s ohledem na makro ohyby a útlum, ostatní parametry shodné s G.652.D.
G.657.B	Při poloměru ohybu 15 mm a 10 otočkách maximální útlum 0,03 dB na 1 550 nm a 0,1 dB na 1 625 nm.	Širokopásmové pokrytí (od O po L pásmo).	Optimalizace pro instalace s velmi malým poloměrem ohybu.

Tab. 1.2: Standard G.657: Charakteristika jednořivkových optických vláken pro přístupové sítě [7].

	Charakteristika	Rozsah vlnových délek	Aplikace
G.653.A	Nulová hodnota chromatické disperze na 1 550 nm. Maximální útlum 0,35 dB/km na 1 550 nm, maximální PMD = $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .	1 550 nm.	Podpora vysokorychlostních aplikací na 1 550 nm, na dlouhé vzdálenosti.
G.653.B	Stejně jako u G.653.A, jen maximální PMD = $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .	1 550 nm.	Standard představen v roce 2003 s nízkým koeficientem PMD, podpora vyšších přenosových rychlostí než G.653.A.

Tab. 1.3: Standard G.653: Charakteristika Vláken s posunutou disperzí [4].

- **Vlákna s posunutou disperzí** – jsou charakteristická gradientním profilem indexu lomu, vysoce negativní disperzí ve II. přenosovém okně (pod  $20 \text{ ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ ) a nulovou disperzí pro 1 550 nm ve III. přenosovém okně. Hlavní aplikace DSF (Dispersion Shifted Fiber) je v jednokanálových přenosech na dlouhé vzdálenosti ve III. přenosovém okně. Naopak nejsou vhodné pro vícekanálové přenosy, protože chybějící disperze způsobuje přeslechy způsobené nelineárním jevem – čtyřvlnné směšování FWM (Four Wave Mixing).
- **Vlákna s nenulovou disperzí** – z důvodu snížení nelineární disperze a současně zamezení FWM, byla zavedena vlákna NZDF (Non-Zero Dispersion Fiber), která jsou charakteristická nízkou, ale nenulovou disperzí v celém rozsahu optických EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovačů (1 530–1 565 nm). Nízká, ale nenulová disperze omezuje jev FWM a křížovou-fázovou modulaci XPM (Cross Phase Modulation) a je tedy nejvhodnějším médiem pro aplikaci a multiplexaci přenosů založených na hustém vlnovém multiplexu DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

	Charakteristika	Rozsah vlnových délek	Aplikace
G.653.A	Specifikován maximální útlum pouze na 1 550 nm. Nižší hodnota CD než u G.655.B a G.655.C, maximální PMD = $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .	C pásmo.	Podpora DWDM přenosů (G.692) v C pásmu s odstupem kanálů do 200 GHz.
G.653.B	Specifikován maximální útlum na 1 550 a 1 625 nm. Vyšší hodnota CD než u G.655.A, maximální PMD = $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .	Oblasti 1 550 a 1 625 nm (C+L pásma).	Podpora DWDM přenosů (G.692) v C+L pásmech s odstupem kanálů do 100 GHz.
G.653.C	Specifikován maximální útlum na 1 550 a 1 625 nm. Vyšší hodnota CD než u G.655.A, maximální PMD = $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .	Od O do L pásma.	Podobné s G.655.B, ale tento standard umožňuje vyšší přenosové rychlosti pro STM-64/OC-192 (10 Gbit/s) na dlouhé vzdálenosti. Vhodný také pro STM-256/OC-568 (40 Gbit/s).

Tab. 1.4: Standard G.655: Charakteristika vláken s nenulovou disperzí [5].

	Charakteristika	Rozsah vlnových délek	Aplikace
G.656	Specifikován maximální útlum na 1 460, 1 550 a 1 625 nm. Minimální hodnota CD $2 \text{ ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ mezi 1 460 a 1 625 nm, maximální PMD = $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .	S, C a L pásma.	Podpora jak CWDM, tak DWDM systémů v rozsahu od 1 460 do 1 625 nm.

Tab. 1.5: Standard G.656: Charakteristika vlákna s nenulovou disperzí pro širokopásmové přenosy [6].



## 1.2 Princip přenosu

Definice světelného paprsku – nejjednodušší představou je, že světlo se šíří ze zdroje podél přímek (paprsky) [51].

**Fermatův princip** (1679) – světlo se šíří mezi dvěma body A a B po takové dráze, že doba k proběhnutí této dráhy je extrémní nebo stacionární ve srovnání s jakoukoli sousední dráhou [65],

$$\delta V(A, B) = \delta \int_A^B n(x, y, z) ds = 0. \quad (1.2)$$

### 1.2.1 Index lomu

Světlo se v různých prostředích šíří různou rychlostí, v závislosti na indexu lomu daného prostředí. Výsledná rychlost je vždy nižší než rychlost ve vakuu  $c$  z důvodu interakce fotonů s atomy a molekulami látky [33].

Index lomu látky je dán poměrem rychlosti šíření světla ve vakuu  $c$  a rychlosti určité vlnové délky  $v_\lambda$  v látce [51],

$$n = \frac{c}{v_\lambda} = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \geq 1. \quad (1.3)$$

Hodnoty indexu lomu pro určité látky je možné nalézt v matematicko-fyzikálních tabulkách (pro vzduch  $n = 1,003$ , pro sklo  $n = 1,4$ – $1,8$  v závislosti na druhu skla a pro vodu  $n = 1,33$ ) [33].

### 1.2.2 Numerická apertura

Optické vlákno je ve své podstatě válcový vlnovod zhotovený z nízko ztrátového materiálu pro daný druh vlnění. Každé optické vlákno je složeno ze dvou hlavních částí – jádra, které slouží k přenosu optického signálu, a pláště (včetně dalších vrstev) sloužícího k ochraně před různými vlivy. Světelný paprsek vstupuje do vlákna pod malým úhlem  $\theta$ . Schopnost (maximální přijatelná hodnota) optického vlákna navázat světelný paprsek do jádra je určena numerickou aperturou NA (Numerical aperture) [33],

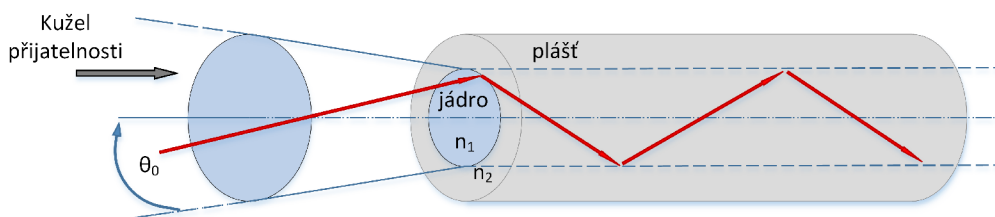
$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} [-]. \quad (1.4)$$

Kde index lomu  $n_0$  určuje prostředí, ze kterého je světelný paprsek navázán do optického vlákna,  $n_1$  je index lomu jádra a  $n_2$  je index lomu pláště. Jak již bylo dříve zmíněno, úhel  $\theta_0$  určuje hranici, kdy paprsky dopadající maximálně pod tímto úhlem se budou dále šířit vláknem a paprsky dopadající pod větším úhlem nebudou do vlákna navázány. Princip je zobrazen na obr. 1.2.

Výsledný kužel přijatelnosti je definován jako  $2\theta_0$  [33].

### 1.2.3 Šíření světla

Šíření světelného paprsku ve vláknech popisuje Snell-Descartesův zákon. Část světla je vedena optickým vláknem, pokud vstupuje do vlákna v kuželu přijatelnosti [31].

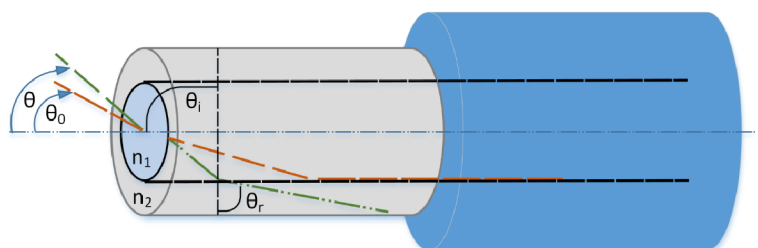


Obr. 1.2: Princip navázání optického paprsku do vlákna.

### Lom světla

Dopadá-li světlo na rozhraní dvou prostředí o různých indexech lomu, mění se směr šíření světla. Paprsek se při průchodu prostředím láme a zároveň dochází k jeho odrazu (viz obr. 1.3). Pokud  $\theta > \theta_0$ , pak je optický paprsek zcela odražen a nedochází k jeho navázání do jádra vlákna [31],

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r. \quad (1.5)$$

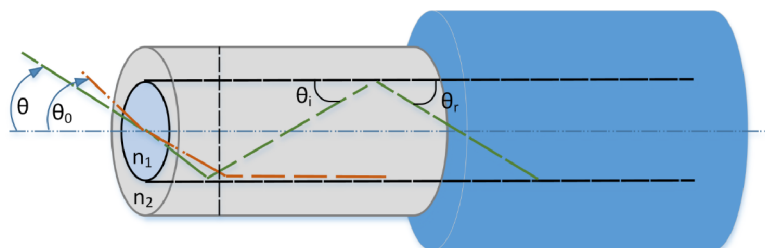


Obr. 1.3: Lom světelného paprsku.

### Odraz světla

Odraz je ostrá změna směru šíření světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí o různých indexech lomu (viz obr. 1.4). V tomto případě se světelný paprsek vrátí zpět do média, ze kterého pochází. Pokud  $\theta < \theta_0$ , pak je optický paprsek zcela odražen a nedochází k jeho navázání do jádra vlákna [31],

$$\theta_i = \theta_r. \quad (1.6)$$



Obr. 1.4: Odraz světelného paprsku.

### 1.2.4 Princip šíření

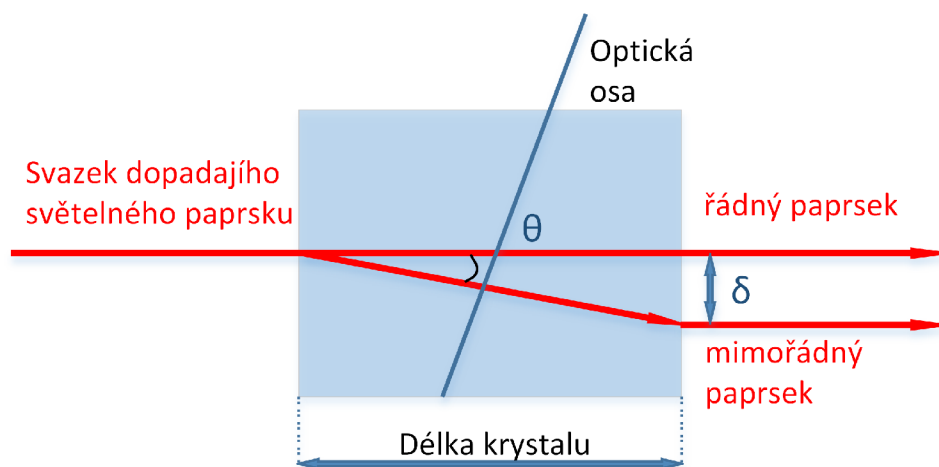
Optický světelný paprsek je tvořen určitou částí světelného spektra a je využit pro přenos informace v optickém vlákně. Je tedy možné ho popsat stejnými vzorci jako platí pro obecné světlo, neboli elektromagnetické záření [33].

V telekomunikační oblasti se převážně jedná o elektromagnetické vlnění s velmi vysokou frekvencí (stovky THz). Jednotlivá elektromagnetická vlnění se odlišují svou frekvencí neboli vlnovou délkou (používají se i další druhy elektromagnetického vlnění – viditelné spektrum).

Z důvodu rozsáhlého frekvenčního spektra a různě velké energii přenášené světelným zářením, lze světlo popsat pomocí dvou způsobů – vlnovou optikou nebo kvantovou fyzikou. Přičemž energie daného záření určuje, jakým způsobem se na záření bude nahlížet, jestli se blíží k vlnovému nebo částicovému chování. Oba popisy se navzájem nevylučují, ale záleží vždy na konkrétní aplikaci a na výhodnosti použití popisu světelného záření. Obecně o světle tedy mluvíme jako o částicově-vlnovém dualismu [33].

#### Dvojlom

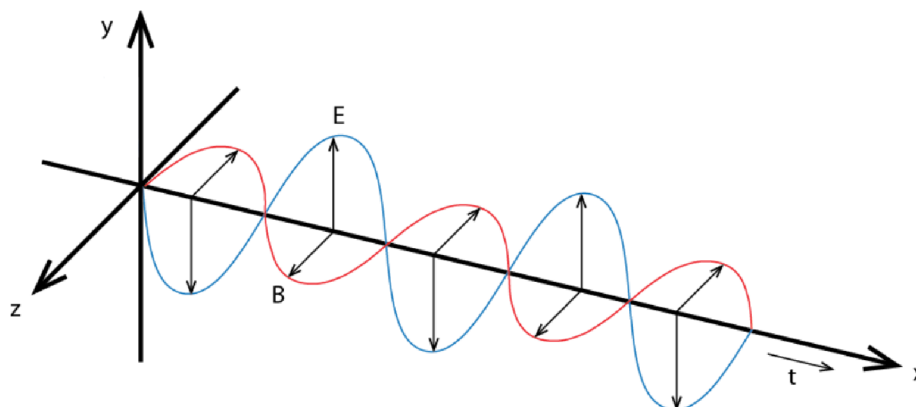
V ideálním optickém vlákně neexistují rozdílné optické osy a jádro i plášť jsou z izotropních materiálů, takže neexistuje dvojlom. V reálných optických vláknech však namáhání, změny hustoty, náhodné změny tvaru jádra nebo jeho průměru způsobují vznik rozdílných optických os, a tedy dvojlom. V důsledku toho, dvě navzájem kolmé složky se šíří v optickém vlákně různými rychlostmi. Rozdílná rychlost šíření obou navzájem kolmých složek způsobuje fázové rozdílové změny během šíření ve vlákně a náhodné míchání obou složek způsobuje změny polarizace. Jevo dvojlom může být pozorován při přenosu světla přes určité krystaly (kalcit, led, křemen, slída, cukr), které jsou anizotropní a mají odlišné optické osy. Paprsek světla, během lomu, se rozdělí do dvou paprsků – řádných a mimořádných, které mají rozdílné rychlosti a různé indexy lomu obr. 1.5. Tento jev, zvaný dvojitý lom nebo dvojlom, objevili Bartholinus a Huygens. Zjistili, že oba paprsky jsou lineárně polarizovány v navzájem kolmých rovinách, řádný paprsek je polarizován v rovině kolmé k rovině optické osy. Izotropní média (kapaliny, plyny, skla) mají pouze jeden index lomu [32].



Obr. 1.5: Jednoosý dvojlomový krystal.

Mimořádné paprsky nesplňují Snellův zákon (viz kapitola 1.2.3). Pokud otočíme krystal kolem osy kolmé k rovině dopadu, můžeme si všimnout, že řádný paprsek zůstává nehybný, zatímco mimořádný paprsek se otáčí. To znamená, že rychlost světla mimořádného paprsku je jiná pro různé směry v závislosti na jeho orientaci s ohledem na optickou osu krystalu [67].

Princip šíření elektromagnetického vlnění je znázorněn na obr. 1.6. Jak je z obrázku patrné, vlna je tvořena dvěma navzájem kolmými složkami elektrické části E (modrý průběh) a magnetické části B (červený průběh) šířícího se prostorem v čase  $t$  [67].



Obr. 1.6: Princip šíření optického paprsku jako elektromagnetické vlnění [50].

### Rychlost šíření

Albert Einstein ve své teorii relativity představil myšlenku, že rychlost světla  $c$  je nejvyšší možná rychlost dosažitelná ve vesmíru. Světlo je univerzální přírodní konstantou, tvoří podstatnou část všech elektromagnetických dějů a má základní význam ve všech procesech přenosu energie [33].

Rychlost světla ve vakuu je dána [43],

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 2,99792456 \cdot 10^8 [\text{m/s}] . \quad (1.7)$$

Jak již bylo zmíněno, rychlost světla šířícího se přenosovým médiem je určena indexem lomu daného prostředí,

$$n = \frac{c}{v_\lambda} = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \geq 1. \quad (1.8)$$

Přičemž  $\varepsilon_r$  udává relativní permitivitu a  $\mu_r$  představuje relativní permeabilitu prostředí.

Typické výrobní hodnoty indexu lomu jednovidových optických vláken jsou:

- Corning® LEAF® – NZDF vlákno  
 $n = 1,468$  pro vlnovou délku 1 550 nm  
 $n = 1,469$  pro vlnovou délku 1 625 nm

- OFS TrueWave® – NZDF vlákno  
 $n = 1,471$  pro vlnovou délku 1 310 nm  
 $n = 1,470$  pro vlnovou délku 1 550 nm

### 1.3 Lineární optické prostředí a lineární jevy

Hlavní rozdíl mezi lineárním a nelineárním prostředím je ten, že v lineárním prostředí platí princip superpozice, paprsky se vzájemně neovlivňují a nelze tedy řídit jeden svazek paprsků druhým svazkem. V nelineárním prostředí princip superpozice neplatí.

#### 1.3.1 Lineární optické prostředí

Jedná se o prostředí, kde pokud není použito příliš velké elektrické pole, pak elektrická polarizace je přímo úměrná intenzitě elektrického pole [29].

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}, \quad (1.9)$$

kde  $P$  je vektor elektrické polarizace,  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua,  $\chi$  je dielektrická susceptibilita prostředí a  $E$  je vektor elektrického pole.

Jevy, které probíhají v lineárním optickém prostředí, se označují jako lineární optické jevy.

#### 1.3.2 Útlum optického vlákna

Jak se šíří optický signál vláknem, klesá hodnota jeho výkonové úrovně. Tento pokles výkonové úrovně se vyjadřuje v decibelech (dB), případně jako poměr útlumu za jednotku vzdálenosti (dB/km).

Kolem roku 1970 se podařilo americké firmě Corning Inc. vyrobit vlákno dopováním křemenného skla titanem s hodnotou útlumu 17 dB/km. Jako revoluce v telekomunikacích se však počítají až raná 80. léta 20. století, kdy díky dopování vláken germánium bylo dosaženo hodnoty útlumu 4 dB/km, což umožnilo nasazení optických vláken v telekomunikační technice [22]. V dnešní době se vyrábí optická vlákna s útlumem i pod 0,2 dB/km, díky čemuž mohou být nasazována na dlouhé vzdálenosti [33].

Základní rovnice, určující celkový útlum optického vlákna, případně celého systému je dána logaritmickým vyjádřením poměru výkonu na vstupu vlákna  $P_{in}$  k výkonu na výstupu  $P_{out}$  [52],

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_{in}}{P_{out}} [\text{dB}]. \quad (1.10)$$

Vzhledem k tomu, že optické vlákno je určeno svou délkou  $L$ , je nutné zavést měrný útlum optického vlákna [52],

$$\alpha = \frac{A}{L} = \frac{10}{L} \cdot \log \frac{P_{in}}{P_{out}} [\text{dB/km}]. \quad (1.11)$$

### Spektrální útlum vlákna

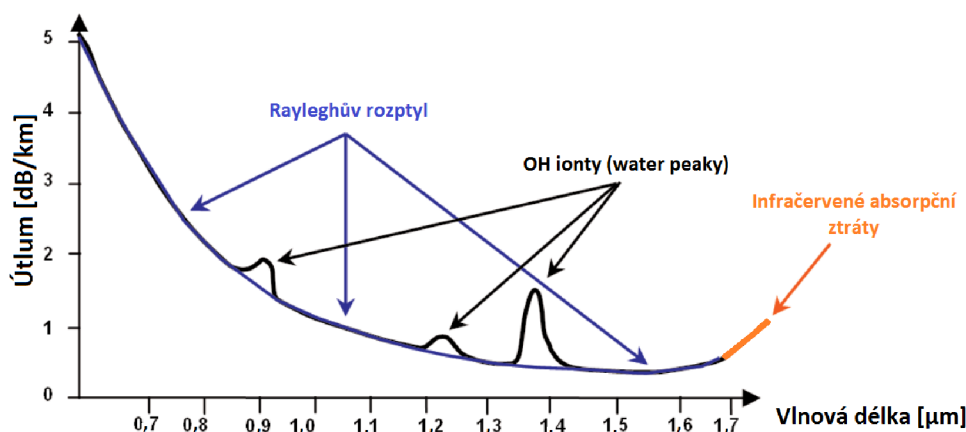
Existují dva hlavní ztrátové mechanismy světelného přenosu v optickém vlákně – absorpce světla a rozptyl.

#### Absorpce světla

V ultrafialové oblasti (vlnové délky pod 1 200 nm) jsou způsobeny přechody mezi atomárními úrovněmi a v infračervené oblasti jsou to pak přechody mezi molekulárními úrovněmi základního materiálu, příměsí a nečistot [58].

Největší vliv mají ionty kovů Fe, Cu a Cr, jejichž rezonance na určitých kmitočtech je provázána tepelnými ztrátami (tepelný nárůst je však velmi malý a těžko měřitelný). Absorpce je přítomna i v čistém křemenném skle při diskrétních vlnových délkách [58].

Při absorpčních ztrátách hrají tedy značnou roli nežádoucí příměsí a nečistoty v optickém vlákně. Výroba optických vláken probíhá v téměř sterilním prostředí a jediným zdrojem znečištění materiálu tak jsou vznikající atomy vodíku a hydroxylové ionty  $OH^-$ , protože molekuly vody vstupují do vlákna při chemické reakci během výrobního procesu. Tyto molekuly vody jsou známy jako absorpční oblasti s water peaky (nebo také s  $OH^-$  ionty) a na vlnových délkách 950, 1 244 a 1 383 nm způsobují nárůst útlumu již při malých koncentracích  $OH^-$  iontů [33].

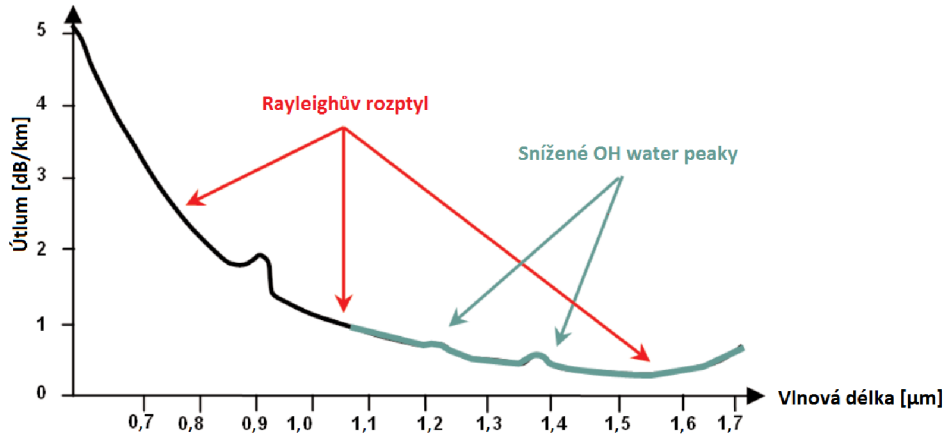


Obr. 1.7: Závislost útlumu na vlnové délce se zobrazením absorpčních ztrát.

Díky precizní výrobě, moderní optická vlákna (např. G.652.D) již vykazují jen mírně zvýšené hodnoty útlumu na výše zmíněných vlnových délkách. Tato vlákna s malými water peaky představují lineární útlum na 1 383 nm, blízký hodnotě na 1 310 nm (kolem 0,35 dB/km), případně i menší. Ve skutečnosti, absorpce způsobená  $OH^-$  ionty je menší než vlastní absorpce materiálu [34].

#### Rayleighův rozptyl

Jedná se o hlavní lineární rozptyl vznikající v optickém vlákně, pojmenovaný po britském fyzikovi lordu Rayleighovi. Rozptyl způsobuje rozptylování energie světla do všech směrů, přičemž část světla uniká z jádra vlákna. Malá část této energie světla je vrácena zpět a nazývá se zpětný rozptyl. Rayleighův rozptyl je způsoben velmi malými nehomogenitami v materiálu optického vlákna, jejichž rozměry jsou výrazně menší, než je



Obr. 1.8: Vlákno se sníženými  $OH^-$  ionty: Závislost útlumu na vlnové délce se zobrazením absorpčních ztrát [58].

vlnová délka přenášeného optického světla. Množství nehomogenit se dá redukovat zlepšením technologie výroby optických vláken, ale nedá se úplně odstranit. Rayleighův rozptyl představuje přibližně 96 % hodnoty útlumu optického vlákna. Pro intenzitu rozptylu platí [29],

$$I = I_0 \left( \frac{d}{2} \right)^6 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right) \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2}, \quad (1.12)$$

kde  $I_0$  je původní intenzita světla,  $d$  je průměr rozptylující částice,  $n$  je index lomu rozptylující částice,  $\theta$  je rozptylový úhel a  $R$  je vzdálenost od částice. Z obr. 1.9 je zřejmé, že malé částice, pro které se používá jednodušší Rayleighova teorie, rozptyluje světlo do všech stran, i když nejvýraznější jsou zpětný a dopředný rozptyl. Podmínka použití Rayleighovy teorie je [29]:

$$\frac{2\pi d}{\lambda} \ll 1 \Rightarrow d \ll \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow d \approx 100[\text{nm}]. \quad (1.13)$$

Důsledkem Rayleighova rozptylu je fluktuace indexu lomu ve vlákně. Příspěvek Rayleighova rozptylu k celkovému útlumu optického vlákna délky  $L$  je dán [29]:

$$L_{TR} = \exp \{ -\gamma_R L \}, \quad (1.14)$$

kde  $\gamma_R$  je koeficient Rayleighova rozptylu [29],

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_c K T_F. \quad (1.15)$$

$n$  je index lomu jádra optického vlákna,  $p$  je střední hodnota fotoelastického koeficientu,  $\beta_c$  je koeficient izotermální stlačitelnosti při efektivní teplotě  $T_F$  a  $K$  je Boltzmanova konstanta.

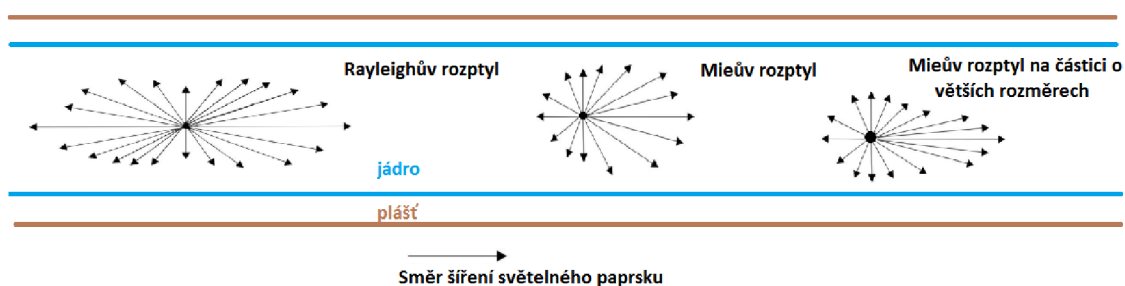
Celkový útlum způsobený Rayleighovým rozptylem je dán vztahem,

$$\alpha_{TR} = 10 \log \left( \frac{1}{L_{TR}} \right) [\text{dB}]. \quad (1.16)$$



### Mieův rozptyl

Vzniká na nehomogenitách, jejichž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou světla. Vzniká z důvodu existence mikroskopických bublin ve vlákne, napětí ve vlákne, kolísání průměru jádra, nedokonalé cylindrické struktury vlnovodu, nečistotám, a dalším aspektům. Matematický popis je, oproti Rayleighovu rozptylu, složitější, proto pokud jsou splněny podmínky pro Rayleighův rozptyl nebo stačí menší přesnost výpočtu, používá se právě výpočet Rayleighova rozptylu. Na obr. 1.9 je vidět, že Mieův rozptyl světlo rozptyluje zejména v dopředném směru a se zvětšováním poloměru rozptylující sférické částice se rozptýlené světlo koncentruje mnohem více v dopředném směru. Pokud je velikost nehomogenity větší jak  $\lambda/10$ , pak rozptýlená intenzita, která je úhlově závislá, je příliš velká a rozptyl může způsobovat velké ztráty [52].



Obr. 1.9: Zobrazení rozptylů vznikajících ve vlákne.

### Mikroohyby a makroohyby

Mikro a makro ohyby jsou běžným problémem vyskytujícím se v instalovaných kabelových systémech, protože mohou způsobit ztrátu optického výkonu.

Mikroohyby nastávají, pokud se jádro vlákna vychyluje ze své osy a mohou vzniknout při výrobě vlákna, mechanickými překážkami při procesu pokládky, a změnami podmínek v okolí vlákna po dobu jeho životnosti (teplota, vlhkost, tlak) [58].

Makroohyby jsou ohyby vlákna s poloměrem větším než 2 mm. V grafu zaznamenaném na obr. 1.10 lze spatřit závislost útlumu na vlnové délce pro různé poloměry ohybu ( $R$ ) makroohybů [58].

### 1.3.3 Disperze v jednojádřových optických vláknech

Dalším faktorem ovlivňujícím signál během přenosu je disperze, která omezuje efektivní šířku pásma vhodnou pro přenos. Disperze způsobuje zkreslení signálu. Obecný základ je spojen s fázovou a skupinovou rychlostí šíření. Jak fázová, tak skupinová rychlost, se mění v závislosti na změně geometrie, indexu lomu, který vyvolá jejich změnu frekvenční závislosti.

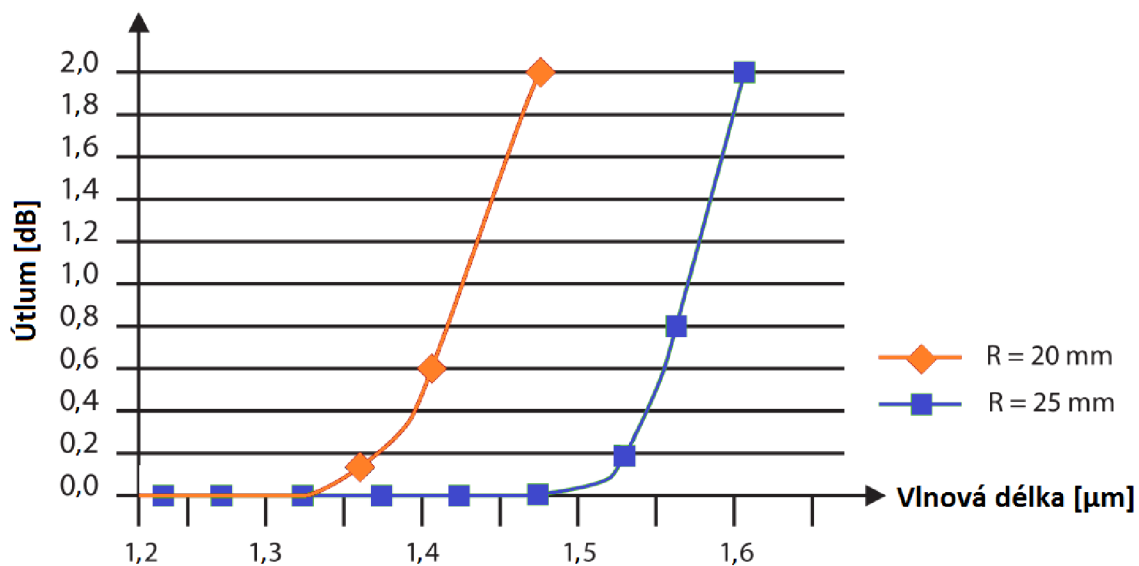
#### Fázová rychlost

Harmonickou vlnu v kladném směru osy lze vyjádřit jako [26],

$$u(z, t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot z) [-], \quad (1.17)$$

kde  $A$  je amplituda,  $\omega$  je úhlová frekvence,  $t$  označuje čas,  $k$  je vlnový vektor a  $z$  je souřadnice místa. Pokud je splněna podmínka  $\omega \cdot t - k \cdot z = konst.$ , mluvíme o vlně, která





Obr. 1.10: Závislost útlumu na vlnové délce pro různé poloměry ohybu [58].

má konstantní fázi. Při zderivování rovnice podle času, lze dostat [26],

$$\omega - k \cdot \frac{dz}{dt} = 0 \text{ nebo } v_F = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} \text{ [m/s]}, \quad (1.18)$$

kde  $v_F$  je úhlová rychlost se kterou se posouvá místo, kde je fáze vlny konstantní. Parametry  $dz$  a  $dt$  jsou derivace podle místa a času. Pokud  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  a  $n = \frac{c}{v}$ , pak lze říct, že v materiálech, kde fázová rychlost je funkcí vlnové délky, pak je od ní závislý i index lomu [26],

$$n = f(\lambda) \text{ [-]}. \quad (1.19)$$

Tento jev se nazývá disperze. Fázová rychlost může mít vyšší rychlost jako světlo ve vakuu.

### Skupinová (grupová) rychlost

Skupinová rychlost šíření je přenos energie vlněním. Při přenosu energie se mohou vlnou šířit signály, takže skupinová rychlost nemůže být větší jak rychlost světla ve vakuu. Vlna podle rovnice 1.17 signál nepřenáší, protože každé následující maximum je stejné, jako předchozí. Pro přenos signálů je vlnu potřeba modifikovat a nebo omezit na určitou časovou oblast  $\Delta t$  [28].

Pokud se vlna skládá z více harmonických vln s různými frekvencemi, tzn. že není monochromatická, vytvářejí vlny skupiny (grupy) neboli vlnový balík. Rychlost vlnového balíku určuje skupinová rychlost, přičemž rychlejší vlny vznikají na konci a šíří se dopředu. Na předním konci pak zanikají. Skupinová rychlost pro disperzní prostředí je dána [28]:

$$v_G = \frac{d\omega}{dk} \text{ [m/s]}. \quad (1.20)$$

Pokud prostředí není disperzní, pak

$$v_G = v_F, \quad (1.21)$$

kde  $v_G$  je skupinová rychlost,  $v_F$  je fázová rychlost,  $d\omega$  je derivace podle úhlové frekvence a  $dk$  je derivace podle vlnového vektoru.

### Chromatická disperze

Zkráceně je chromatická disperze označována jako CD (Chromatic Dispersion). Objevuje se v jednovidových optických vláknech a je způsobena tím, že není možné vytvořit monochromatický zdroj světla. Je složena z materiálové a vlnovodné disperze [28], [72].

K přenosu jednovidovým vláknem dojde, pokud je splněna podmínka přenosu prvního kořene Besselovské funkce [56],

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA \leq 2,405. \tag{1.22}$$

Současné technologie výroby umožňují měnit průměr jádra, a tím ovlivňovat průběh chromatické disperze.

Potřeba měření chromatické disperze vyvstala teprve v nedávných letech, kdy vzrostla potřeba větší šířky přenosového pásma a s nástupem systémů DWDM, které pro přenos využívají signály na různých vlnových délkách s různými přenosovými rychlostmi. Každý vstupní signál vždy obsahuje více spektrálních složek a při průchodu vláknem dochází k jejich zpoždování. Výstupní signál na konci optického vlákna je tedy oproti vstupnímu signálu rozšířen v čase a zasahuje do vedlejších bitových mezer. Dochází k mezisymbolové interferenci a ke zkreslení přenášené informace. Velikost chromatické disperze charakterizuje koeficient chromatické disperze [28],

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \text{ [ps/nm}\cdot\text{km]}, \tag{1.23}$$

který udává změnu skupinového zpoždění signálu  $t_g$  v závislosti na vlnové délce  $\lambda$ . Hodnota koeficientu udává časové rozšíření Gaussovského impulzu při použití zdroje se spektrální šířkou 1 nm, po průchodu 1 km optického vlákna. Typická hodnota koeficientu chromatické disperze pro klasické telekomunikační vlákno je 17 ps/nm·km@1550 nm.

V kapitole 1.1.4 jsou uvedeny některé typy speciálních vláken s upravenou disperzní charakteristikou. V tab. 1.6 jsou pak uvedeny limitní hodnoty koeficientu chromatické disperze podle standardu ITU-T G.695 ( International Telecommunication Union) [10].

Vlnová délka $\lambda$ [nm]	Hodnota koeficientu chromatické disperze $D(\lambda)$ [ps/nm·km]
1 291–1 351	5,7
1 311–1 371	6,8
1 391–1 451	11,5
1 531–1 591	19,9
1 471–1 611	21,1

Tab. 1.6: Limitní hodnoty koeficientu disperze podle standardu ITU-T G.695.

Chromatická disperze představuje problém pro dlouhé trasy s přenosovými rychlostmi nad 2,5 Gbit/s. Vzhledem k tomu, že chromatická disperze je tvořena materiálovou (vlastností materiálu způsobující závislost indexu lomu na vlnové délce) a vlnovodnou (závislost rychlosti šíření na vlnové délce) disperzí, které mají hodnoty stanoveny již při výrobě, nemění se ani hodnota chromatické disperze vlákna, a tudíž ji lze relativně snadno kompenzovat.

### Kompenzace chromatické disperze

Mezi nejpoužívanější metody kompenzace chromatické disperze patří pasivní kompenzace pomocí speciálních kompenzačních vláken [33].

- **Kompenzační DCF (Dispersion Shifted Fiber) vlákno** – jedná se o speciální typ optického vlákna s vysokou hodnotou záporného koeficientu chromatické disperze. Běžně se používá kompenzační vlákno o délce 1/6 celkové trasy. Mezi výhody DCF vlákna patří vysoká spolehlivost, jednoduchá konstrukce a kompenzace v širokém rozsahu vlnových délek. Na druhou stranu jsou DCF vlákna drahá, vnášejí do trasy značný útlum (0,38–0,5 dB/km), mají větší průměr jádra (20  $\mu\text{m}$ ) a obtížně kompenzují disperzní sklon u SM (Singlemode Fibre) vláken [33].
- **FBG (Fiber Bragg Grating) kompenzační vlákno** – jedná se o vlákno s Braggovskou mřížkou, která působí ve vlákně jako částečné zrcadlo – některé vlnové délky prochází a jiné jsou odraženy zpět. Pro kompenzaci se využívá čerpovaná mřížka, kde díky změně periody mřížky dochází k odrazu různých vlnových délek. Rychlejší části spektra se na mřížce odrazí dále a naopak pomalejší se odrazí dříve. Tím dojde k časové kompresi pulzu a spektrum výsledného signálu je užší než spektrum vstupního signálu. FBG mřížka kompenzuje chromatickou disperzi jen pro úzkou spektrální oblast (cca 6 nm), pro zvětšení se používá kaskádní zapojení nebo širokospektrální kompenzátory s FBG mřížkou. Útlum těchto vláken se pohybuje konstantně kolem 3 dB, má menší rozměry než DCF vlákno a umožňuje kompenzaci disperzního sklonu SM vláken [64].
- **HOM (Higher-Order Mode) kompenzační vlákno** – vlákna mají dostatečný záporný sklon disperzní charakteristiky a jsou vhodná jak pro klasická telekomunikační vlákna, tak i pro NZDF vlákna. Koeficient chromatické disperze je třikrát větší než u konvenčních DCF vláken, což umožňuje použití 1/3 délky oproti DCF vláknu. HOM mají nízký měrný útlum a jsou odolná vůči nelineárním jevům [33].

### Polarizační vidová disperze

Polarizační vidová disperze PMD (Polarization Mode Dispersion) je způsobena anizotropními vlastnostmi optického vlákna a může představovat problém v sítích s přenosovými rychlostmi nad 2,5 Gbit/s. Index lomu jádra vykazuje rozdílné hodnoty v průřezu vlákna, což je způsobeno jevy, jako jsou např. tlak, tah nebo teplota. Polarizační vidová disperze je způsobena rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých ortogonálních polarizačních rovin signálu. Na rozdíl od chromatické disperze, polarizační vidová disperze vykazuje náhodný charakter, a proto je těžké ji kompenzovat. Základní jednotkou PMD je diferenciální skupinové zpoždění DGD (Differential Group Delay) nebo také  $\Delta\tau$  (vyjádřeno v ps). Pro krátké vzdálenosti, do 10 km, je PMD téměř lineární a můžeme ji vyjádřit jako [28],

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l} [\text{ps}/\sqrt{\text{km}}]. \quad (1.24)$$

Pro vzdálenosti nad 10 km se hodnota PMD mění s druhou odmocninou vzdálenosti [28],

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} [\text{ps}/\sqrt{\text{km}}], \quad (1.25)$$

kde  $l$  je délka optického vlákna.

Limitní hodnoty PMD pro různé přenosové rychlosti podle ITU-T G.697 jsou uvedeny v tab. 1.7 [11].

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

Tab. 1.7: Limitní hodnoty koeficientu disperze podle standardu ITU-T G.697.

### Kompensace polarizační vidové disperze

Jak již bylo zmíněno dříve, PMD je náhodný jev, a proto je těžké ji kompenzovat. Nicméně, existuje několik metod, jak omezit vliv PMD. Jednou z možností je použití kanálového kódování FEC (Forward Error Correction) nebo redundanci vlnových délek ve WDM (Wavelength Division Multiplexing) sítích. Celková kompenzace je pak řešena samostatně nebo kombinací s jinými systémy. Podle prvků a na základě fyzických a technických vlastností, rozdělujeme metody na optické, opto-elektrické a elektrické [28].

## 1.4 Nelineární optické prostředí a nelineární jevy

Nelineární jevy vznikají při velké hustotě výkonu ve vlákně, kdy dochází k vzájemnému působení mezi optickým paprskem a vláknem. Projevují se zejména na trasách, kde jsou nasazeny WDM systémy a optické zesilovače. Obecně lze nelineární prostředí popsat vztahem [20],

$$P = N \cdot p. \tag{1.26}$$

Jsou-li hodnoty elektrické polarizace  $P$  a intenzity elektrického pole v prostředí vysoké, pak vznikne dipólový moment  $p$  indukci elektrického pole. Samotný vznik nelineárních jevů pak může být způsoben jak dipólovým momentem, tak hustotou dipólů. Vznik nelineárních jevů pomocí dipólového momentu lze dokázat Lorentzovým zákonem [20],

$$p = -e \cdot x, \tag{1.27}$$

kde  $e$  je elektrický náboj a  $x$  posuv částice.

### 1.4.1 Nelineární optické prostředí

Elektrická polarizace atomů v dielektrickém prostředí není vždy úměrná intenzitě elektrického pole. V přítomnosti silného elektrického pole  $E$  odezva vázaných elektronů do aplikovaného pole není lineární. Celková elektrická polarizace musí být vyjádřena jako [20],

$$\vec{P} = \varepsilon_0(\chi^1 \vec{E} + \chi^2 \vec{E}\vec{E} + \chi^3 \vec{E}\vec{E}\vec{E}), \tag{1.28}$$

kde  $\chi^1$  označuje lineární susceptibilitu a vyšší řády  $\chi^2$  a  $\chi^3$  označují kvadratickou a kubickou susceptibilitu.

### 1.4.2 Jevy druhého řádu

Nelineární jevy druhého řádu jsou popsány v druhém koeficientu rovnice 1.28, který je dán vztahem [20],

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi^2 \vec{E} \vec{E}. \quad (1.29)$$

Tento člen je zodpovědný za nelineární jevy vznikající v nelineárních krystalech. Vzhledem k tomu, že se v telekomunikacích s těmito jevy často nesetkáme a běžně neovlivňují parametry přenosu, budou jevy představeny jen okrajově.

