

# 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

VZÁJEMNÁ KONVERZE OTDM A WDM SYSTÉMŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. ZOLTÁN VÉGH

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

## **VZÁJEMNÁ KONVERZE OTDM A WDM SYSTÉMŮ**

THE MUTUAL CONVERSION OF THE OTDM AND WDM SYSTEMS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. ZOLTÁN VÉGH**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. PETR MÜNSTER**

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. Zoltán Végh

**ID:** 119665

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vzájemná konverze OTDM a WDM systémů

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je rozbor optických sítí WDM, OTDM a možností jejich přímé konverze. Student v práci detailně popíše jednotlivé multiplexační techniky, provede rozbor současného stavu vzájemné konverze jednotlivých multiplexací a detailně popíše principy jejich fungování. Výsledkem práce pak bude návrh vlastního systému pro konverzi OTDM na WDM, případně WDM na OTDM.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GIRARD. A. Guide to WDM Technology. EXFO, Quebec, 2002.

[2] Mulvad, H.C.H., Palushani, E., Galili, M., Hu, H., Ji, H., Xu, J., Clausen, A.T., Jeppesen, P., Oxenlowe, L.K., "Time-domain optical Fourier transformation for OTDM-DWDM and DWDM-OTDM conversion", Information Photonics and Optical Communications (IPOC), 2011 International Conference on, On page(s): 1 - 3.

[3] Govind P. Agrawal. Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.: 2002 ISBN: 0-471-21571-6

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 28.5.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Münster

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce je rozbor optických telekomunikačních sítí WDM a OTDM a možností jejich přímé konverze. První kapitola byla věnována základům optiky. V další kapitole je popsáno optické vlákno. Konkrétně jejich typy, lineární a nelineární vlastnosti ovlivující optický přenos. Jsou zmíněny útlum, disperze, rozptyly, FWM, XPM a SPM. Následoval obecný popis multiplexových systémů používaných v optice a jednotlivé prvky používané při jednotlivých multiplexacích. Poslední kapitola byla věnována samotnému návrhu vzájemné konverze OTDM – WDM modelu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

WDM, OTDM, FWM, konverze

## **ABSTRACT**

The aim of the diploma thesis is to analyze the WDM and OTDM optical telecommunication networks and the possibility of conversion between these two multiplexing methods. In the first chapter were mentioned the basics of optical communication. The next chapter describes the optical fiber. Specifically, their types, linear and nonlinear optical characteristics which are limiting transmission e.g. attenuation, dispersion, refraction, FWM, SPM and XPM. Followed by a general description of the multiplexing systems used in optics and individual elements used in various multiplexing systems. The last chapter was devoted to the design of the OTDM – WDM conversion model.

## **KEYWORDS**

WDM, OTDM, FWM, conversion

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Vzájemná konverze OTDM a WDM systémů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

# Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Petrovi Münsterovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne.....

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

# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| Úvod   | 12        |
| <b>1 Základní termíny</b>                        | <b>13</b> |
| 1.1 Základní vztahy                              | 13        |
| 1.1.1 Index lomu                                 | 13        |
| 1.1.2 Časová perioda                             | 13        |
| 1.1.3 Vlnová délka                               | 13        |
| 1.1.4 Fermatův princip                           | 14        |
| 1.1.5 Numerická apertura                         | 14        |
| 1.1.6 Normalizovaná frekvence                    | 15        |
| <b>2 Optická vlákna</b>                          | <b>16</b> |
| 2.1 Druhy optických vláken                       | 16        |
| 2.2 Lineární parametry optického vlákna          | 18        |
| 2.2.1 Útlum optického vlákna                     | 18        |
| 2.2.2 Disperze                                   | 19        |
| 2.2.3 Lineární rozptyly                          | 23        |
| 2.3 Nelineární parametry optického vlákna        | 24        |
| 2.3.1 Nelineární rozptyly                        | 24        |
| 2.3.2 Vlastní fázová modulace                    | 28        |
| 2.3.3 Křížová fázová modulace                    | 29        |
| 2.3.4 Čtyřvlnné směšování                        | 29        |
| <b>3 Multiplexní přenosové systémy v optice</b>  | <b>32</b> |
| 3.1 Vlnový multiplex                             | 32        |
| 3.1.1 Princip WDM                                | 33        |
| 3.2 Časový multiplex                             | 36        |
| <b>4 Prvky multiplexních přenosových systémů</b> | <b>39</b> |
| 4.1 Zdroje záření                                | 39        |
| 4.2 Detektory pro optické přijímače              | 41        |
| 4.3 Optický zesilovač (OA)                       | 41        |
| 4.4 Multiplexory a demultiplexory                | 43        |
| 4.5 Optické rozbočovače a slučovače              | 45        |
| <b>5 Konverze OTDM / WDM</b>                     | <b>46</b> |
| 5.1 Konverze OTDM / WDM                          | 49        |
| 5.1.1 Větev hodinového WDM signálu               | 49        |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.1.2    | Větev datového OTDM signálu . . . . .                                    | 51        |
| 5.1.3    | Adiabatická solitonová komprese pomocí Ramanovského zesilovače . . . . . | 52        |
| 5.1.4    | Parametrická konverze OTDM / WDM . . . . .                               | 58        |
| 5.1.5    | Chybovost systémů . . . . .  | 66        |
| <b>6</b> | <b>Závěr</b>   | <b>70</b> |
|          | <b>Literatura</b>  | <b>71</b> |
|          | <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>                                  | <b>74</b> |
| <b>A</b> | <b>První příloha</b>   | <b>76</b> |
| A.1      | Optické spektra signálů při jednotlivých bodech konverze . . . . .       | 76        |
| <b>B</b> | <b>Druhá příloha</b>   | <b>81</b> |
| B.1      | Obsah přiloženého DVD . . . . .  | 81        |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Přípustné úhly dopadajícího svazku $\theta_a$ do vlákna. Paprsky z kužele jsou vedeny ve vlákne pomocí totálního odrazu. . . . .   | 14 |
| 2.1  | Geometrie typických optických vláken a jejich rozložení indexu lomu, zobrazení paprsku šířících se jednotlivými vlákny [26]. . . . .   | 17 |
| 2.2  | Útlum optického signálu v optických vláknech. . . . .  | 19 |
| 2.3  | Ilustrace vlivu disperze na rozšíření impulzů a vznik mezosymbolové interference: a) – vstupní signál, b) – signál na výstupu optického vlákna délky $l_1$ a c) – signál na výstupu optického vlákna délky $l_2 > l_1$ [27]. . . . . | 20 |
| 2.4  | Závislost materiálové disperze od vlnové délky pro čisté křemenné sklo a pro křemenné sklo dopované 13% oxidu germaničitého [5]. . . . .   | 21 |
| 2.5  | Závislost vlnovodové disperze pro $LP_{01}(\lambda = 1\mu\text{m}, \Delta = 0,001)$ od normované frekvence $V$ [5]. . . . .  | 22 |
| 2.6  | Vliv vidové disperze na šíření světelného impulzu různými druhy vláken [8]. . . . .  | 22 |
| 2.7  | Stimulovaný Brillouinův rozptyl v optickém vlákne [3]. . . . .   | 25 |
| 2.8  | Stimulovaný Ramanův rozptyl [24]. . . . .  | 27 |
| 2.9  | Stimulovaný Brillouinův rozptyl [24]. . . . .  | 27 |
| 2.10 | Stimulovaný Brillouinův rozptyl [24]. . . . .  | 28 |
| 2.11 | Vliv SPM na signální impuls – frekvence při náběhové hraně impulsu se sníží, při doběhu se naopak zvětší. . . . .  | 29 |
| 2.12 | FWM zobrazeno ve frekvenční oblasti [20]. . . . .  | 31 |
| 2.13 | Přítomnost FWM v systému WDM který byl generován v prostředí OptSim. . . . .   | 31 |
| 3.1  | Zjednodušené schéma WDM. . . . .   | 33 |
| 3.2  | Základní princip systému TDM [23]. . . . .   | 36 |
| 3.3  | Časové rámce pro sdružování a) po bitů b) po blocích [23]. . . . .   | 37 |
| 3.4  | Princip zpracování signálů a) ETDM a b) OTDM [13]. . . . .   | 38 |
| 4.1  | Struktura Fabry - Perotova laserové diody. . . . .   | 40 |
| 4.2  | Struktura DFB laserové diody. . . . .  | 40 |
| 4.3  | Princip vláknového zesilovače EDFA. . . . .  | 42 |
| 4.4  | OTDM Demultiplexor. . . . .  | 44 |
| 5.1  | Princip konverze OTDM/WDM [19]. . . . .  | 48 |
| 5.2  | Blokove zobrazení WDM větvy. . . . .   | 49 |
| 5.3  | Realizace WDM větvy v programu OptSim. . . . .   | 50 |
| 5.4  | Optické spektrum hodinového WDM toku při kanálovém odstupu 200 GHz. . . . .  | 51 |
| 5.5  | Optické spektrum hodinového WDM toku při kanálovém odstupu 400 GHz. . . . .  | 51 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.6  | Blokové zobrazení datové OTDM větvy. . . . .  | 52 |
| 5.7  | Realizace OTDM větvy v programu OptSim. . . . .   | 53 |
| 5.8  | Realizace Ramanovského kompresoru. . . . .  | 54 |
| 5.9  | Realizace Ramanovského kompresoru v prostředí OptSim. . . . .                           | 54 |
| 5.10 | Možnosti nastavení disperze a ramanovského zesílení při konfiguraci<br>vlákna. . . . .  | 55 |
| 5.11 | Optické spektrum signálu před vstupem do kompresoru. . . . .                            | 55 |
| 5.12 | Optické spektrum signálu při výkonu pumpy 1 mW. . . . .                                 | 56 |
| 5.13 | Optické spektrum signálu při výkonu pumpy 800 mW. . . . .                               | 56 |
| 5.14 | Znázornění FWM a DFWM [2]. . . . .  | 58 |
| 5.15 | Výsledná konverze OTDM na WDM. . . . .  | 61 |
| 5.16 | Blokové schéma modelu pro konverzi OTDM/WDM. . . . .                                    | 62 |
| 5.17 | Realizace konverze OTDM na WDM v programu OptSim. . . . .                               | 63 |
| 5.18 | Optické spektrum signálu na vstupu do HNLF vlákna ( $\Delta\lambda = 200$ GHz). . . . . | 64 |
| 5.19 | Optické spektrum signálu na výstupu HNLF vlákna ( $\Delta\lambda = 200$ GHz). . . . .   | 64 |
| 5.20 | Optické spektrum výsledného datového WDM signálu ( $\Delta\lambda = 200$ GHz). . . . .  | 65 |
| 5.21 | Diagram oka detekovaného signálu při kanálovém odstupu 100 GHz . . . . .                | 67 |
| 5.22 | Diagram oka detekovaného signálu při kanálovém odstupu 200 GHz . . . . .                | 68 |
| 5.23 | Diagram oka detekovaného signálu při kanálovém odstupu 400 GHz . . . . .                | 69 |
| A.1  | Optické spektrum signálu na vstupu do HNLF vlákna (odstup kanálů<br>100 GHz). . . . .   | 76 |
| A.2  | Optické spektrum signálu na vstupu do HNLF vlákna (odstup kanálů<br>200 GHz). . . . .   | 76 |
| A.3  | Optické spektrum signálu na vstupu do HNLF vlákna (odstup kanálů<br>400 GHz). . . . .   | 77 |
| A.4  | Optické spektrum signálu na výstupu HNLF vlákna (odstup kanálů<br>100 GHz). . . . .     | 77 |
| A.5  | Optické spektrum signálu na výstupu HNLF vlákna (odstup kanálů<br>200 GHz). . . . .     | 78 |
| A.6  | Optické spektrum signálu na výstupu HNLF vlákna (odstup kanálů<br>200 GHz). . . . .     | 78 |
| A.7  | Optické spektrum výsledného datového WDM signálu (odstup kanálů<br>100 GHz). . . . .    | 79 |
| A.8  | Optické spektrum výsledného datového WDM signálu (odstup kanálů<br>200 GHz). . . . .    | 79 |
| A.9  | Optické spektrum výsledného datového WDM signálu (odstup kanálů<br>400 GHz). . . . .    | 80 |

# ÚVOD

V současnosti s dynamickým rozvojem společnosti je jedním ze základních faktorů i rozvoj komunikace. Kvůli obrovským technickým pokrokům v přenosových a digitálních systémech velmi rychle narůstají nároky na přenosovou kapacitu. Tento nárůst požadavků souvisí nejen s rozvojem telekomunikačních služeb, ale především s rychle se šířícím používáním informačních technologií a s nástupem širokopásmových multimedialních služeb. Plně optické WDM a OTDM sítě se stávají základní variantou komunikačních přenosových tras. Tyto sítě nám poskytnou vysoké přenosové kapacity.

V současnosti probíhá rozsáhlý výzkum v oblasti OTDM technologie paralelně s výzkumem WDM sítí. Výrazné pokroky ve WDM technologii umožňují jejich široké uplatnění. Použití WDM technologie umožňuje mnohem lépe využít šířku přenosového pásma optického vlákna. Experimentální výsledky OTDM technologie naznačují, že sítě s OTDM budou ještě efektivněji využívat šířku přenosového pásma. Dnes bychom mohli mluvit o dvou rozdílných technologických možnostech, které si navzájem konkurují. Můžeme předpokládat, že s jejich rozvojem se budou tyto technologie vzájemně zdokonalovat. V blízké budoucnosti můžeme předpokládat, že hybridní sítě vzájemné konverze OTDM – WDM budou běžnou variantou optického přenosu.

Diplomová práce je věnována optickému přenosovému systému. Jsou probrány základní termíny v optice, optické vlákna a jejich vlastnosti. Dále jsou popsány multiplexovací systémy v optice a jejich základní prvky. V závěrečné části práce byla popsána metoda pro vzájemné konverze OTDM – WDM a byl navržen vlastní návrh konverze.

# 1 ZÁKLADNÍ TERMÍNY

Na světlo se dá nahlížet jako na částice z pohledu kvantové fyziky nebo jako na vlnění z pohledu vlnové optiky. Světlo má velmi rozsáhlé frekvenční spektrum a tím má i různou energii, která rozhoduje, zda-li má světlo blíže k částicovému nebo k vlnovému chování. Světlo je možné představit jako paprskové šíření částic – fotonů, které při svém letu ještě vykonávají kmitavý pohyb. Frekvence kmitání pro viditelné světlo je velmi vysoká (řádově v desítkách THz).

## 1.1 Základní vztahy

### 1.1.1 Index lomu

Předpokládejme, že jakékoli prostředí z hlediska optických vlastností je možné charakterizovat určitým indexem lomu  $n$  což je poměr rychlosti světla ve vakuu s rychlostí světla v materiálu. Je to bezrozměrná veličina a je větší než 1 [8].

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1.1)$$

kde  $n$  je index lomu prostředí,  $c$  je rychlost světla ve vakuu ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $v$  je fázová rychlost ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a  $v$  považujeme za rychlost v daném prostředí. Pokud ve směru osy  $z$  se šíří světelná vlna, tak její intenzita se zmenšuje dle vztahu [8]:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (1.2)$$

kde  $I$  je intenzita vlny ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $\alpha$  je koeficient absorpce,  $z$  je souřadnice místa a  $I_0$  je intenzita v bodě  $z = 0$ . Pokud výše uvedené veličiny nejsou závislé od intenzity vlny, tak můžeme říci, že optické jevy které popisujeme jsou lineární.

### 1.1.2 Časová perioda

Časová doba, za kterou hmotný bod popíše vlnovou délku [8].

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (1.3)$$

kde  $\omega$  je uhlová rychlost.

### 1.1.3 Vlnová délka

Označuje vzdálenost dvou nejbližších bodů vlnění, které kmitají ve fázi [8].

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}, \text{ nebo } \lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}. \quad (1.4)$$

### 1.1.4 Fermatův princip

Světlo se v prostoru šíří z jednoho bodu do druhého po takové dráze, aby doba potřebná k proběhnutí této dráhy nabývala minimální hodnotu [8].

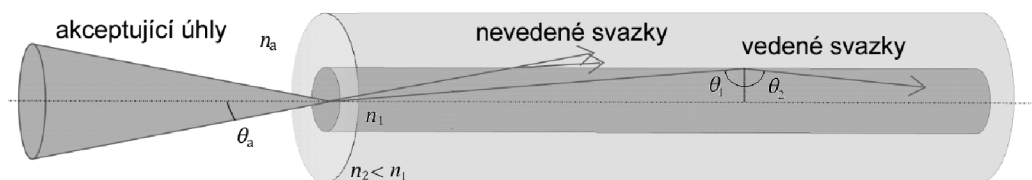
$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2), \quad (1.5)$$

kde  $n_1$  je index lomu jádra,  $n_2$  je index lomu pláště,  $\theta_1$  je úhel dopadu a  $\theta_2$  je úhel odrazu.

### 1.1.5 Numerická apertura

Numerická apertura ( $NA$ ) vyjadřuje účinnou světelnost optického vlákna, respektive určuje úhel  $\theta_a$  pod kterým je možné do vlákna navázat vedené módy (paprsky). Čím větší numerická apertura je, tím více světla z bodového zdroje lze do vlákna soustředit a přenést. Je tedy žádoucí, aby rozdíl indexů lomu mezi optickým jádrem a obalem byl co největší. Je to bezrozměrné číslo, které lze vyjádřit matematickým zápisem [8]:

$$NA = n_a \cdot \sin(\theta_a). \quad (1.6)$$



Obr. 1.1: Přípustné úhly dopadajícího svazku  $\theta_a$  do vlákna. Paprsky z kužele jsou vedeny ve vlákne pomocí totálního odrazu.

Lze ukázat, že numerická apertura závisí na indexu lomu jádra a pláště. Pokud  $n_a$  je vzduch  $n_a = 1$  potom platí [5]:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (1.7)$$

Lze vypočítat i z měření:

$$NA = \sqrt{\frac{P_{in}}{P_{out}}}. \quad (1.8)$$

### 1.1.6 Normalizovaná frekvence

Určuje počet vedených módů ve vlákně. Lze určit s pomocí numerické apertury následovně [8]:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot NA, \quad (1.9)$$

kde  $a$  je průměr jádra vlákna. Tato frekvence určuje zda-li je vlákno jednovidové nebo více vidové. Pro jednovidové vlákna platí  $V = 2,405$ .

## 2 OPTICKÁ VLÁKNA

Technologii optických vláken charakterizuje využití světla pro přenos dat po skleněných nebo plastových vláknech. Optický kabel se skládá z jednoho nebo více vláken, přičemž každé z nich je schopno přenášet informaci modulovanou do podoby světelných vln. Vlákenná optika má v porovnání s tradičním metalickým vedením celou řadu výhod. Možné je mezi ně zařadit zejména větší šířku pásma, což představuje možnost přenášet větší množství dat. Signál putující po optických vláknech je také podstatně méně náchylný na rušení, vlákna jsou mnohem tenčí a lehčí než klasické dráty. Telekomunikační společnosti již intenzivně nahrazují tradiční telefonní linky optickými kabely. Je více než pravděpodobné, že v budoucnu bude veškerá komunikace probíhat po optických sítích.

### 2.1 Druhy optických vláken

Optické vlákno je dielektrická struktura (vlnovod) většinou válcové symetrie jejíž podélný rozměr je mnohanásobně větší než příčný, složená z optického jádra o vyšším indexu lomu a optického obalu o nižším indexu lomu, která přenáší světlo ve směru své podélné osy.

Pokud je průměr jádra vlákna srovnatelný s vlnovou délkou přenášeného optického záření, jedná se o jedno (mono) vidové vlákno. Pokud průměr jádra vlákna je řádově 10 až 100 násobek vlnové délky přenášeného optického záření, jde o mnohavidové vlákno.

Důležitým parametrem optických vláken je jejich index lomu, jako z hlediska velikosti, tak z hlediska charakteru jeho změny v radiálním směru. Největší rozlišení mají vlákna se skokovou změnou indexu lomu v případě mnohavidových vláken. Pro tvarování disperzních charakteristik jednovidových vláken se však používají i vlákna s jiným profilem indexu lomu, např. tříúhelníkovým nebo profilem ve tvaru W. Základní typy vláken jsou znázorněny na obr. 2.1.

Profil indexu lomu optických vláken kruhového průřezu je zpravidla válcově symetrický (nezávislý od  $\varphi$  a  $z$ ), přičemž platí [5]:

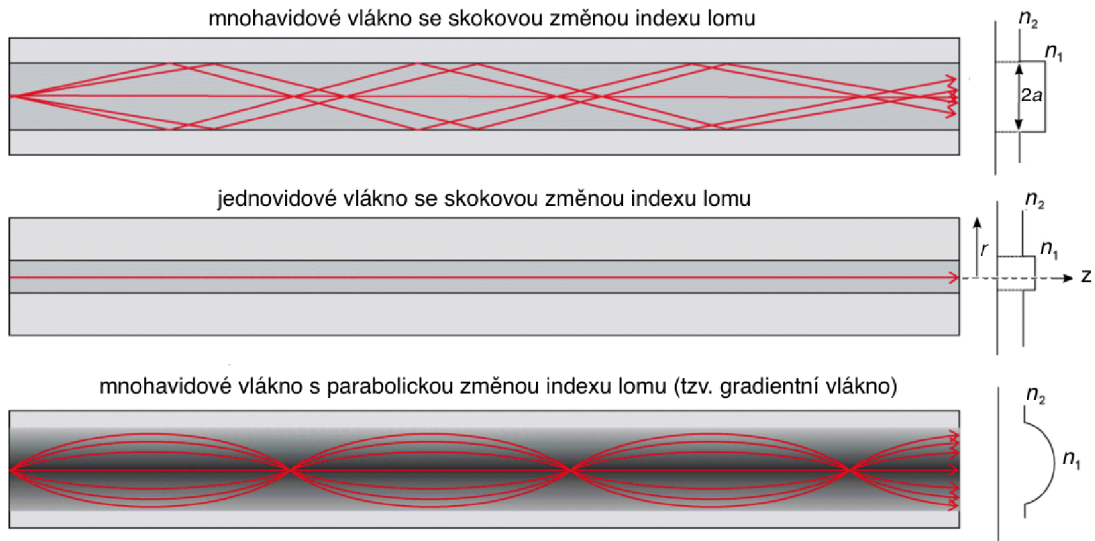
$$n^2(r) = n_1^2(0)[1 - 2\Delta g(r/a)] \text{ ak } r < a, \quad (2.1)$$

$$n^2(r) = n_1^2(0)[1 - 2\Delta] = n_2^2 \text{ ak } r \geq a, \quad (2.2)$$

kde

$$\Delta = \frac{n_1^2(0) - n_2^2}{2n_1^2(0)} = \frac{n_1(0) - n_2}{n_1(0)}. \quad (2.3)$$





Obr. 2.1: Geometrie typických optických vláken a jejich rozložení indexu lomu, zobrazení paprsku šířících se jednotlivými vlákny [26].

Obyčejně aproximativně se píše ve tvaru [5]:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (2.4)$$

kde  $g(r/a)$  je funkce, charakterizující profil indexu lomu jádra optického vlákna,  $a = r$  je poloměr hranice jádro – plášť. Tak platí  $n(r) = n_1(r)$  pro  $r < a$  a  $n(r) = n_2(r) = n_2$  pro  $r \geq a$ . Nejdůležitější třídou funkcí charakterizujících profil vlákna  $g(r/a)$  je třída  $\alpha$  profilů, pro které platí [5]:

$$g(r/a) = (r/a)^\alpha, 0 \leq \alpha \leq \infty. \quad (2.5)$$

Pro  $\alpha \rightarrow \infty$  se dostane již zmíněný profil se skokovou změnou indexu lomu [5].

Mnohavidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu patří k nejstarším typům vláken. Jádro má průměr 50 až 100 násobek vlnové délky optického záření. Optické záření se šíří vláknem v důsledku totálních odrazů na hranici jádro plášť. Pro úhel dopadu paprsků musí platit

$$\theta < \arccos \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.6)$$

jinak paprsky z jádra vystupují [5].