#### Generování druhé harmonické

Generování druhé harmonické SHG (Second Harmonic Generation) je speciálním případem generace součtové frekvence. Pokud bychom například navázali paprsek o vlnové délce 694,3 nm na nelineární krystal, objeví se na výstupu kromě základní složky ještě druhá harmonická s frekvencí dvakrát větší, tedy 347,15 nm [19].

#### Generování součtové a rozdílové frekvence

Tyto jevy, SFG (Sum Frequency Generation) a DFG (Difference Frequency Generation), se využívají při směšování dvou optických vln rozdílných frekvencí do jedné výsledné optické vlny. Pro oba jevy musí být vždy splněna fázová podmínka [19],

$$\vec{k}_3 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2. \quad (1.30)$$

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

#### Kvazi-fázové přizpůsobení

Jedná se o techniku fázového přizpůsobení QPM (Quasi-Phase Matching) optických interakcí, ve kterých je relativní fáze upravena v pravidelných intervalech.

### 1.4.3 Jevy třetího řádu

Nelineární jevy třetího řádu jsou popsány ve třetím koeficientu rovnice 1.28, který je dán vztahem [19],

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi^3 \vec{E} \vec{E} \vec{E}. \quad (1.31)$$

Protože se zde uplatňuje Kerrův jev, mluvíme o tzv. Kerrově prostředí. Jev lze popsat jako závislost indexu lomu na intenzitě světelného paprsku vstupujícího do Kerrova prostředí. Lze vyjádřit jako [20],

$$\Delta n = n_2 \cdot I, \quad (1.32)$$

neboli změna indexu lomu, která je různá v jednotlivých částech impulzu, významně ovlivňuje změny tvaru a polarizace šířícího se pulzu.

#### Vlastní fázová modulace

Jev SPM (Self-Phase Modulation), při kterém působí optický pulz sám na sebe. Růstem a poklesem výkonu na hranách optického impulzu vede ke změnám jeho fáze šíření. Tím dojde ke zkreslení jeho tvaru a rozšíření ve spektru, které díky disperznímu prostředí

může zpětně dále ovlivňovat jeho tvar. Při velkém rozšíření pak dochází k jejich překrytí v mezisymbolové interferenci, což zapříčiňuje chyby v přenosu [20].

### Samofokusace (Self-Focusing)

Při zvyšování indexu lomu v prostředí jsou paprsky vychýlené ve směru velké intenzity pole. Pokud je překročena určitá prahová hodnota výkonu, nelineární refrakce potlačí difrakci světelného paprsku, kde vznikají konstantní místa v prostředí. Pokud je nelineární index lomu prostředí kladný, vznikají tzv. samofokusující účinky. Pokud je nelineární index naopak záporný, pak vznikají tzv. defokusující účinky [20].

Tento jev byl uznán jako primární mechanismus omezení maximálního výkonu, který by mohl být získaný ze skleněných zesilovacích vláken.

### Křížová-fázová modulace

Tento jev vzniká, pokud se současně šíří dva a více signálů a je vždy doprovázen jevem SPM, protože nelineární index lomu optického paprsku závisí nejen na intenzitě tohoto paprsku, ale i na intenzitě ostatních paprsků. Křížová-fázová modulace tedy způsobuje změnu fáze paprsku v důsledku interakce s jiným paprskem [20].

Ve skutečnosti XPM způsobuje kolísáním výkonu určité vlnové délky kanálu fázové kolísání ostatních kanálů. Výsledkem pak může být asymetrické rozšíření ve spektru a zkreslení tvaru pulzu [26].

### Čtyřvlnné směšování

Pokud jsou do optického vlákna navázány alespoň tři signály s rozdílnými vlnovými délkami – označme je  $f_1$ ,  $f_2$  a  $f_3$ , vznikne na jiné vlnové délce  $f_{FWM}$  další signál. Matematicky tento jev lze vyjádřit vztahem [26],

$$f_{FWM} = f_1 + f_2 - f_3. \quad (1.33)$$

Vliv FWM na DWDM přenos je kriticky závislý na disperzi prostředí, odstupu spekter přenášených kanálů a na vstupních výkonech jednotlivých signálů.

## 1.4.4 Nelineární optické rozptyly

Pokud dochází k přímé přeměně fotonu jedné vlnové délky na jinou vlnovou délku, lze to klasifikovat jako nelineární rozptyl. Mezi nelineární rozptyly patří Ramanův a Brillouinův rozptyl. Jedná se o spontánní rozptyly, které předpokládají, že elektrické pole neovlivňuje současně vlastnosti optického vlákna. Při stimulovaném rozptylu pak dochází k rozptylu světelné vlny vlivem srážek fotonu s tepelnými nebo akustickými atomy.

### Stimulovaný Ramanův rozptyl

Rozptyl SRS (Stimulated Raman Scattering) vzniká při interakci fotonů s vibračními složkami prostředí. Při srážce fotonu s energií  $E_1 = h \cdot f_p$  a molekuly s vibrační frekvencí  $f_m$ , molekula absorbuje část energie fotonu. Foton pak bude mít energii s novou frekvencí  $f_s$ . Vzniklý foton se nazývá Stokesův [33].

Ramanův rozptyl se využívá při zesilování a šíří se oběma směry. Kritický výkon čerpadla odpovídající prahové hodnotě SRS efektu lze vyjádřit jako [69],

$$P_{cr} \approx \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}}. \quad (1.34)$$

Efektivní plocha je označena jako  $A_{eff}$ ,  $g_R$  je Ramanův zisk a  $L_{eff}$  je efektivní délka vlákna.

### **Stimulovaný Brillouinův rozptyl**

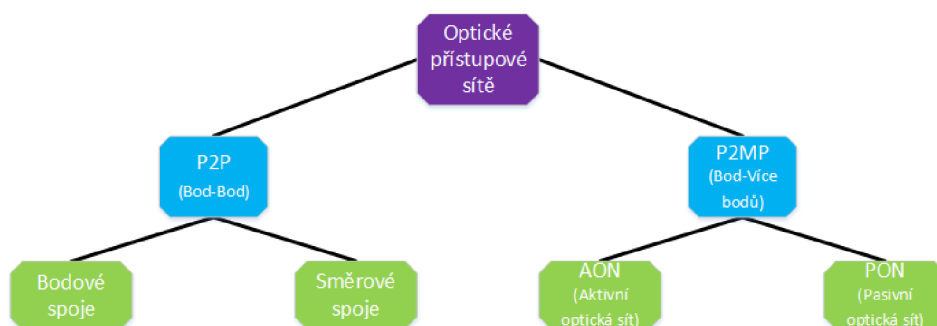
Stimulovaný Brillouinův rozptyl SBS (Stimulated Brillouin Scattering) je principiálně obdobný SRS, avšak pro jeho generování stačí menší výkon. Šíří se pouze ve směru opačném než je směr šíření signálu a je posunut přibližně jen o 10 GHz od užitečného signálu (SRS je posunut přibližně o 10 THz).

Stimulovaný Brillouinův rozptyl je vyvolán podélnou akustickou vlnou vzniklou elektrostrikcí. Jeho velikost závisí na úhlu rozptylu, přičemž maximum energie je rozptýleno ve zpětném směru. Brillouinův rozptyl je významný pro zdroje s úzkou spektrální šířkou [69].

Telekomunikační sítě se vyvíjely během dlouhé historie technologických pokroků a sociálních změn. Sítě, které poskytovaly základní telefonní služby skrze lokální operátory, nyní přenášejí data ekvivalentní tisíce encyklopedií za sekundu. Během této historie se digitální sítě vyvinuly ve 3 základní fáze: asynchronní, synchronní a optická [18].

První optické sítě byly využívány především na dálkové přenosy. Vzhledem k rozvoji nových internetových služeb, jako jsou např. Triple Play, a vzrůstajícím požadavkům uživatelů, roste potřeba větší šířky pásma. Internetový provoz roste každým rokem o 50–70 % [71]. Metalická vedení se blíží ke svým limitním parametrům (jak maximální dosažitelná vzdálenost, tak šířka pásma) a optická vlákna se jeví jako nejlepší vhodné řešení pro další vývoj a výstavbu. Postupně tak nachází stále větší uplatnění nejen v páteřních sítích, ale i v sítích poslední míle (přístupové sítě). Základní rozdělení přístupových sítí můžeme nalézt v obr. 2.1.

Pokud je ke každé ONU (Optical Network Unit) jednotce vedeno samostatné optické vlákno z OLT (Optical Line Termination), mluvíme o technologii P2P (Point-to-Point). V případě, že jednotky ONU sdílejí jedno optické vlákno, mluvíme o P2MP (Point-to-Multipoint), přičemž pokud je vydělení signálu provedeno pomocí aktivních prvků, mluvíme o aktivní optické síti AON (Active Optical Network). Pokud vydělení signálu je zcela pasivní, pak se jedná o pasivní optickou síť PON (Passive Optical Network) [55]. Každá z uvedených metod distribuce signálu má své výhody a nevýhody. Pro P2P sítě jsou výhodami větší dosažitelná vzdálenost a větší šířka přenosového pásma. Naopak je zde více aktivních zařízení (lasery), větší počet optických vláken a tím vyšší náklady na výstavbu a následný provoz sítě. Výhody P2MP sítí jsou nižší náklady na pasivní i některé aktivní prvky sítě a nižší náklady na provoz sítě, avšak na úkor menší šířky přenosového pásma a nižší dosažitelné vzdálenosti [22].



Obr. 2.1: Rozdělení optických přístupových sítí podle typu spojení.

Pasivní optické sítě, vzhledem ke svým ekonomickým výhodám, nachází ve výstavbě přístupových sítí stále více uplatnění – zvláště v hustě osídlených oblastech. Ve světě se s PON lze setkat hlavně v asijských zemích, případně v Americe, postupně se však



rozmáhá výstavba PON i v Evropě [21]. Díky pasivním rozbočovacími prvkům, jako jsou směrová vlnová odbočnice AWG (Arrayed Waveguide Grating) nebo optický rozbočovač OS (Optical Splitter), je možno vydělit signál bez nutnosti aktivního napájení v místě rozbočení. S rostoucími požadavky uživatelů, stoupá potřeba větší šířky přenosového pásma, a tak jsou postupně vyvíjeny nové technologie a vytvářeny nové standardy. Přenos dat u dnes dostupných PON je založen na technologii časového multiplexu, postupně se však začíná uplatňovat technologie vlnově děleného multiplexu, případně jejich kombinace [39].

## 2.1 Multiplexační techniky

Multiplexace je princip přenosu více signálů jedním přenosovým kanálem. Dochází tedy k vícenásobnému využití přenosového kanálu. Multiplexor MUX (Multiplexer) má funkci slučování více zdrojů do jednoho přenosového kanálu. Demultiplexor DEMUX (Demultiplexer) pak umožňuje opětovné rozdělení signálů. Podle způsobu multiplexace pak systémy lze rozdělit na [27]:

- Frekvenční multiplex FDM (Frequency-division multiplexing),
- vlnový multiplex WDM (Wavelength-division multiplexing),
- časový multiplex TDM (Time-division multiplexing),
- prostorový multiplex SMX (Spatial multiplexing),
- hybridní multiplex.

Vzhledem k rozsáhlosti jednotlivých multiplexačních technik, budou zjednodušeně uvedeny jen WDM a TDM multiplexy.

### 2.1.1 Vlnový multiplex

Vlnový multiplex je obdobou frekvenčního multiplexu. Jednotlivé signály jsou přenášeny pomocí různých vlnových délek, přičemž počet nosných vlnových délek závisí na fyzikálních parametrech optického vlákna a na prvcích MUX a DEMUX. Celková kapacita ( $C$ ) systému je rovna [18],

$$C = \sum_{k=1}^N v_k \text{ [bit/s]}, \quad (2.1)$$

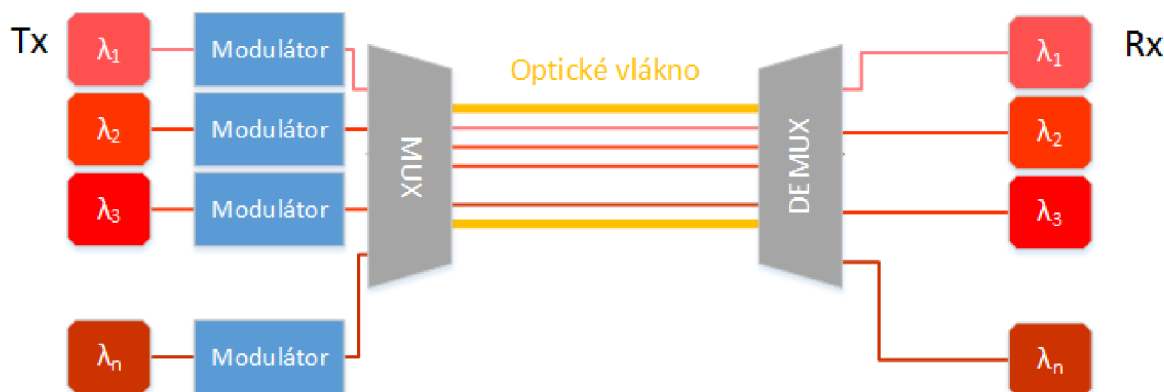
kde  $v_k$  je přenosová rychlost  $k$ -tého kanálu a  $N$  je celkový počet přenášovaných kanálů.

Spektrální účinnost  $\eta$  udává poměr bitové rychlosti k šířce pásma. Vyšší spektrální účinnosti tedy dosáhneme pokud bude použita vyšší přenosová rychlost při stejné šířce kanálu nebo pokud bude použit užší kanál při stejné rychlosti. Matematicky lze spektrální účinnost vyjádřit jako [23],

$$\eta = \frac{C}{\sum_{k=1}^N \Delta B_k} \text{ [bit/s/Hz]}, \quad (2.2)$$

kde  $\Delta B_k$  je šířka pásma  $k$ -tého kanálu. Princip WDM přenosu je zobrazen na obr. 2.2.

Podle standardů ITU-T G.694.1 a G.694.2 jsou určena přenosová okna pro standardní jednovidové optické vlákno.



Obr. 2.2: Zjednodušené schéma principu WDM přenosu.

### Hrubý vlnový multiplex

Kanály CWDM (Coarse WDM) mají odstup 20 nm, přičemž první nosná je na vlnové délce 1 270 nm a poslední se nachází na vlnové délce 1 610 nm. Tolerance nosné je  $\pm 6,5$  nm kvůli méně kvalitním zdrojům optického záření [9].

Nosné číslo	Nominální vlnová délka [nm]	Rozdělení spektra
1–5	1 270–1 350	pásmo O (Original), 1 260–1 360. Původní přenosové pásmo v oblasti 1 310 nm.
6–10	1 370–1 450	pásmo E (Extended), 1 360–1 460. Vláknem s potlačenými OH <sup>-</sup> ionty podle ITU-T G.652.C.
11–14	1 470–1 550	pásmo S (Short), 1 460–1 530. Pásmo kratších vlnových délek.
15	1 530–1 565	pásmo C (Conventional), 1 530–1 565.
16–18	1 565–1 625	pásmo L (Long), 1 565–1 625. Pásmo dlouhých vlnových délek.

Tab. 2.1: Rozsahy vlnových délek pro jednotlivé nosné podle standardu ITU-T G.694.2.

### Hustý vlnový multiplex DWDM (Dense WDM)

Oproti CWDM jsou zde menší rozestupy jednotlivých nosných, díky čemuž je možné realizovat větší počet kanálů (perspektivně až 360 kanálů v C pásmu a 560 kanálů v L pásmu s použitím mřížky 12,5 GHz). Je nutné použití kvalitních zdrojů laserového záření s chlazením (nejčastěji lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou DFB – Distributed Feedback Laser). Odstupy jednotlivých nosných jsou 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz a  $>100$  GHz [8].

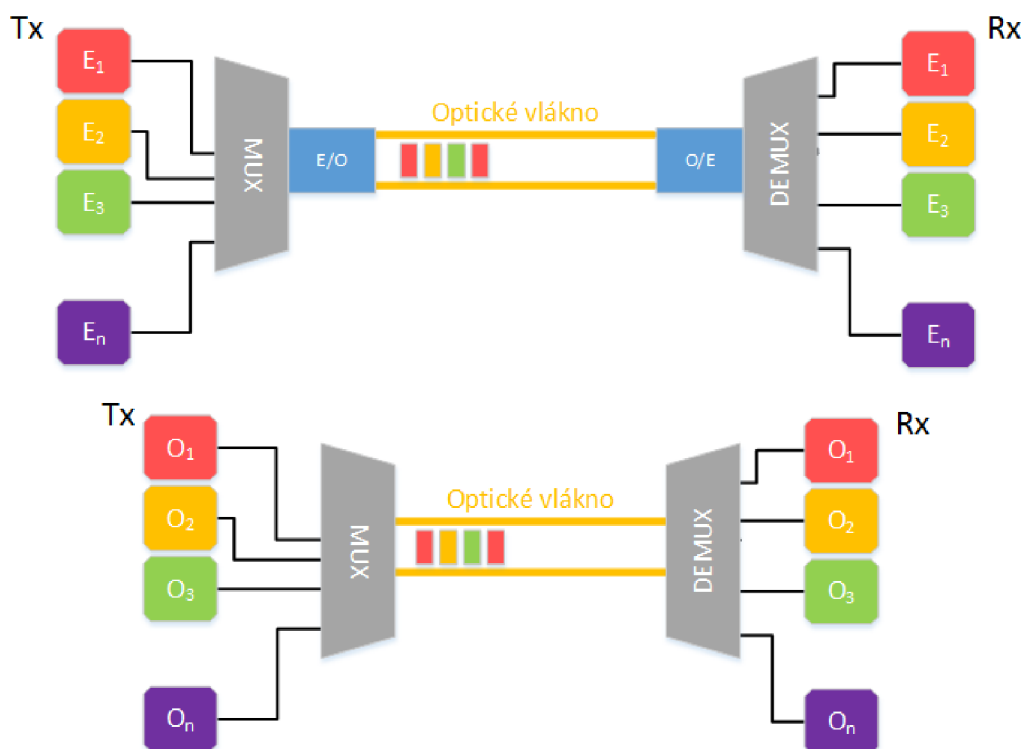
Pro srovnání technologií vlnového multiplexu jsou v tab. 2.2 uvedeny parametry pro hrubý a hustý vlnový multiplex s kanálovým rozestupem 100 GHz.

	CWDM	DWDM
Počet vlnových délek na vlákno	8–16 (O, E, S, C, L pásma)	40–80 (C a L pásma)
Odstup vlnových délek	2 500 GHz (20 nm)	100 GHz (0,8 nm)
Kapacita vlnových délek	do 2,5 Gbit/s	10 Gbit/s a větší
Celková kapacita vlákna	20–40 Gbit/s	100–1 000 Gbit/s
Typ vysílacího laseru	nechlazený DFB	chlazený DFB, externí modulace
Přenosové vzdálenosti	do 70 km	do 9 000 km
Zesilování	není cenově efektivní	EDFA, Raman

Tab. 2.2: Srovnání základních parametrů pro CWDM a DWDM se 100GHz odstupem nosných.

### 2.1.2 Časový multiplex

Princip časového multiplexu spočívá ve slučování signálů o nižších přenosových rychlostech do jednoho vysokorychlostního signálu.



Obr. 2.3: Zjednodušená schémata principů ETDM (nahore) a OTDM (dole).  $E_1$ – $E_n$  značí elektrické signály,  $O_1$ – $O_n$  značí optické signály.

#### Elektrický časový multiplex

Sdružování signálů probíhá v elektrické doméně ETDM (Electrical TDM) před elektrooptickým převodem. Každý cyklus, rozdělený na časové intervaly, je označován jako ča-

sový rámec multiplexního signálu. Časové rámce mohou být sdružovány po bitech nebo po blocích. Principem je synchronní alokace jednotlivých datových toků do časových rámců v přenášeném signálu. Elektrický časový multiplex nachází využití ve všech typech aktivních a pasivních sítí [30].

### Optický časový multiplex

Sdružování signálů OTDM (Optical TDM) probíhá v optické doméně. Výhodou sdružování v optické doméně je eliminace limitace elektrických součástek, a proto může být dosaženo vyšších přenosových rychlostí (až 10,2 Tbit/s na jeden přenosový kanál [62]).

Nevýhodami optického časového multiplexu jsou: složitá realizace, problém s demultiplexací (nutnost použití hodinového synchronizačního signálu) a nutnost kompenzace disperzí kvůli malým rozestupům jednotlivých pulzů (například pro přenosovou rychlost 320 Gbit/s je mezera mezi jednotlivými optickými pulzy 1 ps a doba jejich trvání je 3,13 ps) [61].

## 2.2 Architektura sítí FTTx

Samotné přístupové P2MP sítě pak lze dále dělit podle místa ukončení optických vláken a napojení na metalickou část sítě.

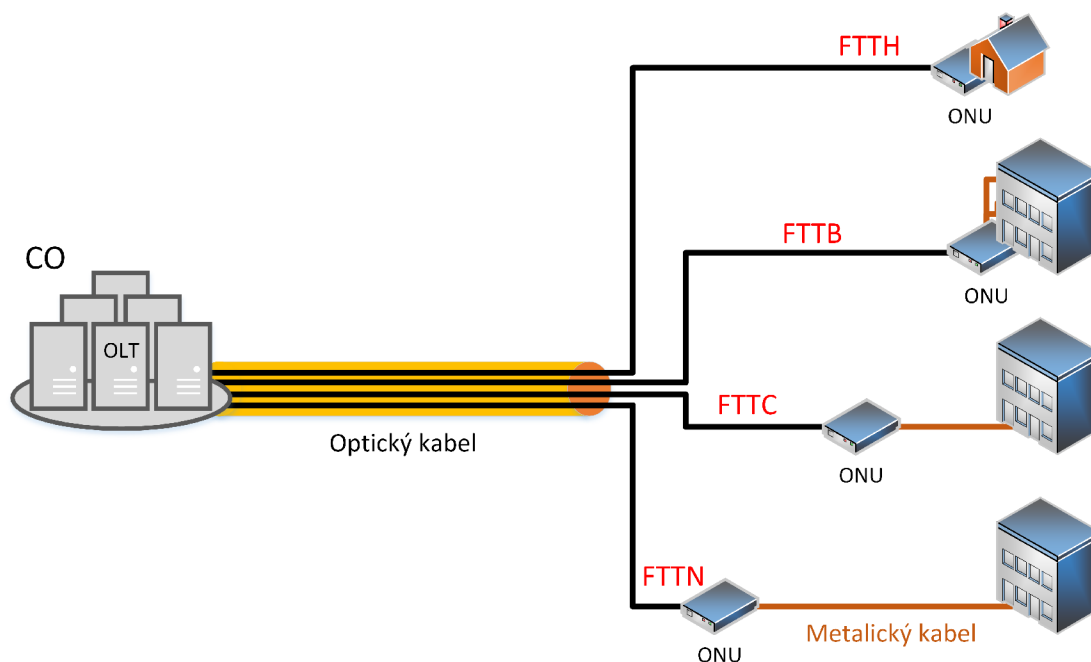
Základní typy architektur FTTx (Fiber to the ...) jsou [55]:

- FTTN (Fiber to the Node) – je založena na optických kabelech ukončených v rozvodní ústředně, sloužící pro připojení blízkého okolí. Připojení účastníků do ústředny probíhá koaxiálními kabely nebo kroucenou dvojlinkou.
- FTTC (Fibre to the Cabinet) – princip spočívá v ukončení optických kabelů v telekomunikačních sloupcích a slouží pouze pro připojení několika zákazníků. Do sloupku se účastníci napojují pomocí koaxiálního kabelu nebo kroucené dvojlinky.
- FTTB (Fiber to the Building) – jak již z názvu vyplývá, FTTB se používá pro připojení budov, kdy optické vlákno je přivedeno do budovy a následné připojení uživatelů je řešeno metalickým vedením [55].
- FTTH (Fiber to the Home) – zkratka FTTH označuje technologii výstavby, kdy optické vlákno je přivedeno do bytové jednotky účastníka/do domu.

Architektury typu FTTN a FTTC jsou si podobné, z OLT umístěné v centrální stanici je signál přiveden pomocí optického vlákna až k ONU odkud je signál dále rozveden metalickým vedením (koaxiální vedení nebo kroucená dvojlinka). Pokud se místo ukončení vlákna nachází ve vzdálenosti větší než 300 m od účastníka mluvíme o FTTN, pokud je vzdálenost menší než 300 m jedná se o FTTC [39]. S těmito architekturami se dnes lze v České republice setkat nejčastěji (hlavně u společností O2 Czech Republic, a.s. a UPC Česká republika, s.r.o.). Kvůli často velkým vzdálenostem metalického vedení však není přenosová rychlost u uživatele příliš velká – max. 30 Mbit/s [33].

Technologie výstavby FTTB je v dnešní době nejvíce využívanou, ačkoli postupně je snaha o přechod na FTTH. Právě díky možnosti využití stávajícího metalického vedení, které např. v případě UTP (Unshielded Twisted Pair) kabelu je schopno přenášet data rychlostí až 10 Gbit/s, našla technologie FTTB velké využití [49].

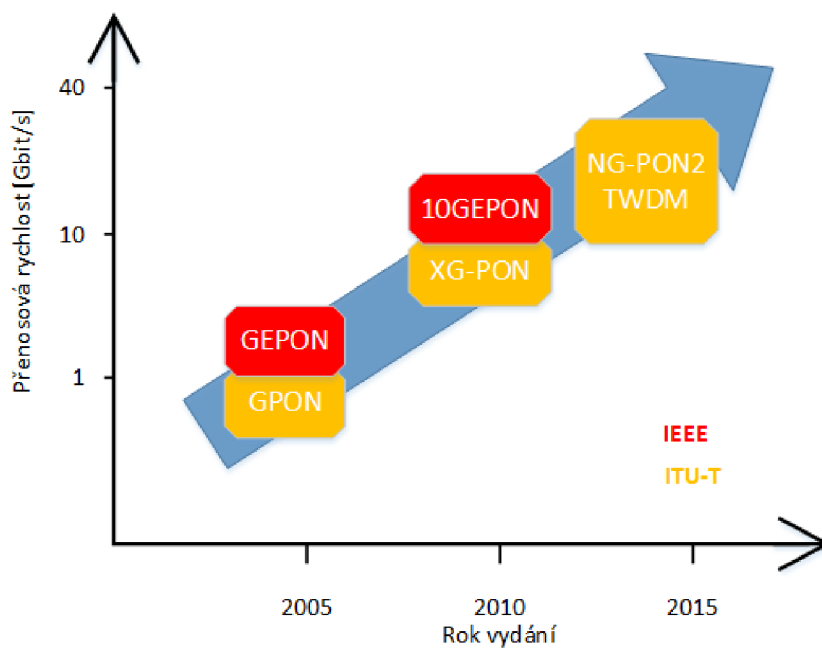
Propojení OLT, umístěné v centrální stanici, a jednotky ONU nacházející se u účastníka, je v síti FTTH řešeno výhradně pomocí optického vlákna.



Obr. 2.4: Rozdělení optických přístupových sítí podle místa ukončení optického vlákna.

## 2.3 Standardy pasivních optických sítí

Pasivní optické sítě představují nejvhodnější řešení pro realizaci optických přístupových sítí. Výběrem vhodné topologie výstavby a zvoleným standardem lze optimalizovat jak náklady na výstavbu přístupové sítě, tak i náklady spojené s provozem.



Obr. 2.5: Vývoj standardů PON [46].

Standardy pro topologie sítí FTTx jsou stále vyvíjeny a zdokonalovány. O standardizaci se starají dvě standardizační skupiny. Jedna větev se soustředí kolem ITU-T ve spolupráci s FSAN (Full Services Access Network). Druhá je pak IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Na obr. 2.5 jsou zobrazeny standardy podle roku vydání a maximální šířky přenášeného pásma.

### 2.3.1 APON

Založeno na přenosu ATM (Asynchronous Transfer Mode) buněk, odtud APON (ATM Passive Optical Network). Standard byl vytvořen ITU-T v roce 1998 pod označením G.983.1. Je zde využívám asynchronní přenos dat s přenosovými rychlostmi – 622,08 Mbit/s pro sestupný směr (downstream) a 155,52 Mbit/s pro vzestupný směr (upstream). Případně symetrických 155,52 Mbit/s v synchronním režimu [12].

### 2.3.2 BPON

Jedná se o navazující standard APONu schválený ITU-T v roce 2001 pod označením BPON (Broadband PON). V podstatě jej rozšiřuje o vlnový multiplex a variantu se symetrickou rychlostí 622,08 Mbit/s. Využívá se buď přenos po oddělených vláknech pro každý směr nebo jedno vlákno s vlnovým multiplexem – rozsah 1 480–1 500 nm je přiřazen sestupnému směru a 1 260–1 360 nm je určen pro vzestupný směr [12].

### 2.3.3 GPON

Standard GPON (Gigabit PON) byl schválen ITU-T v roce 2004 pod označením G.984. Přenos dat může probíhat pomocí ATM buněk, případně je možné využít GEM (GPON Encapsulation Method) rámce s pevnou délkou rámce 125  $\mu$ s. Je zde zahrnuta podpora asynchronního přenosu dat s rychlostmi – 1 244,16 Mbit/s nebo 2 488,32 Mbit/s pro sestupný směr a 155,52; 622,08 nebo 1 244,16 Mbit/s pro vzestupný směr. Pro synchronní přenos jsou rychlosti 1 244,16 Mbit/s nebo 2 488,32 Mbit/s v obou směrech. Maximální délka trasy je 20 km při dělicím poměru 1:64. Přenos dat je řešen pomocí dvou vláken pro jednotlivé směry nebo jedním vláknem (rozsahy vlnových délek jsou totožné se standardem BPON) [13].

### 2.3.4 GEAPON

Standard skupiny IEEE, GEAPON (Gigabit Ethernet PON), je založen na technologii Ethernet a byl schválen v roce 2004 pod označením 802.3ah. Přenosová rychlost v synchronním režimu dosahuje 1 Gbit/s s kódováním 8B/10B (z čehož vyplývá přenosová rychlost 1,25 Gbit/s na fyzické vrstvě). Ke zvýšení dosahu sítě a zlepšení BER (Bit Error Rate) se zde využívá Reedův-Solomonův kód jako možnost dopředné korekce chyb FEC s elektrickým ziskem 5,9 dB. Přenos je realizován pomocí vlnového dělení – pro sestupný směr se využívá 20nm okno s centrální vlnovou délkou 1 490 nm, pro vzestupný směr je alokováno pásmo o šířce 100 nm s centrální vlnovou délkou 1 310 nm [1]. Standard existuje ve dvou variantách:

- 1000BASE-PX10 – jedno jednovláknové vlákno do 10 km s rozbočením maximálně na 16 ONU.

- 1000BASE-PX20 – jedno jednovláknové vlákno do 20 km s rozbočením více než na 16 ONU.

### 2.3.5 10-GEPON

V roce 2009 vydala pracovní skupina z IEEE standard 802.3av. Jedná se o navazující standard GEPON a přináší navýšení přenosové kapacity až na 10 Gbit/s, přičemž je zachována zpětná kompatibilita s GEPON. V symetrickém režimu nabízí 10 Gbit/s pro oba směry, v asymetrickém režimu je pak používáno 10 Gbit/s pro sestupný směr a 1 Gbit/s pro vzestupný směr. Využívá se opět vlnového dělení – pro sestupný směr se využívá okno 1 575–1 580 nm (1 577 nm typicky), pro vzestupný směr je využito okno o šířce 20 nm s centrální vlnovou délkou 1 270 nm. Využívá se zde opět FEC s elektrickým ziskem až 7,2 dB, nicméně za cenu 13% zatížení systému [2].

### 2.3.6 NG-PON1

Standard G.987 přináší v roce 2010 představení NG-PON (Next Generation PON) a základní ustanovení pro 10 Gbit/s pasivní optickou síť navazující na GPON, se kterou je plně zpětně kompatibilní. Přenosová rychlost umožňuje použití rychlostí 10 Gbit/s pro sestupný směr a 2,5 Gbit/s pro vzestupný směr. Pro sestupný směr je využito okno o šířce 6 nm kolem vlnové délky 1 578 nm, pro vzestupný směr je využito okno o šířce 20 nm s centrální vlnovou délkou 1 270 nm. Je zde počítáno s dynamickým rozsahem do 29–31 dB (nominální třída 1 a 2), dělicím poměrem alespoň 1:64 (rozšiřitelné až na 1:256) a dosahem 20 km (60 km v logické vrstvě) [14].

### 2.3.7 TWDM-PON

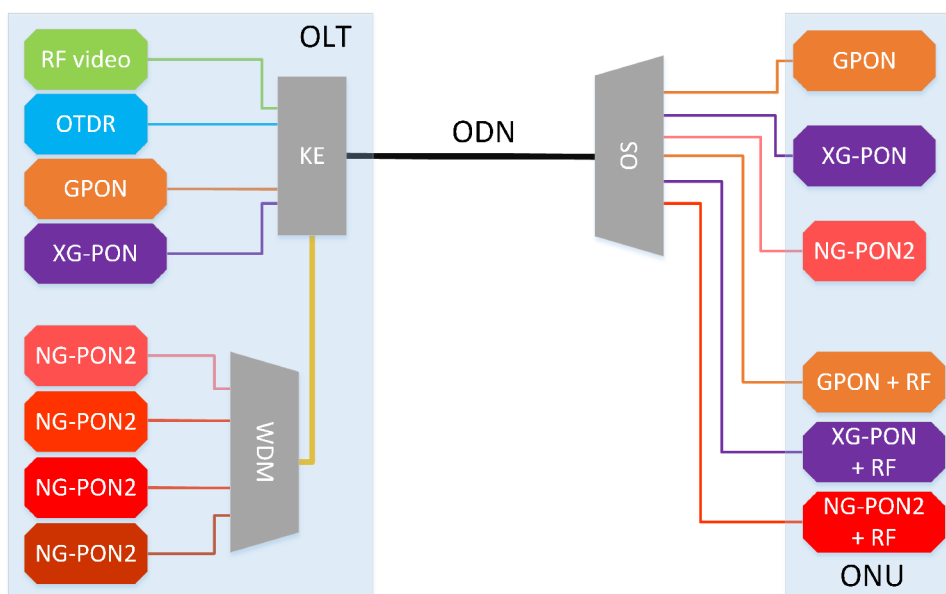
Jedná se pasivní optickou síť druhé generace NG-PON2, označovanou ITU-T G.989. Standard byl veřejnosti představen letos (tj. 2014) a stále vzniká. Klíčovým požadavkem při výběru vhodné technologie byla zpětná kompatibilita s dřívějšími standardy (příklad koexistence je zobrazen na obr. 2.6). Nakonec byla zvolena metoda časového a vlnového dělení TWDM (Time and Wavelength Division Multiplexing). Pro přenos se využívá 4–8 párů vlnových délek na jeden kanál s možností budoucího rozšíření. Pro sestupný směr jsou navrženy přenosové rychlosti – symetrických 10 Gbit/s nebo 2,5 Gbit/s pro oba směry, případně asymetrický přenos s rychlostí 10 Gbit/s v sestupném směru a 2,5 Gbit/s ve směru vzestupném [15].

Standard definuje následující útlumové třídy:

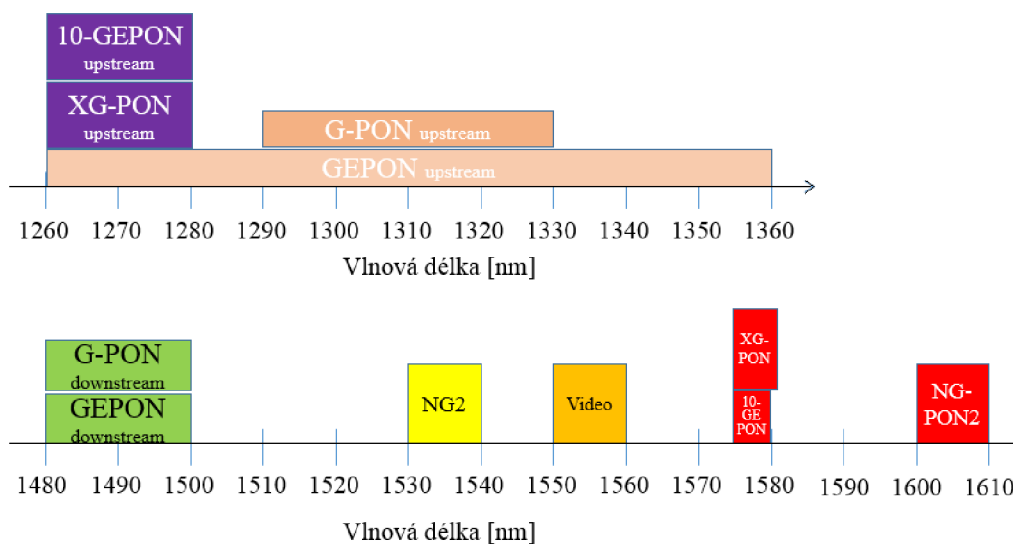
- Nominální 1 – dynamický rozsah 14–29 dB,
- nominální 2 – dynamický rozsah 16–31 dB,
- rozšířená 1 – dynamický rozsah 18–33 dB,
- rozšířená 2 – dynamický rozsah 20–35 dB.

Pro přenos jsou navrženy rozsahy vlnových délek 1 596–1 603 nm pro sestupný směr a 1 524–1 544 nm pro vzestupný směr. Kanálové mezery mezi jednotlivými vlnovými délkami jsou 100 GHz, případně 50 GHz [15].

Na následujícím obr. 2.7 jsou zobrazeny rozsahy vlnových délek použitých pro jednotlivé standardy.



Obr. 2.6: Koexistenční schéma NG-PON2 s dalšími technologiemi. WDM značí vlnové multiplexování, KE představuje koexistenční element, OS je optický rozbočovač.



Obr. 2.7: Zobrazení rozsahů vlnových délek jednotlivých standardů.



## 3.1 Posouzení stavu optických vláken v ČR

Pro posouzení stavu optických vláken v České republice bylo vybráno 8 tras s délkami od 4 do 90 km, přičemž vzorek tras obsahoval jak nové, tak i optické kabely starší více než 20 let. Vzhledem k tomu, že trasy jsou v majetku či nájmu soukromé společnosti, nebudou v práci uvedeny žádné konkrétní údaje k trasám.

Pro jednotlivé trasy 1–8 jsou pro přehlednost naměřené hodnoty uvedeny v tabulkách bez jejich popisu.

Limity hodnot (viz tab. 3.1), pro vyhodnocení výsledků, odpovídají standardním parametrům vyžadovaným většinou operátorů v ČR.

Měrný útlum	$\leq 0,35$ dB/km na 1 310 nm, 0,25 na 1 550 nm
	útlum trasy na 1 383 < útlum na 1 310 nm
Útlum sváru/spojky	$\leq 0,15$ dB na 1 310, 1 550, 1 625 nm
Útlum konektorového spojení	$\leq 0,4$ dB na 1 310, 1 550, 1 625 nm
Útlum zakončení	$\leq 1$ dB na 1 310, 1 550, 1 625 nm
Útlum odrazu ORL	$\geq 55$ dB na 1 310, 1 550, 1 625 nm
Hodnota PMD	$\leq 0,2$ ps/ $\sqrt{km}$

Tab. 3.1: Limitní hodnoty měřených parametrů. Pozn. ORL – Optical Return Loss.

### Metodika měření

1. Měření délky trasy: obousměrné měření s průměrováním délky každého vlákna pomocí OLTS (Optical Loss Test Set) soupravy.
2. Měření optického vložného útlumu trasy přímou metodou: obousměrné měření pomocí OLTS soupravy s průměrováním vložného útlumu každého vlákna na dvou vlnových délkách 1 310 nm a 1 550 nm.
3. Měření OTDR (Optical Time Domain Reflectometry): obousměrné měření každého vlákna na vlnových délkách 1 310 nm, 1 550 nm a 1 625 nm, mezi OTDR a měřené vlákno bylo vloženo předřadné vlákno o délce 1 km, na konci úseku bylo zapojeno zařadné vlákno o délce 1 km.
4. Měření spektrálního profilu útlumu trasy: jednosměrné měření celkového vložného útlumu trasy pro vlnové délky 1 310 nm, 1 383 nm, 1 490 nm, 1 550 nm a 1 625 nm pomocí OTDR.
5. Měření polarizační vidové disperze PMD: jednosměrné měření PMD na vlnové délce 1 550 nm.

**Použitá měřicí zařízení**

- OTDR EXFO FTB-7400E-2347B,
- OLTS EXFO FOT-932X-FP-X-EI,
- OLTS EXFO FOT-932X-4-VFT-A-EI,
- CD/PMD analyzátor EXFO FTB-5700,
- předřadné vlákno SPSB-B-1000,
- zařadné vlákno FTB-PSB-B1000-89/150-96/150-S-I-D.

**3.1.1 Trasa 1****Popis trasy**

Trasa se skládá z 11 kabelových úseků, tvořených kabely s vlákny SM G.652A (9 úseků) a kabely s vlákny SM G.652D (2 úseky). Vlákna jednotlivých úseků jsou spojena sváry v optických spojkách. U spojek jsou umístěny kabelové rezervy cca 30 m, v koncovém bodě A je rezerva 50 m a v koncovém bodu B 25 m. V rozvaděčích ODF (Optical Distribution Frame) jsou vlákna zakončena navařením pigtailů E2000/APC (Angle Polished Connector).

**Délka trasy:**

Délka [m] A→B	Délka [m] B→A	Průměr [m]
36 374	36 376	36 375

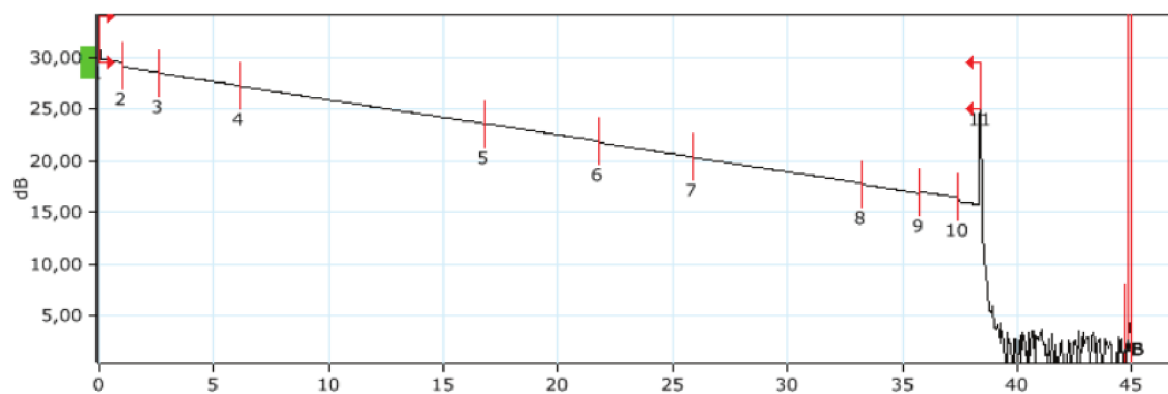
**Přímá metoda:**

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB] A→B	Útlum [dB] B→A	Průměr [dB]	ORL [dB] A→B	ORL [dB] B→A
1 310	12,92	12,76	12,84	32,18	32,31
1 550	7,74	7,65	7,69	32,64	32,54

**Metoda OTDR:**

Z důvodu rozsáhlosti výsledků měření, budou uvedeny pouze výsledky pro vlnovou délku 1 310 nm.