Vlákna, ve kterých se index lomu s poloměrem jádra mění spojitě se nazývají gradientní vlákna (mnohavidové vlákno s parabolickou změnou indexu lomu). U vláken třídy  $\alpha$  se exponent může volit z různých hledisk, obvykle je to požadavek minimální vidové disperze, kdy  $\alpha = 2$ . V jednovidových vláknech se používají různé hodnoty exponentu indexu lomu, čímž se ovlivňuje průběh disperze v závislosti na vlnové

délky. Když  $\alpha = 2$  jde o parabolickou změnu indexu lomu. Je znázorněno na obr. 2.1. Rozměry vlákna jsou srovnatelné s mnohavidovým vláknem se skokovou změnou indexu lomu. Parabolická, nebo obecněji, gradientní změna indexu lomu způsobuje, že ve vlákně nedochází k odrazům, ale k zakřivení paprsků optického záření. Vláknem se projevuje "samoostřícím" efektem, který spočívá v tom, že paprsky, které jsou více vybočené se šíří větší rychlostí, protože procházejí určitou část dráhy prostředím s menší hodnotou indexu lomu jako paprsky, které se šíří blízko osy vlákna. Šíření optického záření v mnohavidových vláknech lze popsat metody geometrické optiky.

Na obr. 2.1 je znázorněno jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, s průměrem jádra vlákna srovnatelným s vlnovou délkou optického záření. Přenosové vlastnosti těchto vláken vysoce převyšují možnosti mnohavidových vláken. Pokud normovaná frekvence  $V \geq 2,405$ , pak jde o vlákna jednovidová.

Tab. 2.1: Parametry jednovidových vláken na základě doporučení ITU – T G.652 [5].

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Vnější průměr           | 125 $\mu\text{m}$ ( $\pm 2,4\%$ max)  |
| Průměr vidového pole    | 9–10 $\mu\text{m}$ $\pm 10\%$ nominální hodnoty   |
| Hraniční vlnová délka   | 1100–1280 nm  |
| Test na ohyb na 1550 nm | $\leq 1$ dB krajní strany pro 100 závitů průměru 7,5 cm   |
| Disperze                | $\leq 3,5$ ps/nm·km mezi 1285 a 1330 nm<br>$\leq 6$ ps/nm·km mezi 1270 a 1340 nm<br>$\leq 20$ ps/nm·km na 1550 nm |

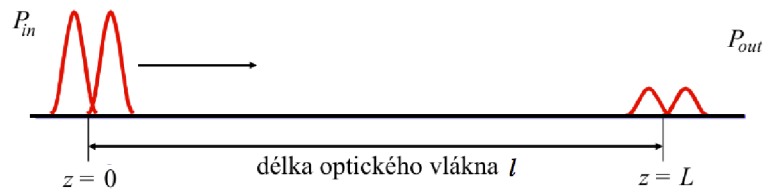
## 2.2 Lineární parametry optického vlákna

Lineární parametry optického vlákna je možno spočítat při návrhu optické trasy, kdy jsou přesně známy jaké budou kladeny nároky na výslednou optickou trasu (délka optické trasy, typ optického vedení, atd.).

### 2.2.1 Útlum optického vlákna

Útlum optického vlákna je definován jako logaritmické vyjádření podílu navázaného výkonu do optického vlákna  $P_{in}$  ku výkonu  $P_{out}$  vystupujícího z vlákna na konci trasy. Hodnota útlumu u křemenných vláken se řádově pohybuje v desetinách decibelu na kilometr. Plastová vlákna mají útlum přibližně 50–100 dB/km [8].

$$A = 10 \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad [\text{dB}]. \quad (2.7)$$



Obr. 2.2: Útlum optického signálu v optických vláknech.

Je možno použít pro výpočet měrného útlumu optického vlákna vztaheného na délku vlákna  $l$  následující vzorec [17]:

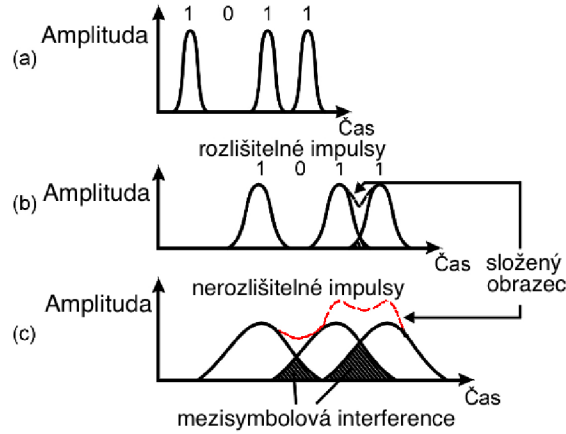
$$a = \frac{A}{l} = \frac{10}{l} \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad [\text{dB/km}]. \quad (2.8)$$

Tab. 2.2: Měrný útlum různých materiálů [5].

| Materiál       | Měrný útlum [dB/km] |
|----------------|---------------------|
| Okenní sklo    | 50 000              |
| Hustá mlha     | 500                 |
| Atmosféra      | 10                  |
| Optické vlákno | 0,3                 |

### 2.2.2 Disperze

Disperzní jevy rozprostírají energii v čase a mění její geometrii v závislosti na délce optického vlákna. Je hlavním limitujícím faktorem přenosové rychlosti. Čím je hodnota disperze větší, tím menší přenosová rychlost se může pro přenos použít. Při číslicovém přenosu způsobuje disperze rozšíření impulsů, které vedou k mezisymbolové interferenci, čímž se zvyšuje chybovost přenosu [8][5].



Obr. 2.3: Ilustrace vlivu disperze na rozšíření impulsů a vznik mezisymbolové interference: a) – vstupní signál, b) – signál na výstupu optického vlákna délky  $l_1$  a c) – signál na výstupu optického vlákna délky  $l_2 > l_1$  [27].

Disperzní efekty v jednovidových vláknech vyplývají z frekvenční závislosti fázové konstanty šíření  $\beta(\omega)$ . Jak vidět ze vztahů [5]:

$$U = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad a \quad V = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}. \quad (2.9)$$

Rozšiřování optických impulsů při přenosu optickým vláknem je způsobené pěti nezávislými mechanismy.

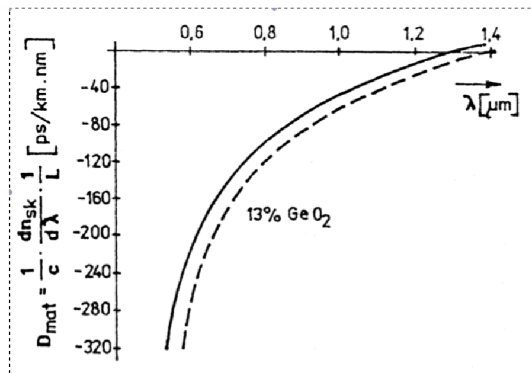
Materiálová disperze, která je zapříčiněna tím, že index lomu použitého materiálu k výrobě vlákna je závislý od vlnové délky optického záření. Tento efekt se charakterizuje druhou derivací indexu lomu  $n$  podle frekvence  $\omega$  nebo disperzním koeficientem  $D(\lambda)$ , který je definován podle následujícího vzorce [5]:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2}, \quad (2.10)$$

$D(\lambda)$  se vyjadřuje v ps/km·nm. Například  $D(\lambda) = 20$  ps/km·nm znamená, že optický impuls, který má spektrální šířku 1 nm, se na každém kilometru rozšíří o 20 ps.

Vhodně zvoleným materiálem lze do určité míry tyto vlastnosti přizpůsobit našim potřebám. Na obrázku 2.4 je znázorněna závislost materiálové disperze na vlnové délce pro čisté křemenné sklo a pro křemenné sklo dopováno 13% oxidu germaničitého. Lze vidět, že materiálová disperze je nulová okolo vlnové délky 1300 nm [5].

**Vlnoidová disperze**, která je způsobena tím, že přenosová funkce jednotlivých vidů je závislá na vlnové délce optického záření jinak řečeno v důsledku změny tvaru vidu s vlnovou délkou. Pokud se ve vlákne šíří jenom jeden vid, při přenosu signálů s konečnou šířkou spektra má na zkreslení signálu velký podíl nelineární závislost



Obr. 2.4: Závislost materiálové disperze od vlnové délky pro čisté křemenné sklo a pro křemenné sklo dopováno 13% oxidu germaničitého [5].

fázové konstanty  $\beta$  od kmitočtu přenášeného signálu. Takové podmínky šíření lze dosáhnout dodržáním podmínky z hlediska poměrného indexu lomu  $\Delta$ , poloměru jádra vlákna  $a$  a provozní vlnové délky  $\lambda$ . Pokud chceme, aby se vlákno projevovalo jako jednovidové na vlnové délce 1300 nm, pak pro index lomu jádra vlákna rovný 1,46 a  $\Delta = 0,002$  musí být průměr jádra menší než [5]:

$$2a = \frac{2,405\lambda}{\pi(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}} \cong 5 \mu\text{m}. \quad (2.11)$$

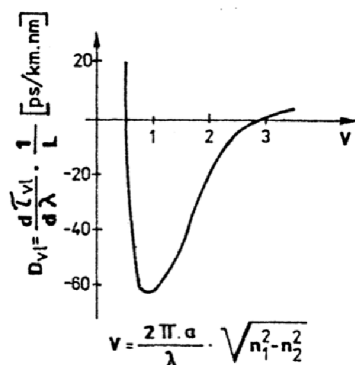
Vlnoidová disperze je závislá na profilu indexu lomu optického jednovidového vlákna. Frekvenční závislost vlnovodové disperze má dvě následující příčiny [5]:

- indexy lomu různých typů optických skel, které se používají pro vytvoření profilu indexu lomu jádra vlákna a pláště nezávisí od  $\omega$  stejným způsobem,
- na základě  $U = a\sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}$  a  $V = a\sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}$  lze ukázat, že radiální změna amplitudy módu je také vlnově závislá. Pro jednovidové vlákno platí, že koncentrace energie v jádru vlákna závisí na tom, v jaké vzdálenosti od hraniční vlnové délky se pracuje. Tato vlastnost se využívá například pro posunutí vlnové délky s nulovou disperzí do okolí 1550 nm. Může se to dosáhnout použitím vlákna se skokovou indexu lomu s vysokým poměrným indexem lomu jádra a pláště optického vlákna.

Vlnoidová disperze vzniká v důsledku závislosti přenosové charakteristiky vidu na vlnové délce optického záření. Počítá a vyjadřuje se pro jednovidové vlákna. Příklad vlnové disperze pro vid  $LP_{01}(\lambda = 1 \mu\text{m}, \Delta = 0,001)$  v závislosti na normované frekvence  $V$  je znázorněn na obrázku 2.5.

Z grafu vidět, že pro vlnovou délku  $\lambda = 1 \mu\text{m}$ , pro  $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$  a  $V = 2$  hodnota vlnové disperze je  $\frac{\partial\tau_v}{L} = -20 \cdot 10^{-12} \text{ s}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ .

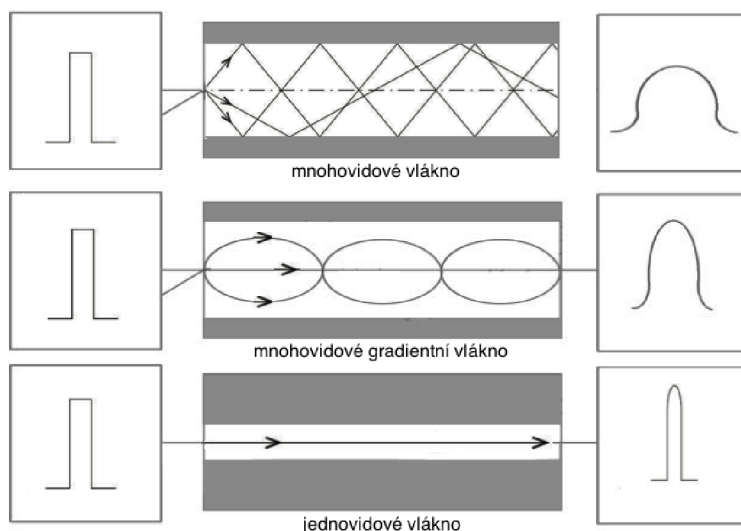
Pro šířku pásma  $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$  je celková hodnota vlnoidové disperze  $\frac{\partial\tau_v}{L} = -0,2 \text{ ns/km}$ . Materiálová a vlnoidová disperze se mohou při vhodně zvolené



Obr. 2.5: Závislost vlnoidové disperze pro  $LP_{01}$  ( $\lambda = 1\mu\text{m}$ ,  $\Delta = 0,001$ ) od normované frekvence  $V$  [5].

vlnové délce a profilu indexu lomu vzájemně kompenzovat [5].