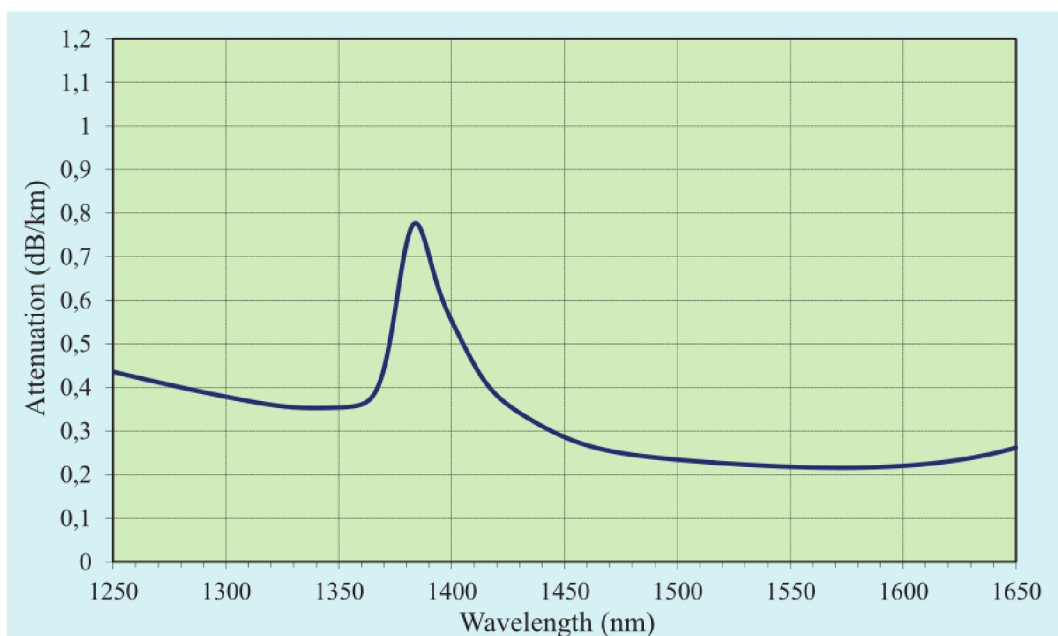
<b>Parametry</b>					
Vlnová délka [nm]	1 310	Rozsah [km]	45	Pulz [ns]	275
Doba měření [s]	30	Rozlišení [m]	0,639	Vys. rozlišení	ano
<b>Výsledky</b>					
Délka [m]	38 419	Útlum [dB]	14,174	Měrný útlum [dB/km]	0,369
Průměrný útlum sváru [dB]	0,126	Max. útlum sváru [dB]	0,447	ORL [dB]	31,84



Obr. 3.1: OTDR průběh trasy č. 1.

## Spektrální profil:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB/km]
1 310	0,369
1 383	0,761
1 490	0,238
1 550	0,218
1 625	0,234



Obr. 3.2: Spektrální profil vlákna.

Polarizační vidová disperze:

PMD [ps]	0,24
Koeficient PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,0400
PMD 2.řádu [ps/nm]	0,0265

### Vyhodnocení trasy

Naměřené hodnoty odpovídají technickým parametrům dle tab. 3.1 s výjimkou spektrálního profilu optického útlumu trasy (červená hodnota v tabulce spektrálního profilu), který je dán typem použitého optického vlákna G.652A (tj. vlákno s tzv. Water Peakem) v převážné části trasy. Mírně nadlimitní hodnoty měrného útlumu prvního úseku vláken jsou opět způsobeny použitím propojovacího patchcordu na vstupu měřeného vlákna.

### 3.1.2 Trasa 2

#### Popis trasy

Trasa se skládá z 8 kabelových úseků, tvořených kabely s vlákny SM G.652D (2 úseky) a kabely s vlákny SM G.652A (6 úseků). Vlákna jednotlivých úseků jsou spojena sváry v optických spojkách, resp. v rozvaděči. U spojek jsou umístěny kabelové rezervy cca 30 m, v lokalitě A je rezerva 5 + 20 m a v lokalitě B je 20 m. V koncových bodech jsou vlákna zakončena v rozvaděčích ODF navařením pigtailů E2000/APC.

Délka trasy:

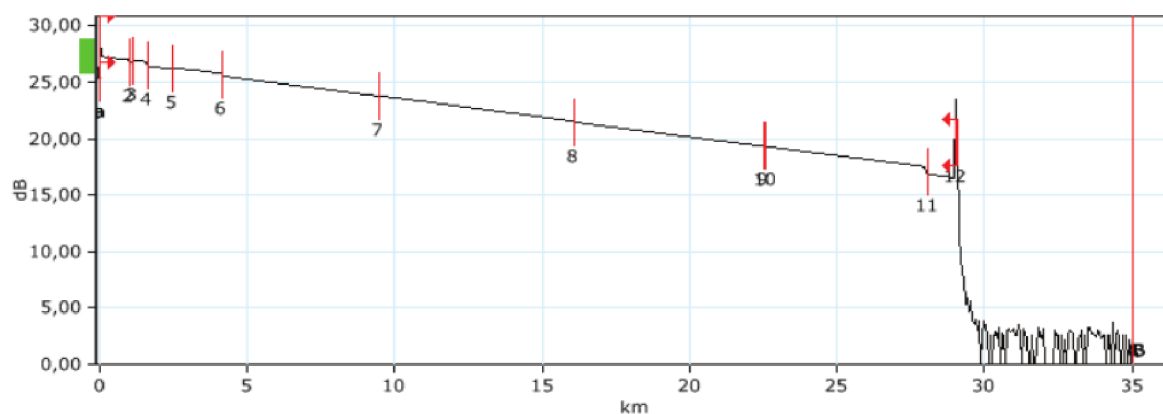
Délka [m] A→B	Délka [m] B→A	Průměr [m]
27 009	27 011	27 010

Přímá metoda:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB] A→B	Útlum [dB] B→A	Průměr [dB]	ORL [dB] A→B	ORL [dB] B→A
1 310	9,68	9,52	9,60	31,85	24,86
1 550	5,90	5,82	5,86	31,59	25,90

Metoda OTDR:

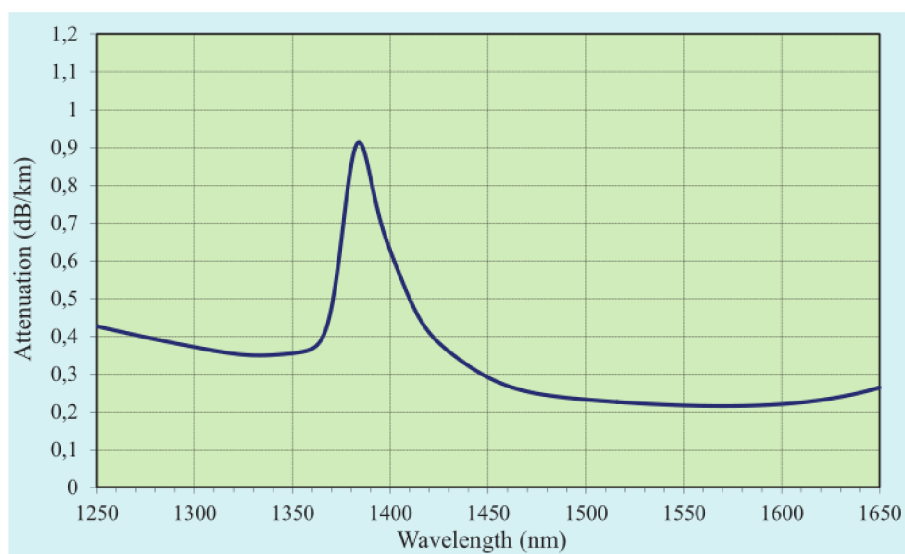
Parametry					
Vlnová délka [nm]	1 310	Rozsah [km]	35	Pulz [ns]	100
Doba měření [s]	30	Rozlišení [m]	0,320	Vys. rozlišení	ano
Výsledky					
Délka [m]	24 042	Útlum [dB]	10,799	Měrný útlum [dB/km]	0,372
Průměrný útlum sváru [dB]	0,104	Max. útlum sváru [dB]	0,681	ORL [dB]	30,31



Obr. 3.3: OTDR průběh trasy 2 pro vlnovou délku 1310 nm.

Spektrální profil:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB/km]
1310	0,367
1383	0,930
1490	0,239
1550	0,219
1625	0,236



Obr. 3.4: Spektrální profil vlákna.

Polarizační vidová disperze:

PMD [ps]	0,15
Koeficient PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,0291
PMD 2.řádu [ps/nm]	0,0104

### Vyhodnocení trasy

Naměřené hodnoty odpovídají technickým parametrům dle tab. 3.1 s výjimkou spektrálního profilu optického útlumu trasy (červená hodnota v tabulce spektrálního profilu), který je dán typem použitého optického vlákna G.652A (tj. vlákno s tzv. Water Peakem) v převážné části trasy.

### 3.1.3 Trasa 3

#### Popis trasy

Trasa se skládá z 12 kabelových úseků, tvořených kabely s vlákny SM G.652D (2 úseky), kabely s vlákny SM G.652A (7 úseků) a kabely s vlákny SM G.652C (2 úseky). Vlákna jednotlivých úseků jsou spojena sváry v optických spojkách, resp. v rozvaděčích. U spojek jsou umístěny kabelové rezervy cca 30 m, v místě A je rezerva 25 m a v místě B 20 m. V koncových bodech jsou vlákna zakončena v rozvaděčích ODF navařením pigtailů E2000/APC.

Délka trasy:

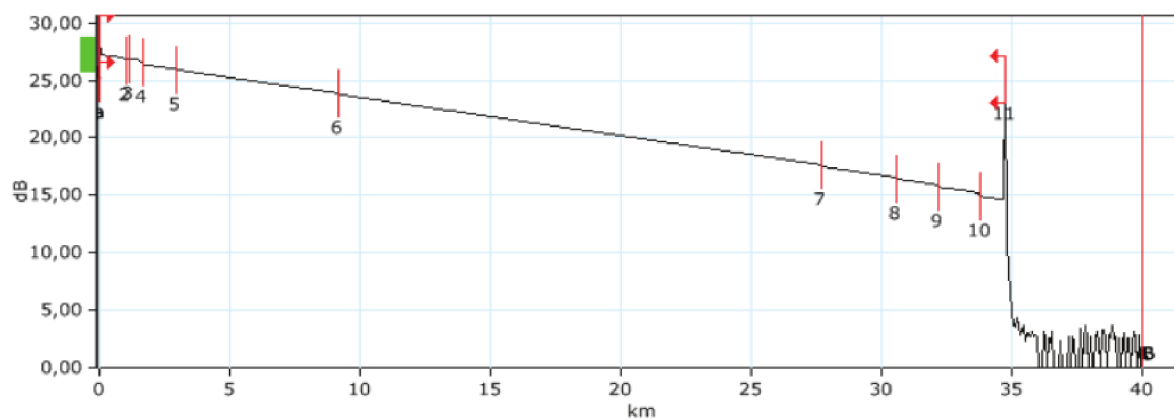
Délka [m] A→B	Délka [m] B→A	Průměr [m]
32 721	32 730	32 725,5

Přímá metoda:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB] A→B	Útlum [dB] B→A	Průměr [dB]	ORL [dB] A→B	ORL [dB] B→A
1 310	13,20	13,01	13,11	30,86	26,91
1 550	8,47	8,35	8,41	30,18	27,85

Metoda OTDR:

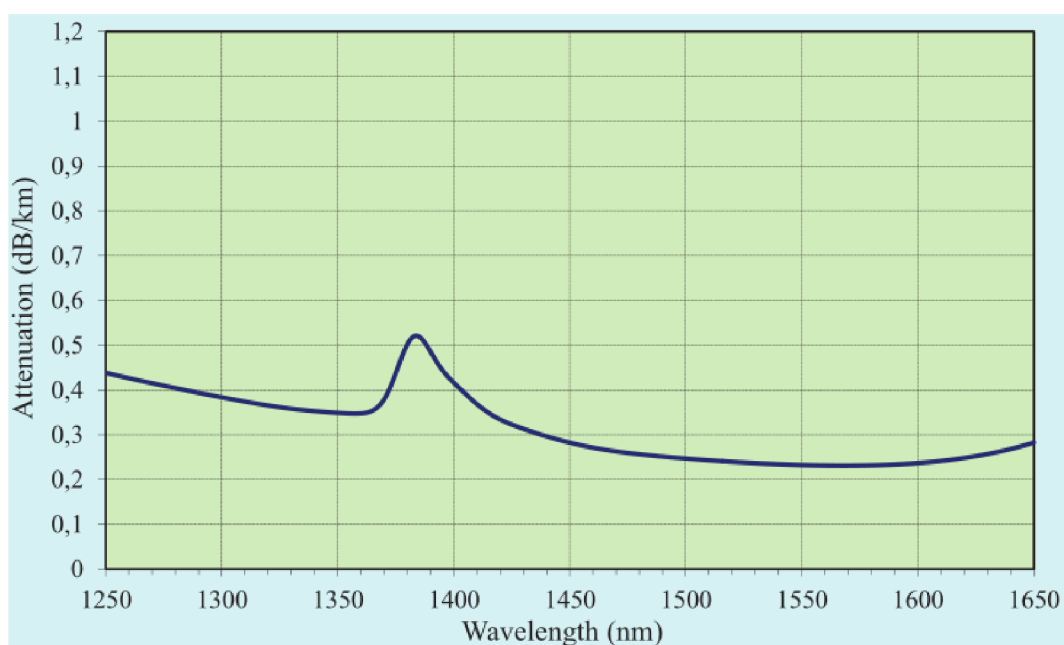
Parametry					
Vlnová délka [nm]	1 310	Rozsah [km]	40	Pulz [ns]	100
Doba měření [s]	30	Rozlišení [m]	0,320	Vys. rozlišení	ano
Výsledky					
Délka [m]	34 766	Útlum [dB]	12,718	Měrný útlum [dB/km]	0,366
Průměrný útlum sváru [dB]	0,119	Max. útlum sváru [dB]	0,348	ORL [dB]	31,12



Obr. 3.5: OTDR průběh trasy 3 pro vlnovou délku 1310 nm.

Spektrální profil:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB/km]
1310	0,374
1383	0,514
1490	0,251
1550	0,232
1625	0,252



Obr. 3.6: Spektrální profil vlákna.

Polarizační vidová disperze:

PMD [ps]	0,52
Koeficient PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,0918
PMD 2.řádu [ps/nm]	0,1250

### Vyhodnocení trasy

Naměřené hodnoty odpovídají technickým parametrům dle tab. 3.1 s výjimkou spektrálního profilu optického útlumu trasy (červená hodnota v tabulce spektrálního profilu), který je dán typem použitého optického vlákna G.652A (tj. vlákno s tzv. Water Peakem) v převážné části trasy. Mírně nadlimitní hodnoty měrného útlumu některých kabelových úseků jsou opět způsobeny krátkými úseky mezi jednotlivými spoji.

### 3.1.4 Trasa 4

#### Popis trasy

Pro danou trasu nebylo možné zjistit počet kabelových úseků ani typ. V koncových bodech jsou vlákna zakončena v rozvaděčích ODF navařením pigtailů E2000/APC.

Délka trasy:

Délka [m] A→B	Délka [m] B→A	Průměr [m]
3903	3912	3907,5

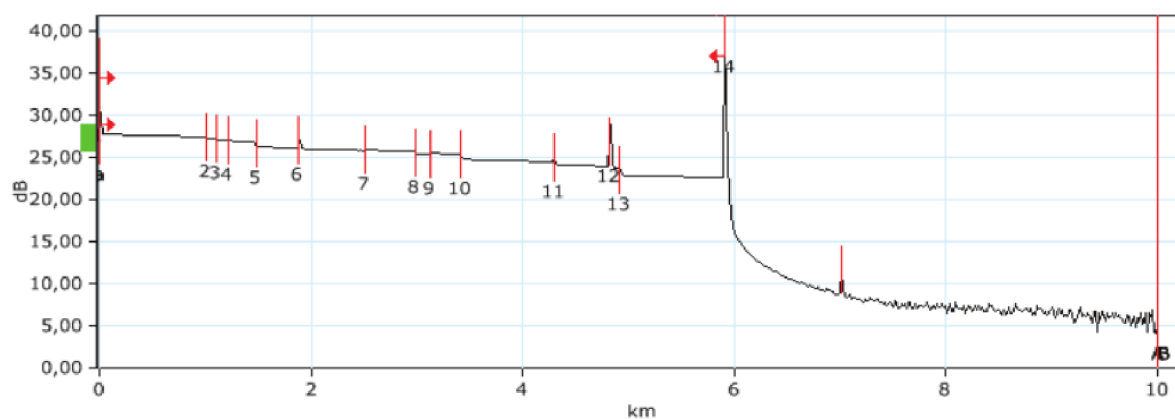
Přímá metoda:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB] A→B	Útlum [dB] B→A	Průměr [dB]	ORL [dB] A→B	ORL [dB] B→A
1310	4,12	3,96	4,05	35,83	31,79
1550	3,50	3,37	3,44	36,88	33,28

Metoda OTDR:

Parametry					
Vlnová délka [nm]	1310	Rozsah [km]	10	Pulz [ns]	100
Doba měření [s]	30	Rozlišení [m]	0,320	Vys. rozlišení	ano
Výsledky					
Délka [m]	5913	Útlum [dB]	5,201	Měrný útlum [dB/km]	0,880
Průměrný útlum sváru [dB]	0,215	Max. útlum sváru [dB]	0,649	ORL [dB]	24,37

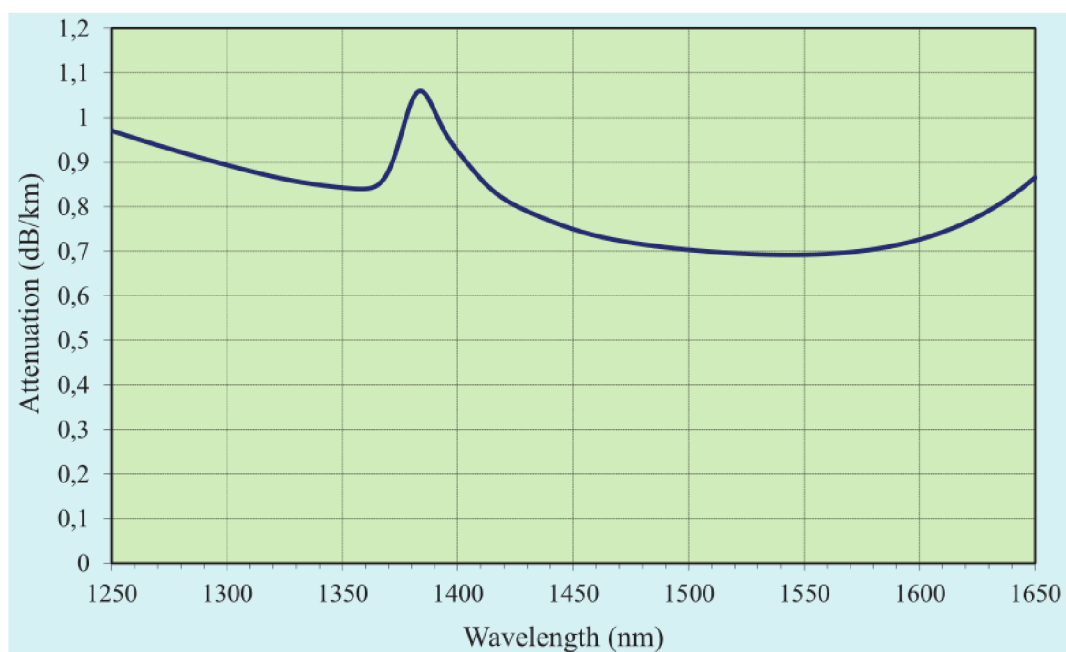




Obr. 3.7: OTDR průběh trasy 4 pro vlnovou délku 1 310 nm.

Spektrální profil:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB/km]
1 310	0,880
1 383	1,051
1 490	0,708
1 550	0,692
1 625	0,777



Obr. 3.8: Spektrální profil vlákna.

**Polarizační vidová disperze:**

PMD [ps]	1,80
Koeficient PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,9125
PMD 2.řádu [ps/nm]	1,4775

**Vyhodnocení trasy**

Naměřené hodnoty odpovídají technickým parametrům dle tab.3.1 s výjimkou spektrálního profilu optického útlumu trasy (červená hodnota v tabulce spektrálního profilu), který je dán typem použitého optického vlákna (pravděpodobně G.652A – tj. vlákno s tzv. Water Peakem) v převážné části trasy. Krátké úseky měly vliv na nadlimitní hodnoty měrného útlumu jednotlivých kabelových úseků mezi některými spoji.

Hodnota PMD řádově překračuje stanovený limit. Vzhledem k délce cca 4 km však nemusí mít zásadní vliv na přenosové parametry.

**3.1.5 Trasa 5****Popis trasy**

Trasa se skládá z 10 kabelových úseků, tvořených převážně kabely s vlákny SM G.652A. Vlákna jednotlivých úseků jsou spojena sváry v optických spojkách, resp. v rozvaděčích. U spojek jsou umístěny kabelové rezervy cca 30 m, v místě A je rezerva 40 m a v místě B 20 m. V koncových bodech jsou vlákna zakončena v rozvaděčích ODF navařením pigtailů E2000/APC, na straně A na ODF navazuje 15 m patchcord E2000/APC.

**Délka trasy:**

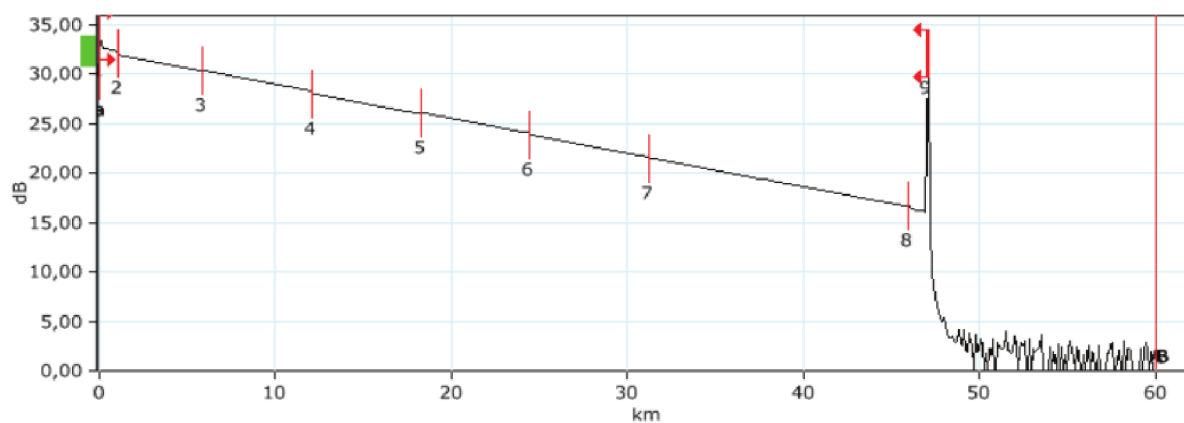
Délka [m] A→B	Délka [m] B→A	Průměr [m]
45 014	45 015	45 014,5

**Přímá metoda:**

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB] A→B	Útlum [dB] B→A	Průměr [dB]	ORL [dB] A→B	ORL [dB] B→A
1 310	15,53	15,31	15,42	32,33	31,37
1 550	9,22	9,12	9,17	32,34	31,81

**Metoda OTDR:**

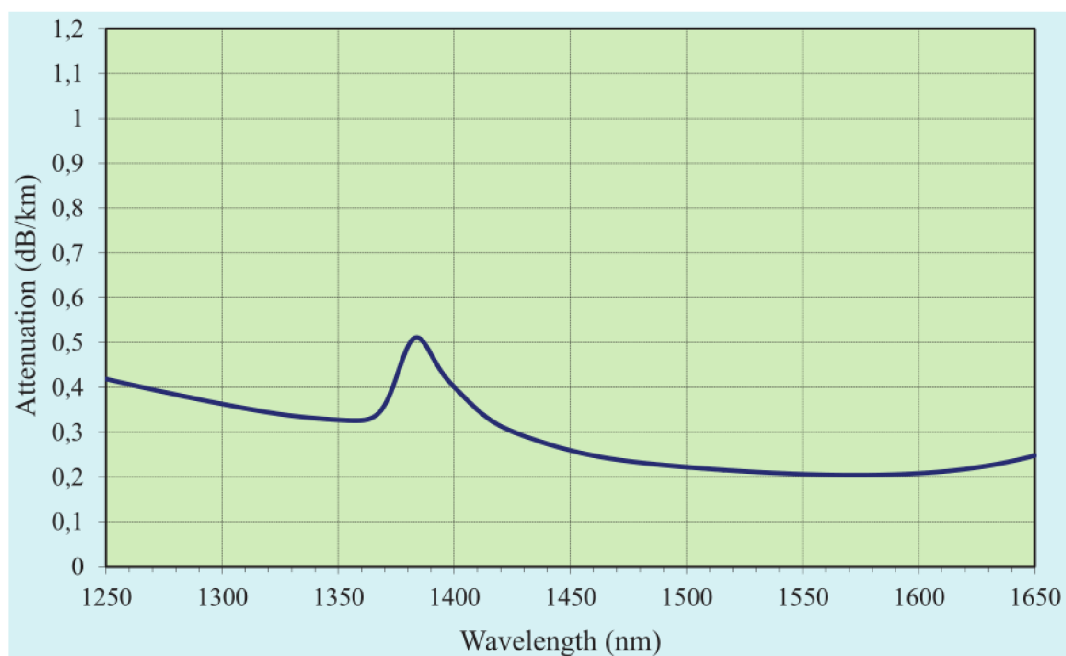
Parametry					
Vlnová délka [nm]	1 310	Rozsah [km]	60	Pulz [ns]	1 000
Doba měření [s]	30	Rozlišení [m]	2,556	Vys. rozlišení	ano
Výsledky					
Délka [m]	47 065	Útlum [dB]	16,608	Měrný útlum [dB/km]	0,353
Průměrný útlum sváru [dB]	0,108	Max. útlum sváru [dB]	0,388	ORL [dB]	31,87



Obr. 3.9: OTDR průběh trasy 5 pro vlnovou délku 1310 nm.

**Spektrální profil:**

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB/km]
1310	0,353
1383	0,504
1490	0,226
1550	0,206
1625	0,221



Obr. 3.10: Spektrální profil vlákna.

Polarizační vidová disperze:

PMD [ps]	0,34
Koeficient PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,0500
PMD 2.řádu [ps/nm]	0,0510

### Vyhodnocení trasy

Naměřené hodnoty odpovídají technickým parametrům dle tab. 3.1 s výjimkou spektrálního profilu optického útlumu trasy (červená hodnota v tabulce spektrálního profilu), který je dán typem použitého optického vlákna G.652A (tj. vlákno s tzv. Water Peakem) v převážné části trasy.

### 3.1.6 Trasa 6

#### Popis trasy

Trasa se skládá z 5 kabelových úseků, tvořených kabely s vlákny SM G.652D (4 úseky) a kabelem s vlákny SM G.657A (1 úsek). Vlákna jednotlivých úseků jsou spojena sváry v optických spojkách. U spojek jsou umístěny kabelové rezervy cca 30 m, v bodu A je rezerva 40 m a v bodu B 25 m. V koncových bodech jsou vlákna zakončena v rozvaděčích ODF navařením pigtailů E2000/APC.

Délka trasy:

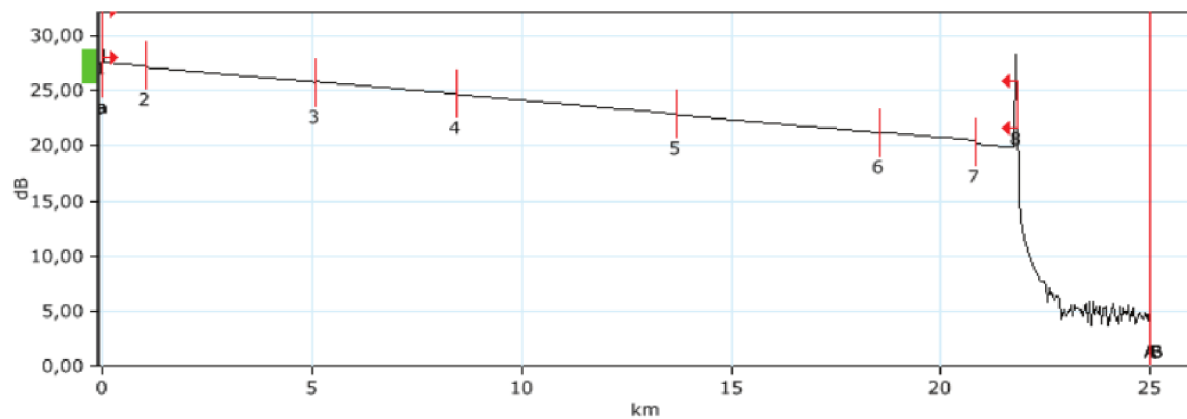
Délka [m] A→B	Délka [m] B→A	Průměr [m]
19 788	19 788	19 788

Přímá metoda:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB] A→B	Útlum [dB] B→A	Průměr [dB]	ORL [dB] A→B	ORL [dB] B→A
1 310	6,90	6,75	6,82	31,91	31,31
1 550	4,24	4,16	4,20	32,42	32,15

Metoda OTDR:

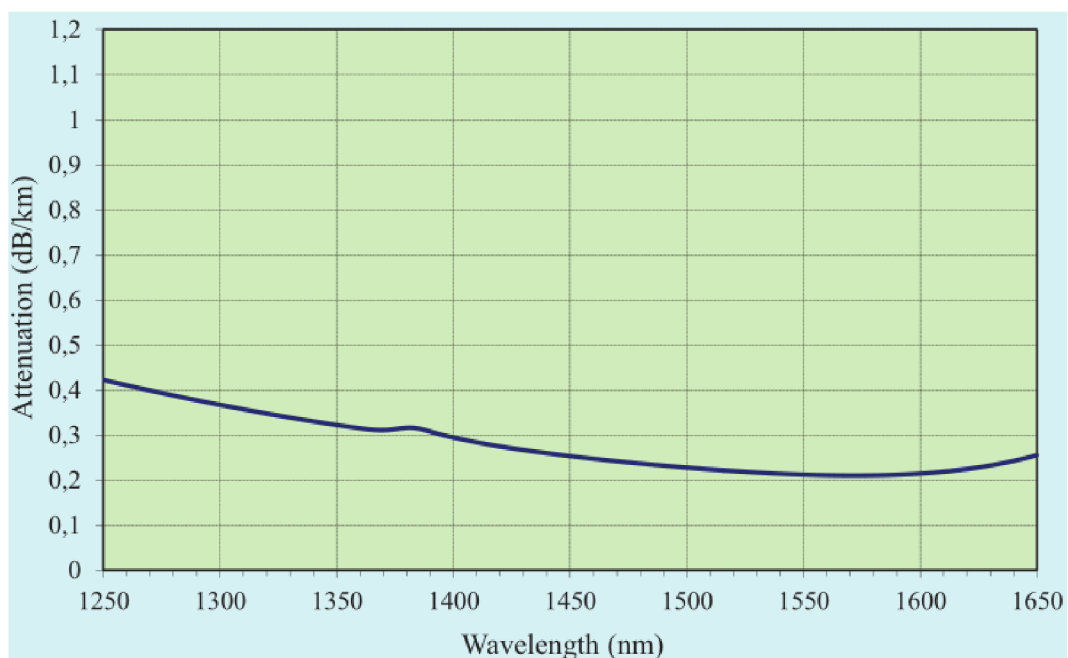
Parametry					
Vlnová délka [nm]	1 310	Rozsah [km]	25	Pulz [ns]	100
Doba měření [s]	30	Rozlišení [m]	0,320	Vys. rozlišení	ano
Výsledky					
Délka [m]	21 813	Útlum [dB]	7,785	Měrný útlum [dB/km]	0,357
Průměrný útlum sváru [dB]	0,035	Max. útlum sváru [dB]	0,162	ORL [dB]	27,67



Obr. 3.11: OTDR průběh trasy 6 pro vlnovou délku 1 310 nm.

Spektrální profil:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB/km]
1 310	0,357
1 383	0,315
1 490	0,230
1 550	0,212
1 625	0,228



Obr. 3.12: Spektrální profil vlákna.

**Polarizační vidová disperze:**

PMD [ps]	0,09
Koeficient PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,0197
PMD 2.řádu [ps/nm]	0,0035

**Vyhodnocení trasy**

Naměřené hodnoty odpovídají technickým parametrům dle tab.3.1.

**3.1.7 Trasa 7****Popis trasy**

Trasa se skládá z 25 kabelových úseků, tvořených kabely s vlákny G.652C (1 úsek), kabely s vlákny G.652D (4 úseky) a kabely s vlákny G.652A (20 úseků). Vlákna jednotlivých úseků jsou spojena sváry v optických spojkách, resp. v rozvaděčích. U spojek jsou umístěny kabelové rezervy cca 30 m, v bodu A je rezerva 20 m a v bodu B 25 m. V koncových bodech jsou vlákna zakončena v rozvaděčích ODF navařením pigtailů E2000/APC, na straně B na ODF navazuje 2m patchcord E2000/APC.

**Délka trasy:**

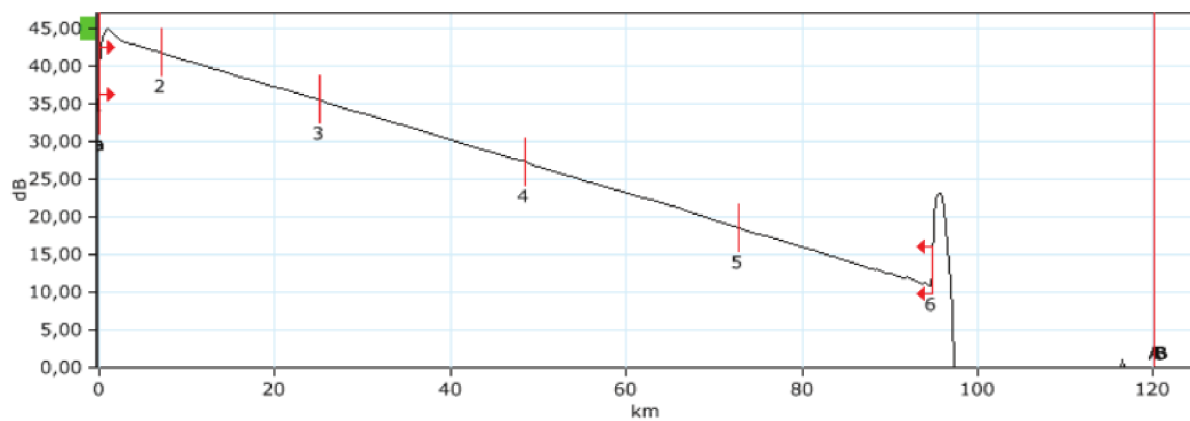
Délka [m] A→B	Délka [m] B→A	Průměr [m]
92 744	92 757	92 750,5

**Přímá metoda:**

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB] A→B	Útlum [dB] B→A	Průměr [dB]	ORL [dB] A→B	ORL [dB] B→A
1 310	33,42	32,98	33,19	31,82	27,73
1 550	20,09	19,94	20,01	32,09	29,27

**Metoda OTDR:**

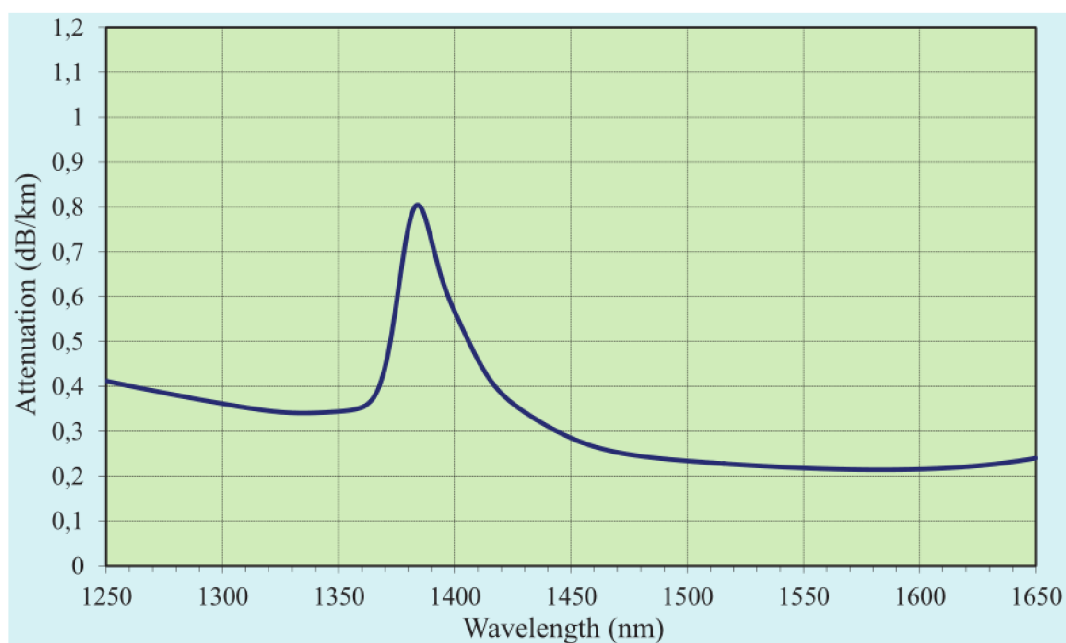
<b>Parametry</b>					
Vlnová délka [nm]	1 310	Rozsah [km]	120	Pulz [ns]	10 000
Doba měření [s]	30	Rozlišení [m]	2,556	Vys. rozlišení	ano
<b>Výsledky</b>					
Délka [m]	94 892	Útlum [dB]	33,542	Měrný útlum [dB/km]	0,353
Průměrný útlum sváru [dB]	0,150	Max. útlum sváru [dB]	0,208	ORL [dB]	31,27



Obr. 3.13: OTDR průběh trasy 7 pro vlnovou délku 1 310 nm.

Spektrální profil:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB/km]
1 310	0,353
1 383	0,787
1 490	0,239
1 550	0,218
1 625	0,223



Obr. 3.14: Spektrální profil vlákna.

Polarizační vidová disperze:

PMD [ps]	1,24
Koeficient PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,1288
PMD 2.řádu [ps/nm]	0,6924

### Vyhodnocení trasy

Naměřené hodnoty odpovídají technickým parametrům dle tab. 3.1 s výjimkou spektrálního profilu optického útlumu trasy (červená hodnota v tabulce spektrálního profilu), který je dán typem použitého optického vlákna G.652A (tj. vlákno s tzv. Water Peakem) v převážné části trasy. Některé delší úseky tras jsou mírně nadlimitní.

### 3.1.8 Trasa 8

#### Popis trasy

Trasa se skládá z 18 kabelových úseků, tvořených kabelem s vlákny SM G.652D (1 úsek) a kabely s vlákny SM G.652A (17 úseků). Vlákna jednotlivých úseků jsou spojena sváry v optických spojkách, resp. v rozvaděčích. U spojek jsou umístěny kabelové rezervy cca 30 m, v lokalitě A je rezerva 25 m a v lokalitě B 30 m. V koncových bodech jsou vlákna zakončena v rozvaděčích ODF navařením pigtailů E2000/APC, v bodu B navazuje kabelový patchcord E2000/APC délky 15 m.

Délka trasy:

Délka [m] A→B	Délka [m] B→A	Průměr [m]
88 287	88 300	88 293,5

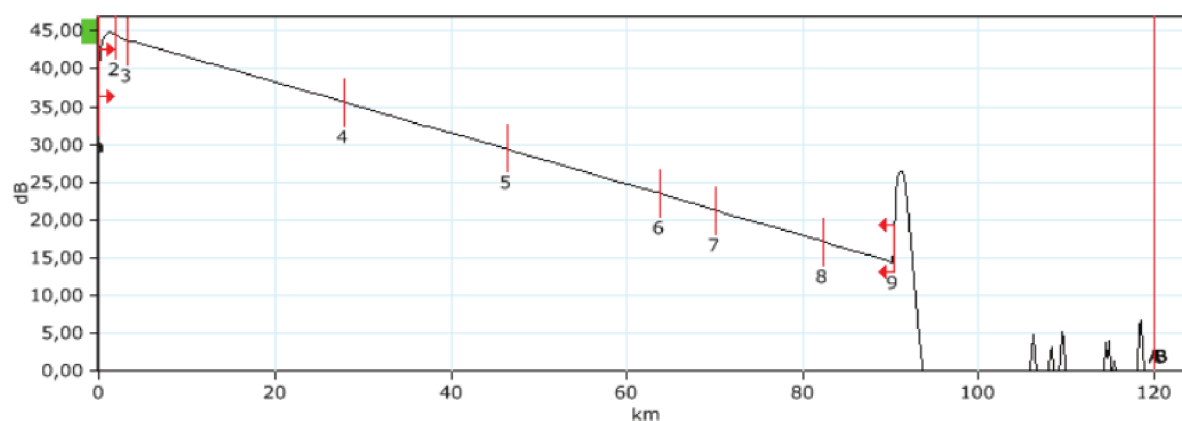
Přímá metoda:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB] A→B	Útlum [dB] B→A	Průměr [dB]	ORL [dB] A→B	ORL [dB] B→A
1 310	30,61	30,12	30,36	32,33	31,43
1 550	18,01	17,99	18,00	32,44	31,85

Metoda OTDR:

Parametry					
Vlnová délka [nm]	1 310	Rozsah [km]	120	Pulz [ns]	10 000
Doba měření [s]	30	Rozlišení [m]	2,556	Vys. rozlišení	ano
Výsledky					
Délka [m]	90 423	Útlum [dB]	31,073	Měrný útlum [dB/km]	0,344
Průměrný útlum sváru [dB]	0,107	Max. útlum sváru [dB]	0,384	ORL [dB]	32,44

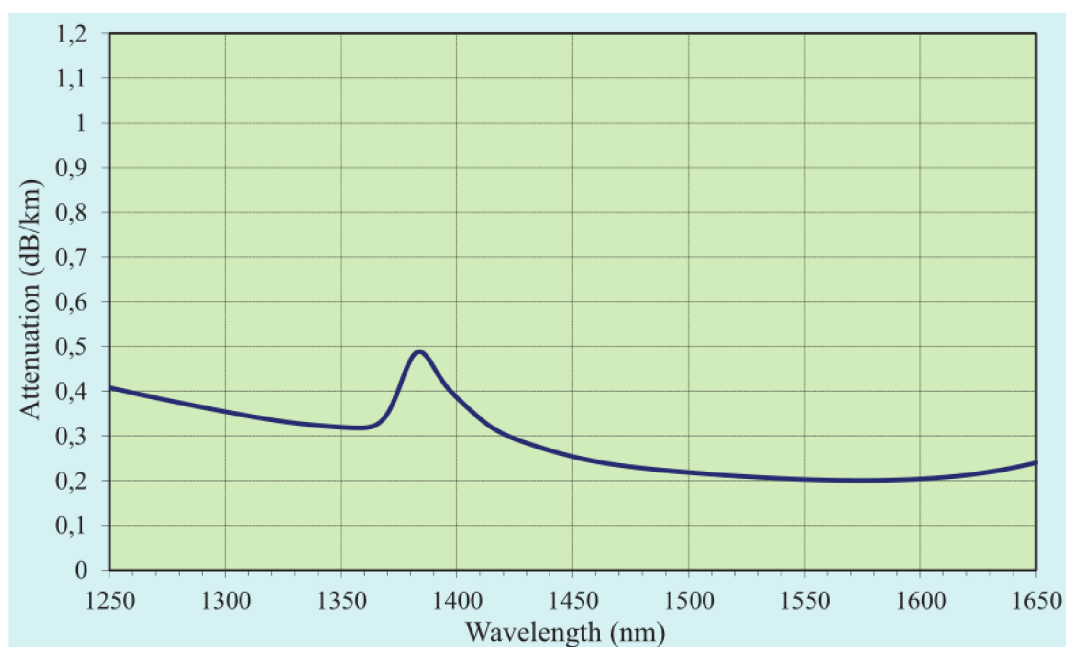




Obr. 3.15: OTDR průběh trasy 8 pro vlnovou délku 1 310 nm.

Spektrální profil:

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB/km]
1 310	0,345
1 383	0,482
1 490	0,223
1 550	0,203
1 625	0,216



Obr. 3.16: Spektrální profil vlákna.

**Polarizační vidová disperze:**

PMD [ps]	0,58
Koeficient PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,0614
PMD 2.řádu [ps/nm]	0,1510

**Vyhodnocení trasy**

Naměřené hodnoty odpovídají technickým parametrům dle tab. 3.1 s výjimkou spektrálního profilu optického útlumu trasy (červená hodnota v tabulce spektrálního profilu), který je dán typem použitého optického vlákna G.652A (tj. vlákno s tzv. Water Peakem) v převážné části trasy.

**3.2 Posouzení vlivu PMD disperze na síť FTTx**

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3.1, kromě útlumu jsou dalším limitujícím parametrem optických sítí, disperze. Většina výrobců PMD a CD analyzátorů doporučuje měřit disperze při instalaci nových tras a před instalací systémů s rychlostmi nad 10 Gbit/s [16]. Vzhledem k tomu, že FTTx síť (AON i PON) dosahují rychlostí nad 10 Gbit/s na vzdálenosti až několik desítek kilometrů, je vhodné posoudit možný vliv disperzí. Z důvodu toho, že CD je relativně stabilní a lze tedy vhodně kompenzovat, budeme se zabývat spíše PMD, která je do určité míry náhodná, a proto těžce kompenzovatelná.

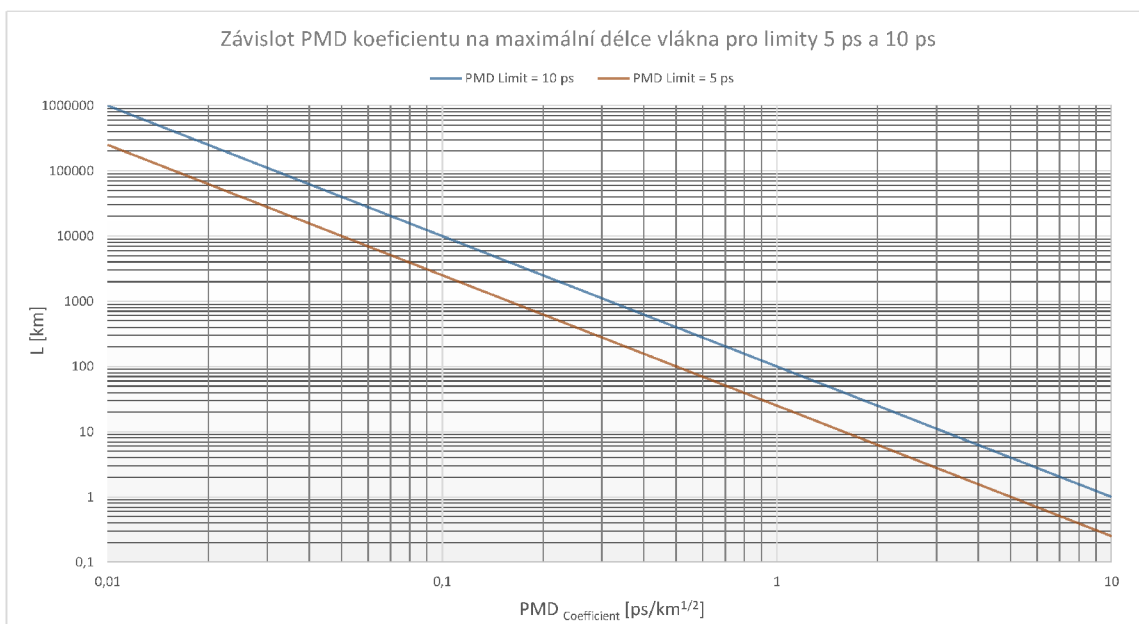
S příchodem PON standardů s přenosovými rychlostmi nad 10 Gbit/s je vhodné se zamyslet i nad nutností měření PMD v PON sítích. Zvláště pokud by se nejednalo o novou instalaci, ale o nasazení systému na starší vlákna.

Pro posouzení vlivu PMD disperze na PON síť byl vytvořen simulační model s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s v simulačním softwaru OptSim v5.2 [68]. Na základě simulace byly vyhodnoceny výsledky maximální dosažitelné vzdálenosti sítě v poměru k dělicímu poměru. Vzhledem k tomu, že simulační software neumožňuje implementaci FEC, byla jako limitní hodnota chybovosti brána hodnota  $10^{-9}$ . Optický rozbočovač s menším dělicím poměrem vkládá do trasy menší vložný útlum a díky tomu lze dosáhnout delší vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že některá starší vlákna mohou dosahovat hodnot koeficientu PMD přes  $1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , je důležité zaměřit se na měření disperzí [63].

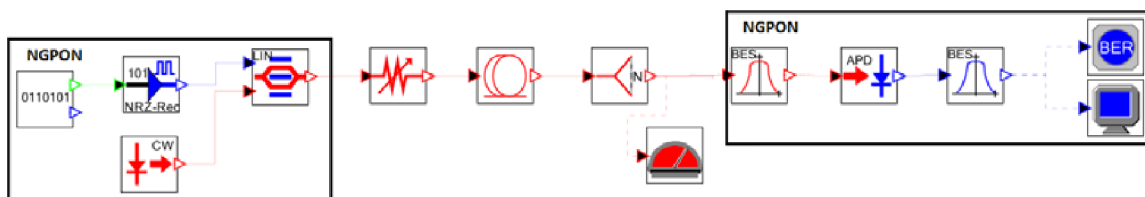
Obecně platí PMD limit 10 ps pro síť s rychlostí 10 Gbit/s [59], [29]. Z výsledků výzkumu společnosti JDSU však vyplývá, že pro PON síť je limit jen 5 ps, a to kvůli robustnímu FEC a nižší pravděpodobnosti přijetí výpadku [59]: pro SONET/SDH (Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy) sítí je udáváno  $10^{-5}$ , kdežto u PON je to  $10^{-7}$ . Na základě teoretických podkladů lze vytvořit následující graf (viz obr. 3.17) se zobrazením závislosti PMD koeficientu na délce vlákna s vyznačením limitních hodnot 5 ps a 10 ps.

**3.2.1 Simulační model**

Simulační model byl vytvořen v simulačním softwaru OptSim v5.2. Schéma navrženého modelu je zobrazeno na obr. 3.18 a vychází z [44].



Obr. 3.17: Závislost PMD limitu na délce vlákna pro PMD koeficienty 5 a 10 ps.



Obr. 3.18: Schéma zapojení modelu NG-PON s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s.

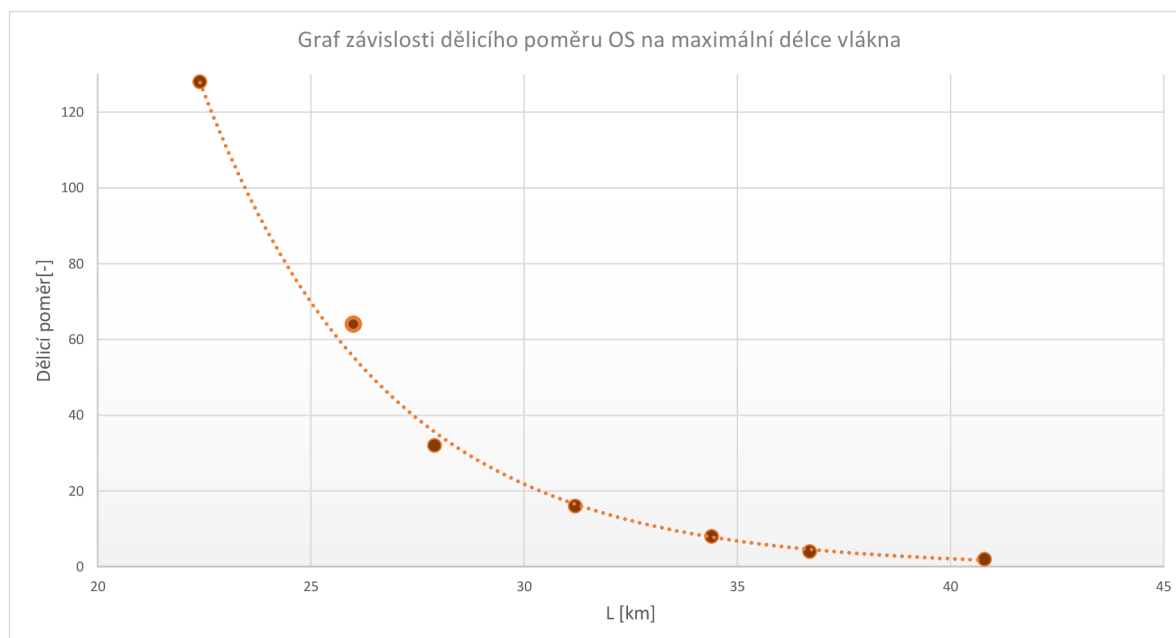
Základní parametry modelu jsou zobrazeny v tab. 3.2.

Zdroj dat		Modulátor	
Přenosová rychlost	9,95328 Gbit/s	REC NRZ	Nížká: 0 V
Sekvence	Náhodná		Vysoká: -5 V
CW laser		ODN	
Výs. výkon	6 dBm	Délka	20–45 km
$\lambda$	1 577 nm	Útlum	0,2 dB/km
Fotodetektor		Opt. rozbočovač	
APD	0,863 A/W@1 577	Delicí poměr	1:2–1:128

Tab. 3.2: Parametry modelu sítě NG-PON. Pozn. ODN – Optical Distribution Network.

Pro navržený systém byl měněn dělicí poměr OS od 1:2 do 1:128 pro zjištění limitů vzdálenosti. Jak je vidět z grafu na obr. 3.19, limit vzdálenosti se měnil v rozsahu 20–40 km. Srovnáním s PMD limity z grafu na obr. 3.17 lze usoudit, že pro PMD limit

10 ps bude systém ovlivněn pokud PMD koeficient bude větší než  $1,6 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ . Pro PMD limit 5 ps by koeficient PMD neměl překročit hodnotu  $0,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ . Vzhledem k tomu, že ITU-T doporučuje pro NG-PON sítě použít dělicí poměr alespoň 1:64, maximální dosažitelná vzdálenost systému je 26 km. Pro danou vzdálenost je při limitu 10 ps hodnota maximálního koeficientu PMD  $2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , respektive  $1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  pro PMD limit 5 ps.



Obr. 3.19: Závislost dělicího poměru na maximální délce vlákna pro daný model.

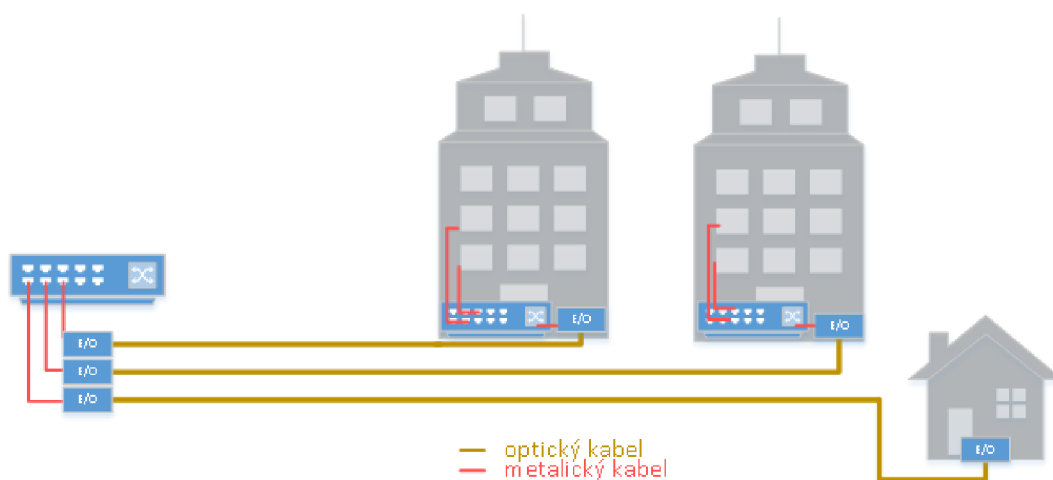
Pro eliminaci vlivu OS na celkovou hodnotu PMD přenosového systému, bylo provedeno měření planárních a fúzních OS. Pomocí EXFO FTB-5700 PMD analyzátoru bylo provedeno obousměrné měření planárního OS vyrobeného společností SQS s dělicím poměrem 1:4 (25 % na každý výstup) a fúzního OS společnosti Optokon 1:4 (25 % na každý výstup). Pro planární rozbočovač vyšel koeficient PMD  $0,002 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  a pro fúzní  $0,004 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .

### 3.2.2 Zhodnocení

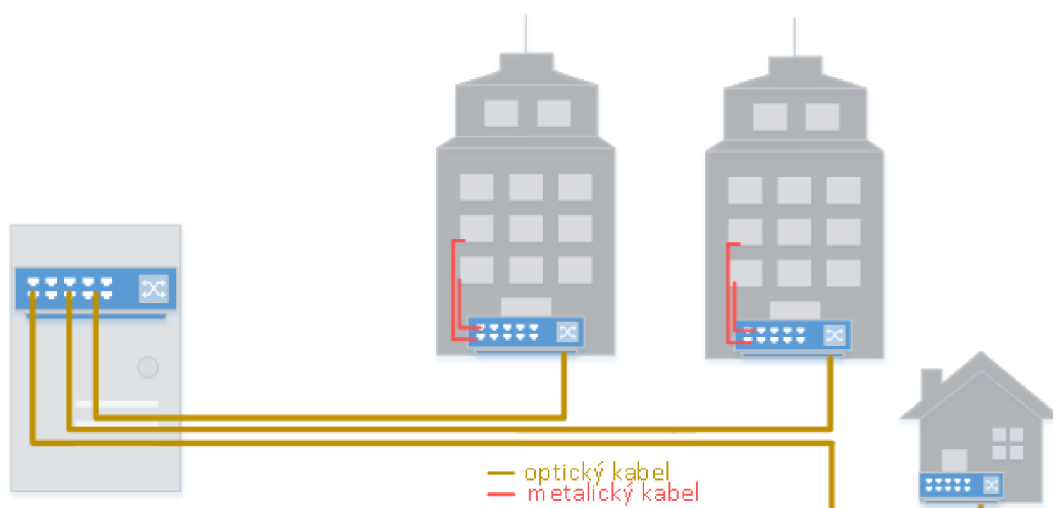
Jak AON sítě, tak i NG-PON sítě mohou být ovlivněny PMD pokud je systém nasazován na starší optická vlákna s vyšší hodnotou PMD koeficientu. Pro minimální dělicí poměr 1:64 je maximální dosažitelná vzdálenost systému 26 km a při PMD limitu 5 ps může být PMD koeficient vlákna maximálně  $1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ . Doporučením proto je instalace 10Gbit systému na nová vlákna a měření PMD před nasazováním těchto systémů. Pro zjištění vlivu optických rozbočovačů na PMD bylo provedeno měření planárních a fúzních OS. Z měření je patrný jen minimální vliv na celkovou PMD.

### 3.3 Porovnání plně optických switchů a media-konvertorů pro využití v sítích FTTx

Vzhledem k vysoké ceně prvků pro pasivní optické sítě a naopak relativně nízké ceně optických vláken, volí řada ISP (Internet Service Provider) instalaci P2P sítí, kdy jednotlivé uživatelské jednotky (domy, budovy) jsou připojeny individuálními vlákny [25]. Místo OLT a ONU jednotek, které se používají v PON sítích, jsou zde většinou použity media-konvertory nebo plně optické, případně opticko-metalické switche<sup>1</sup>. Návrhy sítí s media-konvertory a optickými přepínači jsou na obrázcích 3.20 a 3.21.



Obr. 3.20: Model sítě s použitím media-konverorů.



Obr. 3.21: Model s použitím optických switchů.

<sup>1</sup>Switch je obecně uznávaný termín v telekomunikacích, proto tento termín nebude překládán a bude používán v celé práci. Český ekvivalent může být např. přepínač.

### Media-konvertory

Nebo také opticko-elektrické (O/E) či elektricko-optické (E/O) převodníky jsou aktivní prvky, které umožňují převádět signál z elektrické oblasti do oblasti optické a naopak. Parametry media-konvertorů se liší v závislosti na potřebě pro danou instalaci. Existují media-konvertory jak s levnými LED (Light Emitting Diode) diodami pro mnohovlákna na propojení krátkých vzdáleností, tak i s kvalitními DFB diodami pro jednovlákna na dlouhé vzdálenosti. Přenos může být realizován pomocí oddělených vláken nebo pomocí WDM technologie. Dle standardů IEEE 802.3u lze realizovat O/E převod na 10/100 Mbit/s Ethernet a dle IEEE 802.3z i na Gigabit Ethernet. Převodníky mohou být realizovány jako samostatné zařízení, PCI (Peripheral Component Interconnect) karta do stolního počítače, nebo speciální karta pro instalaci do serverů. Optický vstup/výstup pak může být osazen konektorem (FC, LC, atd.) nebo SFP (Small Form-factor Pluggable) slotem (portem).

### Optické switche

Existují plně optické switche, které mají všechna rozhraní čistě optická. Tyto switche se převážně používají v CO (Central Office). Naopak opticko-metalické switche, které mají většinou optická rozhraní jen na vstupu a zbylá rozhraní jsou metalická. Případně může switch obsahovat volné SFP sloty, které lze osadit potřebným rozhraním. Na rozdíl od media-konvertorů, kde základní řady neumožňují žádný management, většina switchů, tedy i základní, management umožňují.

## 3.3.1 Použitá zařízení

Pro měření byly zapůjčeny 2 media-konvertory: TP-Link MC 111CS a TP-Link MC 112CS, dále 4 SFP moduly: 2× MRV Communications SFP-FD-BX35 a 2× Signamax 300-77WDM, a 3× optický převodník: Signamax 300-7851, Edge-Core ES3528M a Edge-Core ES3528M-SFP.

### Media-konvertory TP-Link MC 111CS a TP-Link MC 112CS

Konvertory jsou určeny k převodu fyzické vrstvy z optického prostředí 100BASE-FX na metalickou část 100Base-TX a naopak. Pro přenos dat je využita technologie WDM, tj. pouze jeden optický kabel pro odesílání a příjem dat, což snižuje náklady na kabeláž. Využívá vlnové délky 1 550 a 1 310 nm pro odesílání a příjem dat. Media-konvertory splňují standardy IEEE 802.3u 10/100Base-TX a 100Base-FX. Mezi další funkce tohoto modulu patří možnost použití jako samostatného zařízení (nevyžaduje žádné šasi) nebo se šasi TP-LINK 19". Na obr. 3.22 je zobrazen media-konvertor MC 111CS.



Obr. 3.22: Media-konvertor TP-Link MC 111CS.

### Switch Signamax 300-7851

Jedná se o plně manažovatelný L2 switch s podporou služeb Triple Play (data, video a zvuk). Switch obsahuje 16 SFP slotů, 8 Combo portů SFP nebo 10/100/1000Base-T. Umožňuje řízení rychlosti každého portu a je zde i podpora VLAN (Virtual Local Area Network). Pro nastavení je k dispozici intuitivní webová grafická uživatelská rozhraní nebo průmyslový standard rozhraní příkazového řádku, CLI (Command Line Interface).

### Switche Edge-Core ES3528M a ES3528M-SFP

Jedná se o výkonné plně manažovatelné L2/L4 switche. Model ES3528M (na obr. 3.23) obsahuje 24× 10/100Base-T port a 4× Gigabit Combo port (RJ45/SFP). Model ES3528M-SFP obsahuje 24× Fast Ethernet SFP port, 2× metalický port 10/100/1000Base-T a 2× Gigabit Ethernet Combo port (RJ45/SFP). Oba dva switche mají řadu nadstandardních funkcí pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu sítě a pro zajištění vysoké kvality poskytovaných služeb – QoS (Quality of Services), jako jsou přenos dat, hlasu – VoIP (Voice over Internet Protocol) či videa.



Obr. 3.23: Switch Edge-Core ES3528M-SFP.

### SFP moduly MRV Communications

Moduly SFP-FD-BX35 umožňují obousměrný vysokorychlostní přenos rychlostí 100 až 155 Mbit/s pomocí jednoho optického vlákna. Využívány jsou vlnové délky 1550 a 1310 nm. Podporují standardy Fast Ethernet a OC-3/STM-1, a maximální dosah pomocí těchto modulů je 28 km. Modul je kompatibilní i se zařízeními jiných výrobců (např. Cisco Systems, Inc).

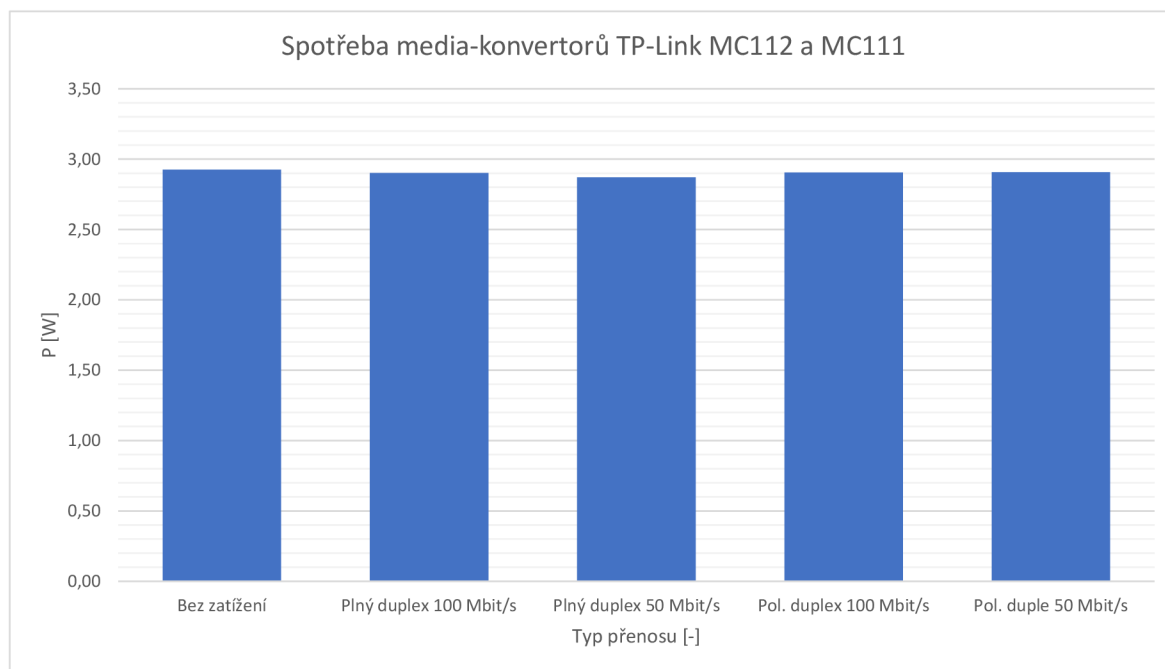
### SFP moduly Signamax

Moduly 300-77WDMA a 300-77WDMB umožňují obousměrný vysokorychlostní přenos rychlostí až 1 Gbit/s pomocí jednoho optického vlákna. Využívány jsou vlnové délky 1550 a 1310 nm. Maximální dosah pomocí těchto modulů je 10 km. Modul je kompatibilní i se zařízeními jiných výrobců (např. Cisco Systems, Inc).

## 3.3.2 Měření příkonu jednotlivých zařízení

Příkon konvertorů TP-Link byl měřen při zapojení do testovací sítě dle 100Base-TX. Z výsledků je zřejmé, že velikost provozu nemá na příkon media-konvertorů žádný vliv. Při téměř nulovém provozu dosáhla průměrná spotřeba media konvertoru hodnoty 2,93 W  $\pm$  6,8 %. Při plném duplexu a zatížení rychlostí 100 Mbit/s byla naměřena hodnota 2,90 W  $\pm$  5 % a při zatížení 50 Mbit/s hodnota 2,87 W  $\pm$  3,7 % [25]. Při polovičním duplexu a zatížení 100 Mbit/s byla hodnota 2,91 W  $\pm$  5,3 % a při zatížení 50 Mbit/s hodnota 2,91 W  $\pm$  4,5 %. Průměrná spotřeba pro všechna měření vychází 2,90 W  $\pm$  0,7 %, což znamená,





Obr. 3.24: Spotřeba media-konvertorů TP-Link.

že provoz nemá vliv na spotřebu zařízení. Na obr. 3.24 jsou zobrazeny naměřené hodnoty pro media-konvertory.

Dále byl měřen příkon tří různých switchů, které byly představeny v kapitole 3.3.1. Vzhledem k tomu, že switch Edge-Core ES3528M obsahuje většinu portů pro metalické sítě (RJ45), byla spotřeba tohoto switchu při plném zatížení podstatně nižší než u zbylých testovaných switchů. Spotřeba switchu ES3528M byla bez zatížení  $15,45 \text{ W} \pm 1,9 \%$  a  $22,44 \text{ W} \pm 1,3 \%$  při plném zatížení. U zbylých dvou byly pro měření použity i SFP moduly. Při plném zatížení byla spotřeba switchu ES3528M-SFP  $42,53 \text{ W} \pm 0,6 \%$ . Bez zatížení byla spotřeba více než poloviční, a to  $18,52 \text{ W} \pm 1,7 \%$ . Hodnoty switchu Signamax 300-7851 byly téměř totožné s předchozím typem. Bez zatížení byla spotřeba  $17,56 \text{ W} \pm 1,5 \%$  a při plném zatížení  $41,45 \text{ W} \pm 0,7 \%$ .

U switchů s SFP moduly vychází cca 1 W na každý další aktivní SFP modul zapojený do switchu. Na obr. 3.25 jsou zobrazeny naměřené hodnoty pro jednotlivé modely switchů.

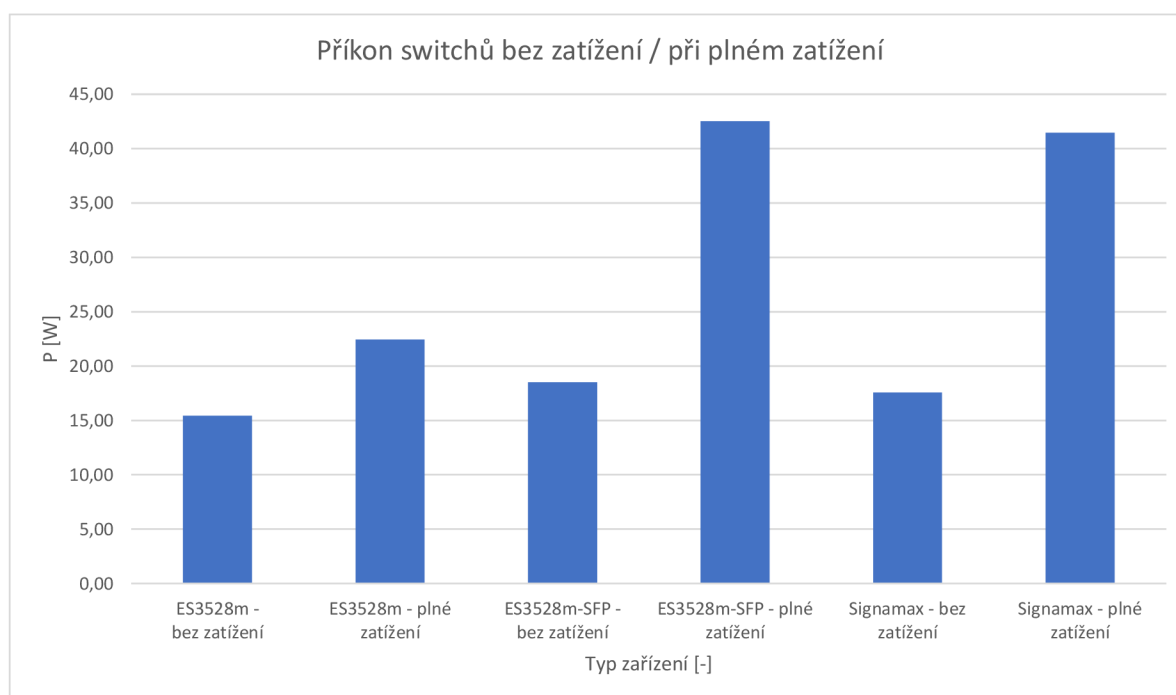
### 3.3.3 Srovnání nákladů pro jednotlivé varianty sítí

Pro posouzení nákladů na realizaci a provoz obou sítí budeme vycházet z modelů obdobných scénářům na obrázcích 3.20 a 3.21. Pro simulaci plného zatížení budeme počítat s připojením 24 objektů (10 domů a 14 budov), přičemž v každé budově bude připojeno maximum, tedy 24 uživatelů. Situaci, kdy bude jen minimální provoz pak bude naopak představovat připojení jen čtyř objektů (2 domy a 2 budovy).

#### Realizace pomocí media konvertorů

Pro propojení jednotlivých objektů s CO je využito media-konvertorů, ze kterých je signál následně přiveden do L2 switchu v budově. V domě budeme předpokládat použití jen jednoho PC (Personal Computer) – tedy za media-konvertorem už by nebyl žádný





Obr. 3.25: Spotřeba jednotlivých switchů při plném zatížení a bez zatížení.

další prvek. V budovách bude switch sloužit k připojení požadovaného počtu účastníků pomocí metalického vedení. Do každého domu/budovy je tak přivedeno vlastní jednovidové optické vlákno. Cenová kalkulace je provedena dle dostupných informací běžné maloobchodní nabídky.

Položka	Množství	Cena v tis. Kč	Celkem v tis. Kč	Spotř./rok [kW]	Spotř./rok v tis. Kč
MC 111CS	4	1	4	105	0,5
MC 112CS	4	1	4	105	0,5
EC 3528M	3	5	15	420	2,1
<b>Cena celkem v tis. Kč</b>			<b>23</b>		<b>3,1</b>

Tab. 3.3: Náklady na aktivní prvky pro první topologii při minimálním zatížení a jejich roční spotřeba při ceně 5 Kč/kW.

Položka	Množství	Cena v tis. Kč	Celkem v tis. Kč	Spotř./rok [kW]	Spotř./rok v tis. Kč
MC 111CS	24	1	24	630	3,2
MC 112CS	24	1	24	630	3,2
EC 3528M	15	5	75	2 950	14,8
<b>Cena celkem v tis. Kč</b>			<b>123</b>		<b>21,2</b>

Tab. 3.4: Náklady na aktivní prvky pro první topologii při plném zatížení a jejich roční spotřeba při ceně 5 Kč/kW.

### Realizace pomocí switchů

Pro propojení jednotlivých objektů s CO je využito switchů s SFP moduly. Oproti první variantě zde není nutná instalace dalšího switchu v budovách. Stejně tak v CO stačí jeden aktivní prvek, a to EC 3528M-SFP, který umožní napojení až 24 objektů. V domě budeme předpokládat použití jen jednoho PC – zde je nevýhodou použití switchu s více porty, které zůstanou neobsazeny. V budovách bude switch sloužit k připojení požadovaného počtu účastníků pomocí metalického vedení. Do každého domu/budovy je tak přivedeno vlastní jednovidové optické vlákno. Cenová kalkulace je provedena dle dostupných informací běžné maloobchodní nabídky.

Položka	Množství	Cena v tis. Kč	Celkem v tis. Kč	Spotř./rok [kW]	Spotř./rok v tis. Kč
EC 3528M	4	5	20	541	2,7
EC 3528M-SFP	1	20	20	162	0,8
SFP-FD-BX53	8	1	8	70	0,35
<b>Cena celkem v tis. Kč</b>			<b>48</b>		<b>3,85</b>

Tab. 3.5: Náklady na aktivní prvky pro druhou topologii při minimálním zatížení a jejich roční spotřeba při ceně 5 Kč/kW.

Položka	Množství	Cena v tis. Kč	Celkem v tis. Kč	Spotř./rok [kW]	Spotř./rok v tis. Kč
EC 3528M	24	5	120	5 003	25
EC 3528M-SFP	1	20	20	363	2
SFP-FD-BX53	48	1	48	–	–
<b>Cena celkem v tis. Kč</b>			<b>188</b>		<b>27</b>

Tab. 3.6: Náklady na aktivní prvky pro druhou topologii při plném zatížení a jejich roční spotřeba při ceně 5 Kč/kW (spotřeba SFP je již zahrnuta ve spotřebách switchů).

### 3.3.4 Zhodnocení

Z tabulek 3.3–3.6 vyplývá, že nejdražší je realizace návrhu s maximálním využitím kapacity prvků při použití optických a opticko-metalických switchů, 188 tis. Kč. Při použití media konvertorů lze podobnou síť realizovat za cenu cca 123 tis. Kč. Pokud bychom však porovnali spotřebu jednotlivých zařízení, zjistíme, že každý rok by byl provoz na síť s media-konvertory nákladnější o cca 6 tis. Kč.

V případě malé sítě, kdy je potřeba připojit jen 4 objekty, vychází nejlevněji varianta s media-konvertory, 23 tis. Kč. Oproti tomu varianta se switchi vychází více než dvojnásobně dražší, 48 tis. Kč, přičemž spotřeba obou variant je téměř shodná.

Výhodou varianty používající media-konvertory je beze sporu její jednoduchost, škálovatelnost a cena. Avšak každá ze zmíněných výhod může být při bližším zkoumání nevýhodou. Jednoduché prvky jsou dostačující, dokud nenastane potřeba nové funkce/možnosti nastavení. Mnohdy se zdá být plně dostačující použití jednoduchého media-konvertoru pro připojení několika domácností – hlavně z pohledu technika, který zařízení jen zapojí a nic nemusí konfigurovat. V případě nabídky nových služeb pro uživatele však může nastat problém v jednoduchosti zařízení, protože zde chybí možnost jakéhokoli nastavení a podpory např. multicastového přenosu, kvality služeb QoS, atd.

Vzhledem k tomu, že s rostoucím počtem prvků roste i potřeba více místa v rozvaděčích, případně nutnost instalace nových rozvaděčů v CO. To s sebou samozřejmě nese zvýšené náklady. Proto je vhodnější snažit se využívat více-portová zařízení.

I když je cena mnohdy hlavním faktorem při návrhu sítě, měl by být návrh realizován s rozvahou. Díky spotřebě jednotlivých aktivních prvků, se může během několika let dražší a kvalitnější síť stát finančně výhodnější.

Důležitým faktorem pro mnoho ISP neřeší spotřebu zařízení a instalují raději aktivní P2P síť založené na media-konvertorech nebo pomocí optických a opticko-metalických switchů je, že neplatí v objektech uživatelů za odběr elektřiny. Tím pádem se nemusí dívat dopředu a řešit návratnost kvalitní sítě a její efektivnost. S množstvím aktivních i pasivních prvků v síti však roste její robustnost a síť se stává nepřehlednou a složitou na údržbu a provoz. Jedinou výhodou tak zůstává téměř neomezená šířka přenosové kapacity díky propojením každého objektu s CO.

Pokud bychom danou síť pro 24 objektů chtěli realizovat jako pasivní optickou síť, stačilo by aktivní prvek v CO nahradit pasivním optickým rozbočovačem a přesunout tak CO blíže k páteřní síti. I když se PON síť u nás pomalu budují, stále řada ISP volí P2P topologii. Přitom výhody PON jasně převyšují – náklady na aktivní prvky jsou jen o málo větší, možná i totožné jak v případě P2P sítí (cena OLT se pohybuje v řádech desítek tis. Kč, ONU stojí řádově jednotky tis. Kč). Nespornou výhodou je snížení nákladů na provoz a servis sítě díky omezení počtu aktivních prvků.

### 3.4 Návrh a realizace vysokorychlostního optického přenosu založeném na OTDM

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3, dnes jsou pro PON sítě standardizovány přenosy rychlostí 40 Gbit/s, pro AON síť pak lze využít téměř jakoukoli technologii a tedy mít takřka neomezenou šířku pásma. Existují studie ([47], [37], [57], [48]), které představují rychlosti až 100 Gbit/s. Vzhledem k rostoucím požadavkům uživatelů je reálné, že během několika let budou představeny spoje pro páteřní sítě s přenosem Tbit/s a v přístupových sítích to budou právě zmiňované rychlosti až 100 Gbit/s. Sítě založené na TDM mohou být realizovány elektricky nebo opticky, přičemž aktuální ETDM dosahují nejvyšších rychlostí 100 GBd a 640 Gbit/s s použitím modulací NRZ (Non-return-to-Zero) a polarizačně multiplexované kvadrurní amplitudové modulace PDM-16-QAM (Polarization-Division Multiplexed Quadrature Amplitude Modulation). Modulace NRZ je považována za nejjednodušší implementaci. Nicméně je těžké a energicky náročné další zvyšování symbolové rychlosti ETDM, která je limitována hlavně elektrickým multiplexorem, E/O modulátorem a řídicími RF (Radio Frequency) zesilovači. Na druhé straně, pomocí OTDM bylo dosaženo symbolové rychlosti 1,28 TBd a přenosové rychlosti 9,5 Tbit/s jedním kanálem. Nicméně, klasický OTDM s RZ (Return-to-Zero) formátem je založen na časově prokládaných krátkých pulzech jako jsou Gaussianovy nebo Sechovy pulzy, které obvykle zabírají velkou šířku pásma ve frekvenční doméně. Kromě toho, časově prokládané pulzy mají náhodné nebo driftující vztahy mezi sebou a nemohou tak projít přísným filtrováním. To způsobuje obtížné zlepšení spektrální účinnosti SE (Spectral Efficiency) klasické OTDM a neefektivnost pro škálování do více WDM kanálů.

Pokud jsou spektra konvenčních OTDM signálů zúžena přísnou filtrací, dochází k nekoherentnímu rušení při vytváření taktovacích signálů a objevuje se efekt označovaný jako mezsímbolová interference ISI (Intersymbol Interference). Jedním z možných řešení omezení ISI mezi sousedícími kanály je vytvoření optických Nyquistových pulzů a použití ortogonality mezi TDM kanály. Na druhou stranu, pokud optická fáze sousedních kanálů je stabilní a korelovaná, dochází pouze ke koherentnímu rušení při vzájemném překrývání se sousedních kanálů a jsou vytvářeny jakoby NRZ signály. Tímto způsobem je možné se vyhnout ISI, dokonce i v případě, že signál má úzkou šířku pásma.

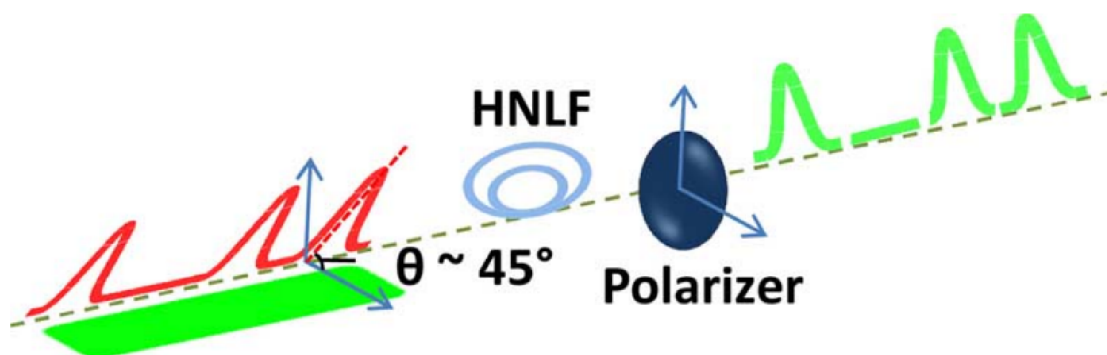
Fázově korelovaného PC-OTDM (Phase Correlated-OTDM) signálu může být dosaženo modulováním koherentní kontinuální vlny CW (Continuous Wave) světla s konvenčním (tj. fázově nekorelovaným) OTDM signálem. Vzhledem k tomu, že šířka pásma PC-OTDM signálu může být významně omezena bez ISI, vyšší spektrální účinnost může výrazně zvýšit toleranci k chromatické disperzi a polarizační vidové disperzi. Lze si také všimnout, že PC-OTDM signál má téměř shodné vlastnosti, jako ETDM signál o stejné baudové rychlosti, jak ve frekvenční, tak i v časové oblasti, což je praktický nástroj pro studium vysokorychlostních datových přenosů dříve, než bude k dispozici vysokorychlostní ETDM.

Společně s univerzitou DTU (Denmark Technical University) v Kodani, která se zabývá vysokorychlostními přenosy, byl na nejvýznamnější optické konferenci OFC (Optical Fiber Communication Conference and Exposition) prezentován návrh generování PC-OTDM signálu a první ukázka zkušebního přenosu NRZ datového signálu 640 GBd odvozeného z PC-OTDM RZ signálu [45].

Společně byl navržen a otestován 640 GBd fázově korelovaný OTDM (PC-OTDM) signál s návratem k nule (RZ) a ON-OFF klíčováním (RZ-OOK), založený na křížové-fázové modulaci vyvolané křížovou-polarizační rotací CPR (Cross-Polarization Rotation) ve vysoce nelineárním optickém vlákne Al-HNLF (Al-Highly Non-Linear Optical Fibre) a 640 GBd PC-OTDM bez návratu k nule (NRZ)-OOK signál pomocí RZ-NRZ konverze využívající pasivní filtraci. Tím byl realizován 1,19 Tbit/s PDM-NRZ-OOK zkušební přenos na vzdálenost 56 km s bitovou chybovostí BER  $< 3,8 \cdot 10^{-3}$  pro všech 128 TE (Transverse Electric) i TM (Transverse Magnetic) toků. Výhodou fázové koherence mezi sousedními TDM kanály je, že PC-OTDM signál může být velmi tolerantní k přísné filtraci a šířka pásma 640 GBd PC-OTDM NRZ-OOK signál tak může být omezen na 700 GHz. Tím bylo dosaženo prvního jednokanálového přenosu s rychlostí  $> 1$  Tbit/s a první 640 GBd přenos s šířkou pásma 800 GHz. Kromě toho, s užším spektrem je PC-OTDM NRZ-OOK signál více tolerantní k chromatické disperzi a polarizační vidové disperzi v porovnání s běžným (tj. fázově nekorelovaným) OTDM RZ signálem [45].