**Vidová disperze**, která je způsobena tím, že přenosové charakteristiky jednotlivých vidů v mnohovidovém vlákne sú navzájem odlišné. Na konci vedení dojde k rozšíření v čase a zmenšení amplitudy, ale nedojde ke ztrátě energii.



Obr. 2.6: Vliv vidové disperze na šíření světelného impulzu různými druhy vláken [8].

Polarizační vidová disperze PMD (Polarization Mode Dispersion), která je způsoben tím, že základní vid jednovidového vlákna se skládá ze dvou ortogonálně polarizovaných vidů, které v případě anizotropie nebo důsledku kruhové nesymetrie v optickém vlákne nemají stejné fázové konstanty šíření. Je závislá například na teplotě okolí, tlaku, vlhkosti a na dalších vlivech a parametrech prostředí. Koeficient

PMD je definován pro krátké vzdálenosti do 10 km [5]:

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l} \quad [\text{ps} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (2.12)$$

kde  $l$  je délka trasy a  $\Delta\tau$  je zpoždění signálu. Pro dlouhé vzdálenosti nad 10 km platí[5]:

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} \quad [\text{ps} \cdot \text{km}^{-1}]. \quad (2.13)$$

Chromatická disperze je způsobena tím, že jednotlivé vlnové délky se šíří vláknem odlišnou rychlostí a závisí na šířce spektra vyzářeného ze zdroje. Impuls šířící se vláknem v důsledku disperze časově rozšíří a na konci vlákna se jednotlivé impulzy začínají slévat, vzniká mezisymbolová interference (viz obr.2.3). Chromatická disperze je dána součtem materiálové a vlnoidové disperze [5]. Velikost chromatické disperze optického vlákna definuje koeficient chromatické disperze  $D(\lambda)$  [5]:

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad \left[ \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \right]. \quad (2.14)$$

V jednovidových vláknech se musí uvažovat materiálová disperze, vlnoidové a polarizační disperze. V mnohavidových vláknech se musí uvažovat s materiálovou a vidovou disperzí.

### 2.2.3 Lineární rozptyly

Ztráty lineárním rozptylem jsou způsobovány lineárním přenosem části nebo celého optického výkonu jednoho vysílaného vidu do vidu nového. Lineární rozptyly se dělí na dvě skupiny:

- Rayleighovy rozptyly,
- Mieho rozptyly.

Mají-li nehomogenity a drobné nečistoty oproti vlnové délce malé rozměry, dochází k tepelným kmitům krystalické mřížky a vznikající rozptylové ztráty označovány jako Rayleighovy rozptyly. Charakteristickou vlastností těchto ztrát je všesměrovost a rychlý nárůst směrem k ultrafialové oblasti. Rayleighův rozptyl nelze úplně odstranit, pouze potlačit posunem pracovní frekvence k infračervené oblasti. V praxi je využíván při měřeních metodou OTDR (Optical Time Domain Reflectometry). Jsou-li nehomogenity srovnatelné s vlnovou délkou, vznikající rozptylové ztráty jsou označovány jako Mieho rozptyly. Vznikají v důsledku nedokonalosti při výrobě vláken, jako je porušení geometrie, porušení tvaru, kolísání průměru jádra a další. Rozptyl se významně zvyšuje, pokud geometrické nepravidelnosti překročí desetinu vlnové délky. Lze eliminovat zdokonalením výrobního procesu vlákna [8][13].

## 2.3 Nelineární parametry optického vlákna

Pokud se ve vlákne přenáší velký optický výkon (už jednotky mW vzhledem k mikroskopickým rozměrům vlákna), nelze vlákno považovat za lineární prostředí. Index lomu jádra vlákna je v tomto případě závislý nejen na vlnové délce záření, ale i na intenzitě záření šířícího se vlákem. Index lomu jádra vlákna je popsán rovnicí [5]:

$$n = n_0 + n_2 \cdot \frac{P}{A_{eff}} = n_0 + n_2 \cdot I, \quad (2.15)$$

kde  $n_0$  je lineární index lomu jádra vlákna,  $n_2$  je koeficient nelineárního indexu lomu jádra vlákna,  $P$  je optický výkon ve vlákne,  $A_{eff}$  je efektivní průřez jádra vlákna,  $I$  je intenzita.

Je vidět, že nelineární přírůstek indexu lomu lze minimalizovat snížením optického výkonu navázaného do vlnovodu a zvětšením průřezu jeho jádra. Nelineární jevy se tedy objevují při zvyšování výkonu a v prostředí, kde energie záření je soustředěna do malého průřezu. Jejich vliv na optický přenos vyústí do nežádoucích změn přenášeného užitečného optického signálu a zvýšení chybovosti (BER). Typický příklad prostředí, kde se uplatňuje vliv nelineární, je WDM systém. V něm se šíří několik kanálů, každý o výkonu několik mW, v jádru vlákna o průměru přibližně  $9 \mu\text{m}$ . Celkový optický výkon všech kanálů snadno může přesáhnout prahovou hodnotu výkonu, při kterém vznikne ve vlákne některý z nelineárních jevů.

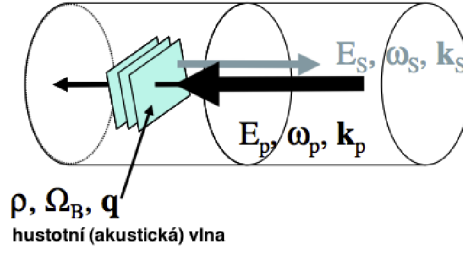
### 2.3.1 Nelineární rozptyly

Rozptyl světla v optických vláknech je přítomen vždy, bez ohledu na optický výkon ve vlákne. Můžeme to rozdělit do dvou režimů: spontánní a stimulovaný rozptyl. Spontánní rozptyl světla se vztahuje na proces rozptylu za takových podmínek, že optické vlastnosti materialu nejsou ovlivněny současným stavem elektrického pole. V případě dopadu paprsků s dostatečnou intenzitou spontánní rozptyl světla může být intenzivnější. Vlastnosti rozptylu v tomto režimu procesu výrazně mení optické vlastnosti materiálu a naopak.

Spontánné a stimulované rozptyly můžou být výsledkem Ramanovho a Brillouinova rozptylu. Ramanův rozptyl vychází z interakce světla s vibračními stavy molekul v rozptylujícím mediu (rozptyl světla z optických fotonů). Brillouinův rozptyl vyplývá z interakce světla s šířícími se vlnami hustoty, nebo akustickými fotony. Tyto procesy rozptylu jsou vždy přítomen v optickém vlnovodu, protože každé optické vlákno má mikroskopické chyby, nebo fluktuace teploty, které způsobují tyto tři procesy. Ze tří typů rozptylu Brillouinův rozptyl SBS (Stimulated Brillouin Scattering) je považován za dominantní nelinearitu optického vlákna.[3]

$\omega_{p,S}$  – optické frekvence,





Obr. 2.7: Stimulovaný Brillouinův rozptyl v optickém vlákně [3].

$\vec{k}_{p,S}$  – vlnové vektory vstupující vlny a vlny Stokesovým posuvom,  
 $\Omega_B$  – Brillouinůva frekvence,  
 $\vec{q}$  – vlnový vektor akustického pola,  
 $E_{p,S}$  – intenzity elektrických polí vstupující a Stokesové vlny.

Když vstupný výkon bude dostatečně vysoký, SBS se přemění světlo vstupující na rozptýlené, a způsobí Stokesův posun. Na obr.2.7 je znázorněna jev, který vyplývá z interakce mezi optickým polem a akustickými fotony ve vlákně, která se uskuteční prostřednictvím elektrostrikce. Rozptýlené optické pole vzájemně působí se vstupující optické pole s dostatečnou intenzitou, což způsobí změnu hustoty a tlaku (elektrostrikce). Vstupující optické pole se rozptýlí na změnách indexu lomu, které vznikly jako důsledek změn hustoty. Rozptýlené světlo poukazuje Stokesův posuv a interferuje se Stokesovým zářením způsobující akustické poruchy. Vstupující světlo může přidat energii akustickým vlnám, protože interferuje s rozptýleným Stokesovým světlem a tak výrazně zvyšuje pravděpodobnost rozptylu dopadajícího světla kvůli Braggově difrakce. Vzhledem k tomu, že energie a hybnost během rozptylu zachovává, frekvence a vlnové vektory vstupující vlny, rozptýlené a akustické jsou vyjádřeny vztahem [3]:

$$\Omega_B = \omega_p - \omega_s, \vec{q} = \vec{k}_p - \vec{k}_s, \quad (2.16)$$

kde  $\omega_{p,S}$  jsou optické frekvence,  $\vec{k}_{p,S}$  jsou vlnové vektory vstupující vlny a vlny Stokesovým posuvom a  $\Omega_B$  je Brillouinůva frekvence. Brillouinova frekvence  $\Omega_B$  a vlnový vektor akustického pole  $\vec{q}$ , navzájem souvisejí prostřednictvím fotonových disperzních vztahů [3]:

$$\Omega_B = |\vec{q}|v_A \approx 2v_A|\vec{k}_p| \sin \frac{\Theta}{2}, \quad (2.17)$$

kde  $v_A$  je rychlost zvuku v prostředí a  $\Theta$  je úhel mezi vstupující vlnou a Stokesův poli. Předchozí popis interakce mezi dvěma poli může být vyjádřen jako soubor rovnic vázaných vln, které mají v stacionárním stavu tvar [3]:

$$\frac{dA_p}{dz} = -\frac{i\gamma_e\omega}{2\rho_Onc}\rho A_S - \alpha A_p, \quad \frac{dA_S}{dz} = -\frac{i\gamma_e\omega}{2\rho_Onc}\rho^* A_p + \alpha A_S. \quad (2.18)$$

kde amplituda hustotné akustické vlny  $\rho(z, t)$ , je aproximován jako [3]:

$$\rho(z, t) = \frac{\gamma_e q^2}{4\pi} \frac{A_p A_S^*}{\Omega_B^2 - \Omega^2 - i\Omega\Gamma_B}, \quad (2.19)$$

kde  $A_{p,S}$  je amplitúdy elektrických polí vstupující a Stokesové vlny,  $\Gamma_B$  je doba životu fotónu,  $\rho_O$  je hustota materiálu,  $\gamma_e$  je elektrostriční vazební koeficient prostředí a je vyjádřen jako  $\gamma_e = \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial p}$  kde  $\epsilon$  je permitivita materiálu. Po úpravách vztahů 2.18 a 2.22 můžeme definovat komplexní koeficient Brillouinůvho zisku [3]:

$$g(\Omega) = \frac{g_B}{(\Omega_B^2 - \Omega^2) + i\Omega\Gamma_B}. \quad (2.20)$$

Maximální hodnota je definován jako [3]:

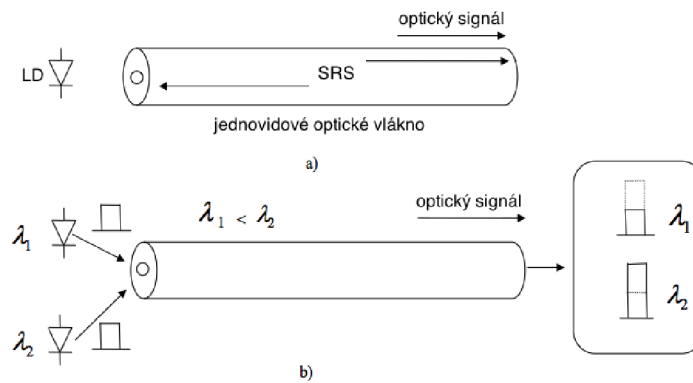
$$g_B(\Omega = \Omega_B) = \frac{\gamma_e^2 \omega^2}{2n\rho_O C^3 n \Gamma_B}. \quad (2.21)$$

Brillouinův zisk je významným parametrem, protože mnoha omezení stimulovaného Brillouinůvho rozptylu (SBS) je možné posouzet z jeho hodnot. Pomocí tohoto parametru je možné stanovit kritický výkon SBS, fázový posuv vstupujícího optického signálu indukovaný SBS a charakterizovat spektrum Brillouinůvho zisku.

Nelineární jevy v optických vláknech mohou být také využívány pro širokou škálu systémů. Úzkopásmové spektrum Brillouinůvho zisku  $g(\Omega)$  (Brillouin gain spectrum – BGS) a vysoký nelineární Brillouinův koeficient může učinit SBS ve vláknech pro konverze vlnové délky, kmítočtovou selektivitu, utlumit nebo zesilovat vlnu. Vliv teploty a napětí na maximální hodnotu zisku a Brillouinůvho frekvenčního posuvu je ideálním vlastnostem pro distribuované vláknové senzory.

## Stimulovaný Ramanův rozptyl

Stimulovaný Ramanův rozptyl (SRS) vzniká v důsledku vzájemné interakce světla s molekulovými kmity. Ve skutečnosti je to modulace způsobená vlivem molekulových kmitů. U stimulovaného Ramanovho rozptylu je možnost vzniku postranních pásem. Při frekvenčním posunutí vznikají světelné signály, které nazýváme anti – Stokesove a Stokesove světlo. Rozptýlená světelná vlna se šíří oběma směry. V případě, že se mluví o jednokanálovém přenosu, stimulovaný Ramanův rozptyl vzniká v obou směrech. Na činnost zdroje světla (LD – Laserová dioda) negativně působí zpětný signál. Když se jedná o vícekanálový přenos, tak mezi jednotlivými kanály existují přeslechy. Pokud máme malé frekvence (na velkých vlnových délkách), tak světlo je zesilován, ale už při velkých frekvencích (na malých vlnových délkách) je světlo zeslabován [24].

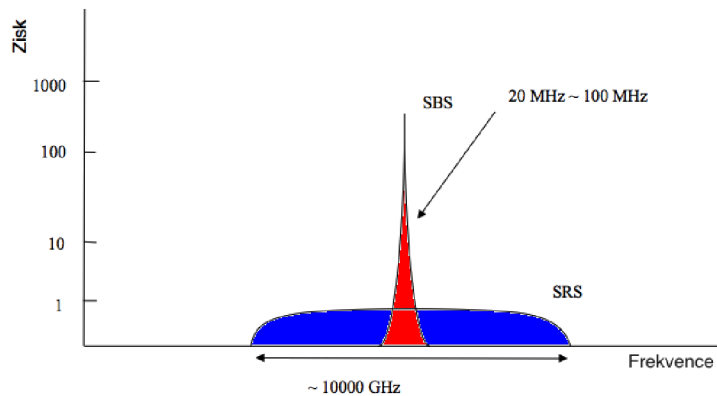


Obr. 2.8: Stimulovaný Ramanův rozptyl [24].

### Stimulovaný Brillouinův rozptyl

Vzniká v důsledku interakce světla a akustických vibrací v optickém vlákně. Rozptýlená vlna je spektrálně přesunutá o cca 10 GHz [24][8].

- Brillouinův zisk je přibližně o 2 řády větší než Ramanův zisk.
- Brillouinův frekvenční posuv a šířka pásma zisku jsou mnohem menší, než v případě Ramanůvho rozptylu.



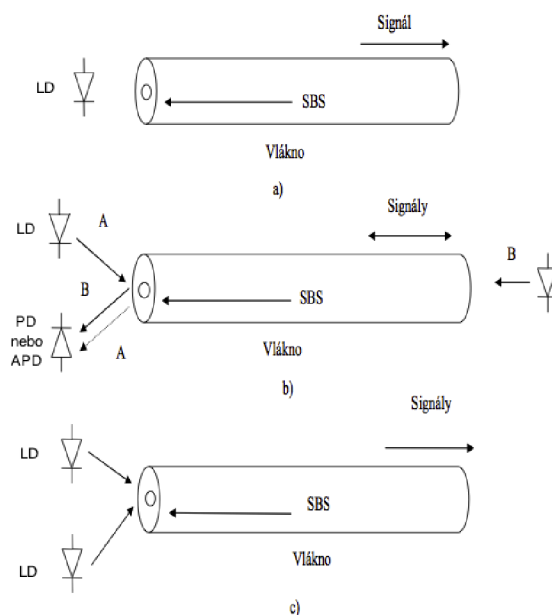
Obr. 2.9: Stimulovaný Brillouinův rozptyl [24].

Kritický výkon je dán vzhledem [24]:

$$P_C = 16A_{eff}/g \cdot s \cdot L_e = 16A_e \cdot \alpha/g \cdot s[1 - \exp(-\alpha \cdot L)], \quad (2.22)$$

kde  $g$  je Ramanův zisk,  $s$  je polarizační stav,  $L_e$  je efektivní délka optického vlákna,  $L$  je délka optického vlákna a  $A_{eff}$  je efektivní plocha. Je vyjádřen jako výkon, při kterém výkon Stokesůvho záření je rovný vstupujícímu výkonu [24]. Při jednonálovém přenosu v případě velkého SBS, vstupní výkon se blíží ke kritickému

výkonu  $P_C$ . Pomocí optického izolatorů je možné potlačit optický signál ve spětném směru. Maximální výkon navázaný do systému může být způsoben přeslechly v případě obousměrného přenosu, jako je na obr.2.10. Při vícekanálovém přenosu na obr.2.10 přenosový kanál působí s vláknem nezávisle již při užší šířky pásma  $\Delta f_B$  a při menším frekvenčním posuvu. V tomto přenosu při zpětném směru můžeme pozorovat několik rozptylů. Kritický výkon  $P_C$  je závislý od modulační schémy, ale není závislý na počtu kanálů.

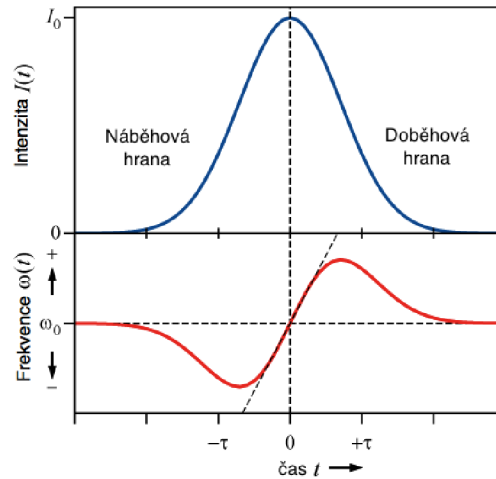


Obr. 2.10: Stimulovaný Brillouinův rozptyl [24].

### 2.3.2 Vlastní fázová modulace

Při dostatečně vysokého optického výkonu ve vláknech začne projevovat tzv. Kerrův efekt. Jeho vlivem index lomu jádra vlákna se stává závislým od intenzity záření šířícího se ve vlákně. Kolísání intenzity optického záření mění index lomu skla, a způsobuje modulaci okamžité fáze šířící se optické vlny. Tento jev se nazývá vlastní fázová modulace SPM (Self – Phase Modulation). Protože frekvence je definována jako derivace fáze podle času, s měnící se fází signálu se bude měnit i jeho okamžitá frekvence a objeví se tzv. frekvenční chirping. Projeví se tím že optická frekvence spektrálních komponent impulsu na náběhové hraně se sníží (jejich vlnová délka se zvětší) a na doběhové straně impulsu se frekvence spektrálních komponent impulsu zvětší.

Frekvence generované SPM rozšiřují spektrum impulsu, v časové oblasti je impuls nezměněn, avšak v každém reálném přenosovém médiu se projeví vliv chromatické disperze. V oblastech s normální disperzí mají signály s větší vlnovou délkou větší



Obr. 2.11: Vliv SPM na signální impuls – frekvence při náběhové hraně impulsu se sníží, při doběhu se naopak zvětší.

rychlost šíření jako signály na kratších vlnových délkách, proto se náběhová hrana impulsu bude šířit rychleji než doběhová. Výsledný efekt na přenesený impuls je jeho rozšíření v čase. Působení SPM se dá minimalizovat udržením výkonu na hodnotách, které nezpůsobují nelineární změnu indexu lomu.

### 2.3.3 Křížová fázová modulace

Pokud ve vlákne se přenášejí najednou dva nebo více kanálů na různých vlnových délkách, fáze jejich signálů jsou ovlivněny SPM, a zároveň i křížovou fázovou modulací XPM (Cross Phase Modulation). Kolísání výkonu v jednom konkrétním kanále zapříčiňuje změny indexu lomu, které ovlivňují nejen tento, ale i ostatní společně se šířící kanály. Tyto změny modulují fázi světelné vlny ostatních kanálů, navíc se projevuje efekt SPM v konkrétním kanále. Okamžitá fáze kanálu se mění s každým přenášeným bitem, velikost modulace fáze závisí na zbývajících sousedních kanálech. V nejpříznivějším případě by přenášeli všechny zbývajících kanály soubežně bit "1", čili celkový přenášený výkon by byl maximální. Tehdy je změna fáze vyvolána XPM největší. Efekt křížové fázové modulace roste s počtem kanálů a hustším rozmístěním ve spektru.

### 2.3.4 Čtyřvlnné směšování

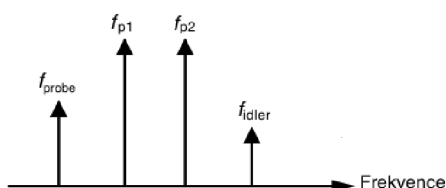
Čtyřvlnné směšování FWM (Four Wave Mixing) se objevuje pouze ve WDM systémech, kde jeho přítomnost způsobuje značné problémy. V případě, že je do vlákna navázaných několik vlnových délek s vyšším optickým výkonem, na výstupu vlákna

se objeví kromě očekávaných vlnových délek i nové signály na jiných vlnových délkách. Tyto nové signály vznikají vzájemnou interakcí kanálů nesoucích užitečný signál. Pokud se šíří signály na frekvencích  $f_{p1}$ ,  $f_{p2}$  a  $f_{probe}$ , vytvoří se vlivem FWM nová vlna na frekvenci  $f_{idler}$ , pro kterou platí [20]:

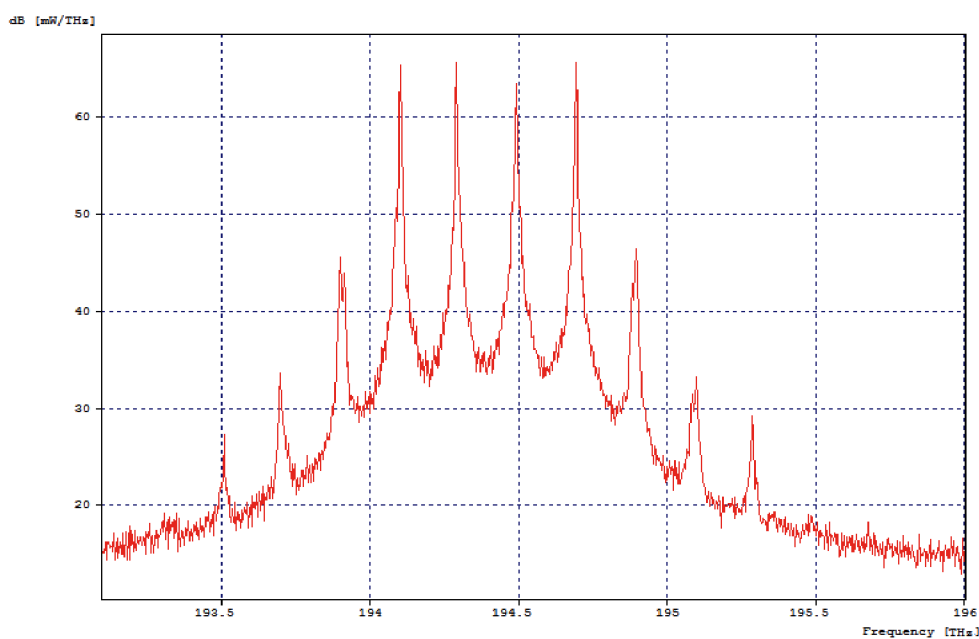
$$f_{idler} = f_{p1} + f_{p2} - f_{probe}. \quad (2.23)$$

Nově vzniklé kanály mohou navíc s užitečnými interferovat (vznikají přeslechy) a tím snižovat kvalitu přenosu. Se vznikem nových frekvencí se zvyšuje tlumení užitečných kanálů, protože ty předávají energii ve prospěch nových kanálů.