### 3.4.1 Generování PC-OTDM RZ a NRZ signálu

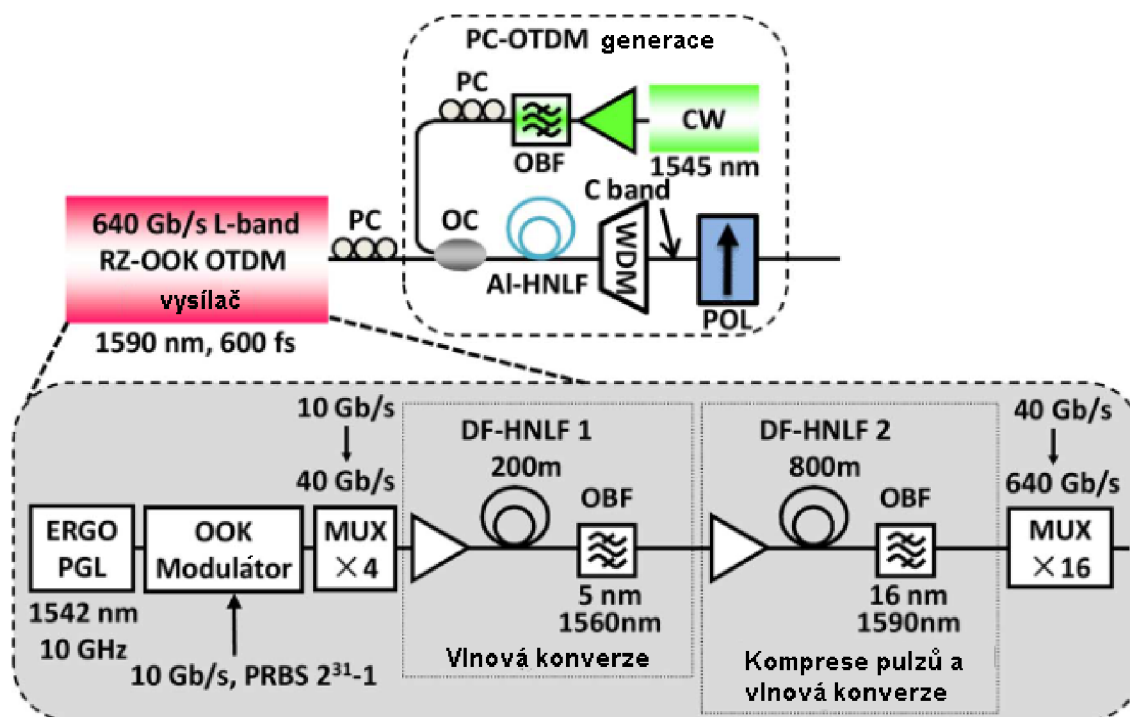
PC-OTDM signál je vytvářen na základě polarizačně rotujícího Kerrova switche, jak je zobrazeno na obr. 3.26.



Obr. 3.26: Princip činnosti generování PC-OTDM signálu založeného na CPR.

Datové pulzy s vlnovou délkou  $\lambda_0$  a CW svazek s vlnovou délkou  $\lambda_1$  jsou sloučeny a navázány do vysoce nelineárního optické vlákna. Na výstupu vlákna je umístěn polarizér s nastavením os ortogonálně k CW světlu. Polarizace dat je  $45^\circ$  s ohledem na polarizér. CW světlo je blokováno polarizérem pokud datová pumpa má logickou úroveň '0'. Pokud má naopak datová pumpa úroveň '1', Kerrův efekt začne vytvářet ve vlákne dvojlohu mezi směrem polarizace datové pumpy a jejím ortogonálním směrem. Proto stav polarizace CW světla bude rotovat vlivem dvojlohu a může projít skrz polarizér. Důsledkem toho fázově nekorelovaný OTDM datový signál spíná CW světlo a fázově korelovaný pulz-na-pulz signál je generován CW světlem.

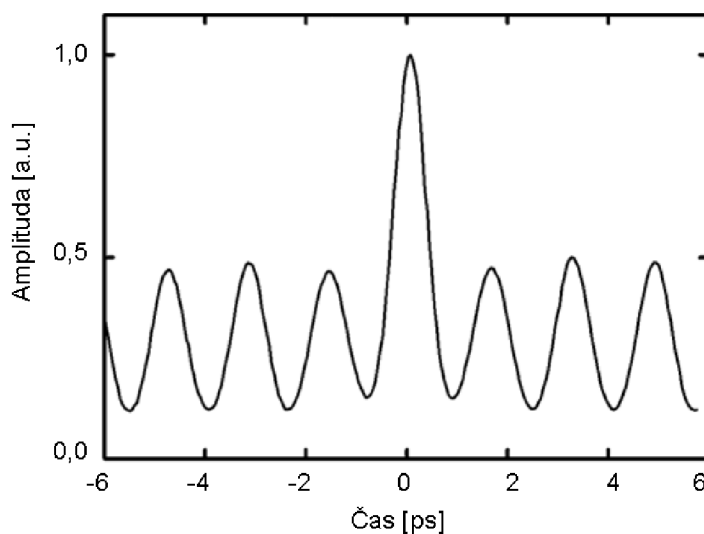
Uvedený obr. 3.27 zobrazuje experimentální zapojení PC-OTDM generátoru signálu, který zahrnuje 640 Gbit RZ-OOK OTDM vysílač v L-pásmu a PC-OTDM generátor. Ve vysílači jsou pomocí erbiu-vláknově-oscilujícího-pulzního laseru produkovány pulzy



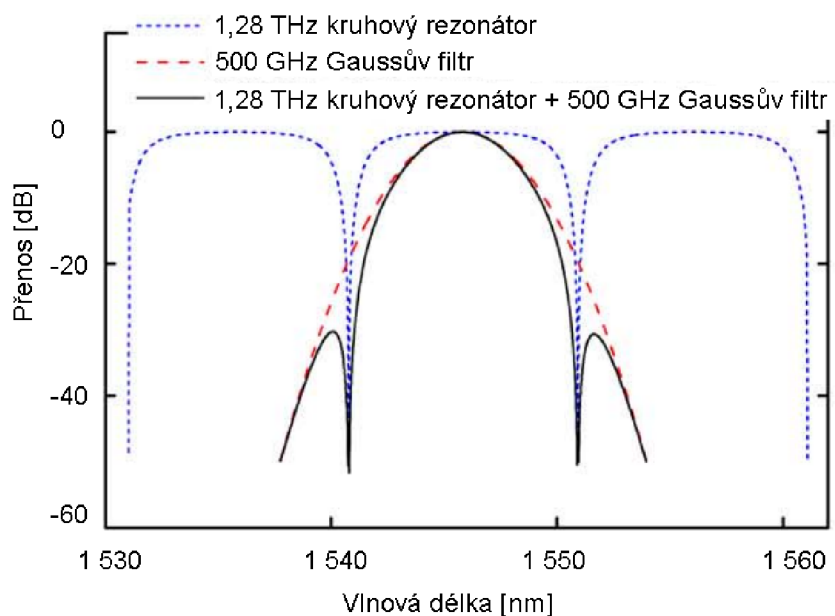
Obr. 3.27: Experimentální zapojení PC-OTDM generátoru signálu.

s opakovací frekvencí 10 GHz na vlnové délce 1 542 nm s plnou šířkou v polovině maxima FWHM (Full-Width at Half-Maximum) 1,5 ps. 10GHz pulzy jsou kódovány pomocí OOK modulace v Machově-Zehnderově modulátoru s 10Gbit signálem tvořeným pseudonáhodnou binární posloupností ( $2^{31}-1$ ). Modulovaný RZ-OOK signál 10 Gbit/s je multiplexován v čase na 40 Gbit/s pomocí pasivního polarizaci zachovávajícího (PM – Polarization Maintaining) vláknového zpožďovacího multiplexoru (MUX $\times$ 4). Datové pulzy 40 Gbit/s jsou vlnově konvertovány na 1 560 nm, díky vlastní fázové modulaci v 200m dlouhém disperzně zploštělém DF-HNLF 1 (Dispersion-Flattened HNLF). Toto vlákno disponuje parametry: disperze  $D = -0,33$  ps/nm/km, disperzním sklonem  $0,006$  ps/nm<sup>2</sup>/km@1550, nelineárním koeficientem  $\gamma = 10,5$  W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>) a následné mimo-středové filtraci. Vlnově konvertované 40Gbit datové pulzy na vlnové délce 1 560 nm s FWHM 1 ps jsou dále vlnově konvertovány na vlnovou délku 1 590 nm pulzně komprimovány na FWHM 600 fs díky SPM v dalším 800 m dlouhém DF-HNLF 2 (disperze  $D = -0,45$  ps/nm/km a disperzním sklonem  $0,0056$  ps/nm<sup>2</sup>/km@1550, nelineární koeficient  $\gamma = 10,5$  W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>) a následné mimo-středové filtraci. Po vlnové konverzi a pulzní kompresi je 40Gbit datový signál v L-pásmu dále multiplexován v čase na 640 Gbit/s pomocí dalšího PM vláknového zpožďovacího multiplexoru (MUX $\times$ 16). Autokorelační křivka a spektrum 640 Gbit/s fázově nekorelovaného datového signálu v L-pásmu jsou zobrazeny na obrázcích 3.28 až 3.30.

V PC-OTDM signálovém generátoru je 640Gbit signál v L-pásmu zesílen, pak vyfiltrován 20nm optickým filtrem OBF (Optical Bandpass Filter) typu pásmová propust a nakonec navázán do AI-HNLF pomocí WDM slučovače. Světlo z CW laseru na vlnové délce 1 545 nm je zesíleno pomocí erbiem-dopovaného vláknového zesilovače EDFA, filtrováno pomocí 1,3nm OBF a navázáno do AI-HNLF druhým portem WDM slučo-



Obr. 3.28: Autokorelační křivka 640 Gbit/s fázově nekorelačního OTDM RZ-OOK signálu v L-pásmu.

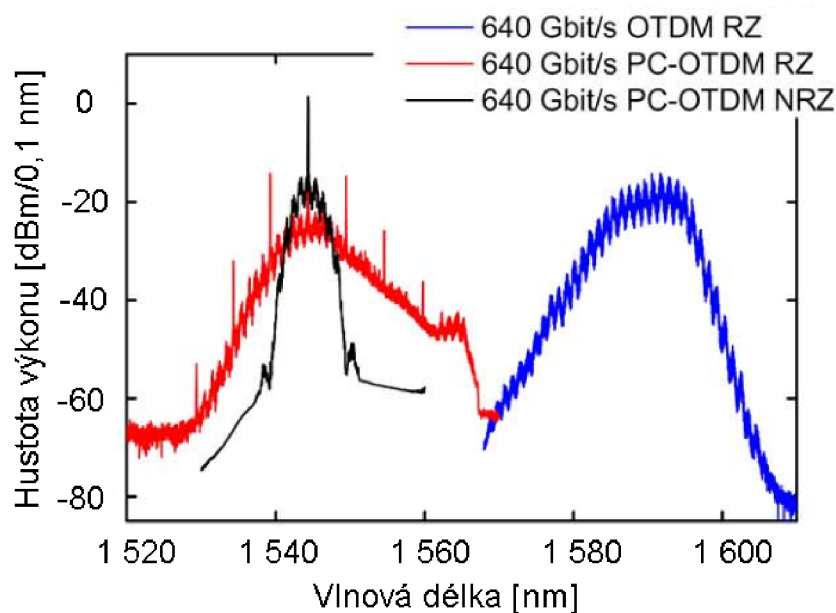


Obr. 3.29: Filtreační funkce pro převod PC-OTDM RZ na PC-OTDM NRZ.

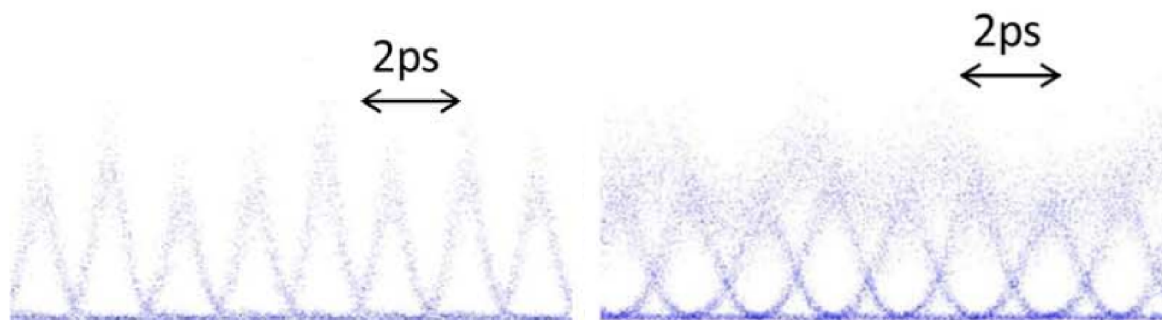
vače. Průměrný výkon datové pumpy a CW světla je 25, respektive 27 dBm. Napnuté hlinito-křemičité HNLF dlouhé 128 m slouží ke zvýšení prahu stimulovaného Brillouinova rozptylu. Nulová disperzní vlnová délka Al-HNLF je 1560 nm a slouží k minimalizaci rozchodu mezi datovou pumpou v L-pásmu a CW světlu v C pásmu. WDM rozbočovač na výstupu Al-HNLF je použit k rozdělení fázově korelovaného signálu v C-pásmu od fázově nekorelovaného signálu v L-pásmu. Na výstupu polarizéru je pak fázově korelovaný 640Gbit signál na vlnové délce 1545 nm. Vytvořený PC-OTDM 640Gbit signál pak



může být posouzen v 640Gbit přijímači, který bude popsán v kapitole 3.4.3. Jeden 10Gbit prítok je vybrán pro měření BER.



Obr. 3.30: Spektra 640Gbit fázově nekorelačního OTDM signálu v L-pásmu, 640Gbit PC-OTDM RZ a PC-OTDM NRZ signály.



Obr. 3.31: Diagramy oka optického vzorkování pro 640Gbit PC-OTDM RZ (vlevo) a NRZ (vpravo) signály.

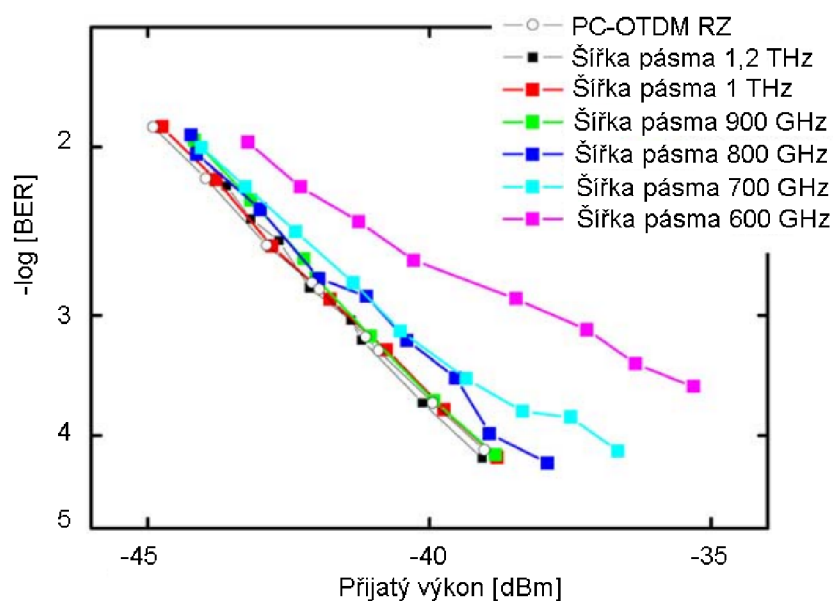
Vytvořený 640Gbit PC-OTDM RZ signál může být převeden na 640Gbit PC-OTDM NRZ signál průchodem přes filtrační funkci, která je kombinací 1,28THz kruhového rezonátoru a Gaussova filtru, jak je vidět na obr. 3.29. FWHM Gaussova filtru je nastaven na 500 GHz s cílem zmenšit šířku pásma. Další obr. 3.30 zobrazuje optická spektra vytvořených 640Gbit PC-OTDM RZ a NRZ signálů. Je zde jasně patrný 640GHz odstup modulačního vrcholu PC-OTDM signálu. Potlačení dvou postranních modulačních vrcholů a zúžením spektra pásmovou propustí může být PC-OTDM RZ signál převeden na PC-OTDM NRZ signál. Opticky vzorkované diagramy oka 640Gbit PC-OTDM RZ



a NRZ signálů jsou zobrazeny na obr. 3.31. Díky fázové koherenci PC-OTDM signálu dochází pouze ke stabilní koherentní interferenci mezi sousedními kanály v důsledku zúžení spektra. Rozšíření a překrývání datových pulzů nezpůsobuje nestabilní interferenci nebo nekoherentní šumy.

### 3.4.2 Charakteristika PC-OTDM signálu

Výhodou fázové koherence mezi sousedními kanály může být velká tolerance PC-OTDM NRZ signálu k přísné filtraci, jako je např. obdélníkové filtrování. Navíc s užším spektrem je PC-OTDM NRZ signál více tolerantní jak k CD, tak i PMD, v porovnání s fázově nekorelovaným PC-OTDM RZ signálem.

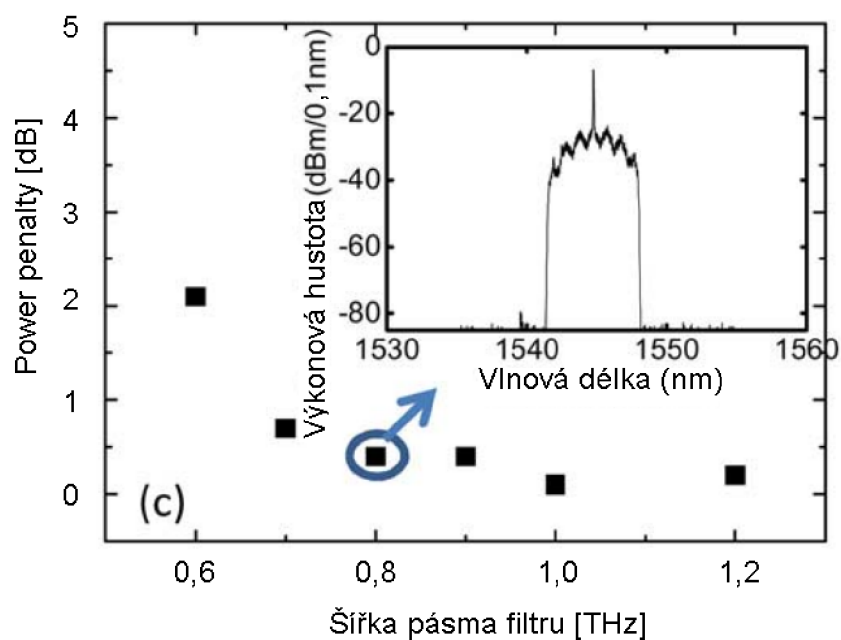


Obr. 3.32: Tolerance k přísné filtraci 640Gbit PC-OTDM NRZ. Vliv obdélníkového filtrování na BER.

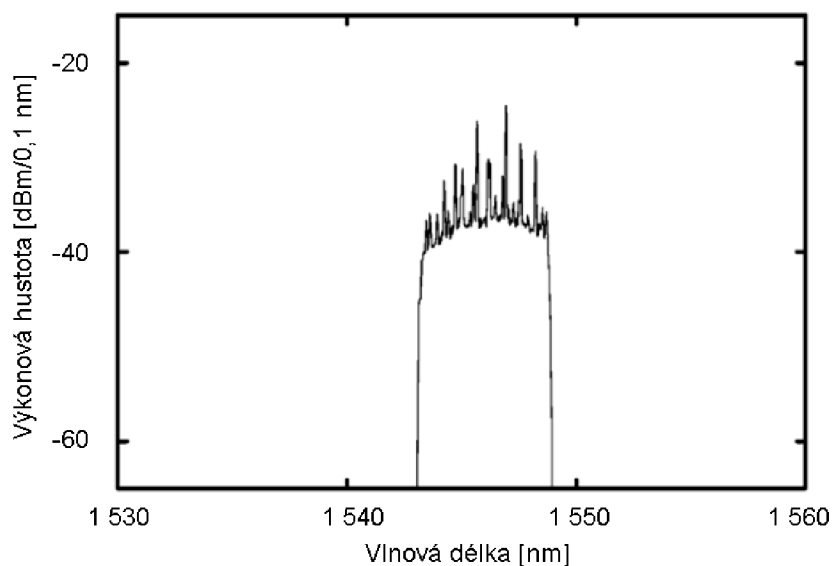
#### Tolerance k přísné filtraci

Za účelem prokázání výhody PC-OTDM signálu ve smyslu tolerance k přísné filtraci jsme nejdříve vyfiltrovali 640Gbit PC-OTDM NRZ signál pomocí obdélníkových filtrů s různými šířky pásma a následně zkoumali filtrační účinek na BER propustnosti v porovnání s klasickou PC-OTDM RZ bez filtrace. Jak je vidět na obrázcích 3.33 a 3.34, pokud je šířka pásma filtru větší než 700 GHz, pak power penalty, způsobená filtrací, je  $<1$  dB. Pokud šířka pásma filtru je 600 GHz, což je dokonce méně než přenosová (baudová) rychlost, power penalty vzroste na  $\approx 2$  dB při BER  $3,8 \cdot 10^{-3}$ . Vnitřní obrázek v obr. 3.33 zobrazuje spektrum 640Gbit PC-OTDM NRZ signálu po obdélníkové filtraci s šířkou pásma 800 GHz.

Pro posouzení vlivu obdélníkové filtrace na fázově nekorelovaný OTDM signál byl vytvořen 640Gbit fázově nekorelovaný OTDM signál v C-pásmu. Na obr. 3.34 je zobrazeno spektrum fázově nekorelovaného 640Gbit signálu po obdélníkové filtraci s šířkou pásma 700 GHz. Při měření BER fázově nekorelovaného OTDM signálu po obdélníkové



Obr. 3.33: Tolerance k přísné filtraci 640Gbit PC-OTDM NRZ. Závislost power penalty NRZ signálu s BER  $3,8 \cdot 10^{-3}$  pro obdélníkovou filtraci s různou šířkou pásma na optimální případ RZ. Vložený obrázek: spektrum 640Gbit/s PC-OTDM NRZ signálu za obdélníkovým filtrem s šířkou pásma 800 GHz.



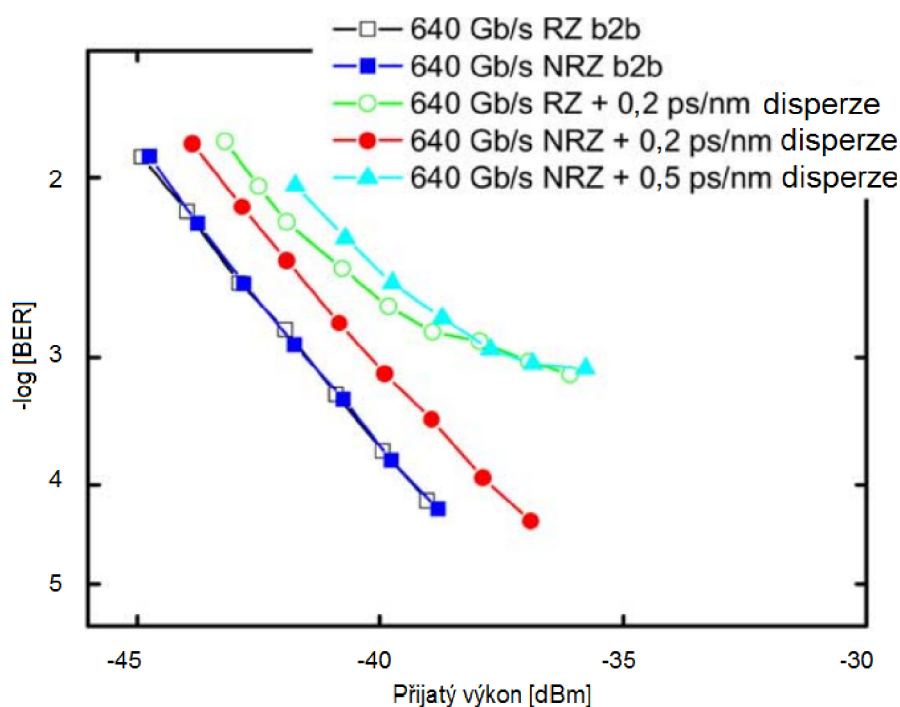
Obr. 3.34: Optické spektrum fázově nekorelovaného 640Gbit signálu s obdélníkovou filtrací 700 GHz.

filtraci docházelo k náhodným skokům fáze mezi sousedními bity, což způsobovalo amplitudové fluktuace a nemohlo tak být provedeno stabilní měření BER. Pro výstupní výkon

-38 dBm se hodnota BER měnila od  $10^{-2}$  do  $10^{-5}$ . Tento drift vzniká teplotou a vibracemi, které způsobují délkové změny vláknové zpožďovací linky v OTDM multiplexoru.

### Tolerance k disperzi

Vzhledem k tomu, že PC-OTDM NRZ signál je užší než RZ o stejné přenosové rychlosti, předpokládá se lepší tolerance k disperzi. V rámci práce byla charakterizována tolerance k disperzi 640Gbit PC-OTDM NRZ signálu pro různé hodnoty přidané  $\beta_2$  disperze v porovnání s 640Gbit RZ signálem. Jak je vidět na obr. 3.35, pro nekompenzovanou disperzi 0,2 ps/nm měl 640Gbit RZ signál úroveň chybovosti BER  $10^{-3}$ . Zatímco 640Gbit NRZ signál vykazoval power penalty<sup>2</sup> pouze 1,2 dB bez chybovosti. Úroveň chybovosti se pro 640Gbit NRZ objevila pouze když nekompenzovaná disperze vzrostla na 0,5 ps/nm. Výsledky jasně potvrdili výhodu PC-OTDM NRZ signálu v souvislosti s tolerancí k disperzi díky omezení šířky pásma.



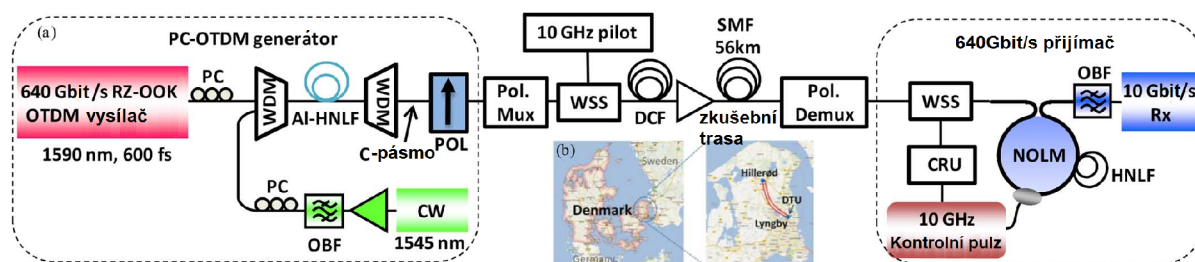
Obr. 3.35: Tolerance k disperzi 640Gbit PC-OTDM NRZ signálu v porovnání s 640Gbit RZ signálem.

### 3.4.3 Zkušební 1,19Tbit přenos PDM-NRZ-OOK signálu

Experimentální zapojení pro zkušební přenos PC-OTDM PMD-NRZ-OOK signálu s rychlostí 1,19 Tbit/s je zobrazeno na obr. 3.36.

Zapojení obsahuje 640Gbit PC-OTDM generátor, polarizační multiplexor, testovací trasu, polarizační demultiplexor, a 640Gbit přijímač. V PC-OTDM generátoru je vytvářen 640Gbit fázově nekorelovaný OTDM RZ signál na vlnové délce 1590 nm, který působí

<sup>2</sup>Jedná se obecně uznávaný termín, proto nebude překládán.



Obr. 3.36: a) Experimentální zapojení pro zkušební přenos 1.19Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signálu. PC: polarizační kontrolér, WDM: rozbočovač/slučovač pro vlnový multiplex (v C i L-pásmu), HNLF: vysoce nelineární optické vlákno, POL: polarizér, CW: kontinuální vlna, OBF: optický filtr typu pásmová propust, Pol. Mux: polarizační multiplexor, WSS: vlnově selektivní switch, Pol. Demux: polarizační demultiplexor, CRU: jednotka obnovy hodinového signálu, NOLM: nelineární smyčkové zrcadlo. b) Trasa instalovaného vlákna.

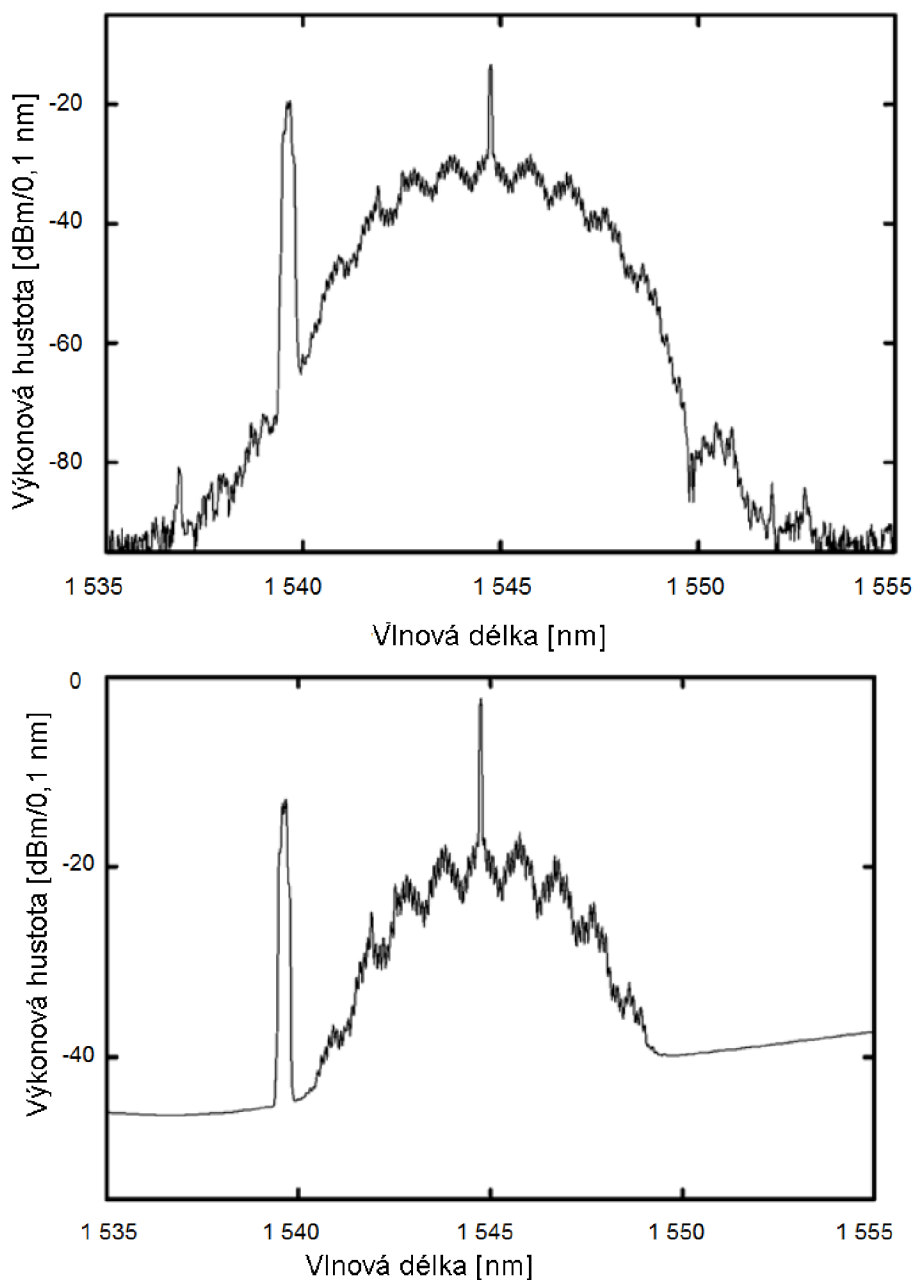
jako pumpovací signál a slouží ke spínání koherentního CW světla založeného na XPM vyvolané CPR v AI-HNLF, jak je popsáno v kapitole 3.4.1.

Vytvořený 640Gbit PC-OTDM-RZ signál je následně polarizačně multiplexován pomocí polarizačního multiplexoru tvořeného PM vláknovou odbočnicí, optickým zpoždovacím členem pro realizaci zpoždění 4 800 symbolů, a polarizačním slučovačem k rekombinaci signálu. Tím je vytvořen PC-OTDM PDM-RZ-OOK signál s přenosovou rychlostí 1,28 Tbit/s za předpokladu 7% FEC režie, čemuž odpovídá rychlost 1,19 Tbit/s po odečtení režie.

Vlnově selektivní switch WSS (Wavelength Selective Switch) se používá k provedení funkce filtrování pomocí kombinace 1,28THz kruhového rezonátoru a 500GHz Gaussova filtru, jak je vidět na obr. 3.29, za účelem přeměny RZ formátu do NRZ formátu. Nakonec je do pásma přes WSS navázán 10GHz řídicí signál v kanálu na vlnové délce 1 539,6 nm pro obnovu hodinového signálu v přijímači. Polarizace hodinového signálu je  $45^\circ$  s ohledem na polarizaci dat. Zde je třeba poznamenat, že přizpůsobení polarizace hodinového signálu nemusí být nutností v případě, pokud by byl hodinový signál extrahován před polarizační demultiplexací. Optické spektrum 1,28Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signálu v kombinaci s 10GHz řídicím signálem v kanálu je zobrazen na obr. 3.37 nahoře.

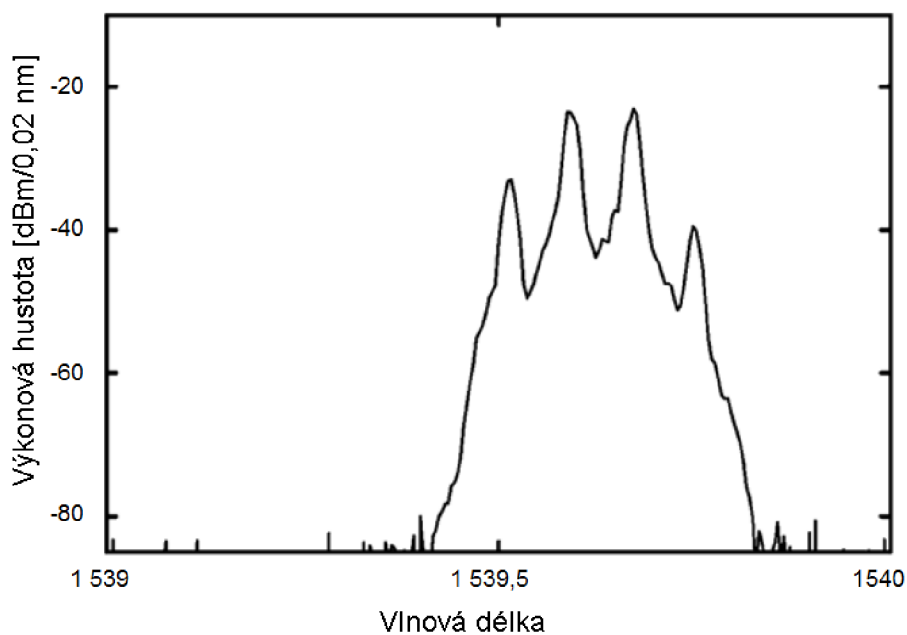
Vytvořený 1,28Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signál je předem disperzně kompenzován pomocí 7km DCF vlákna (disperze  $D = -135$  ps/nm/km@1550 nm) a následně navázán do 56 km dlouhé testovací trasy, která je tvořena smyčkou mezi laboratoří DTU v Lyngby a městem Hillerød v Dánsku, jak je vidět na obr. 3.36b). Útlum trasy je 11 dB a kvůli mnoha spojům má navýšený útlum o 9 dB. Výkon navázaný do testovací trasy je 11 dBm. Průměrná hodnota diferenčního skupinového zpoždění DGD instalovaných vláken v trase je 0,2 ps, což má jen zanedbatelný vliv na přenos.

Spektrum 1,28Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signálu s 10GHz řídicím signálem v kanále po přenosu testovací trasou je zobrazen na obr. 3.37 dole, přičemž dosahuje OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio)  $\approx 41$  dB po přenosu. Signál PC-OTDM PDM-NRZ-OOK je následně polarizačně multiplexován polarizačním děličem výkonu PBS (Polarization Beam Splitter) a poté přijat 640Gbit přijímačem, který se skládá z WSS, jednotky obnovy hodinového signálu, TDM demultiplexoru na bázi nelineárního optického smyč-

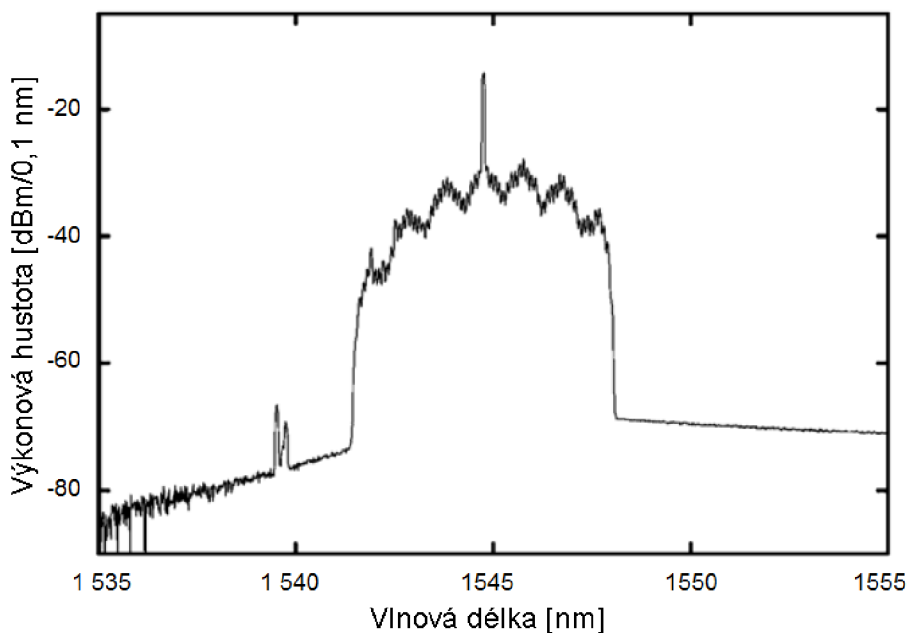


Obr. 3.37: Optická spektra 1,28Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signálu s 10GHz řídicím signálem v kanálu před (nahore) a po (dole) přenosu testovací trasou.

kového zrcadla NOLM (Non-linear Optical Loop Mirror), filtru s šířkou 0,9 nm, a 10Gbit přijímače s předzesilovači. WSS slouží k extrakci 10GHz řídicího signálu (viz obr. 3.38 nahore) a působí jako obdélníkový filtr s šířkou pásma  $\approx 800$  GHz (laditelný) pro napodobení přísné filtrace jako v systému WDM. Přijaté spektrum pro demultiplexaci je zobrazeno na obr. 3.38 dole. Extrahovaný 10GHz hodinový signál je obnoven smyčkou fázového závěsu PLL (Phase Locked Loop) a následně použit pro synchronizaci ML (Mode Lock) laseru pro generování řídicích pulzů. NOLM slouží k demultiplexaci 640Gbit datového signálu na 10Gbit datové přítoky.



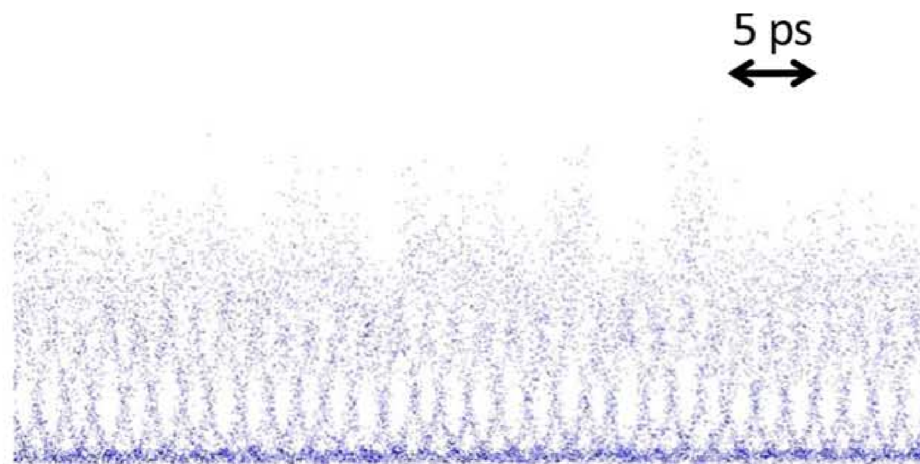
Obr. 3.38: Extrahovaný 10GHz řídicí signál.



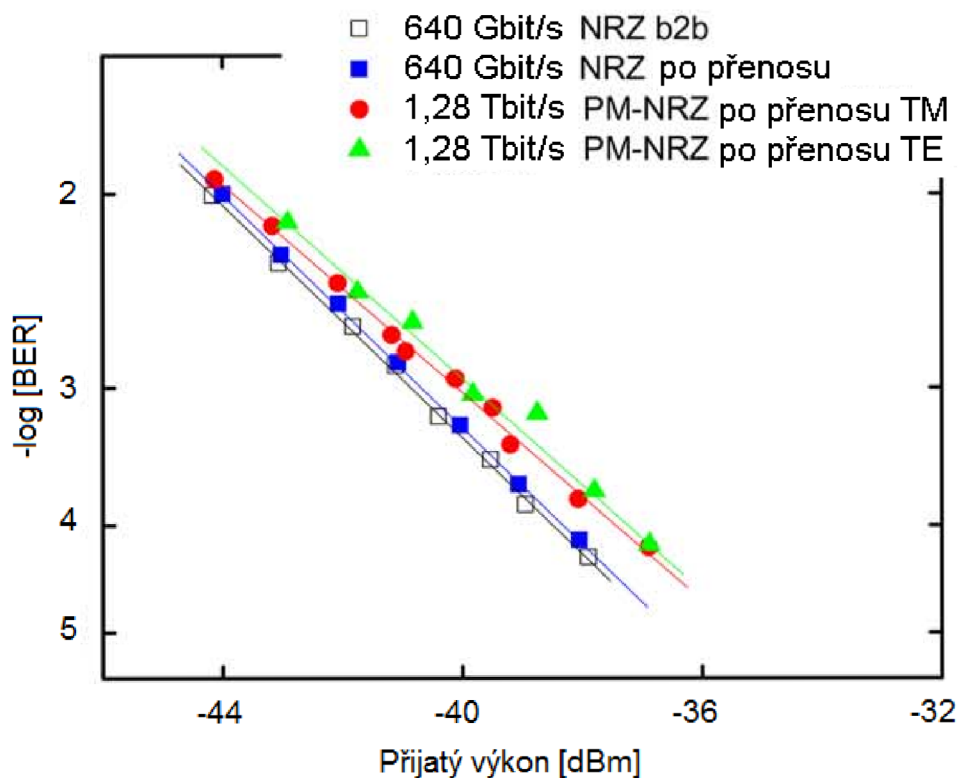
Obr. 3.39: 640Gbit PC-OTDM NRZ-OOK signál v 640Gbit přijímači.