Navíc, odfiltrovat lze jen ty nově vzniklé kanály, které nespádají do oblastí vlnových délek, na kterých se šíří původní kanály. Předcházet FWM se dá vhodným rozmístěním kanálů. Používají se nestejně rozestupy kanálů, aby vytvořené nežádoucí vlnové délky nespádaly do oblasti užitečných nosných vlnových délek a tím nesnižovaly kvalitu přenosu. Přítomnost chromatické disperze v optickém vlákně snižuje vliv FWM. Účinnost směšování je inverzně závislá na koeficientu disperze, to znamená, že nežádoucí účinek čtyřvlnné směšování se projeví nejvíce na vlnových délkách s nulovou disperzí.



Obr. 2.12: FWM zobrazeno ve frekvenční oblasti [20].



Obr. 2.13: Přítomnost FWM v systému WDM který byl generován v prostředí Opt-Sim.

## 3 MULTIPLEXNÍ PŘENOSOVÉ SYSTÉMY V OPTICE

Multiplex je způsob nebo princip přenosu signálů (např. telefonních hovorů, optických signálů, televizního vysílání, rozhlasového vysílání, počítačových dat či internetového obsahu), při kterém dochází k současnému vícenásobnému využívání jednoho přenosového prostředí či části spojovacího zařízení (optické nebo metalické vedení, vzduchu). Přenos, při němž se využívá multiplex, se nazývá multiplexní přenos. Multiplexor (angl. multiplexer, MUX) slučuje několik signálů pro přenos jednou přenosovou trasou. Signály na konci trasy může rozdělovat zařízení s opačnou funkcí, nazývané demultiplexor (DEMUX).

Multiplexní systémy můžeme rozdělit podle způsobu realizace přenosu na:

- frekvenční multiplex,
- vlnový multiplex,
- časový multiplex,
- prostorový multiplex,
- hybridní multiplex.

Dále multiplexování můžeme rozdělit podle druhů zpracovaného signálu:

- multiplexování elektrických signálů na základě elektrického zpracování signálů,
- multiplexování optických signálů na základě optického zpracování signálů.

Jelikož tato práce se zabývá s technologiemi WDM a OTDM podrobněji rozebereme tyto dva multiplexní systémy.

### 3.1 Vlnový multiplex

Vlnový multiplex umožňuje přenášet po jednom optickém vlákně více signálů. Každý signál je přenášen pomocí jiné vlnové délky. Přenos na každém vlnovém délce může uskutečnit s jinou přenosovou rychlostí. Počet nosných vlnových délek jednoho optického vlákna závisí od fyzikálních parametrů optického vlákna a od optických prvků které umožňují vysílání více vlnových délek do vlákna.

Celková přenosová kapacita  $C$  (b/s) systému je rovna:

$$C = \sum_{k=1}^N v_k, \quad (3.1)$$

kde  $v_k$  je přenosová rychlost  $k$ -tého kanálu a  $N$  je celkový počet kanálů. Pro případ kdy každý kanál má stejnou přenosovou rychlost platí:

$$C = N \cdot v \quad (3.2)$$



Spektrální účinnost  $\eta$  (b/s/Hz) je poměr bitové rychlosti a šířky pásma. Čím vyšší rychlost při stejné šířce kanálu, nebo čím užší kanál při stejné rychlosti, tím vyšší je spektrální účinnost.

$$\eta = \frac{C}{\sum_{k=1}^N \Delta B_k}, \quad (3.3)$$

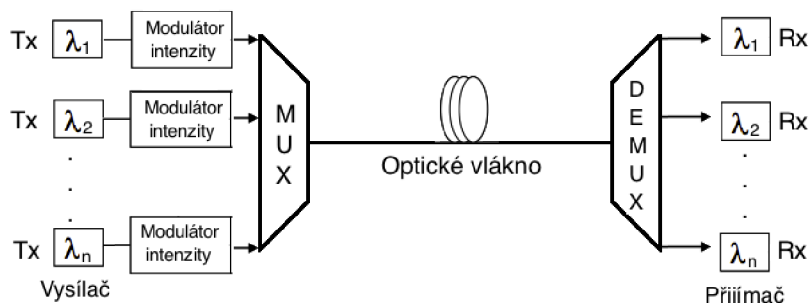
kde  $C$  je celková přenosová kapacita,  $N$  je celkový počet kanálů a  $\Delta B_k$  je šířka pásma  $k$  – tého kanálu.

Hlavní výhody systému s vlnovým multiplexem:

- možnost přenosu signálů s různými přenosovými rychlostmi, s různou modulací a formátem signálu,
- možný současný přenos analogového a digitálního signálu,
- zvýšení přenosové rychlosti přidáním vlnové délky,
- snížení požadavku na rychlost elektronických obvodů,
- transparentnost na datový formát a rychlost (IP, ATM, SDH),
- možnost spínání a směrování,
- dobrý poměr ceny a výkonu.

### 3.1.1 Princip WDM

Základní princip vlnově děleného multiplexu ve WDM (Wavelength Division Multiplexing) sítích je zobrazen na obr.3.1. Na vysílací straně (Tx) několik vlnových délek ( $\lambda$ ) je společně pomocí multiplexeru navázaných na jedno optické vlákno. Podstatou WDM je tedy současný přenos více vlnových délek, čímž se vytvoří více optických přenosových kanálů.



Obr. 3.1: Zjednodušené schéma WDM.

Počet vlnových délek (resp. počet kanálů) a umístění v oblastech okna závisí od technologických možnosti optického vlákna a od prvků celého optického přenosového systému. Jeden z nejdůležitějších parametrů je odstup  $\Delta\lambda$  mezi dvěma blýzkými vlnovými délkami optického záření. Je definován takto:

$$\Delta\lambda = \lambda_{j+1} - \lambda_j. \quad (3.4)$$

Technologie WDM byla navržena kolem roku 1970, v roce 1978 pak proběhl první přenos se současným využitím dvou vlnových délek v laboratorních podmínkách. Postupně došlo díky standardizaci ITU – T (ITU – T G.694.2) k jednotnému určení vlnových délek pro realizaci vlnového dělení a došlo k rozdělení na variantu hrubého CWDM (Coarse WDM) a hustého DWDM (Dense WDM) vlnového dělení podle vzájemného odstupů vlnových délek [14].

### Hrubý vlnový multiplex CWDM

Pro hrubé vlnové dělení CWDM byly definovány jednotlivé kanály s první nosnou 1270 nm a poslední 1610 nm, s odstupem mezi jednotlivými nosnými 20 nm a tolerancí nosné  $\pm 6,5$  nm. Rozteč 20 nm a tolerance je nutná kvůli použití méně kvalitních optických zdrojů a závislosti vysílané vlnové délky na teplotě. Pro standardní jednovidové vlákno 9/125  $\mu\text{m}$  je definováno 18 kanálů rozdělených do následujících pásem:

Tab. 3.1: Tabulka vlnových délek podle ITU – T G.694.2 [14].

| Nosné číslo | Nominální vlnová délka [nm] | Rozdělení spektra jednovidového vlákna 9/125 $\mu\text{m}$  |
|-------------|-----------------------------|---|
| 1 – 5       | 1270 až 1350                | <b>pásmo O (Original)</b> , 1260 – 1360.<br>Původní přenosové pásmo v oblasti 1310 nm                       |
| 6 – 10      | 1370 až 1450                | <b>pásmo E (Extended)</b> , 1360 – 1460.<br>vlákno s potlačenými ionty $\text{OH}^-$ podle ITU – T G.652.C. |
| 11 – 14     | 1770 až 1530                | <b>pásmo S(Short)</b> , 1460 – 1530.<br>Pásmo kratších vlnových délek                                       |
| 15          | 1530 až 1565                | <b>pásmo C (Conventional)</b> , 1530 – 1565   |
| 16 – 18     | 1565 až 1625                | <b>pásmo L (Long)</b> , 1565 – 1625.<br>Pásmo dlouhých vlnových délek                                       |

## Hustý vlnový multiplex DWDM

Varianta DWDM využívá menší odstupy mezi kanály a potřebuje mnohem nižší toleranci vlnové délky jednotlivých nosných. Je možné ve stejném pásmu umístit větší počet vlnových délek (32, 64 a perspektivně až 96 v jednom uvažovaném pásmu). Pro použití hustého vlnového multiplexu jsou však nutné aktivně chlazené optické zdroje (nejčastěji lasery typu DFB — Distributed Feedback Laser) a tím pádem celkové náklady na provoz jsou tak vyšší než v případě CWDM. Pro využití v pasivních optických přístupových sítích se pro použití vlnového dělení DWDM uvažuje o pásmech C a L s minimálním odstupem mezi jednotlivými vlnovými délkami 0,8 nm specifikován podle ITU – T G.694.1 což by umožnilo přenos 32 až 80 vlnových délek. Odstup je dán vztahem:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda \cdot \Delta f}{f}, \quad (3.5)$$

kde  $\Delta\lambda$  je odstup vlnových délek,  $\Delta f$  je odstup frekvence a  $f$  a  $\lambda$  je frekvence a vlnová délka.

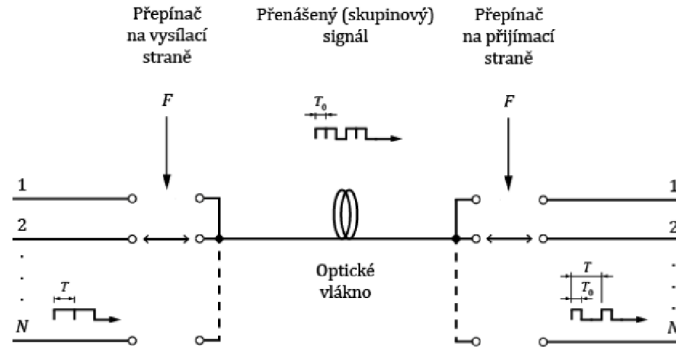
Pro dálkové a páteřní optické komunikace pak pásma C, L a S s odstupem nosných 0,4 nm a použitím 80 až 160 nosných v jednom vlákne. Existují ale již teoretické studie pro zavedení ultra jemného vlnového dělení UDWDM (Ultra – Dense WDM) [14].

Tab. 3.2: Porovnání WDM

| Vlastnost               | CWDM             | DWDM                       |
|-------------------------|------------------|----------------------------|
| Počet kanálů            | 8 – 16           | 40 – 80                    |
| Použité spektrum        | Pásma S, C       | Pásmá C, L, S              |
| Rozestup kanálů         | 2500 GHz         | 12,5 – 100 GHz             |
| Kapacita vlnové délky   | do 2,5 Gbit/s    | do 10 Gbit/s               |
| Celková kapacita vlákna | 20 – 40 Gbit/s   | 100 – 1000 Gbit/s          |
| Využití                 | metropolitní síť | regionální a dálkové spoje |
| Dosah                   | 50 – 100 km      | stovky až tisíce km        |
| Optické zesílení        | žádné            | EDFA, Raman                |

## 3.2 Časový multiplex

Technika optického časového sdružování signálů OTDM (Optical Time Division Multiplexing) je principiálně stejná jako u elektrického TDM (Time Division Multiplexing). Základní princip je zobrazen na obr.3.2 .



Obr. 3.2: Základní princip systému TDM [23].

Taktovací kmitočty všech sdružovaných signálů jsou rovnaké, tj [23].

$$F_j = F \text{ pro } j = 1, 2, \dots, N. \quad (3.6)$$

Sdružování je realizováno pomocí přepínače což plní úlohu multiplexera. Ten postupně pomocí sběrného kontaktu připojuje jednotlivé sdružované datové toky o nižších přenosových rychlostech do výsledného vysokorychlostního signálu. Cyklus přepínání se periodicky opakuje s kmitočtem  $F$ . Pomocí jednoho přepínacího cyklu je vytvořen skupinový (přenášený) signál s taktovacím kmitočtem [23]:

$$F_{sk} = N \cdot F. \quad (3.7)$$

Pro každý kanál během cyklu je vyhrazen časový interval  $T_0$ , což pro každý sdružovaný signál opakuje  $F$  krát za sekundu [23]:

$$T_0 = \frac{1}{N \cdot F} = \frac{1}{F_{sk}}. \quad (3.8)$$

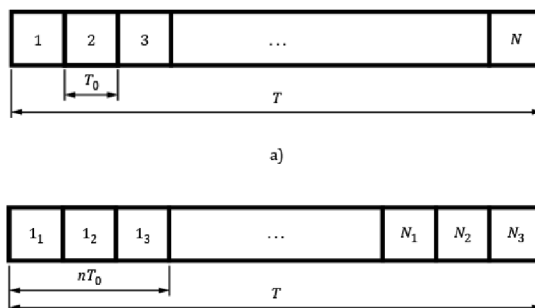
Technika multiplexování, když v každém daném opakovacím přepínacím cykle se pro každý uzel ukládá pouze jeden symbol (bit) přenášeného signálu se nazývá sdružování po bitu. V případě když je možné sdružovat celé skupiny  $n$  bitů do vytvářeného signálu multiplexní systém se nazývá sdružování po blocích. Přenášený signál bude mít taktovací kmitočet [23]:

$$F_{sk} = n \cdot N \cdot F, \quad (3.9)$$

kde  $n$  je počet bitů které se sdružují do skupiny. Doba trvání  $T_0$  jednoho symbolového místa bude [23]:

$$T_0 = \frac{1}{n \cdot N \cdot F} = \frac{1}{F_{sk}}. \quad (3.10)$$

Jeden přepínací cyklus rozdělený na časové intervaly je označován jako časový rámec multiplexního signálu. Na obr.3.3 jsou zobrazeny časové rámce pro sdružování po bitech (a) a sdružování po blocích (b).

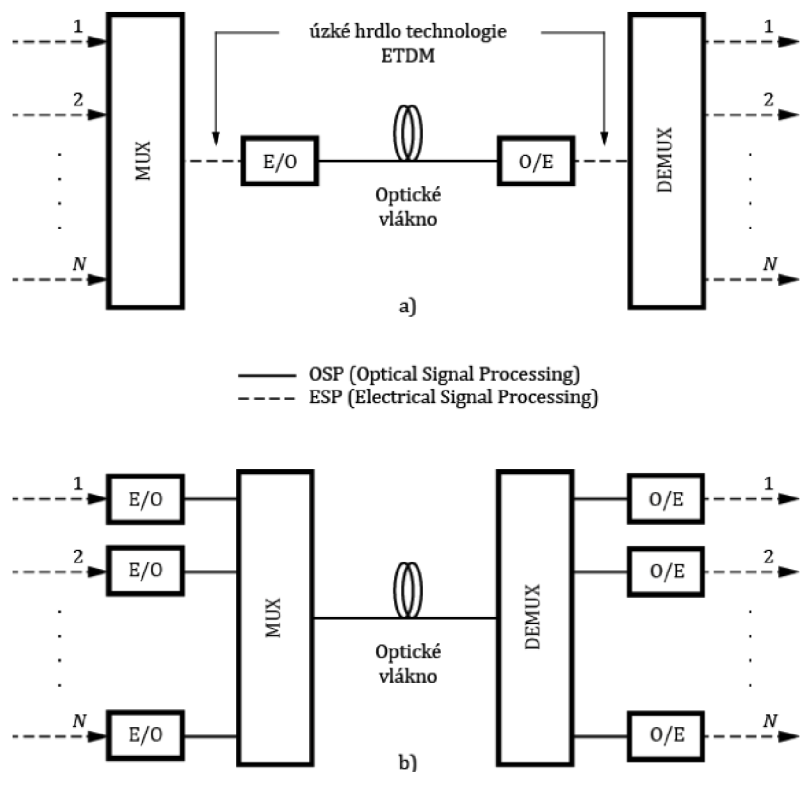


Obr. 3.3: Časové rámce pro sdružování a) po bitech b) po blocích [23].

Základním principem této metody je tedy synchronně alokovat jednotlivé datové toky do časových rámců v přenášeném signálu. Na vysílací straně Multiplexor sdružuje signály o nižší přenosové rychlosti do jednoho vysokorychlostního signálu a na přijímací straně přenosového spoje tyto signály demultiplexer vyděluje zpět.

U elektrického časového multiplexu ETDM probíhá sdružování signálů v elektrické doméně ESP před převodníkem E/O (převod elektrického signálu na optický). U optického časového multiplexu signal je sdružován za E/O převodníkem a vydělován před O/E převodníkem. Multiplexování a demultiplexování probíhá pouze v optické doméně OSP (Optical Signal Processing). ESP tak zpracovává elektrické impulsy s nižšími přenosovými rychlostmi jednotlivých sdružovaných signálů [13].

V systému elektrického časového multiplexu ETDM je po multiplexování signál v převodnicích zesílen a přenášený signál není ovlivněn sdružováním. V přijímací části pak přenesený signal je opět převodníky zesílen před vydělením. U optického časového multiplexu je sdružován a vydělován optický signál a kritickým parametrem se stává hodnota útlumu. Pro kompenzaci ztrát přenášeného optického signálu je používán optický zesilovač typu EDFA.



Obr. 3.4: Princíp zpracování signálů a) ETDM a b) OTDM [13].

## 4 PRVKY MULTIPLEXNÍCH PŘENOSOVÝCH SYSTÉMŮ

### 4.1 Zdroje záření

Jedním z nejdůležitějších optických prvků používaných v optických systémech jsou právě zdroje záření. Nakolik DWDM je hustý vlnově dělený multiplex, musí být tomuto faktoru přizpůsobeny i záření. Jsou na něj kladeny vysoké nároky nejen z hlediska finančního, ale především funkčního.

Základními požadavky na zdroje záření užívané v optoelektronice jsou:

**Konstantní generovaný optický výkon** – výkon zdroje musí být alespoň takový, aby signál prošlý vláknem a přijímaný detektorem byl s požadovanou přesností detekovatelný .

**Přenosová rychlost** – k dosažení požadované přenosové rychlosti musí zdroj umožnit odpovídající modulaci.

**Nominální poloha středu spektrální čáry a její šířka** – systémy WDM jsou velmi náročné na stabilitu jednotlivých nosných frekvencí. Spektrální čára zdrojů záření se nesmí vlivem změny teploty ani jiných okolností posunout do polohy příslušející jiným kanálům. Musí být dostatečně úzká, aby nezasahovala do sousedních kanálů a pro minimalizaci chromatické disperze při šíření signálu podél vlákna.

**Šum** – zdroj nesmí vykazovat náhodné fluktuace.

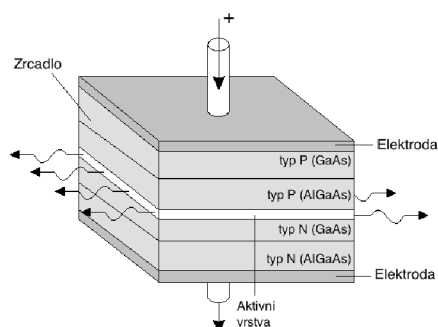
Jako základní zdroje v optice se používají LED (Light Emitting diode) a laserové diody LD (Laser Diode). LED diody se vyrábají ve dvou konfiguracích: povrchově a hranově emitující. Jsou používány jako zdroje záření pro přenosové systémy s nižšími přenosovými rychlostmi (kolem 100 Mb/s). Využití LED diod v systémech WDM znemožňuje jejich široká spektrální čára.

Laserové diody jsou polovodičové součástky, jejichž náplní je přeměna elektrického proudu na světlo. Tato přeměna je výhodná zejména svou efektivitou. Laserové diody jsou malé, spolehlivé, mají velkou životnost, a mezi hlavní výhody patří ještě velký emitovaný výkon (desítky mW). Mezi požadavky, kladené na vlastnosti laserových diod, patří i necitlivost na změny okolního prostředí (zejména na teplotu), mechanická odolnost a nízká cena. V současnosti jsou nejpoužívanější lasery s vnitřním rezonátorem a s rozprostřenou zpětnou vazbou (Distributed Feedback Laser – DFB Laser) a Fabry – Perotovy laserové diody [21].

#### **Fabry – Perotovy laserové diody**

Jeden ze základních zdrojů záření používané v optice. Kvůli teplotní závislosti se používá hlavně na kratší vzdálenosti u jednovidových spojů. Při dosažení prahového

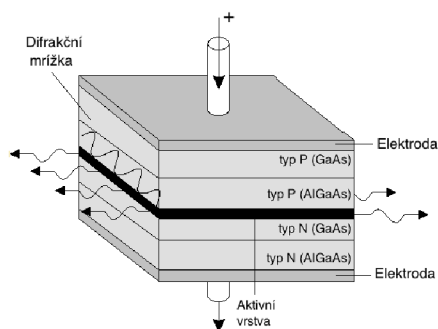
proudu 10 mA je vyzářen výkon 5 mW až 10 mW. Při zvyšování napájecího proudu dochází k nárůstu počtu módů, a spektrální čára se rozšíří.



Obr. 4.1: Struktura Fabry - Perotova laserové diody.

### Lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou

U DFB (Distributed Feed Back) laseru je rezonátor realizován bez zrcadel pomocí prostorových periodických struktur (difrakčních mřížek). Funkce je založena na periodické změně indexu lomu ve směru šíření. Zpětná vazba vzniká trvalým navázáním šířící se vlny do opačného směru Braggovským rozptylem. Mřížka se vytváří leptáním přímo na povrchu aktivní vrstvy. Tyto lasery jsou označovány jako DFB. Sem patří i lasery s rozloženým Braggovým zrcadlem, označované jako DBR (Distributed Bragg Reflector). U tohoto typu se generace optického záření a zpětná vazba pomocí optické mřížky uskutečňují v samostatných částech struktury. Užívají se dva typy konstrukce, s jedním nebo se dvěma Braggovými zrcadly. V praxi se nejčastěji užívá typ se dvěma Braggovými zrcadly na koncích vlnovodu. DFB lasery dosahují velmi úzké spektrální šířky (pod 1 nm) a poskytují modulační šířku pásma hluboko do oblasti GHz. Jsou používány pro vlnové délky pásma C v oblasti 1550 nm a pásma O v oblasti 1310 nm pro starší systémy [15].



Obr. 4.2: Struktura DFB laserové diody.



## 4.2 Detektory pro optické přijímače

Dopadem optického signálu na detektor a jeho přeměnou na elektrický signál končí optická vrstva. Co se týče detektorů – přijímačů optického signálu, mezi WDM a jednokanálovými optickými systémy je pouze ten rozdíl, že signál, vystupující z demultiplexoru WDM, mívá díky plně optickým zesilovačům nižší poměr signál/šum (OSNR – Optical Signal to Noise Ratio).

Používají se dva základní typy přijímače: fotodiody PIN a lavinové fotodiody APD (Avalanche Photo Diode). Vzhledem k tomu, že šířka zakázaného pásu je u křemíku větší než energie fotonu v oblasti třetího přenosového okna, nejsou křemíkové fotodiody použitelné. Užívají se germaniové fotodiody PIN a fotodiody PIN na bázi InGaAs, které jsou výhodnější, protože mají větší tepelnou stabilitu a nižší hodnotu temného proudu. Jejich citlivost je přibližně 1 A/W, kvantová účinnost v rozmezí od 0,5 do 0,9 a časová odezva desítky pikosekund, čemuž odpovídá šířka pásma až 60 GHz. Některé detektory tohoto typu jsou zhotovovány ve formě vlnovodných struktur. Rychlejší jsou fotodiody s Schottkyho bariérou s časovými odezvami v oblasti pikosekund, kterým odpovídají šířky pásma přibližně 100 GHz [21].

## 4.3 Optický zesilovač (OA)

Optický zesilovač je jednou z hlavních komponent optického přenosového systému. Umožňuje zesílit všechny příspěvkové optické kanály ve WDM – signálu najednou a umí to bez elektro–optického konverze, což znamená bitovou a protokolovou nezávislost. V současné době je několik možností a technologií, která nám toto umožňuje. Zesilovače lze implementovat buď za vysílečem, před přijímačem nebo průběžně na trase. Konkrétně se jedná o tyto tři typy:

- Booster.
- In-Line zesilovač (linkový zesilovač).
- předzesilovač.