Zkušební přenos 1,28Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signálu je úspěšný. V porovnání s fázově nekorelovaným OTDM signálem je PC-OTDM signál s užším spektrem více tolerantní k časově proměnné disperzi instalovaného vlákna, která nemůže být přesně kompenzována fixním DCF. Ve skutečnosti, pro delší přenosové vzdálenosti by výhoda PC-OTDM signálu byla více zřejmá, protože svou úzkou šířkou pásma je více tolerantní k PMD vyššího řádu. Na obr. 3.40 je zobrazen otevřený opticky navzorkovaný diagram oka



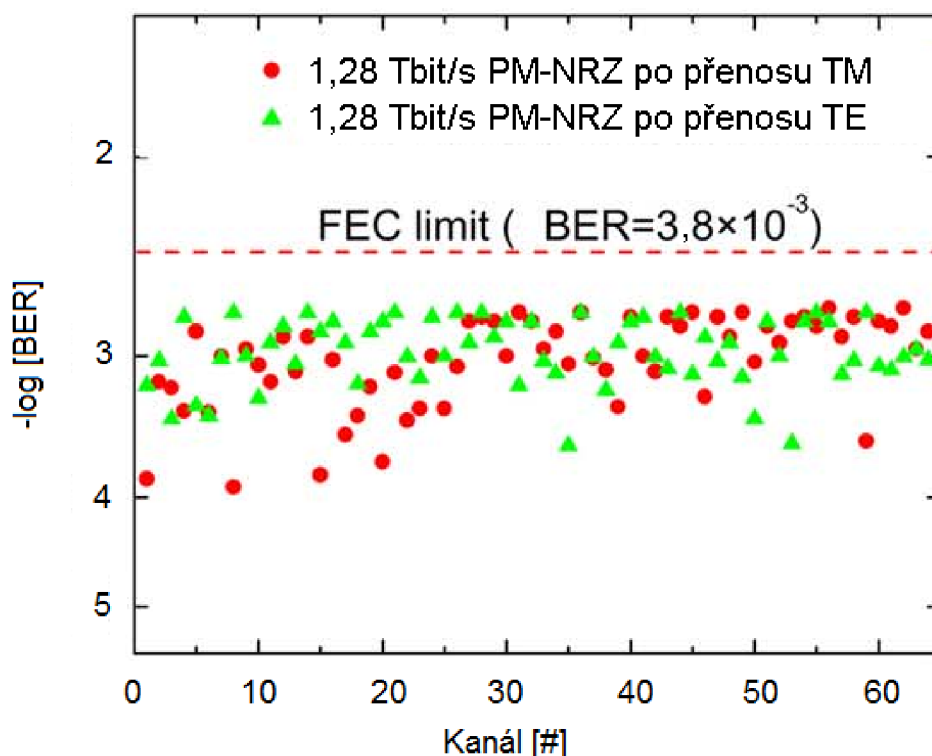


Obr. 3.40: Opticky navzorkovaný diagram oka 640Gbit PC-OTDM NRZ-OOK signálu po přenosu testovací trasou.



Obr. 3.41: Měření BER 640Gbit PC-OTDM NRZ-OOK signálu zpět-zpět, 640Gbit PC-OTDM NRZ-OOK signálu po přenosu trasou, a 1,28Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signálu po přenosu trasou (TM a TE).

signálu 640 Gbit/s PC-OTDM NRZ-OOK po zkušební přenosu. Na obr. 3.41b) je zobrazena závislost BER na přijatém výkonu znázorněná vynesena pro 10Gbit kanál demultiplexovaný z 640Gbit PC-OTDM NRZ-OOK signálu 1,28Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK



Obr. 3.42: Měření BER pro všech 128 přítoků (TM a TE) při přijímacím výkonu  $-37$  dBm.

signál po zkušebním přenosu testovací trasou. Ve srovnání s B2B (Back-to-Back) případem je power penalty 640Gbit NRZ signálu po přenosu  $<1$  dB a power penalty 1,28Tbit PDM-NRZ signálu po přenosu je  $\approx 1$  dB pro oba dva TE a TM módy částečně kvůli limitovanému polarizačnímu zhašecímu poměru (Extinction Ratio) PBS na vstupu přijímače a částečně kvůli polarizačním vazbám během přenosu. Chybovost BER pro všech 128 přítoků (TM i TE) je měřena s přijímacím výkonem  $-37$  dBm, viz obr. 3.42. Všechny přítoky 1,28Tbit signálu ukazují chybovost BER pod  $2 \cdot 10^{-3}$ , výrazně pod FEC limitem  $3,8 \cdot 10^{-3}$ . To odpovídá post-FEC bezchybné propustnosti ( $\text{BER} < 10^{-12}$ ) čisté přenosové rychlosti 1,19 Tbit/s.

### 3.4.4 Zhodnocení

Byl vytvořen 640GBd PC-OTDM NRZ-OOK signál založený na XPM vyvolanou CPR v Al-HNLF a RZ na NRZ konverze pomocí pasivní filtrace. Vytvořený 1,19Tbit PC-OTDM PDM-NRZ-OOK signál byl úspěšně přenesen přes 56 km dlouhou testovací trasu. Všechny 128 přítoků vykazuje chybovost BER pod FEC limitem  $3,8 \cdot 10^{-3}$  po přenosu testovací trasou. Výhodou fázové koherence mezi sousedními kanály je, že PC-OTDM signál může být velmi tolerantní k přísné filtraci, jako např. obdélníková filtrace, a signál s šířkou pásma 640 Gbit/s PC-OTDM NRZ-OOK signál může být omezen na 700 GHz. Kromě toho, s užším spektrem je PC-OTDM NRZ-OOK signál více tolerantní k CD a PMD v porovnání s fázově nekorelovaným OTDM RZ signálem.



### 3.5 Vzdálené zesilování pro WDM síť a pasivní optickou síť NG-PON2

Hlavní výhodou nového standardu NG-PON2 je kromě vyšší přenosové rychlosti i rozsah použitých vlnových délek pro sestupný a vzestupný směr. Oproti předchozím standardům, kde se používají pásma O a S, je u standardu NG-PON2 počítáno s využitím vlnových délek v pásmu L pro sestupný směr a pro vzestupný směr pak vlnové délky na pomezí S a C-pásma. To otevírá nové možnosti pro zesilování pomocí šikropásmových EDFA zesilovačů (pracují jak v C-pásmu, tak v L-pásmu), a tím dosažení větších vzdáleností a rovněž vyššího počtu připojených účastníků, díky kompenzaci ztráty optického výkonu na OS.

Stejně tak DWDM sítě pracující v pásmech C a L jsou vhodné pro obousměrné zesilování. Pomocí AWG směrové odbočnice pak lze realizovat pasivní optickou DWDM síť, přičemž každá ONU by měla vlastní 2 vlnové délky délky pro komunikaci s CO.

Jak již bylo zmíněno, hlavním limitujícím faktorem PON je útlum pasivních optických prvků, hlavně optických vláken a optických rozbočovačů. Celkový útlum sítě pak limituje maximální možnou vzdálenost mezi OLT a ONU, a maximální dělicí poměr sítě, který určuje počet připojených ONU jednotek. Použitím optického zesilovače by bylo možné překlenout větší vzdálenost i současně zvětšit dělicí poměr a tedy připojit více uživatelů.

Porovnáním základních parametrů optických zesilovačů EDFA, ROA (Ramana Optical Amplifier) a SOA (Semiconductor Optical Amplifier) (viz tab. 3.7) zjistíme, že všechny zmíněné zesilovače splňují požadavky na zesilování rozsahů NG-PON2 a DWDM sítí. Každý ze zmíněných zesilovačů má své výhody a nevýhody. Pro všechny výše uvedené zesilovače rovněž existují řešení pro možnost zesilování obousměrného provozu.

Vlastnost	EDFA	Raman	SOA
Zisk	>40	>25	>30
Rozsah vlnových délek [nm]	1 530–1 600	1 280–1 650	1 280–1 650
Max. saturace [dBm]	22	0,75 · pumpa	18
Polarizační citlivost	Ne	Ne	Ano
Výkon pumpy	25 dBm	>30 dBm	<400 mA
Faktor ceny	Střední	Vysoký	Nízký

Tab. 3.7: Srovnání základních parametrů zesilovačů EDFA, ROA a SOA.

Jako nejvhodnější se jeví varianta použití EDFA zesilovače, který je, hlavně díky poměru cena/výkon, v současnosti nejběžnějším zesilovačem v optických vláknových komunikacích. Avšak všechny zmíněné zesilovače mají, pro použití v pasivních optických sítích, nevýhodu v nutnosti použití síťového napájení. Jediným problémem tak zůstává možnost obousměrného zesilování bez nutnosti použití aktivního zařízení na trase pro zachování hlavní myšlenky PON – tj. zachovat kompletně pasivní optickou síť. Vzdálené zesilování RP (Remote Pumping) je technologie, která tento problém řeší. Obecným principem je, že čerpací laserová dioda (pumpa) je umístěna v CO a pomocí WDM slučovače je navázán čerpací signál do vlákna, které slouží k datovému přenosu. Čerpací signál je společně s datovým signálem šířen optickým vláknem až k místu, kde je napojeno EDF (Erbium Doped Fiber) optické vlákno. V něm dojde, díky přítomnosti čerpacího signálu a datového

signálu, ke stimulované emisi záření, podobně jako dochází v laseru. Tímto způsobem je docíleno zesílení datového signálu.

Jedna z prvních zmínek o vzdáleném zesilování pro PON sítě byla prezentována v [42], kde na OLT straně i na straně ONU byly použity lasery jak pro signálová data, tak i čerpací signál. Nedávno byl prezentován další systém s výkonovým ziskem 12 dB (11 dB pomocí vzdáleného zesilování +1 dB Ramanem) v [41]. Obě řešení jsou však navržena pro pásma S a O, které využívají starší PON standardy. V literatuře [40] je prezentováno vzdálené zesilování pro 10Gbit WDM PON s AWG směrovou odbočnicí pomocí výkonové čerpací laserové diody s vlnovou délkou 1480 nm. Díky výkonové pumpě je zde využito jak vzdáleného zesilování, tak i Ramanovského zesilování.

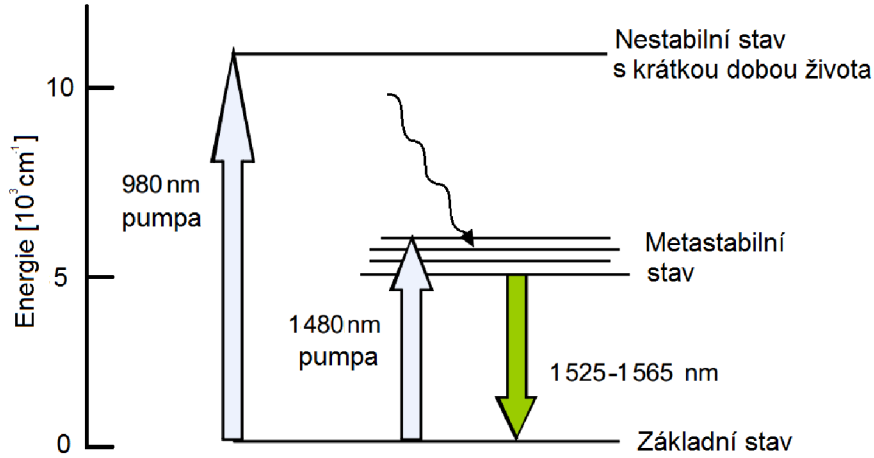
V praxi lze největší změny útlumové bilance systému dosáhnout zvětšením výkonu ER-dálkového čerpacího zesilovače, což lze realizovat pomocí zvýšení výkonu laserové pumpy. V případě přenosu čerpacího signálu ke vzdálenému zesilovači a signálu k přijímači jedním vláknem je podle [24] nárůst útlumové bilance téměř 0,85 dB pro každý 1 dB navýšeného výkonu laserové pumpy. Důležitá je pozice EDF vlákna, stejně jako jeho délka pro maximální optimalizaci útlumové bilance. Největšího zisku 18,2 dB bylo dosaženo kombinací dvou vláknových laserových pump a erbiového vlákna umístěného poblíž přijímače, viz literatura [36].

### Fyzikální princip EDF zesilování

Nejdůležitějším prvkem EDFA zesilovačů je EDF. Jedná se o běžné křemíkové vlákno dopované Erbiem ( $\text{Er}^{3+}$ ).

Předpokládejme pro jednoduchost, že  $\text{Er}^{3+}$  ionty mohou existovat alespoň ve dvou stavech – základním a excitovaném. Počet iontů, v tepelné rovnováze, na jednotlivých hladinách je dán Boltzmannovým rozdělením, přičemž většina iontů se nachází v základním stavu s minimální energií. Interakci souboru iontů s fotony (kvanta světelné energie) vysvětlil teoreticky počátkem 20. století Albert Einstein. Mohou nastat tři různé jevy – spontánní emise, stimulovaná emise a absorpce. Absorpcí fotonu (s energií rozdílu energetických hladin) se iont v základním stavu převede do excitovaného stavu. Z metastabilního stavu může iont zpět do základního stavu spontánně (za současného vyzáření fotonu s náhodnou polarizací a fází) nebo je k emisi stimulován jiným fotonem. V případě stimulované emise jsou oba fotony vzájemně koherentní, tj. mají stejné fázové a polarizační vlastnosti. Z tepelné rovnováhy může být aktivní prostředí vyvedeno např. přítomností čerpacího světelného zdroje. Pokud na aktivní prostředí nepůsobí jiné vlivy, pak při dostatečně silném čerpání dojde k tomu, že většina iontů zůstane trvale v excitovaném stavu. Přivedením optického signálu do excitovaného aktivního prostředí, dojde u fotonů optického signálu k zesilování, protože bude převyšovat stimulovaná emise nad absorpcí. Fotony, které vznikají spontánní emisí přispívají ke zvýšenému šumu zesilovače [66].

Metastabilní hladina (viz obr. 3.43) může být čerpána přímo čerpáním na vlnové délce 1480 nm, nebo přes nestabilní hladinu zářením na vlnové délce 980 nm. Doba života iontu na nestabilní hladině je velmi krátká ( $\approx 7 \mu\text{s}$ ) ve srovnání s dobou života hladiny metastabilní, takže iont vybuzený na nestabilní hladinu přejde rychle, nezářivě na metastabilní hladinu [66].



Obr. 3.43: Schéma energetických hladin erbia.

Pokud maximální zisk zesilovače je  $<20$  dB, může být spontánní emise zesilovače zanedbána. Pak stanovením stacionárních podmínek dostaneme [60],

$$N_2 = \tau \left[ (\sigma_p^a N_1 - \sigma_p^e N_2) \frac{I_p}{h\nu_p} + (\sigma_s^a N_1 - \sigma_s^e N_2) \frac{I_s}{h\nu_s} \right] \quad (3.1)$$

nebo

$$N_2 = \frac{I_p/I_{sp}^a + I_s/I_{ss}^a}{I_p/I_{sp}^a + I_p/I_{sp}^e + I_s/I_{ss}^a + I_s/I_{ss}^e + 1} N_1. \quad (3.2)$$

Přičemž  $I_{sp}^a = h\nu_p/\tau\sigma_p^a$ ,  $I_{sp}^e = h\nu_s/\tau\sigma_p^e$ ,  $I_{ss}^a = h\nu_s/\tau\sigma_s^a$  a  $I_{ss}^e = h\nu_s/\tau\sigma_s^e$ . Frekvence signálu a čerpání jsou označeny  $\nu_s$  a  $\nu_p$ ,  $h$  je Planckova konstanta,  $\tau$  je doba rozpadu spontánní emise,  $\sigma_s^a$  a  $\sigma_s^e$  jsou příčné řezy stimulované absorpce a emise signálového svazku,  $\sigma_p^a$  a  $\sigma_p^e$  představují příčné řezy stimulované absorpce a emise čerpacího signálu. Optická intenzita užitečného signálu je  $I_s$  a čerpacího signálu  $I_p$ , celkové rozložení hustoty dopantu  $N_t(r) = N_1(r) + N_2(r)$ , kde je předpoklad, že  $N_t$ ,  $N_1$  a  $N_2$  jsou všechny radiálně symetrické.

Definujme  $I_s(z, r) = P_s(z) f_s(r)$  a  $I_p(z, r) = P_p(z) f_p(r)$ , kde  $P_s(z)$  a  $P_p(z)$  jsou výkony datového a čerpacího signálu, a  $f_s(r)$  a  $f_p(r)$  jsou normalizované příčné profily intenzit datového čerpacího signálu. V případě, že je použito účinné čerpání dlouhých vlnových délek pro zabránění absorpci vybuzených stavů, lze předpokládat, že  $f_s(r) = f_p(r) = f(r)$  pro následující derivace. Výkony obou signálů se budou řídit následujícími rovnicemi,

$$\frac{dP_s}{dz} = 2\pi \int_0^\infty I_s [\sigma_s^e N_2(r) - \sigma_s^a N_1(r)] r dr, \quad (3.3)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = \mp 2\pi \int_0^\infty I_p \left[ \sigma_p^a N_1(r) - \sigma_p^e N_2(r) \right] r dr. \quad (3.4)$$

Znaménka mínus a plus v rovnici 3.4 odpovídají souběžně se šířícím nebo protichůdně se šířícím vlnám čerpání [60].

Substitucí rovnice 3.1 do rovnic 3.3 a 3.4, a následnou úpravou dostaneme,

$$\frac{dP_s}{dP_p} = \mp \frac{\left[ \left( \frac{\sigma_s^e}{\sigma_s^a} I_{sp}^a - 1/I_{sp}^e \right) - 1/RP_p/ \right] \sigma_p^a}{\left[ \left( 1/I_{ss}^e - \sigma_p^e/\sigma_p^a I_{ss}^a \right) + 1/RP_s/ \right] \sigma_s^a}, \quad (3.5)$$

kde  $R = \int_0^\infty N_t(r) f(r) r dr / \int_0^\infty N_t(r) r dr$ . Účinnost čerpání  $|dP_s/dP_p|$  roste s  $R$  pro všechny  $P_s$  a  $P_p$ . Pro různé délky EDF vlákna rovnice 3.5 může být integrována po částech, čímž se získá vztah jak pro souběžné, tak i protichůdné čerpání,

$$\begin{aligned} & \left[ \left( P_s^{out} - P_s^{in} \right) \left( \frac{1}{I_{ss}^e} - \frac{\sigma_p^e}{\sigma_p^a I_{ss}^a} \right) + \ln \left( \frac{P_s^{out}}{P_s^{in}} \right) \frac{1}{R} \right] \frac{\sigma_p^a}{\sigma_s^a} = \\ & = \left[ \left( P_p^{in} - P_p^{out} \right) \left( \frac{\sigma_s^e}{\sigma_s^a I_{sp}^a} - \frac{1}{I_{sp}^e} \right) - \ln \left( \frac{P_p^{in}}{P_p^{out}} \right) \frac{1}{R} \right]. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Z rovnice 3.6 najdeme  $R$  změřením  $P_s^{out}$  a  $P_p^{out}$  pro daná  $P_s^{in}$  a  $P_p^{in}$ . Pro maximální zisk,  $dP_s/dP_p = 0$ , je výstupní výkon čerpacího laseru,

$$P_{p,op}^{out} = \frac{1}{R \left( \frac{\sigma_s^e}{\sigma_s^a} I_{sp}^a - 1/I_{sp}^e \right)}. \quad (3.7)$$

Pokud maximální zisk je definován jako  $G = P_s^{out}/P_s^{in}$ , pak lze použít následující rovnici [60],

$$\frac{\nu_p}{\nu_s} \frac{P_s^{in}}{P_{p,op}^{out}} (G - 1) + \frac{\sigma_p^a}{\sigma_s^a} \ln(G) = \frac{P_p^{in}}{P_{p,op}^{out}} - 1 - \ln \left( \frac{P_p^{in}}{P_{p,op}^{out}} \right). \quad (3.8)$$

Kombinací rovnic 3.1, 3.3, 3.4 a definováním faktoru uvěznění (týká se zisku a rozložení pole)  $\Gamma = A \int_0^\infty N_2(r) f(r) r dr / \int_0^\infty N_2(r) r dr$ , kde  $A$  je efektivní plocha dopování. Rovnice šíření pro datový signál je,

$$\frac{dP_s}{dz} = -P_s \left[ \alpha_s + \left( \frac{1}{h\nu_s} \frac{dP_s}{dz} \pm \frac{1}{h\nu_p} \frac{dP_p}{dz} \right) h\nu_s/P_s^{IS} \right]. \quad (3.9)$$

Parametr  $\alpha_s$  je absorpční konstanta signálového svazku a je vyjádřena jako  $\alpha_s = 2\pi\sigma_s^a \int_0^\infty N_t(r) f(r) r dr$ , a  $P_s^{IS} = Ah\nu_s/\tau\Gamma(\sigma_s^a + \sigma_s^e)$  je vnitřní saturační výkon signálového svazku. Řešením diferenciální rovnice 3.9 získáme výstupní výkon signálu v  $z = L$ ,

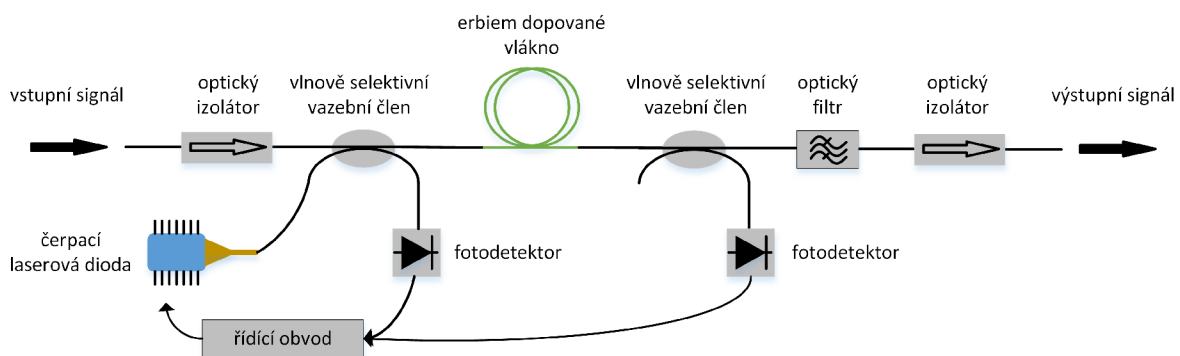
$$P_s^{out} = P_s^{in} \cdot \exp(-\alpha_s L) \exp \left[ \left( \frac{P_p^{in} - P_p^{out}}{h\nu_p} + \frac{P_s^{in} - P_s^{out}}{h\nu_s} \right) \frac{h\nu_s}{P_s^{IS}} \right]. \quad (3.10)$$

Bez čerpacího signálu  $P_s^{out} \cong P_s^{in} \exp(-\alpha_s L)$  pro malý vstupní výkon datového signálu a  $\alpha_s = \log(P_s^{in}/P_s^{out})/L$ . Pokud  $P_s^{in}$  postoupí k  $P_s^{IS}$ ,  $P_s^{out} \cong P_s^{IS} \exp(1 - \alpha_s L)$ . To znamená, že jak absorpční konstanta, tak i vnitřní saturační výkon datového signálu, můžou být získány z monochromatického absorpčního měření. Optimální délka vlákna  $L_{op}$  pro maximální zisk může být získán z rovnice 3.10 jako,

$$L_{op} = -\frac{1}{\alpha_s} \cdot \left\{ \ln(G) + \frac{h\nu_s}{P_s^{IS}} \left[ \frac{P_{p,op}^{out} - P_p^{in}}{h\nu_p} + \frac{P_s^{in}}{h\nu_s} (G - 1) \right] \right\}. \quad (3.11)$$

### Erbium dopované vláknové zesilovače

Na obr. 3.44 je zobrazen příklad zapojení EDFA. Jak již bylo zmíněno dříve, základem je vlákno EDF, přičemž jeho délka může být řádově metry až desítky metrů a s přenosovým vláknem je spojeno svárem. Pomocí prvního vlnově selektivního WDM členu je navázán signál z čerpací laserové diody do vlákna s přenosem. Druhý vlnově selektivní WDM člen pak vyvazuje z vlákna případně neabsorbované čerpání. Čerpací laserovou diodu lze použít buď s vlnovou délkou 980 nebo 1480 nm, přičemž v současnosti jsou dostupné diody s výkonem až 450 mW pro navázání do jednoho vlákna. Optické izolátory v zapojení slouží k odstranění nežádoucích odrazů a pomocí pásmového filtru lze potlačit šum spontánní emise. Díky dvojici fotodetektorů lze monitorovat úroveň výkonů před a za erbiovým vláknem. Zpětnovazebně tak lze řídit zisk zesilovače a čerpací výkon diody [66].



Obr. 3.44: Schéma zapojení erbiem dopovaného vláknového zesilovače.

### Obousměrné zesilování

Erbium dopované vláknové zesilovače jsou ze své podstaty přirozeně obousměrné, což dokazuje přítomnost jak dopředného, tak i zpětně se šířícího ASE (Amplified Spontaneous Emission). Pro eliminaci zpětných odrazů však většina běžných zesilovačů obsahuje směrové prvky (např. optický izolátor), což má za následek možnost pouze jednosměrného zesilování. S rozvojem WDM přenosů, a tedy možností obousměrného přenosu po

jednom optickém vlákně, se objevila myšlenka obousměrného zesilování. Výhod obousměrného zesilování je hned několik. Kromě možnosti snížení počtu zesilovačů na trase je zde i výhoda snížení rizika vzniku nelineárních efektů ve vlákně (pokud aktuální systém přenáší  $N$  jednosměrných kanálů, pak v obousměrném systému může přenášet  $N/2$  obousměrných kanálů).

Možnost obousměrného zesilování protichůdně se šířících signálů byla představena mimo jiné v literatuře [42]. Kromě toho, jsou zde představeny možná rizika obousměrných zesilovačů, způsobená zpětnými odrazy, které mohou významně snížit přenosovou kapacitu linky. Zpětné odrazy vznikají především díky Rayleighovu rozptylu, který vykazuje do jisté míry náhodné fluktuační a i když je průměrná hodnota malá, okamžité vrcholové hodnoty jsou velké. Vztah mezi vrcholovým ziskem zesilovače a úrovněmi odrazů ( $R_1$  a  $R_2$ ) na kterékoli straně zesilovače je  $G^2 R_1 R_2 \leq -15$  dB pro power penalty menší než 0,5 dB z působení laseru zesilovače. Dalším vlivem odrazů je, že vícenásobné odrazy převádí fázový šum laseru na intenzitní šum a odrazy signálu jsou interferometricky superponovány na přenášený signál. Kvůli výslednému Rayleighovu rozptylu z přenosového vlákna musí být omezen maximální zisk zesilovače na méně než 20 dB pro power penalty menší než 1 dB [35].

Problém s odrazy se dále zhoršuje při obousměrném zesilování frekvenčně velmi blízkých signálů, kdy jeden odraz může překrýt jiný signál. Obousměrné zesilování je proto vhodné použít na signály s dostatečným velkým frekvenčním odstupem [70].

### 3.5.1 Ověření funkčnosti vzdáleného zesilování

Vzhledem k tomu, že většina systémů pro vzdálené zesilování ER vláknem je jen na teoretické bázi, případně podložena modely nebo simulacemi, byly navrženy systémy pro ověření vlastního systému vzdáleného zesilování. Všechny scénáře byly rovněž ověřeny simulací.

Celkem byly navrženy tři scénáře od nejjednoduššího jednosměrného přenosového systému až po obousměrně zesilovaný systém pro obousměrný přenos signálu.

Pro měření byla použita čerpací laserová dioda Alcatel A1948FBG se základními parametry uvedenými v tab. 3.8, dále vlnově a výkonově přeladitelný laserový zdroj ITLA (Integrable Tunable Laser Assembly) s DFB laserovou diodou, jehož parametry jsou uvedeny v tab. 3.9, a výkonově nastavitelný laser NKT Photonics – Koheras Adjustik s parametry uvedenými v tab. 3.10.

Parametr	Hodnota
Referenční vlnová délka při 160 mW [nm]	1 489,6
Referenční výkon [mW]	160
Prahový proud [mA]	24
Vnější diferenciální účinnost [mW/A]	258
Napětí v propustném směru (1,2·160 mW) [V]	2,035
Proud v propustném směru [mA]	555,3

Tab. 3.8: Tabulka základních parametrů čerpací diody.

Parametr	Hodnota
Rozsah vlnových délek [nm]	1 529,163–1 567,133
Referenční výkon [dBm]	13,0

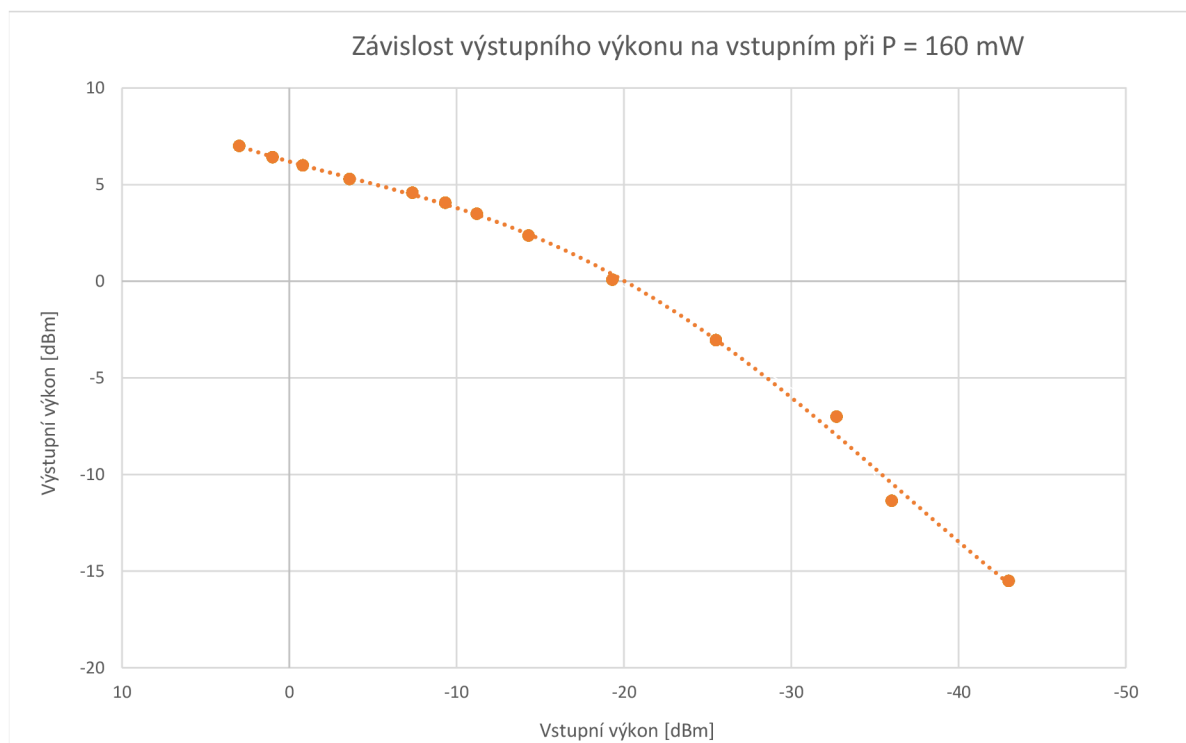
Tab. 3.9: Tabulka základních parametrů ITLA laserového zdroje.

Parametr	Hodnota
Referenční vlnová délka při 160 mW [nm]	1 540
Referenční výkon [mW]	40
Šířka spektrální čáry [kHz]	<0,1

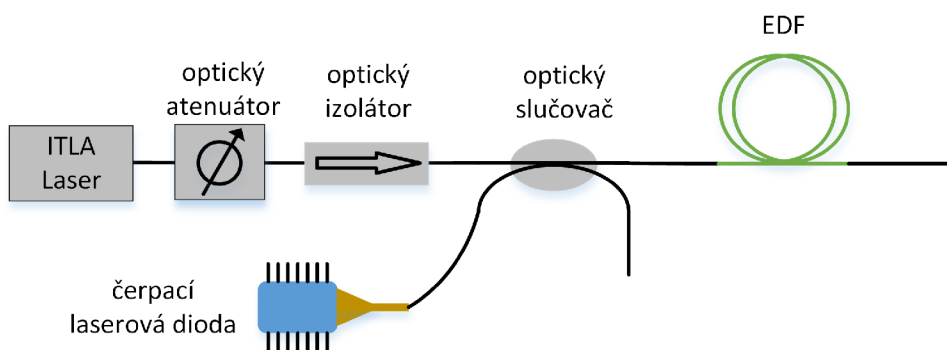
Tab. 3.10: Tabulka základních parametrů laserového zdroje Koheras Adjustik.

**Poznámka k měření:** Z důvodu absence vlnově selektivních vazebních členů, byly při měření použity běžné výkonové slučovače/rozbočovače. Všechny spoje mezi jednotlivými prvky byly tvořeny konektorovými spoji FC/APC. Pro vyhodnocení byl použit optický spektrální analyzátor OSA (Optical Spectrum Analyzer) Anritsu MS9740A.

Před vlastním ověřením vzdáleného zesilování bylo provedeno měření podle zapojení na obr. 3.46, pro zjištění parametrů zesilování. Na obr. 3.45 je vykreslena závislost výstupního výkonu zesilovacího systému na vstupním výkonu.



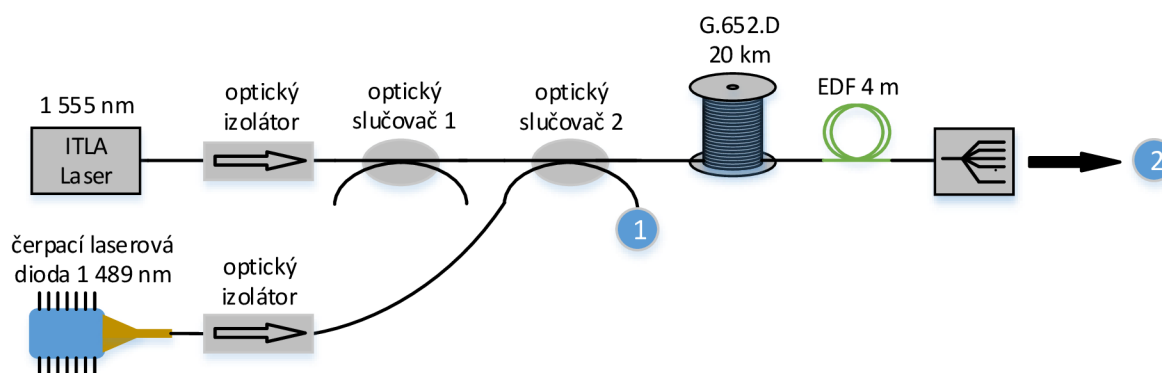
Obr. 3.45: Závislost výstupního výkonu na velikosti vstupního výkonu při použití čerpací laserové diody o výkonu 25 mW a erbiového vlákna o délce 4 m.



Obr. 3.46: Schéma zapojení pro ověření výstupního výkonu zesilovacího systému na vstupním výkonu užitečného signálu. Čerpací laserová dioda s vlnovou délkou 1 490 nm a výkonu 25 mW, délka EDF 4 m.

### Jednosměrně zesilovaný systém pro jednosměrný přenos

Jedná se o základní měření pro ověření funkčnosti vzdáleného zesilování pro jednosměrný přenosový systém. Schéma testovaného zapojení je zobrazeno na obr. 3.47. Datový signál zde představuje laserový zdroj ITLA, který obsahuje DFB laserovou diodu a řídicí software pro přesné nastavení referenčního kanálu. Pro přenos byl zvolen kanál 27 s vlnovou délkou 1 555,75 nm a výkonem 1 dBm. Pro zajištění ochrany laserového zdroje před nežádoucími zpětnými odrazy byl dále připojen optický izolátor. Optický slučovač 1 sloužil pro měření odražených signálů z trasy. Optický slučovač 2 byl použit namísto selektivního vazebního členu pro navázání čerpací diody. Čerpací dioda na vlnové délce 1 489 nm a o výstupním výkonu 14 dBm byla rovněž připojena na optický izolátor kvůli ochraně před zpětnými odrazy. Za optickým slučovačem 2 byla napojena 20 km cívka s vláknem G.652.D a následně bylo zapojeno EDF vlákno o délce 4 m. Pro nastin reálné ODN byl na konec trasy ještě napojen optický rozbočovač s dělicím poměrem 1:4 a poté i 1:256.



Obr. 3.47: Schéma zapojení experimentálního měření jednosměrného systému s jednosměrným zesilováním.



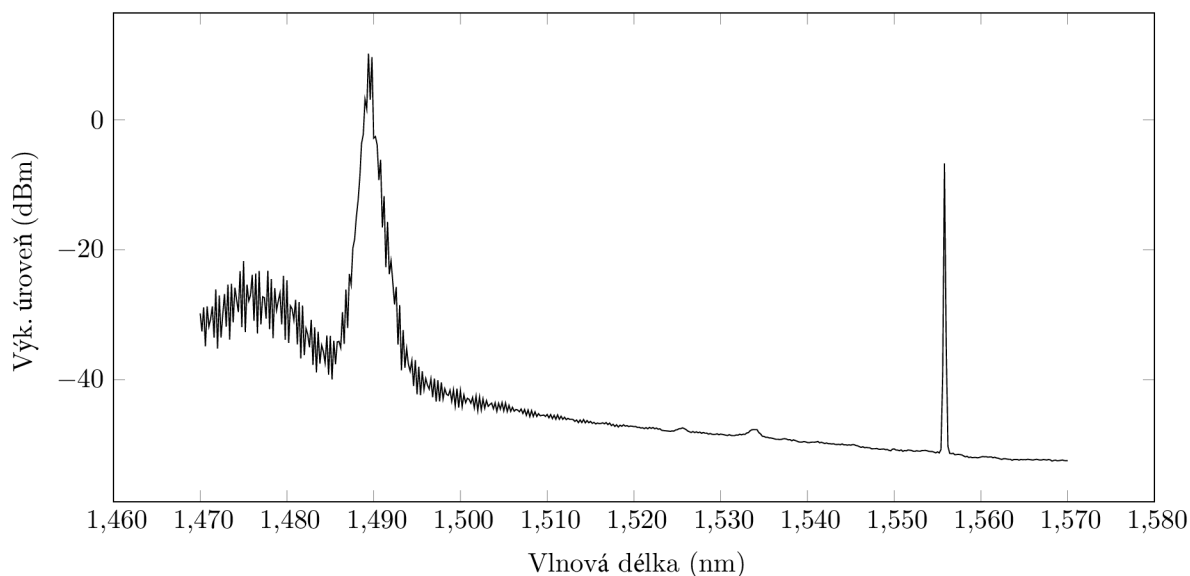
Útlumová bilance trasy pro užitečný signál bez zesilování s dělicím poměrem 1:4 je,

$$A_C = A_{FIB} + A_{OS} = 4 + 7,4 = 11,4 \text{ [dB]}, \quad (3.12)$$

a pro signál s dělicím poměrem 1:256,

$$A_C = A_{FIB} + A_{OS} = 4 + 24 = 28 \text{ [dB]}. \quad (3.13)$$

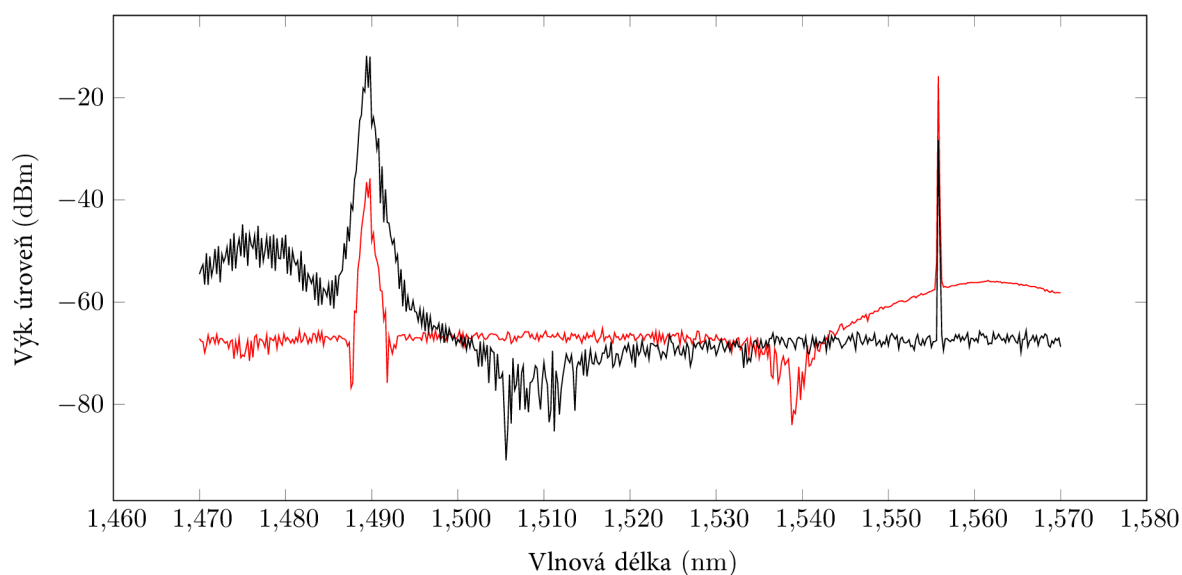
Na obr. 3.48 je zobrazeno spektrální rozložení užitečného signálu a čerpacího signálu na výstupu optického rozbočovače 2, tedy v měřeném bodě 1. Výkonová úroveň užitečného signálu je cca  $-6,7$  dB, což odpovídá teoretickým předpokladům (výstupní výkon 1 dBm z ITLA je zeslaben průchodem přes optický izolátor o 1,2 dB a následně o dalších 6,4 dB při průchodu optickými slučovači). Stejně tak výkonová úroveň čerpacího signálu je snížena o vložený útlum optického izolátoru a na výstupu optického rozbočovače 2 má tedy hodnotu 10,2 dBm. Při průchodu přes 20 km trasy jsou oba signály dále zeslabeny. Na obr. 3.49 je vidět užitečný signál a zeslabený čerpací signál za optickým rozbočovačem 1:4, přičemž černý průběh představuje trasu bez EDF vlákna a červený průběh je se zapojeným EDF vlákem, a tedy realizovaným systémem vzdáleného zesílení. Výstupní signál bez zesilování a se zesilování pro ODN s dělicím poměrem 1:256 je zobrazen na obr. 3.50.



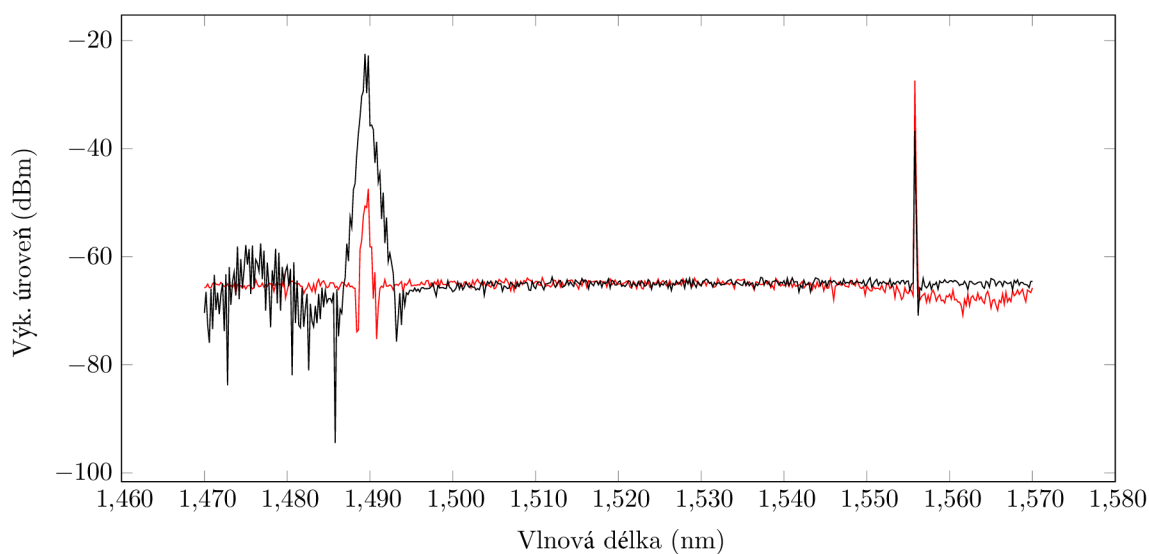
Obr. 3.48: Výstup OSA měřený na výstupu optického slučovače 2.

Jak je vidět z obr. 3.49, díky vzdálenému zesilování bylo pro ODN s dělicím poměrem 1:4 dosaženo zesílení z hodnoty  $-28,34$  dBm na hodnotu  $-15,84$  dBm. Celkový zisk systému byl tedy 12,5 dB. Pro ODN s dělicím poměrem 1:256 došlo k zesílení signálu z hodnoty  $-36,71$  dBm na hodnotu  $-27,41$  dBm, zisk byl tedy 9,3 dB.

Pro ověření naměřených hodnot, byl v simulačním prostředí Optisystem, navržen systém podle zapojení na obr. 3.47 s dělicím poměrem 1:4. Parametry prvků byly nastaveny



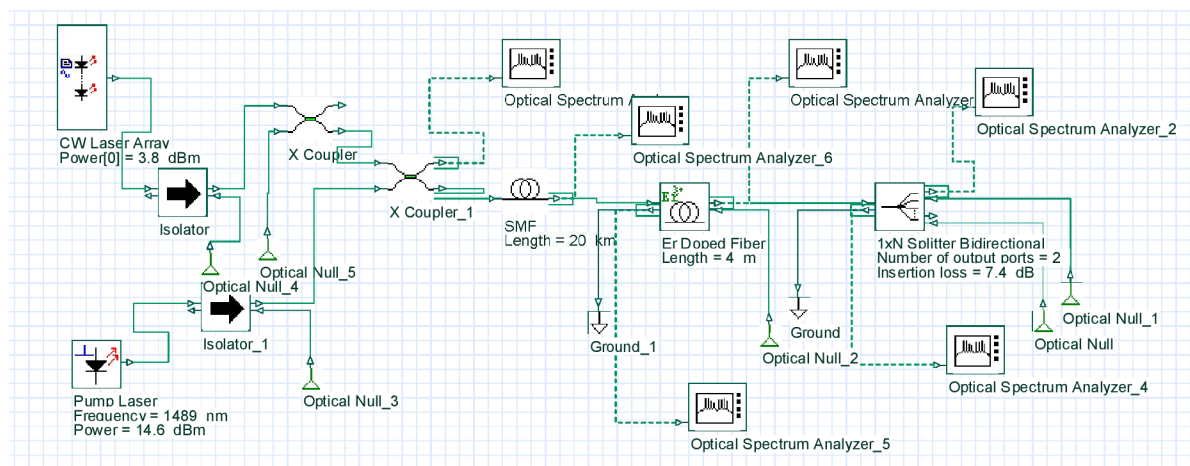
Obr. 3.49: Výstup OSA měřený za optickým rozbočovačem 1:4. Červený průběh značí ODN s EDF vláknem a černý průběh je bez EDF vlákna.



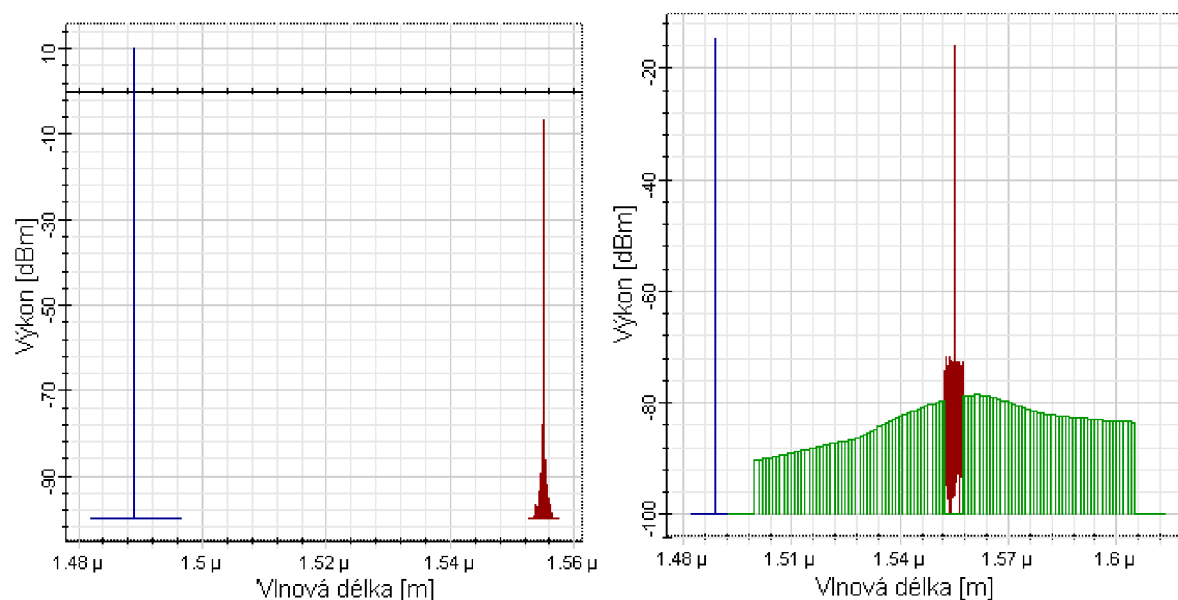
Obr. 3.50: Výstup OSA měřený za optickým rozbočovačem 1:256. Červený průběh značí ODN s EDF vláknem a černý průběh je bez EDF vlákna.

podle hodnot reálných prvků. Zapojení realizované v prostředí Optisystem je zobrazeno na obr. 3.51.

Simulací byly ověřeny výsledky dosažené při měření. Při nastavení stejných parametrů, které byly platné pro měření, bylo dosaženo výstupního výkonu  $-16$  dBm. Tato hodnota se liší od naměřené hodnoty o  $\approx 0,16$  dB. Současně tak byly ověřeny výsledky získané při měření, což je důležité pro následující částí práce. Výstupy ze simulačního prostředí Optisystem jsou zobrazeny na obr. 3.52.



Obr. 3.51: Schéma zapojení jednosměrného systému s jednosměrným zesilováním v prostředí Optisystem.

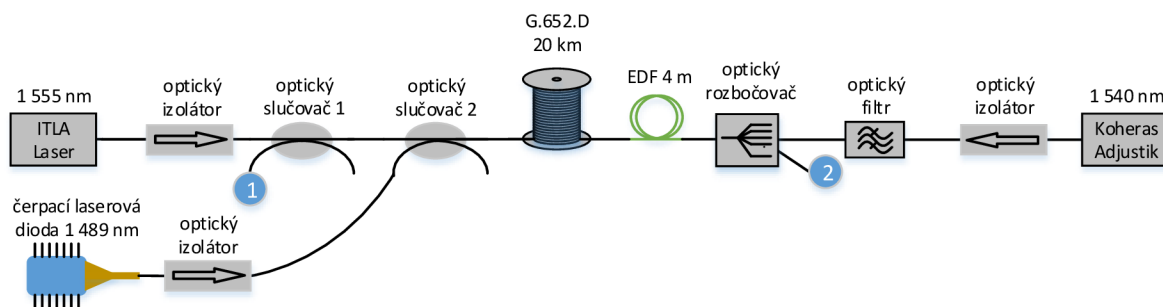


Obr. 3.52: Zobrazení spekter datového a čerpacího signálu za optickým slučovačem (vlevo) a na konci ODN (vpravo).

### Jednosměrně zesilovaný systém pro obousměrný přenos

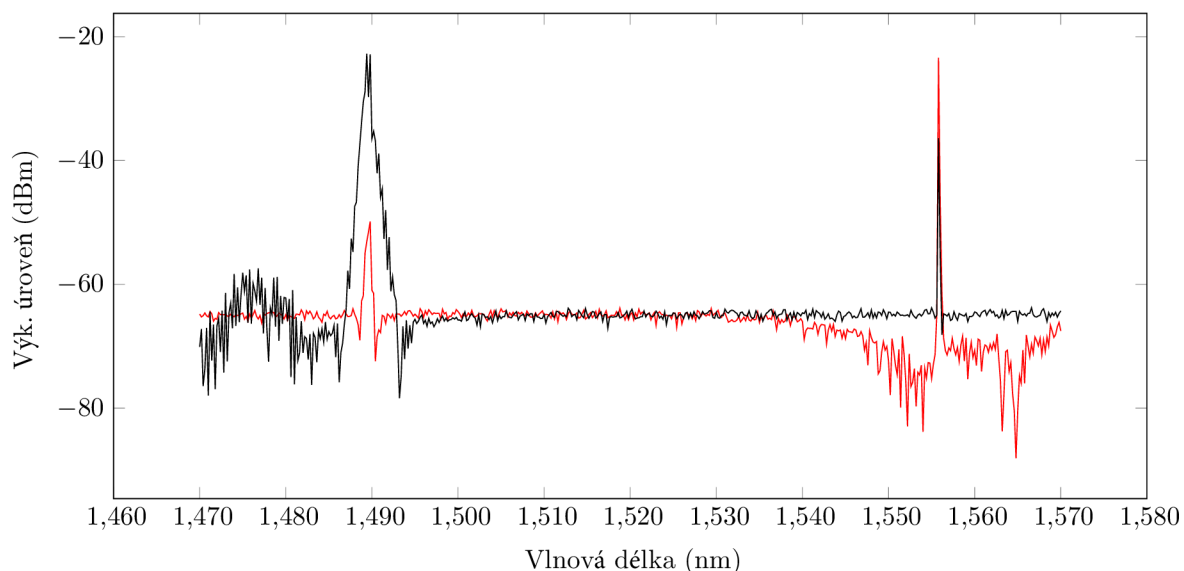
Jedná se o obdobné zapojení předchozího systému. Celková ODN zůstala stejná, rozdíl byl v realizaci obousměrného provozu pomocí laseru Koheras Adjustik zapojeného na konec ODN. Pro vzestupný směr byla použita vlnová délka 1 540 nm a vysílací výkon byl nastaven na 0 dBm. Schéma zapojení je zobrazeno na obr 3.53.

Na obr. 3.54 jsou zobrazena spektra užitečného signálu a čerpacího signálu na výstupu ODN (bod 2 na obr 3.53). Výkonová úroveň užitečného signálu v daném bodě je  $\approx -23,4$  dBm. Hodnota vložného útlumu ODN bez zesilovacího systému je téměř stejná jako v předchozím zapojení pro měření s dělicím poměrem 1:256, a to  $-36,4$  dBm.



Obr. 3.53: Schéma zapojení experimentálního měření obousměrného systému s jednosměrným zesilováním.

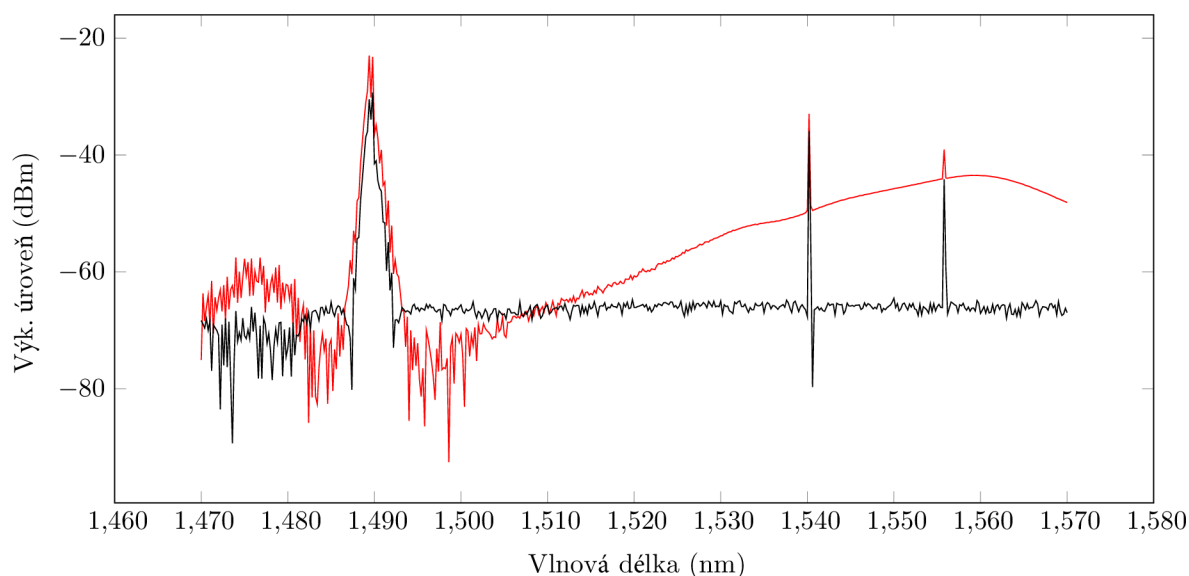
Výstupní sestupný signál bez zesilování a se zesilováním pro ODN s dělicím poměrem 1:256 je zobrazen na obr. 3.54. Celkový zisk pro sestupný směr vyšel 13 dB.



Obr. 3.54: Výstup OSA pro sestupný směr (měřený bod 2).

Jak bylo popsáno výše, vzestupný směr byl realizovaný pomocí laseru Koheras Adjustik s referenční vlnovou délkou 1 540 nm. Pro ochranu před zničením, byl za laser napojen optický izolátor a optický vlnově přeladitelný filtr, který odfiltroval jak nežádoucí odrazy, tak sestupný signál na vlnové délce 1 555 nm. Výstup z optického filtru byl připojen na optický slučovač/rozbočovač. Optický signál pro vzestupný směr byl do ODN navázán přes jeden z 256 portů.

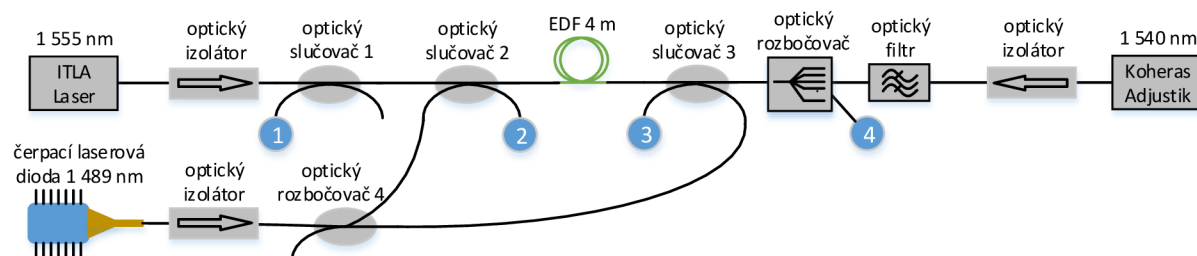
Na obr. 3.55 jsou zobrazena spektra výstupních signálů pro vzestupný směr bez zesilování a se zesilováním pro ODN s dělicím poměrem 1:256 (měřeno v bodě 1 na obr 3.53). Celkový zisk pro vzestupný směr dosáhl hodnoty 3 dB.



Obr. 3.55: Výstup OSA pro vzestupný směr (měřený bod 1).

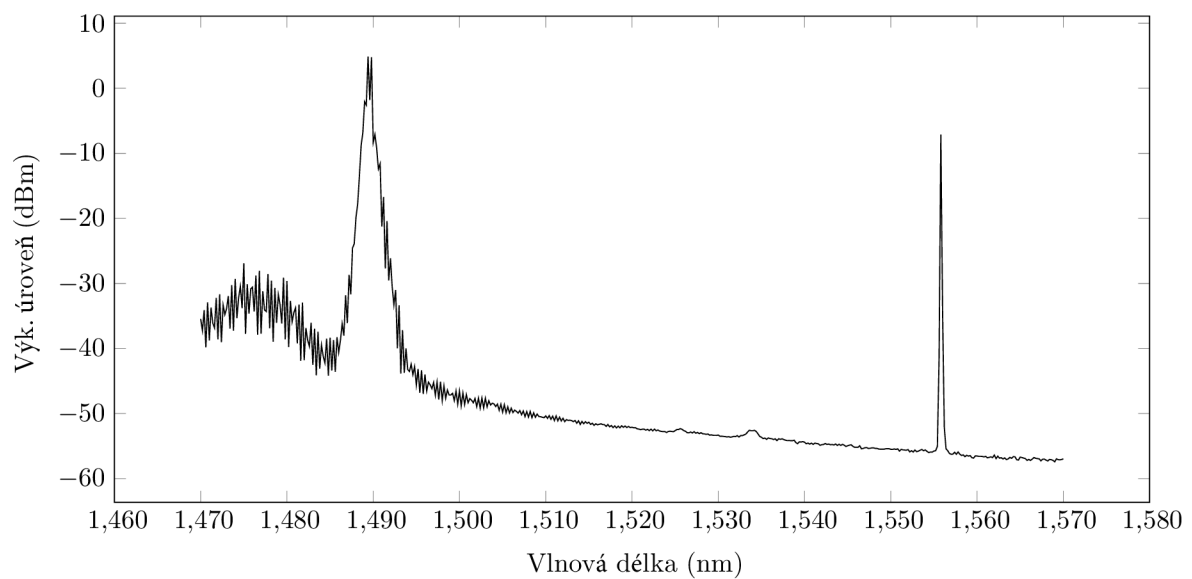
### Obousměrně zesilovaný systém pro obousměrný přenos

Vzhledem k velkým nepoměřům mezi zisky pro sestupný a vzestupný směr u předchozího zapojení, bylo navrženo zapojení s čerpacím signálem navázaným z obou stran EDF vlákna. Schéma zapojení pro poslední měření je zobrazeno na obr 3.56.



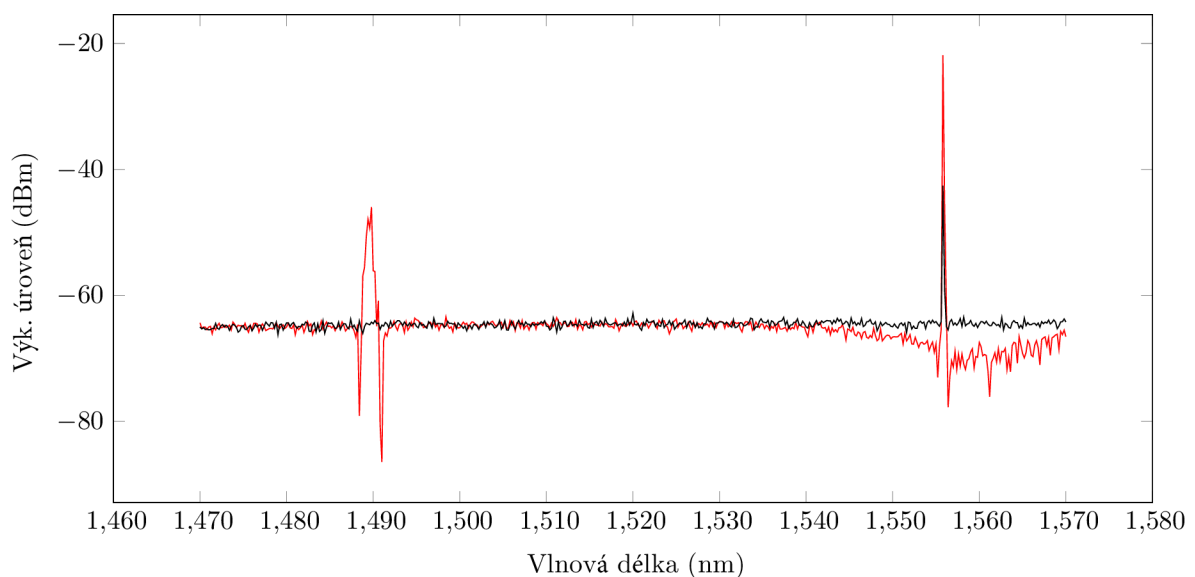
Obr. 3.56: Schéma zapojení experimentálního měření obousměrného systému s obousměrným zesilováním.

Ze schématu zapojení si lze si povšimnout, že v posledním zapojení chybí cívka s 20 km optického vlákna v ODN. Odpojení 20km cívky bylo provedeno ze dvou důvodů. Za prvé, útlumové bilance ODN byla zvýšena v důsledku napojení dvou slučovačů/rozbočovačů. Za druhé, maximální výstupní výkon čerpací diody byl omezen chladičím obvodem laseru, proto byl maximální výkon čerpacího laseru 14,5 dBm. Tento signál byl následně vydělen optickým rozbočovačem s poměrem 50:50, který způsobil pokles výkonu o 3,2 dB. Jedna část čerpacího signálu pak byla napojena před EDF vlákno pomocí optického slučovače 2. Druhá část čerpacího signálu byla přivedena na EDF z druhého konce pomocí optického slučovače 3. Všechny slučovače měly hodnotu vložného útlumu 3,2 dB. Použitím selektivních vazebních členů WDM, namísto optických slučovačů 2 a 3, by bylo možné snížit vložný útlum ODN až o 4 dB.



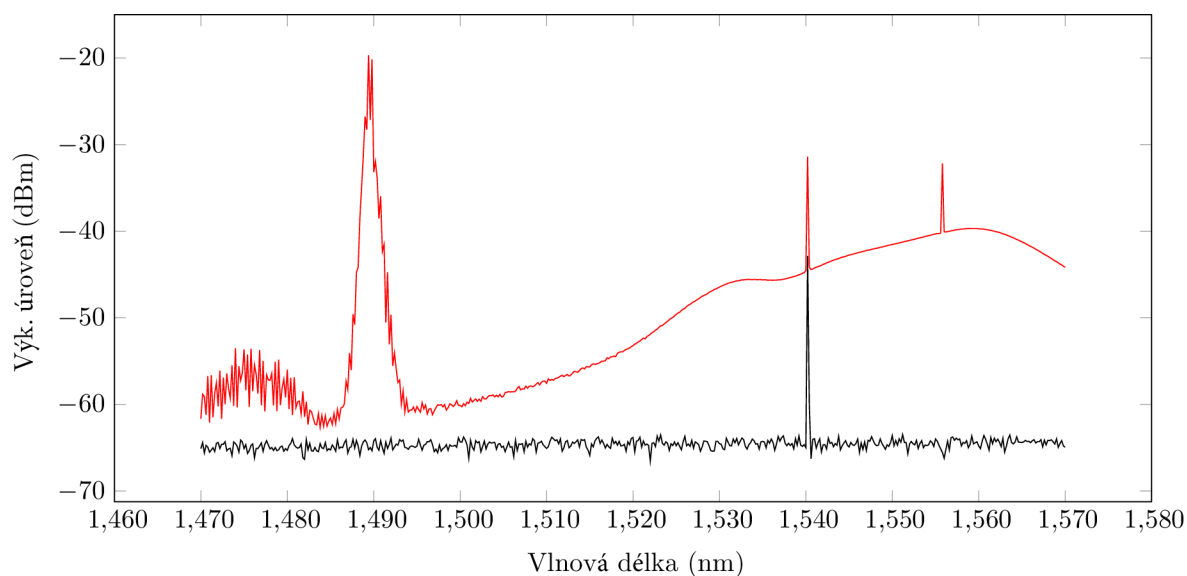
Obr. 3.57: Výstup OSA měřený za optickým rozbočovačem 2.

Na obr 3.57 je zobrazen výstup z OSA v místě měření 2. Oproti předchozím zapojením je zde možné vidět pokles výkonu čerpacího signálu z důvodů vložení optického rozbočovače 4.



Obr. 3.58: Výstup OSA měřený za optickým rozbočovačem 1:256. Červený průběh značí ODN s EDF vláknem a černý průběh je bez EDF vlákna.

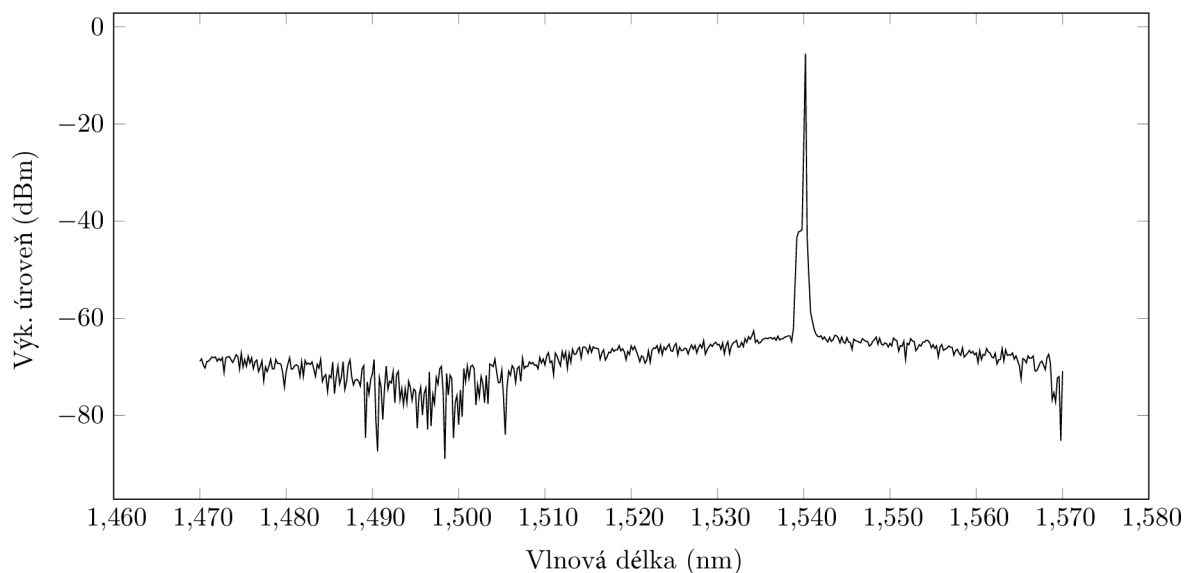
Výstupní signály za optickým rozbočovačem 1:256 jsou zobrazeny na obr 3.58. Výstupní výkon na trase bez zesilování byl  $-42,87$  dBm, po zesílení  $-21,87$  dBm. Zisk sestupného směru při vzdáleném zesilování je 21 dB.



Obr. 3.59: Výstup OSA zobrazující signál z laseru Koheras Adjustik před navázání do optického slučovače 1:256.

Na obr 3.59 je zachycen výstupní signál z laseru Koheras Adjustik na vlnové délce 1 540 nm. Výstupní signál je do ODN navázán přes optický slučovač 1:256.

Poslední výstup z OSA, na obr 3.60, zobrazuje signál měřený v místě 1. Výstupní výkon pro síť bez EDF a tedy bez zesilovacího systému byl  $-42,56$  dBm. Při zapojeném EDF vláknu vzrostl výkon na  $-31,4$  dBm. Zisk systému pro vzestupný směr je 11,16 dB.



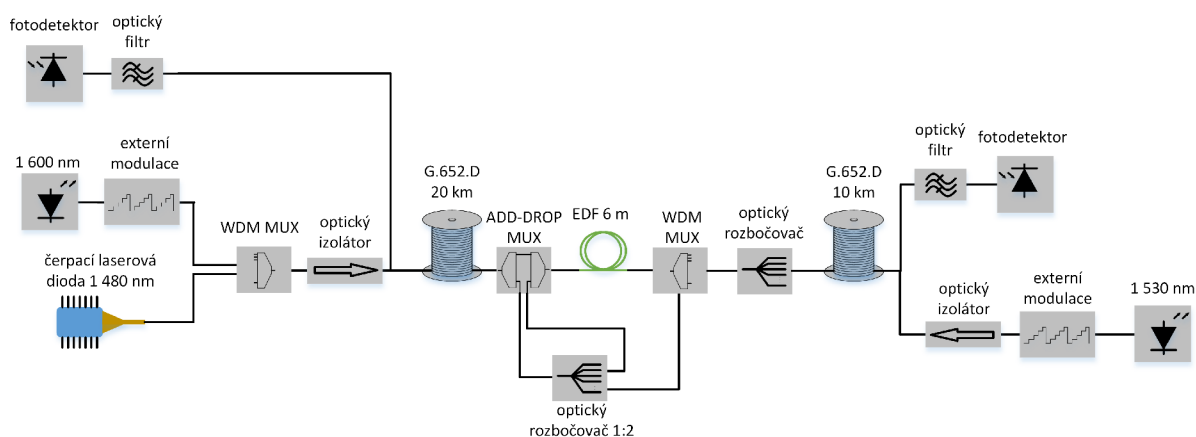
Obr. 3.60: Výstup OSA zobrazující signál z laseru Koheras Adjustik před navázání do optického slučovače 1:256.



Srovnáním výsledků z předchozích měření zjistíme, že nejlepšího výsledku zesilování pro obousměrné zesilování signálů bylo dosaženo v poslední variantě.

### 3.5.2 Návrh obousměrně zesilovaného systému pro NG-PON2

Na základě výsledků získaných z předchozích měření a simulací byl proveden návrh vzdáleného zesilování pro NG-PON2. Schéma navrženého zapojení je zobrazeno na obr. 3.61, na obr. 3.62 je pak zobrazeno zapojení v prostředí aplikace Optisystem. Navržená topologie využívá obousměrného přenosu dat přes 30 km dlouhou distribuční síť, přičemž po 20 km, je umístěn optický rozbočovač s dělicím poměrem 1:256.

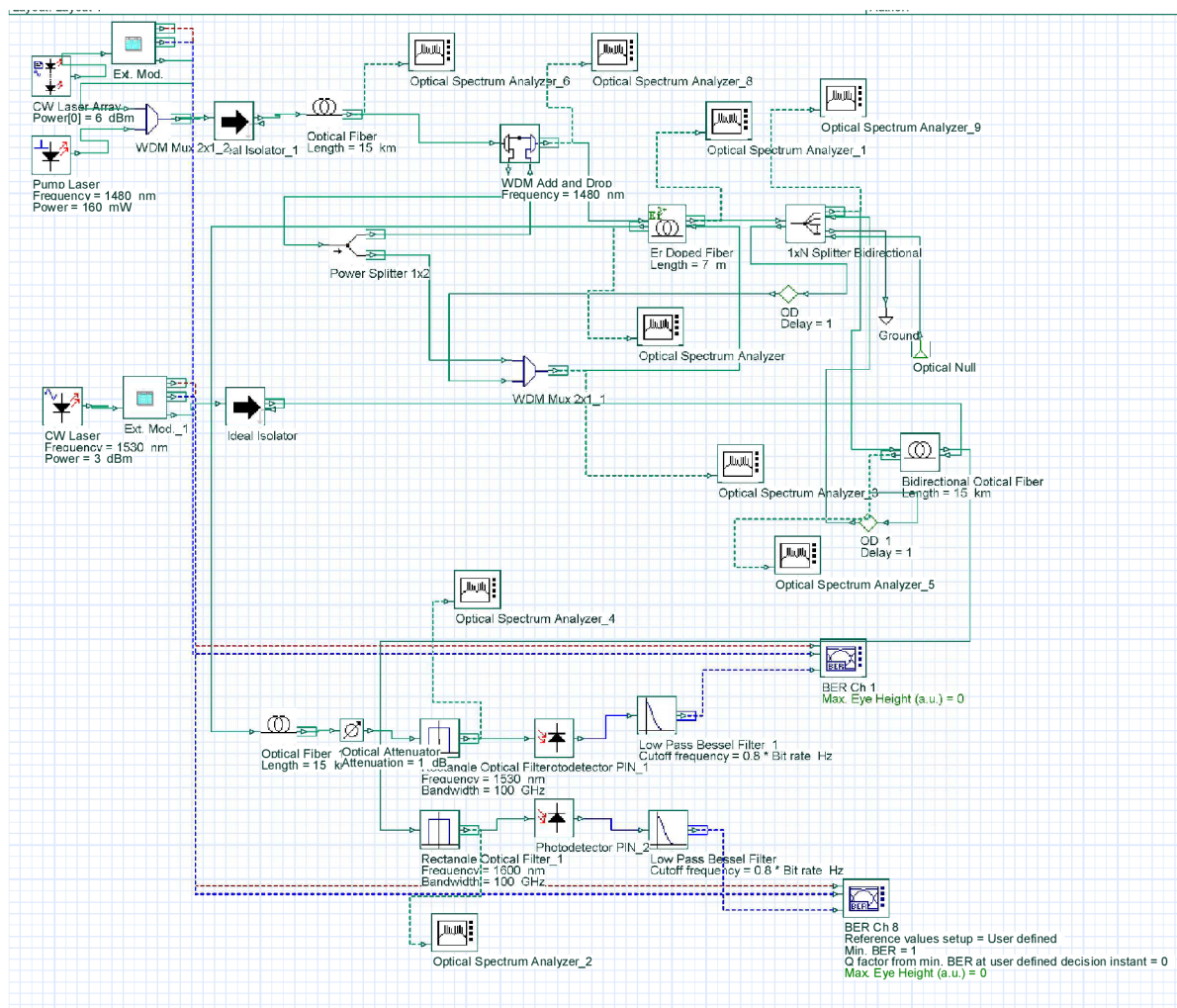


Obr. 3.61: Obecné schéma zapojení obousměrného systému pro zesilování NG-PON2.

Pro sestupný směr byla zvolena vlnová délka 1 600 nm a výkon laserové diody 8 dBm. Optický signál poté vstupuje do elektro-optického modulátoru, který je řízen generátorem a pomocí PRBS je vytvořen datový tok 10 Gbit/s. Vlivem modulace dojde v modulátoru ke snížení výkonové úrovně signálu. Namodulovaný signál je následně sloučen s čerpacím signálem o výkonu 22 dBm pomocí selektivního vazebního členu WDM a přiveden na optický izolátor, který zde slouží k ochraně před nežádoucími odrazy z trasy. Vlevo na obr. 3.63 lze vidět jak datový signál, tak i čerpací signál. Na výstupu vysílací části má čerpací signál výkon 21 dBm a datový signál 1 dBm.

První část ODN je tvořena 20 km optického vlákna G.652.D. Jak je vidět vpravo na obr. 3.63, výkonové úrovně obou signálů klesly o hodnotu vložného útlumu daného úseku vlákna. Za optickým vláknem je umístěn Add-Drop MUX, který slouží k vyvedení čerpacího signálu z vlákna a následně opětovnému navázání zpět do vlákna. Než je však čerpací signál navázán zpět a přiveden do EDF vlákna, je polovina výkonu vydělena pomocí optického rozbočovače 1:2. Druhá polovina výkonu čerpací diody je navázána pomocí selektivního vazebního členu WDM do druhého konce EDF vlákna. Vlevo na obr. 3.64 je možné vidět datový signál před vstupem do EDF, vpravo na obr. 3.64 je zobrazen datový signál na výstupu EDF vlákna. Srovnáním jednotlivých výkonových úrovní pak lehce získáme zisk systému, který pro sestupný směr vyšel  $\approx 9,5$  dB. Kromě datového signálu lze vlevo na obr. 3.64 vidět i čerpací signál, který vlivem čerpání v EDF vlákně ztratil část své energie (viz obr. 3.64 vpravo).

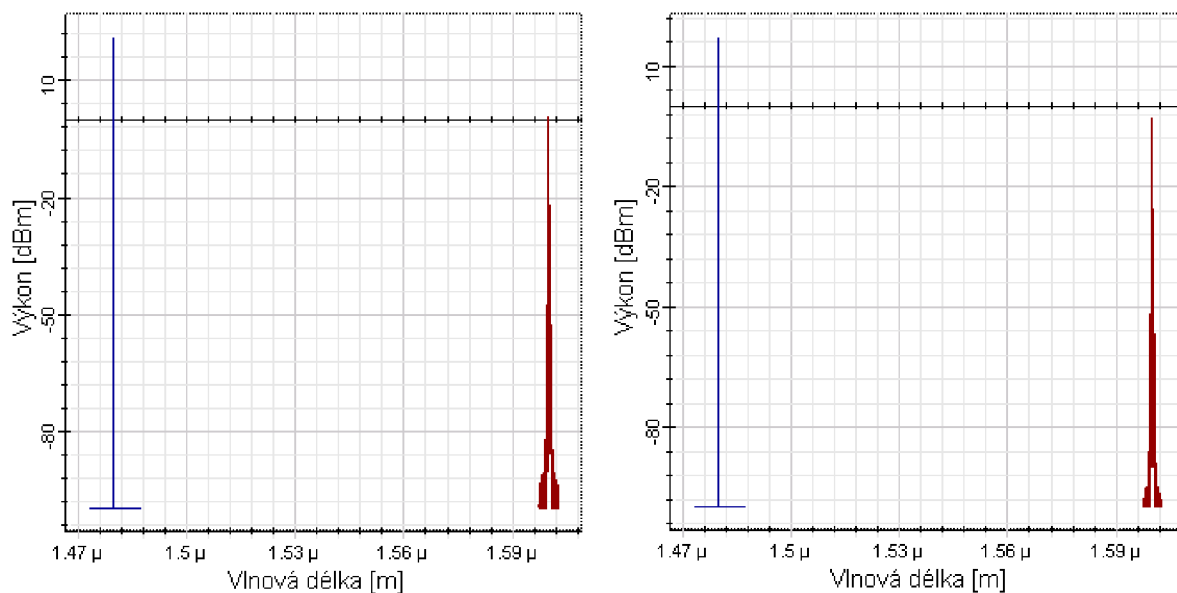




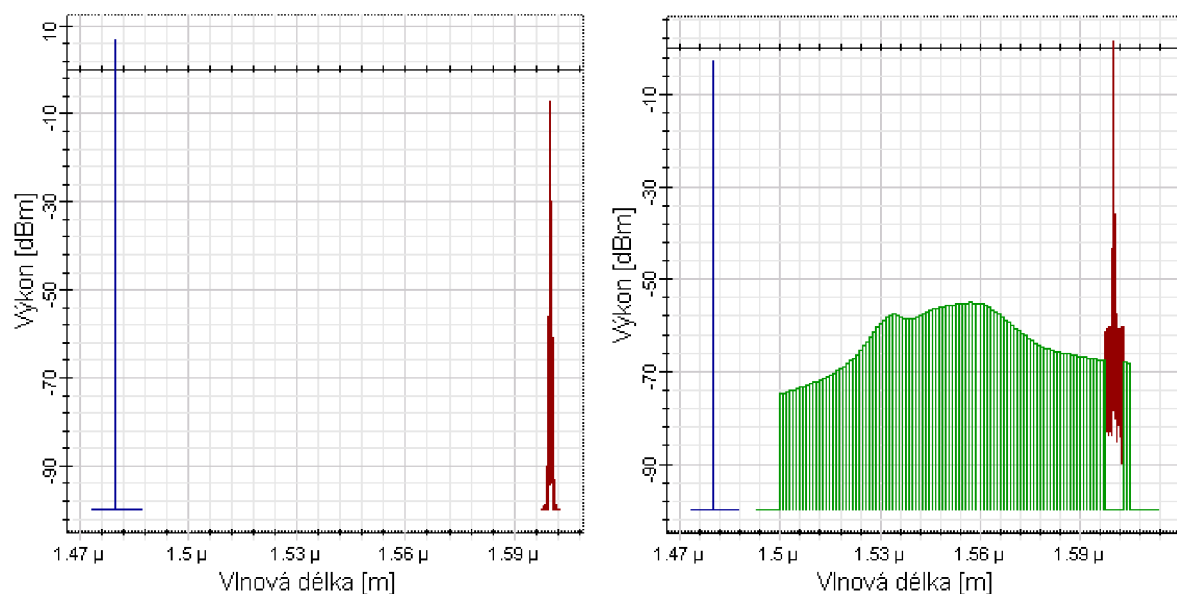
Obr. 3.62: Schéma zapojení obousměrného systému pro zesilování NG-PON2 v prostředí Optisystem.

Vzhledem k tomu, že standard NG-PON2 počítá s minimálním dělicím poměrem 1:64, bylo v testovaném modelu použito vydělení 1:256, které představuje maximální dělicí poměr. V simulaci bylo počítáno s průměrným útlumem, který je pro tento dělicí poměr  $\approx 24$  dB. Vzhledem k tomu, že např. nominální rozsah 1 (viz kapitola 2.3) standardu NG-PON2 má limit 29 dB, je zřejmé, že pro ODN zbývá cca 5 dB, což odpovídá max. 25 km vlákna (pokud nebudeme počítat ztráty na spojích). Zesílený signál je tedy přiveden na vstup optického rozbočovače, kde je následně rozdělen do 256 směrů s útlumem  $\approx 24$  dB pro každou větev. Spektra signálů za vydělovacím prvkem jsou vlevo na obr. 3.65. Kromě datového signálu v sestupném směru a zeslabeného čerpacího signálu si lze povšimnout i přítomnosti datového signálu pro vzestupný směr.

Z optického rozbočovače je signál přiveden na další cívku s optickým vláknem G.652.D o délce 10 km. Vzhledem k tomu, že se vláknem šíří, kromě datového signálu, i zeslabený čerpací signál, je nutné před fotodetektorem použít filtr. V našem případě se jedná o obdélníkový filtr typu pásmová propust. Spektrum výsledného signálu před fotodetek-



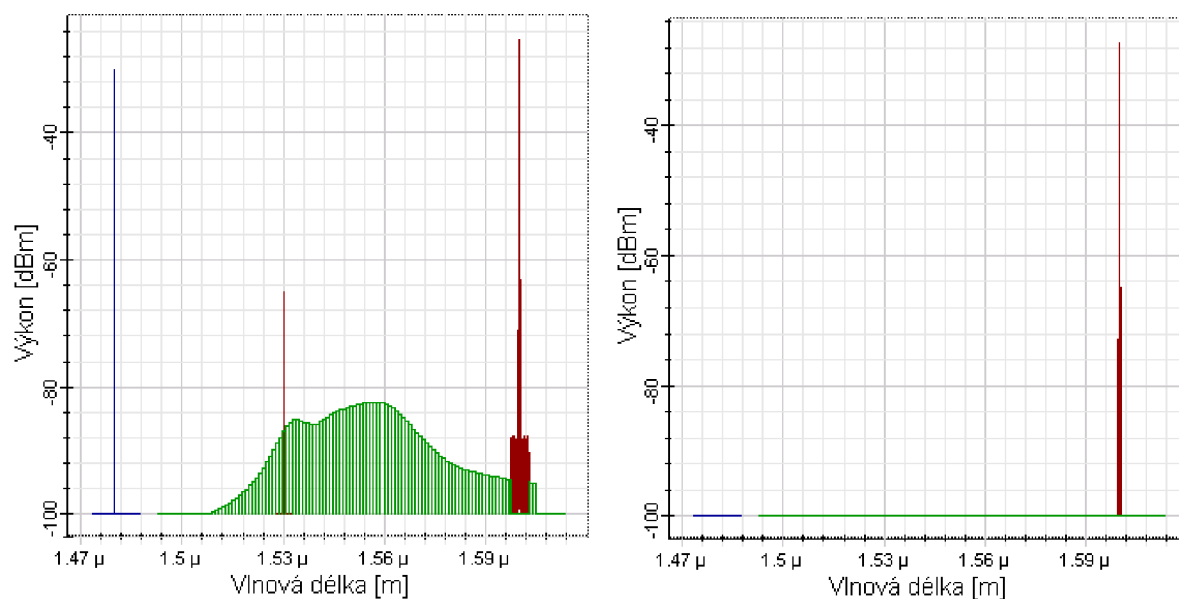
Obr. 3.63: Zobrazení spekter datového a čerpacího signálu za optickým izolátorem (vlevo) a po 20 km optického vlákna (vpravo).



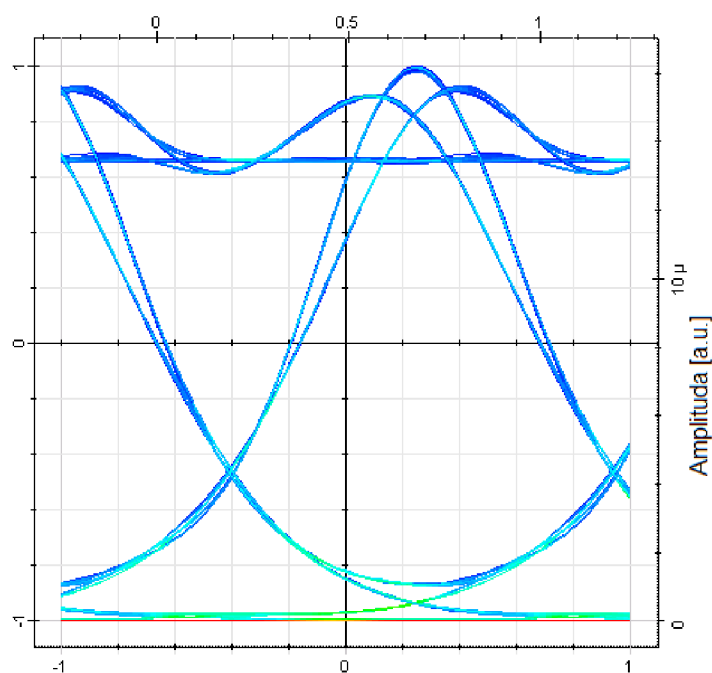
Obr. 3.64: Zobrazení spekter datového a čerpacího signálu před EDF (vlevo) a za EDF (vpravo).

torem je zobrazeno vpravo na obr. 3.65. Hodnota dopadajícího výkonu na fotodetektor je  $-27,2$  dBm.

Vzestupný směr je realizován DFB laserovou diodou o vlnové délce  $1\,530$  nm a nominálním výkonem  $10$  dBm. Pomocí externího modulátoru je na CW světlo namodulován datový signál s přenosovou rychlostí  $10$  Gbit/s. Vlivem modulace byl signál zeslaben a na výstupu izolátoru, který je připojen na výstup modulátoru, je výkon  $4,1$  dBm. Vzhledem



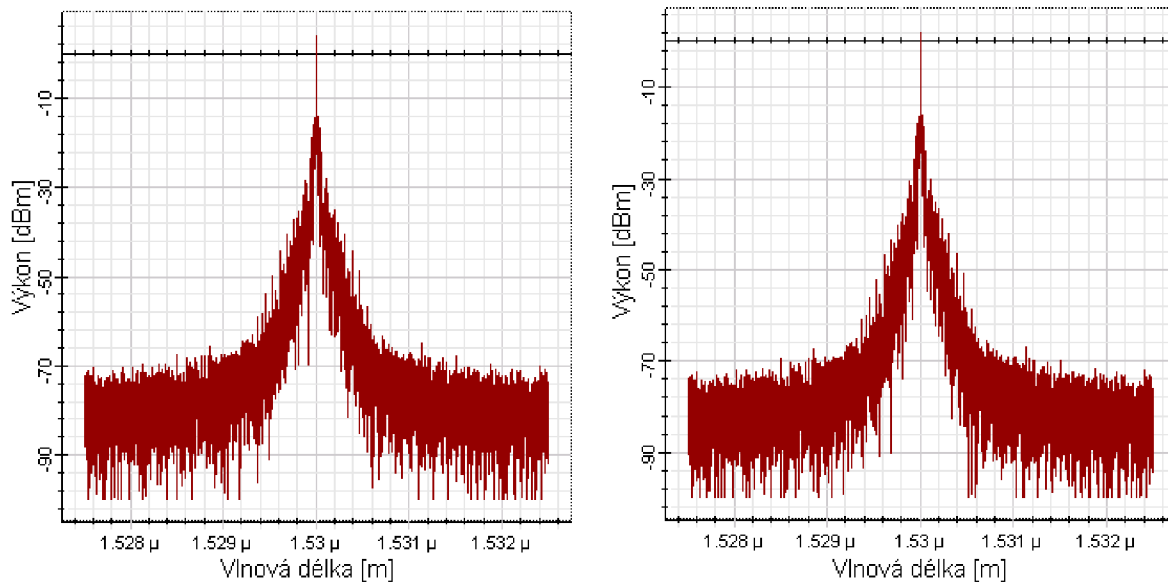
Obr. 3.65: Zobrazení spekter datového a čerpacího signálu za optickým rozbočovačem (vlevo) a za filtrem (vpravo).



Obr. 3.66: Oko rozhodnutí pro sestupný signál.

k tomu, že v simulačním prostředí Optisystem nebylo možné realizovat celou trasu pomocí obousměrných prvků, bylo nutné některé komponenty použít odděleně pro sestupný a vzestupný směr šíření. Absence některých prvků pro obousměrný přenos nemá žádný vliv na výsledek simulace. Stejně jako u sestupného směru šíření, budou i pro vzestupný směr zobrazeny výstupy z OSA za jednotlivými komponenty. To nám umožní lépe po-

soudit funkčnost navrženého řešení. Vlevo na obr. 3.67 lze spatřit spektrum výstupního signálu za izolátorem a vpravo spektrum po přenosu první části (z pohledu od ONU) ODN, tedy po 10 km vlákna.



Obr. 3.67: Zobrazení spektra datového signálu pro vzestupný směr za optickým izolátorem (vlevo) a po 20 km optického vlákna (vpravo).

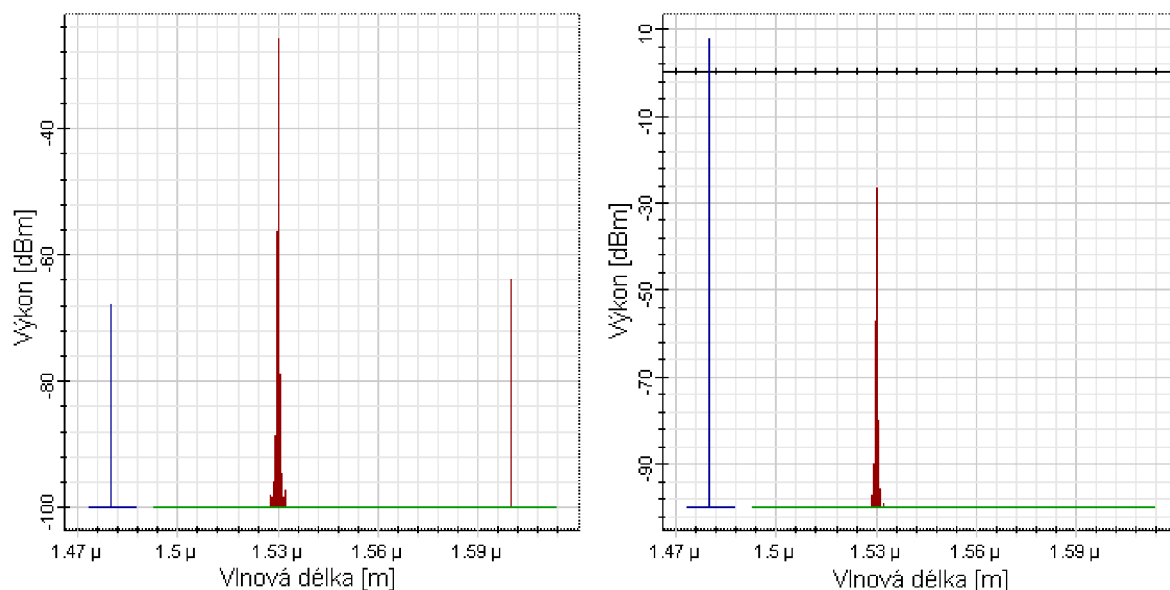
Za 10 km dlouhým optickým vláknem byl signál přiveden na jeden z 256 portů optického slučovače. Termín slučovač namísto rozbočovač, který byl použit pro sestupný směr, je volen záměrně, protože z pohledu od ONU dochází směrem k OLT ke slučování signálů z jednotlivých větví do jednoho vlákna. Spektrum signálu za slučovačem je zobrazeno vlevo na obr. 3.68. Kromě datového signálu pro vzestupný směr jsou zde vidět i čerpací a datový signál ze směru vzestupného. Vzestupný signál o výkonu  $-25,8$  dBm je následně sloučen s polovinou výkonu čerpacího signálu a pomocí selektivního vazebního členu WDM je navázán do EDF vlákna. Vpravo na obr. 3.68 je zobrazen datový signál pro vzestupný směr spolu s čerpacím signálem před vstupem do EDF vlákna.

V EDF vlákně proběhne, díky stimulované emisi, zesílení vzestupného signálu z původní hodnoty  $-26,6$  dBm na hodnotu  $-15,5$  dBm. Zisk systému pro vzestupný směr tedy byl  $\approx 10$  dB. Vlevo na obr. 3.69 je zobrazen signál za EDF vláknem a vpravo je signál po dalších 20 km optického vlákna.

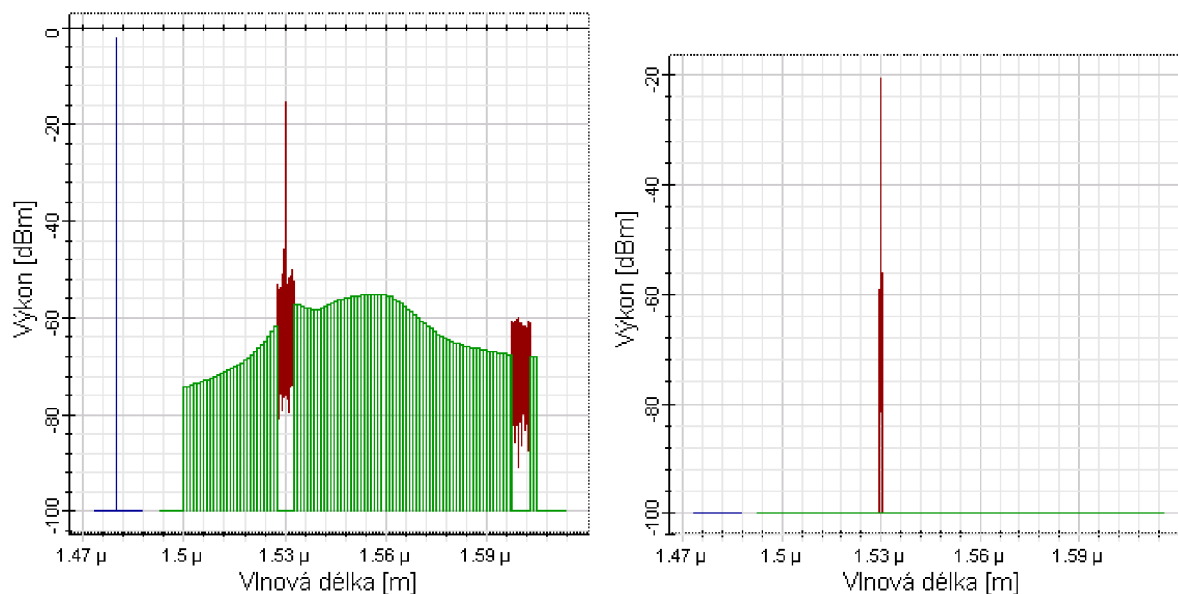
Pokud bychom se podívali na útlumovou bilanci trasy, tak pro ODN bez zesilovacího systému je,

$$A_C = A_{FIB1} + A_{OS} + A_{FIB2} = (20 \cdot 0,2) + 24 + (10 \cdot 0,2) = 30 \text{ [dB]}. \quad (3.14)$$

Přičemž  $A_C$  představuje celkový útlum ODN,  $A_{FIB1}$  je útlum 20 km optického vlákna,  $A_{OS}$  představuje útlum na rozbočovači/slučovači a  $A_{FIB2}$  je vlákno o délce 10 km. Celková hodnota útlumu vyšla 30 dB, což podle kapitoly 2.3 odpovídá TWDM síti v útlumové třídě nominální 1.



Obr. 3.68: Výstup z OSA pro vzestupný směr za optickým slučovačem (vlevo) a před EDF vláknem (vpravo).



Obr. 3.69: Výstup z OSA pro vzestupný směr za optickým slučovačem (vlevo) a před EDF vláknem (vpravo).

Útlumová bilance trasy pro ODN se zapojenými prvky systému vzdáleného zesilování pro sestupný směr je,

$$\begin{aligned}
 A_C &= A_{FIB1} + A_{ADMUX} + A_{EDF} + A_{WDM} + A_{OS} + A_{FIB2} = \\
 &= (20 \cdot 0,2) + 2 + (-9,5) + 1 + 24 + (10 \cdot 0,2) = 23,5 \text{ [dB]}.
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

a pro vzestupný směr,

$$\begin{aligned} A_C &= A_{FIB2} + A_{OS} + A_{WDM} + A_{EDF} + A_{ADMUX} + A_{FIB1} = \\ &= (10 \cdot 0,2) + 24 + 1 + (-10) + 2 + (20 \cdot 0,2) = 23 \text{ [dB]}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Přičemž  $A_{ADMUX}$  představuje vložný útlum prvku Add-Drop MUX,  $A_{EDF}$  je zisk na EDF vláknu a  $A_{WDM}$  je vložný útlum vlnově selektivního členu WDM.

### 3.5.3 Zhodnocení

V poslední kapitole práce byla realizována měření pro ověření funkčnosti vzdáleného zesílení signálu. Celkem byly ověřeny tři různé konfigurace, přičemž nejlepších výsledků bylo dosaženo v posledním měření s obousměrným provozem a čerpacím signálem navázaným do obou konců EDF vlákna. Na základě provedených měření, byl v simulačním prostředí Optsim, vytvořen model sítě NG-PON2 se systémem vzdáleného zesilování. Výsledky simulací potvrdili možnost použití vzdáleného zesilování pro pasivní optické sítě nové generace.

Cílem teoretické části práce bylo představit základní informace vláknové optiky. Nejdříve jsou představena optická vlákna používaná v optických přístupových sítích a jejich základní parametry. Nejběžnějšími typy optických vláken jsou jednovidová optická vlákna, přičemž pro telekomunikační sítě se nejvíce používají standardy G.652 a G.657 definované ITU-T, proto jim byla věnována větší pozornost než například speciálním typům optických vláken. Dále je uveden princip přenosu informací po optickém vlákně a nakonec jsou představeny lineární a nelineární jevy vznikající v optickém prostředí. Druhá kapitola je věnována optickým přístupovým sítím. Kromě základního rozdělení, představení architektur a vysvětlení principů multiplexace, jsou zde uvedeny všechny standardy pasivních optických sítí.

Vzhledem k tomu, že teorii vláknové optiky a optickým přístupovým sítím je věnována celá řada samostatných odborných knih, byly v práci stručně představeny jen základní informace nutné k pochopení praktické části práce. Více informací lze vždy nalézt v uvedených referencích.

Praktická část práce je rozdělena celkem do pěti samostatných podkapitol. První kapitola představuje rozsáhlou analýzu stavu optických vláken v České republice. Na náhodně vybraných 8 trasách bylo provedeno komplexní měření základních parametrů. Měřením bylo zjištěno, že většina tras nesplňuje některé limitní hodnoty, což do budoucna představuje problém pro nasazování nových technologií. Nejvíce překročení limitních hodnot bylo zjištěno u měření spektrálního profilu vlákna, kde měrný útlum vlákna na vlnové délce 1383 nm v některých případech převyšoval povolenou hodnotu až trojnásobně. Tyto trasy jsou nevhodné pro nasazení hrubého vlnového multiplexu v E pásmu. Zvýšení hodnoty je vždy zapříčiněno použitím starších optických vláken s water peaky, proto jediným způsobem opravy je výměna starších vláken za vlákna nová. Dalším parametrem, který často vykazoval nadlimitní hodnoty byl vložný útlum trasy. Použitím krátkých úseků vláken a jejich spojováním (sváření i konektorováním) vykazovaly trasy na všech vlnových délkách zvýšené hodnoty měrného útlumu vlákna. Každý přenosový systém pracuje v určitém dynamické rozsahu a zvýšené hodnoty trasy snižují maximální dosah sítě, případně maximální možný dělicí poměr pasivní optické sítě. Snížení nadlimitních hodnot měrného útlumu vláken lze realizovat provařením jednotlivých úseků kvalitními sváry. Posledním parametrem, který vykazoval nadlimitní hodnotu byl koeficient PMD. Pro trasu 4 vyšla hodnota PMD koeficientu více než o řád výše ( $0,9 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ ), než je stanovený limit ( $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ ). Zvýšení hodnoty bylo pravděpodobně dáno špatným způsobem instalace. Pro krátké vzdálenosti (do 10 km), nemusí mít zvýšená hodnota vliv na přenosové vlastnosti systému. Pro dlouhé vzdálenosti by zvýšená hodnota koeficientu PMD zvyšovala mezisymbolovou interferenci a tedy chybovost systému. Nápravou by zde byla výměna úseků vláken se zvýšenou hodnotou PMD koeficientu.

Následující podkapitola se zabývá posouzením vlivu polarizační vidové disperze na přístupové sítě. Navazuje na výsledky přechodí podkapitoly, kde bylo zjištěno, že některé



současné přenosové trasy vykazují hodnotu PMD koeficientu o řád větší, než je limitní hodnota. V simulačním prostředí OptSim v5.2 byl vytvořen jednoduchý model pasivní optické sítě NG-PON s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s. Postupně byl měněn dělicí poměr optického rozbočovače z 1:2 až po 1:128 a pro každou hodnotu byl určen maximální dosah sítě v závislosti na chybovosti systému. Pro minimální dělicí poměr 1:2 vyšla maximální možná vzdálenost trasy 41 km. Taková síť by pracovala správně pokud by koeficient PMD byl  $< 0,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ . Vzhledem k tomu, že standard NG-PON definuje minimální dělicí poměr 1:64, maximální délka trasy navrženého systému je 26 km. Při limitní hodnotě 5 ps je maximální přípustná hodnota koeficientu PMD rovna  $1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ . Srovnáním výsledků s hodnotou zjištěnou pro trasu 4 v předchozí podkapitole zjistíme, že polarizační vidová disperze má vliv na optické přístupové sítě a některé trasy nemusí být vhodné pro nasazení pasivních optických sítí s rychlostmi 10 Gbit/s. Důležité je provést vždy měření disperzí před nasazením nového systému na trasu.

Vzhledem k tomu, že je stále v České republice hodně ISP, kteří nechtějí investovat do výstavby pasivních optických sítí a zaměřují se na výstavbu aktivních optických sítí, bylo provedeno porovnání dvou nejběžnějších způsobů realizace aktivní optické sítě z hlediska počátečních nákladů a rovněž nákladů na následný provoz sítě. Porovnávány byly vždy dva scénáře obsahující kombinaci domů a budov – nezatížená síť (připojeny 4 objekty) a plně zatížená síť (připojeno 24 objektů). První varianta byla realizována pomocí media-konvertorů, kde každý objekt byl propojen pomocí jednoho páru media-konvertorů. Pro síť s minimálním zatížením byly náklady na realizaci spočítány na částku 23 tis. Kč a náklady na provoz sítě po dobu jednoho roku 3,1 tis. Kč. Při plném zatížení byly počáteční investice 123 tis. Kč a náklady na provoz vyšly na 21,2 tis. Kč/rok. Druhá varianta sítě byla realizována pomocí plně optických a opticko-metalických switchů. Při minimálním zatížení byly počáteční náklady 48 tis. Kč a náklady na provoz sítě po dobu jednoho roku činily 3,85 tis. Kč. Realizace plně zatížené sítě by vyšla na cenu 188 tis. Kč a náklady na následný provoz 27 tis./rok. Srovnáním jednotlivých variant zjistíme, že výhodou sítě realizované pomocí media-konvertorů jsou náklady na její realizaci. Naopak, realizace sítě pomocí switchů snižuje počet aktivních prvků v síti a umožňuje její vzdálený manažment. Z hlediska dlouhodobých nákladů však ani jedna síť není ekonomicky výhodná. Realizací sítě pasivním způsobem, by umožnilo přesun CO blíže k páteřní síti a úsporu jak provozních nákladů, tak i nákladů na provoz sítě.

V předposlední podkapitole byl navrženo a realizován systém založený na optickém časovém multiplexu. Pomocí polarizačního multiplexu byl přenesen po každé polarizační rovině signál 640 Gbit/s, celková přenosová rychlost systému byla 1,28 Tbit/s včetně režie FEC. Přenos vytvořeného PDM-NRZ-OOK signálu s přenosovou rychlostí 1,19 Tbit/s byl ověřen na reálné trase o délce 56 km, která byla vytvořena v Dánsku mezi laboratoří DTU v Kodani a městem Hillerød. Všech 128 datových toků bylo přijato s chybovostí pod limitem FEC, tedy  $3,8 \cdot 10^{-3}$ . Díky tomu, že nejdříve byl vytvořen signál s modulací RZ, který byl následně plně opticky převeden na modulaci NRZ, spektrum výsledného signálu mohlo být zúženo na šířku 700 GHz se zanedbatelným power penalty. Bylo tedy dosaženo vyšší spektrální účinnosti oproti klasickému přenosu RZ signálu. Navíc fázově koherentní OTDM signál s užším spekrem je více tolerantní k disperzím.

Přestože je hlavní myšlenkou pasivních optických sítí přenos dat z CO k ONU na straně uživatele po plně pasivní infrastruktuře, v posledních standardech od GPON se objevuje zmínka o použití aktivních optických zesilovačů v trase, pro navýšení maximál-



ního dosahu sítě. Taková síť už by však nebyla plně pasivního charakteru, ale jednalo by se spíše o hybridní síť. Poslední část práce je věnována kompenzaci útlumu přenosové optické trasy pro pasivní optické sítě pomocí technologii vzdáleného čerpání. Celkem byly navrženy tři modely systémů vzdáleného zesílení, přičemž první model sloužil pro zesilování jednosměrného signálu a zbylé dva modely sloužili pro zesílení obousměrného provozu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo v posledním zapojení, kde zisk v sestupném směru dosahoval hodnoty zesílení až 21 dB a vzestupný směr byl zesilován se ziskem 11,16 dB. Měřením byla tedy ověřena funkčnost vzdáleného zesílení signálů na trase. Pro porovnání správnosti výsledků naměřených hodnot, byl první model systému vzdáleného zesílení vytvořen v simulačním prostředí Optisystem 13. Rozdíl mezi výsledky získanými měřeními a výsledky získanými simulací byl jen nepatrný, tudíž byla vzájemně ověřena jejich správnost. Na základě uvedených výsledků, byl navržen v simulačním prostředí Optisystem model sítě NG-PON2 s celkovou délkou optické distribuční sítě 30 km. Dělicí poměr byl zvolen maximální možný, podle standardu pro danou síť, tedy 1:256. Bez zapojení EDF a příslušných prvků potřebných pro realizaci vzdáleného zesílení do trasy, byla výkonová bilance systému rovných 30 dB. Se zapojeným systémem vzdáleného zesílení, při použití EDF o délce pouhých 7 m a výkonem čerpací diody 160 mW, bylo zesílení obou směrů téměř shodné, a to  $\approx 10$  dB. Po odečtení vložných útlumů všech prvků vzdáleného zesílení, které by nebyly na trase použity v případě běžné distribuční sítě, vyšla útlumová bilance trasy  $\approx 23$  dB. Se systémem vzdáleného zesílení bylo tedy dosaženo čistého zisku  $\approx 7$  dB.

# Literatura

---

- [1] 802.3ah Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications.
- [2] 802.3av Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks.
- [3] G.652 Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.
- [4] G.653 Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable.
- [5] G.655 Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.
- [6] G.656 Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport.
- [7] G.657 Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network.
- [8] G.694.1 Spectral grids for WDM applications: DWDM wavelength grid.
- [9] G.694.2 Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid.
- [10] G.695 Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications.
- [11] G.697 Optical monitoring for DWDM systems.
- [12] G.983.1 Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON).
- [13] G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON).
- [14] G.987.1 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms.
- [15] G.989.2 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification.
- [16] Distributed PMD Analyzer — FTB-5600. online, 2014.  
URL <http://www.exfo.com/>
- [17] Introduction of PANDA fibers. Technická zpráva, Fujikura, 2014.
- [18] A., G. P.: *Fiber-Optic Communications Systems*. John Wiley & Sons, 2002, doi:ISBN: 0-471-22114-7.
- [19] Abramczyk, A.: Nonlinear phenomena in optical fibers. Technická zpráva, Technical University of Lodz, Laboratory of Laser Molecular Spectroscopy, 2005.
- [20] Agrawal, G. P.: *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, třetí vydání, 2001, doi: ISBN: 0-12-045143-3.
- [21] Ahsan, S.; Newaz, S.; Asif, S.: Migration to the Next Generation Optical Access Networks Using Hybrid WDM/TDM-PON. *JOURNAL OF NETWORKS*, ročník 6, č. 1, 2011: s. 18–25.

- [22] ALCATEL: Optical Networks. Technická zpráva, The International Engineering Consortium, 2010.  
URL <http://www.iec.org>
- [23] Bailey, D.; Wright, E.: *Practical Fiber Optics*. Elsevier, 2003.
- [24] Becker, P.; Olsson, N.; Simpson, J.: *Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Fundamentals and Technology*. Academic Press, 1999, doi:ISBN: 0-12-084590-3.
- [25] Branč, M.: *Media konvertory a optické switche*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010, vedoucí práce: Ing. Petr Münster.
- [26] Chauvel, G.: Dispersion in Optical Fibers. Technická zpráva, Anritsu, 2008.
- [27] Chromycz, B.: *Planning Fiber Optic Networks*. The McGraw-Hill Companies, 2009.
- [28] Collings, B.; Heismann, F.; Lietaert, G.: *Dispersion in Optical Fibers*. JDS Uniphase Corporation, 2010.
- [29] Dado, M.; Turek, I.; Štelina, J.; aj.: *Kapitoly z optiky pre technikov*. Žilinská univerzita v Žiline/EDIS-vydavateľstvo ŽU, 1998, doi:ISBN: 80-7100-390-5.
- [30] Derksen, R. H.; Lehmann, G.; Weiske, C.-J.; aj.: Integrated 100 Gbit/s ETDM Receiver in a Transmission Experiment over 480 km DMF. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference*, Optical Society of America, 2006, str. PDP37.  
URL <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2006-PDP37>
- [31] Dupertuis, M. A.; Acklin, B.; Proctor, M.: Generalization of complex Snell–Descartes and Fresnel laws. *J. Opt. Soc. Am. A*, ročník 11, č. 3, Mar 1994: s. 1159–1166, doi: 10.1364/JOSAA.11.001159.  
URL <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-11-3-1159>
- [32] Žáček, M.: *Nelineární charakter optického prostředí*. Bakalářská práce, VUT Brno, 2008.
- [33] Filka, M.: *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno : Doc. Ing. Milošlav Filka, 2009, 369 s., doi:ISBN 978-80-86785-14-1.
- [34] Ghatak, A.; Thyagarajan, k.: *Introduction to fiber optic*. Cambridge university press, 1997.
- [35] Gimlett, J. L.; Iqbal, M. Z.; Young, J.; aj.: Impact of multiple reflection noise in Gbit/s lightwave systems with optical fibre amplifiers. *Electronics Letters*, ročník 25, č. 20, 1989.
- [36] Grubb, S.: High-power diode-pumped fiber lasers and amplifiers. In *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest*, ročník 8, Optical Society of America, 1995, s. 41–42.
- [37] Guan, P.; Hirano, T.; Harako, K.; aj.: 2.56 Tbit/s/ch polarization-multiplexed DQPSK transmission over 300 km using time-domain optical Fourier transformation. *Opt. Express*, ročník 19, č. 26, Dec 2011: s. B567–B573, doi:10.1364/OE.19.00B567.  
URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-19-26-B567>
- [38] Gutierrez, D.; Kim, K. S.; Rotolo, S.; aj.: FTTH Standards Deployments and Research Issues. *8th Joint Conference on Information Sciences; Symposium on Photonics, Networking and Computing, Session: PNC-5 Optical Communications*, ročník 8, 2005: s. 1358 – 1361.

- [39] Hajduczenia, M.; da Silva, H.: Next generation PON systems - Current status. *11th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2009: s. 1 – 8.
- [40] Hansen, P.; Eskildsen, L.; Grubb, S.; aj.: 8 x 10 Gb/s WDM repeaterless transmission experiment over 352 km. In *Tenth International Conference on Integrated Optics and Optical Fibre Communication*, ročník 5, 1995, s. 27–28.
- [41] Hansen, P.; Eskildsen, L.; Grubb, S. G.; aj.: 2.488-Gb/s unrepeated transmission over 529 km using rernote pumped post- and pre- amplifiers, forward error correction, and dispersion compensation. In *Conference on Optical Fiber Communication OSA Technical Digest Series*, ročník 8, 1995, s. 420–423.
- [42] Haugen, J. ; Freeman, J.; Conradi, J.: Bidirectional Transmission at 622 Mb/s Utilizing Erbium—Doped Fiber Amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, ročník 4, č. 8, 1992: s. 913–916.
- [43] Hájek, M.; Kucharski, M.: Vliv ohybů na útlum jednovidového optického vlákna - význam vlnové délky 1625 nm pro měření optických tras. Technická zpráva, Mikroskop.
- [44] Horvath, T.; Fujdiak, R.; Cucka, M.; aj.: Using Miller’s Code in NG-PON2 Networks. *Elektrorevue*, 2014.
- [45] Hu, H.; Münster, P.; Palushani, E.; aj.: 640 Gbaud NRZ-OOK data signal generation and 1.19 Tbit/s PDM-NRZ-OOK field trial transmission. *National Fiber Optic Engineers Conference OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2012)*, 2012: str. Postdeadline Session III (PDP5C).
- [46] Huawei Technologies Co., Ltd.: *Next-Generation PON Evolution*. 2010.
- [47] Hui, Y.; Juhao, L.; Bangjiang, L.; aj.: Experimental demonstration of upstream long reach double-side band TDM-OFDM-PON. In *Optical Communications and Networks (ICOON), 2012 11th International Conference on*, Nov 2012, s. 1–3, doi: 10.1109/ICOON.2012.6486215.
- [48] Hui, Y.; Juhao, L.; Bangjiang, L.; aj.: DSP-Based Evolution From Conventional TDM-PON to TDM-OFDM-PON. *Journal of Lightwave Technology*, ročník 31, č. 16, Aug 2013: s. 2735–2741, ISSN 0733-8724, doi:10.1109/JLT.2013.2271909.
- [49] Hutcheson, L.: FTTx: Current Status and the Future. *Communications Magazine, IEEE*, ročník 46, 2008: s. 90 – 95.
- [50] Hynek, J.: *Rozproštěné optické vláknové senzory na dlouhé vzdálenosti*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012.
- [51] Jenkins, F. A.; White, H. E.: *Fundamentals of optics*. McGraw Hill Company, 1957.
- [52] John, M.: *Optical Fiber Communications-Principles and Practice*. Pearson Education, třetí vydání, 2009, iISBN: 978-0-13-032681-2.
- [53] Johnson, M.: *Optical fibres, cables and systems*. ITU-T, 2009.
- [54] Kaminow, I. P.; Li, T.: *Optical fiber telecommunications - systems and impairments*. Academic press, 2002.
- [55] Keiser, G.: *FTTX Concepts and Applications*. PhotonicsComm Solutions, Inc., 2006.
- [56] Kováč, F.: *Simulace a měření disperzí v optických přístupových sítích*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013.

- [57] Kun, Q.; Xinwen, Y.; Jing, Z.; aj.: OFDM-PON optical fiber access technologies. In *Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2011. ACP. Asia*, Nov 2011, ISSN 2162-108X, s. 1–9, doi:10.1117/12.900839.
- [58] Laferriere, J.; Lietaert, G.; Taws, R.; aj.: *Reference Guide To Fiber Optic Testing*, ročník 1. JDS Uniphase Corporation, druhé vydání, 2011.
- [59] Lietaert, G.: Dispersion Limits in 10 GigE Transmission Systems. Technická zpráva, JDSU, 2008.
- [60] Lin, M.-C.; Chi, S.: The Gain and Optimal Length in the Erbium-Doped Fiber Amplifiers with 1480 nm Pumping. *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, ročník 4, č. 4, 1992: s. 354–356.
- [61] Münster, P.; Šifta, R.; Tejkal, V.; aj.: The influence of binary modulations in OTDM. *The influence of binary modulations in OTDM*, ročník 15, č. 2a, 2013: s. 155–159, iSSN: 1335- 4205.
- [62] Mulvad, H. C. H.; Galili, M.; Oxenløwe, L. K.; aj.: Demonstration of 5.1 Tbit/s data capacity on a single-wavelength channel. *Opt. Express*, ročník 18, č. 2, Jan 2010: s. 1438–1443, doi:10.1364/OE.18.001438.  
URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-18-2-1438>
- [63] Munster, P.; Sifta, R.; Horvath, T.; aj.: Polarization mode dispersion in NG-PON. In *Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum Education Quality – 2014*, Izhevsk, Russia: Publishing House, 2014, s. 364–367, doi: ISBN: 978-5-7526-0649- 6.
- [64] Othonos, A.; Kyriacos, K.: *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. online, 1999, iISBN 08-900-6344-3.
- [65] Perlick, V.: *Ray Optics, Fermat's Principle, and Applications to General Relativity*. Springer, 2000.
- [66] Peterka, P.: *Vláknové lasery - jasné světlo ze skleněných nitek*. online.
- [67] Powers, E. P.: *Fundamentals of Nonlinear Optics*. CRC Press, první vydání, 2011, doi:ISBN 978-1-4200-9351-3.
- [68] RSOFT DESIGN GROUP, New York: *OptSim*. 2010.
- [69] Singh, S. P.; Gangwar, R.; Singh, N.: Nonlinear scattering effects in optical fibers. *Progress In Electromagnetics Research*, 2007: s. 379–405.
- [70] Staubli, R. K.; Gysel, P.: Crosstalk penalties due to coherent Rayleigh noise in bidirectional optical communication systems. *IEEE/OSA J. of Lightwave Technol.*, ročník 9, 1991: s. 375–380.
- [71] Swanson, B.; Gilder, G.: *Estimating the Exaflood - The Impact of Video and Rich Media on the Internet*. Technická zpráva, Discovery Institute Seattle, Washington, 2008.
- [72] Yao, C.: *What is Optical Fiber Dispersion?* online, 2 2009.

# Seznam symbolů a zkratek

---

**AI-HNLF** AI-Highly Non-Linear Optical Fibre

**AON** Active Optical Network

**APC** Angle Polished Connector

**APON** ATM Passive Optical Network

**ASE** Amplified Spontaneous Emission

**ATM** Asynchronous Transfer Mode

**AWG** Arrayed Waveguide Grating

**B2B** Back-to-Back

**BER** Bit Error Rate

**BPON** Broadband PON

**CD** Chromatic Dispersion

**CLI** Command Line Interface

**CO** Central Office

**CPR** Cross-Polarization Rotation

**CW** Continuous Wave

**CWDM** Coarse WDM

**DCF** Dispersion Shifted Fiber

**DEMUX** Demultiplexer

**DFB** Distributed Feedback

**DFG** Difference Frequency Generation

**DF-HNLF** Dispersion-Flattened HNLF

**DGD** Differential Group Delay

**DSF** Dispersion Shifted Fiber

**DTU** Denmark Technical University

- 
- DWDM** Dense Wavelength Division Multiplexing
- EDF** Erbium Doped Fiber
- EDFA** Erbium Doped Fiber Amplifier
- ETDM** Electrical TDM
- FBG** Fiber Bragg Grating
- FDM** Frequency-division multiplexing
- FEC** Forward Error Correction
- FSAN** Full Services Access Network
- FTTB** Fiber to the Building
- FTTC** Fiber to the Cabinet
- FTTH** Fiber to the Home
- FTTN** Fiber to the Node
- FTTx** Fiber to . . .
- FWHM** Full-Width at Half-Maximum
- FWM** Four Wave Mixing
- GEM** GPON Encapsulation Method
- GEPON** Gigabit Ethernet PON
- GPON** Gigabit PON
- HOM** Higher-Order Mode
- IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers
- ISI** Intersymbol Interference
- ISP** Internet Service Provider
- ITLA** Integrable Tunable Laser Assembly
- ITU-T** International Telecommunication Union
- LED** Light Emitting Diode
- ML** Mode Lock
- MUX** Multiplexer
- NA** Numerical Aperture

- 
- NG-PON** Next Generation PON
- NOLM** Non-linear Optical Loop Mirror
- NRZ** Non-return-to-Zero
- NZDF** Non-Zero Dispersion Fiber
- OBF** Optical Bandpass Filter
- ODF** Optical Distribution Frame
- ODN** Optical Distribution Network
- OFC** Optical Fiber Communication Conference and Exposition
- OLT** Optical Line Termination
- OLTS** Optical Loss Test Sets
- ONU** Optical Network Unit
- ORL** Optical Return Loss
- OS** Optical Splitter
- OSA** Optical Spectrum Analyzer
- OSNR** Optical Signal-to-Noise Ratio
- OTDM** Optical TDM
- OTDR** Optical Time Domain Reflectometry
- P2MP** Point-to-Multipoint
- P2P** Point-to-Point
- PBS** Polarization Beam Splitter
- PC** Personal Computer
- PCI** Peripheral Component Interconnect
- PC-OTDM** Phase Correlated-OTDM
- PDM-16-QAM** Polarization-Division Multiplexed Quadrature Amplitude Modulation
- PLL** Phase Locked Loop
- PM** Polarization Maintenance
- PMD** Polarization Mode Dispersion
- PON** Passive Optical Network



- 
- QoS** Quality of Services
- QPM** Quasi-Phase Matching
- RF** Radio Frequency
- ROA** Raman Optical Amplifier
- RP** Remote Pumping
- RZ** Return-to-Zero
- SBS** Stimulated Brillouin Scattering
- SDH** Synchronous Digital Hierarchy
- SE** Spectral Efficiency
- SFG** Sum Frequency Generation
- SFP** Small Form-factor Pluggable
- SHG** Second Harmonic Generation
- SM** Singlemode Fibre
- SMX** Spatial multiplexing
- SOA** Semiconductor Optical Amplifier
- SONET** Synchronous Optical Network
- SPM** Self-Phase Modulation
- SRS** Stimulated Raman Scattering
- TDM** Time-division multiplexing
- TE** Transverse Electric
- TM** Transverse Magnetic
- TWDM** Time and Wavelength Division Multiplexing
- UTP** Unshielded Twisted Pair
- VLAN** Virtual Local Area Network
- VoIP** Voice over Internet Protocol
- WDM** Wavelength Division Multiplexing
- WSS** Wavelength Selective Switch
- XPM** Cross Phase Modulation

## Vybrané publikace autora

### Články v odborném periodiku impaktovaném

HU, H.; MÜNSTER, P.; PALUSHANI, E.; GALILI, M.; MULVAD, H.C.H.; JEPPESEN, P.; OXENLOWE, L. 640 Gbaud Phase-Correlated OTDM NRZ- OOK Generation and Field Trial Transmission. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2013, roč. 31, č. 99, s. 696-701. ISSN: 0733- 8724. (IF: 2,55).

### Články v jiném odborném periodiku

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

MÜNSTER, P.; ŠIFTA, R.; HORVÁTH, T. Dvoustavové modulace v OTDM sítích. *Elektrorevue - Internetový časopis (<http://www.elektrorevue.cz>)*, 2013, roč. 15, č. 5, s. 339-342. ISSN: 1213- 1539.

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

HORVÁTH, T.; ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P. Co přinese standard NG-PON2?. *Access Server*, 2014, roč. 12, č. 1, s. 1-5. ISSN: 1214- 9675.

HORVÁTH, T.; JURČÍK, M.; ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P. Komunikace mezi jednotkami OLT a ONU ve standardu XG- PON. *Access Server*, 2014, roč. 4, č. 1, s. 1-7. ISSN: 1214-9675.

### Články publikované na konferencích

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

HU, H.; MÜNSTER, P.; PALUSHANI, E.; GALILI, M.; MULVAD, H.C.H.; JEPPESEN, P.; OXENLOWE, L. *640 Gbaud NRZ-OOK data signal generation and 1.19 Tbit/s PDM-NRZ- OOK field trial transmission*. Los Angeles, CA: 2012. s. 1-3. ISBN: 978-1-4673-0262-3.

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

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

TEJKAL, V.; MÜNSTER, P. SOA at 1550 nm testing in bidirectional PON. In *Proceedings of the 17th Conference Student EEICT 2011 Volume 3*. Brno: NOVAPRESS, 2011. s. 71-75. ISBN: 978-80-214-4273- 3.

MÜNSTER, P. OTDM based passive optical network. In *student EEICT - proceedings of the 18th conference*. Brno: LITERA Brno, 2012. s. 24-28. ISBN: 978-80-214-4462- 1.

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

MUNSTER, P., TEJKAL, V.; FILKA, M. Switches for FTTx networks with IPTV - verify the functionality of multicast. In *34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2011)*. 2011. s. 64-68. ISBN: 978-1-4577-1409- 2.

TEJKAL, V.; FILKA, M.; ŠPORIK, J.; REICHERT, P.; MÜNSTER, P. The influence of binary modulations in passive optical network based on WDM. In *34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2011)*. 2011. s. 141-144. ISBN: 978-1-4577-1409- 2.

# Curriculum Vitæ

## Základní údaje

**Jméno, příjmení:** Bc. et Ing. Petr Münster  
**Datum narození:** 9. 9. 1984  
**Národnost:** Česká  
**Stav:** ženatý  
**Kontakt:** e-mail: munster@feec.vutbr.cz  
telefon: +420 777 341 281

## Vzdělání

- 2011 – nyní:** Vysoké Učení Technické v Brně, Ph.D.  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Obor: Teleinformatika  
Téma disertace: Parametry sítí FTTx
- 2012 :** Dánská technická univerzita v Kodani, Ph.D. stáž  
Katedra fotonického inženýrství  
Specializace: Vysokorychlostní optické komunikace  
Výzkum: Realizace a přenos signálu 1,28 Tbit/s
- 2008 – 2010:** Vysoké Učení Technické v Brně, Ing.  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Obor: Telekomunikační a informační technika  
Téma práce: Návrh optické přístupové sítě FTTx
- 2006 – 2009:** Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Bc.  
Fakulta aplikované informatiky  
Obor: Bezpečnostní technologie, systémy a management  
Téma práce: Testy výkonnosti virtualizérů
- 2004 – 2008:** Vysoké Učení Technické v Brně, Bc.  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Obor: Elektronika a sdělovací technika  
Téma práce: Ultrazvukový dálkoměr

## Pracovní zkušenosti

**2005 – 2009:** Občanské sdružení UnArt, Slavičín  
Jednatel v oblasti výstavby optických sítí – návrh,  
realizace a dokumentace optických sítí

## Projekty

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

**2014 – nyní:** Centrum sensorických, informačních a komunikačních systémů (SIX), hlavní řešitel: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida  
ED2.1.00/03.0072

**2012 – nyní:** Lokalizace a klasifikace vibrací pomocí rozprostřeného optovláknového senzoru na velké vzdálenosti,  
hlavní řešitel: doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.  
MPO FR-TI4/696

**2012:** Zavedení moderních přenosových medií do předmětu  
Přenosová media, hlavní řešitel: Ing. Petr Münster  
FRVŠ 2542/G1

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

## Určený recenzent

- Scientific & Academic Publishing USA – Open-Access publisher of journals
- IJATES – Internet All-Electronic Journal, ISSN 1805-5443
- The Tenth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT 2014)

- The Ninth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT 2013)
- Technologická agentura České republiky

### **Publikační aktivity**

- Články v odborném periodiku impaktovaném: 1
- Články v jiném odborném periodiku: 13
- Články publikované na mezinárodních konferencích: 4
- Články publikované na domácích konferencích: 8
- Články v indexované v databázi WoS: 2
- Články v indexované v databázi Scopus: 7
- H-index podle databáze WoS: 1
- H-index podle databáze Scopus: 1
- Počet produktů: 4

Poslední aktualizace dne 14. 8. 2014