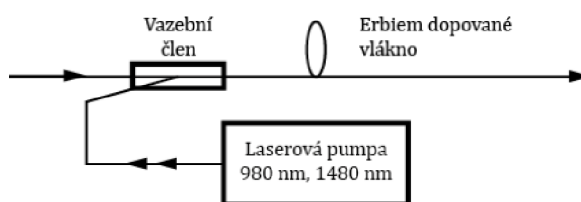
Požadávky na zesilovače zmíněných typů jsou odlišné. Rozhodujícími faktory jsou: zisk  $G$ , křivka zisku, vstupní saturační výkon, saturace zisku, vložný útlum a útlum zesilovače odpojeného od zdroje energie, šířka pásma zesilovače, šumové číslo a teplotní stabilita. K fungování zesilovače je potřebné dodat energii v podobě optického čerpání. Optické zesilovače jsou tříděné dále podle dodání energie [16][4].

Vláknové zesilovače xDFA (x Dopped Fiber Amplifier) – energie je dodána ve formě záření z pumpy s konkrétní vlnovou délkou, kde  $x$  je příslušný chemický prvek. Nejčastěji se používají např. Erbium a Thulium. Polovodičové zesilovače SOA (Semiconductor Optical Amplifier) – energie je dodána ve formě elektrického proudu.

Ramanovské zesilovače RA (Raman Amplifier) – energie je generována jako postranní vid záření v úzkém pásmu kolem jiné vlnové délky vlivem Ramanovského rozptylu.

### Vláknové zesilovače EDFA

Princip funkce vláknového zesilovače (EDFA) je zobrazen na obr.4.3. Současnosti nejuvhodnějším a nejužívanějším optickým zesilovačem pro WDM sítě. Nejefektivnější metoda je použití erbiem dopovaného vlákna kde dochází ke koherentnímu zesílení optického záření v důsledku stimulované emise. Jádrem vláknového zesilovače EDFA je určitá délka erbiem dopovaného vlákna. Záření z laserové pumpy je navázáno do EDF vlákna, kde ionty erbia efektivně absorbují a dostanou se do vyšší energetické hladiny. Dočasně je tak uchována energie z laserové pumpy a uvolní se ve chvíli, kdy se objeví užitečný signál. Jehož energie způsobuje stimulovanou emisi se shodnou vlnovou délkou a fází, jakou má užitečný signál [21][9][16].



Obr. 4.3: Princíp vláknového zesilovača EDFA.

### Ramanovské zesilovače

Ramanův jev byl poprvé publikován v roce 1928, na praktické využití tohoto jevu v přenosových systémech bylo třeba počkat do poloviny 80. let kdy prokázal praktickou využitelnost jako zesilující prvek v prostředí jednovidových vláken na bázi  $\text{SiO}_2$

Princíp fungování RA spočívá ve vytvoření stimulovaného Ramanova rozptylu SRS(Stimulated Raman Scattering) v materiálu optického vlákna. Vhodným budičem na určité vlnové délce lze dosáhnout interakce mezi fotony a fonony prostředí, a dochází k přičtení vibrační či rotační energie molekul prostředí k energii fotonu. Důsledkem tohoto stavu je generace postranního vidu, který je v prostředí křemenných vláken posunut asi o 100 nm (pro pásmo 1550 nm) směrem k vyšším vlnovým délkám. Dochází tedy k přenosu energie a frekvenčnímu posunu směrem k nižším

frekvencím. Míra přenosu energie a velikost vlnového posunu závisí na profilu koeficientu zisku daného prostředí. Existují dva režimy práce Ramanova zesilovačů které se odvíjí z umístění pumpy na trase [4][16]. Jsou to:

- režim DRA (Distributed Raman amplifier), s rozprostřeným zesilovačem,
- režim LRA (Lumped Raman Amplifier), režim diskretní.

### Polovodičové zesilovače

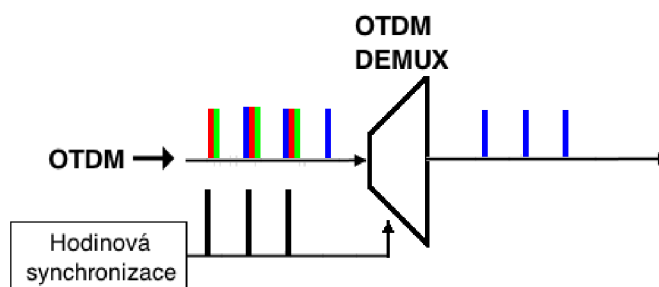
Zisk zesilovače je generován ve struktuře polovodiče nikoliv v materiálu optického vlákna. Energii treba dodat v podobě budícího elektrického pole. Polovodičové materiály vhodné pro realizace optického zesilovače vyznačují vysokou kvantovou účinností, která zaručuje maximální počet generovaných fotonů vztažen k počtu excitovaných nosičů náboje. Používají se např. GaSa, AlGaSa, InGaAs, InGaAsP, InP [16].

## 4.4 Multiplexory a demultiplexory

V systémech OTDM multiplexor spojuje optické signály do jednoho vysokorychlostního signálu. Na opačném konci přenosu tyto signály demultiplexor vyděluje zpět. Při demultiplexování se často vyskytují problémy jako časové chvění (jitter), přeslech ze sousedních kanálů a zbytkový přeslech.

Při demultiplexování v OTDM systémech jsou často aplikované elektro absorbní modulátory EAM (Electro Absorption Modulator). Pokud na řídicí vstup EAM není přiveden řídicí impuls, EAM je ve vysokém absorbním stavu a optický signál na datovém vstupu EAM je absorbován. Pokud ale na řídicím vstupu objeví hodinový impuls, EAM je transparentní a tím způsobem je vybrán základní tok dat z multiplexovaného datového toku. Dále jsou používány optické smyčkové zrcadla NOLM (Nonlinear Optical Loop Mirror) které využívají nelineární závislost intezity od fáze (případy kdy je nutné používat dlouhá vlákna z důvodu menších nelinearit). Nelineární zesilovač se smyčkovým zrcadlem NALM (Nonlinear Amplifier Loop Mirror) využívá nelinearitu erbiem dopovaného vláknového zesilovača EDFA. Dále můžeme připomenout ještě interferometry s polovodičovým optickým zesilovačem SOA (Semiconductor Optical amplifier) kde je možnost použití Mach-Zehnder interferometru.

Demultiplexory v systémech WDM lze realizovat třemi způsoby: jako soustavu dielektrických filtrů, vlnovody uspořádanými do mřížky (AWG - Arrayed Waveguide Grating) nebo vláknovou Braggovou mřížkou (FBG - Fibre Bragg Grating). V uspořádání demultiplexoru jako soustavy dielektrických filtrů dopadá signál WDM na první filtr. Ten propustí první optický kanál na příslušný přijímač, zbylé kanály se odrazí na druhý filtr. Druhým filtrem projde druhý signál na druhý přijímač,



Obr. 4.4: OTDM Demultiplexor.

ostatní kanály se odrazí na třetí filtr, atd. až poslední optický kanál z původního signálu WDM dopadne na poslední přijímač. Zařízení AWG sestává z dvou hvězdicových vláknových odbočnic. První rozvětřuje vstupní signál na několik úzkých vlnodů (Počet kanálů je roven počtu větví). Ty vedou paralelně vedle sebe, poněkud zatáčejí a pak jsou napojeny na druhou odbočnici. V důsledku toho že jednotlivé oblouky jsou nestejně dlouhé, vstupují části signálu z jednotlivých větví do druhého odbočnice s nestejným fázovým zpožděním. Výsledkem je, že ve druhé odbočnici dojde k vzájemné interferenci části signálu, přicházejících z různých větví, a celý signál WDM se rozdělí tak, že veškerá intenzita prvního příspěvkového kanálu se objeví v první výstupní větvi, veškerá intenzita druhého příspěvkového kanálu se objeví v druhé výstupní větvi, atd. až veškerá intenzita posledního příspěvkového kanálu se objeví v poslední výstupní větvi struktury AWG [4].

Hlavní předností AWG je malý vložený útlum, který se pohybuje okolo 2 – 4 dB a je jen minimálně závislý na počtu výstupních portů. [10] Izolace mezi kanály se pak pohybuje okolo 30 dB.

## 4.5 Optické rozbočovače a slučovače

Optické rozbočovače (splitter) slouží k rozbočení přenášeného optického signálu ve směru od optického linkového zakončení k síťovým a koncovým jednotkám. Optický slučovač (coupler) realizuje navázání jednotlivých optických signálů od koncových jednotek do společného vlákna v opačném směru. Umožňují vytvoření potřebné rozvětvené struktury a připojení požadovaného počtu koncových uživatelů do jedné optické sítě. Základním parametrem splitteru je jeho rozbočovací poměr, který se nejčastěji udává jako 1:N. Definuje počet výstupů rozbočovače (N). Samotný proces rozbočení je realizován dvěma způsoby: Čistě pasivním způsobem pomocí FBT (Fused Bionic Taper) článků, které mohou být buď v provedení krátkých vzájemně svařených optických vláken, nebo PLC (Planar Lightwave Circuit) planární technologií na substrátu křemíku (speciální využití s ohledem na malé rozměry). Typické rozbočovače pro pasivní optické sítě dosahují rozbočovacího poměru 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32 a 1:64 [14].

Tab. 4.1: Vložený útlum pasivního rozbočovače v závislosti na jeho rozbočovacím poměru [14].

| <b>Rozbočovací poměr (1:N)</b> | 1:2 | 1:4 | 1:8  | 1:16 | 1:32 | 1:64 |
|--------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|
| <b>Útlum rozbočovače [dB]</b>  | 3,9 | 7,4 | 10,8 | 14,1 | 17,3 | 18,5 |

## 5 KONVERZE OTDM / WDM

Pro dosažení vysokých přenosových rychlostí (řádově 100 Gb/s) a navýšení přenosové kapacity byly výzkumy věnován především na spektrální účinnost optických spojů u systémů WDM a OTDM. V experimentálních výzkumech s rychlostmi okolo 1 Tb/s na kanál bylo dosaženo u obou systému, stále ještě není do dostatečné míry prozkoumán, jak mohou oba systémy pracovat společně. Sloučení dvou odlišných systémů by tak představovalo kompletní řešení u tzv. celooptických sítí. Jednotlivé přístupové sítě založené na systémech vlnového multiplexu budou mezi sebou propojovány páteřními sítěmi tvořenými vysokorychlostním OTDM systémem. Nevyhnutelným krokem takového hybridního optického systému je konverze mezi těmito systémy [19].

Během posledních let bylo uveřejněno několik úspěšných experimentů s konverzí víceprspěvkových OTDM/WDM systémů. Tyto experimenty lze rozdělit na dva hlavní koncepty:

- konverze pomocí OFT (Optical Fourier Transformation),
- konverze pomocí vícevlnového parametrického vzorkování.

Při optické Fourierově transformaci probíhá konverze za využití nelineárních jevů jako XPM, FWM nebo např. SHG DFG (Second Harmonic Generation and Difference Frequency Generation). Lineární chirpované pulsy mají stejnou opakovací frekvenci jako jednotlivě příspěvkové signály OTDM a společně s vhodnou šířkou pulsů umožňují provést demultiplexování všech příspěvkových kanálů OTDM. Doposud není u této techniky uspokojivě vyřešeno generování lineárních chirpovaných pulsů, spektrální rozšíření (tzv. superkontinuum) a generování obdélníkových pulsů. Výzvu představují především obdélníkové pulsy, jejichž realizace je v praxi velmi obtížná. Pomalé náběhy neideálních obdélníkových pulsů u čerpacího signálu způsobují velké kvalitativní rozdíly a mezikanalové přeslechy u vyčleněných WDM kanálů.

Navrhovaný systém konverze by měl splňovat následující požadavky:

- laditelný kanálový odstup podle doporučení ITU – T,
- výběr vlnové délky a časového rámce. Ideálně by bylo, kdyby bylo možné jakýkoliv kanál v jakémkoliv časovém rámci systému OTDM selektivně převést na zvolenou vlnovou délku systému WDM odpovídající doporučení ITU – T,
- flexibilní navyšování a snižování přenosových rychlostí. OTDM/WDM převodník by měl být schopen reagovat na zvýšení přenosové rychlosti OTDM navýšením počtu vyčleněných WDM kanálů a naopak.

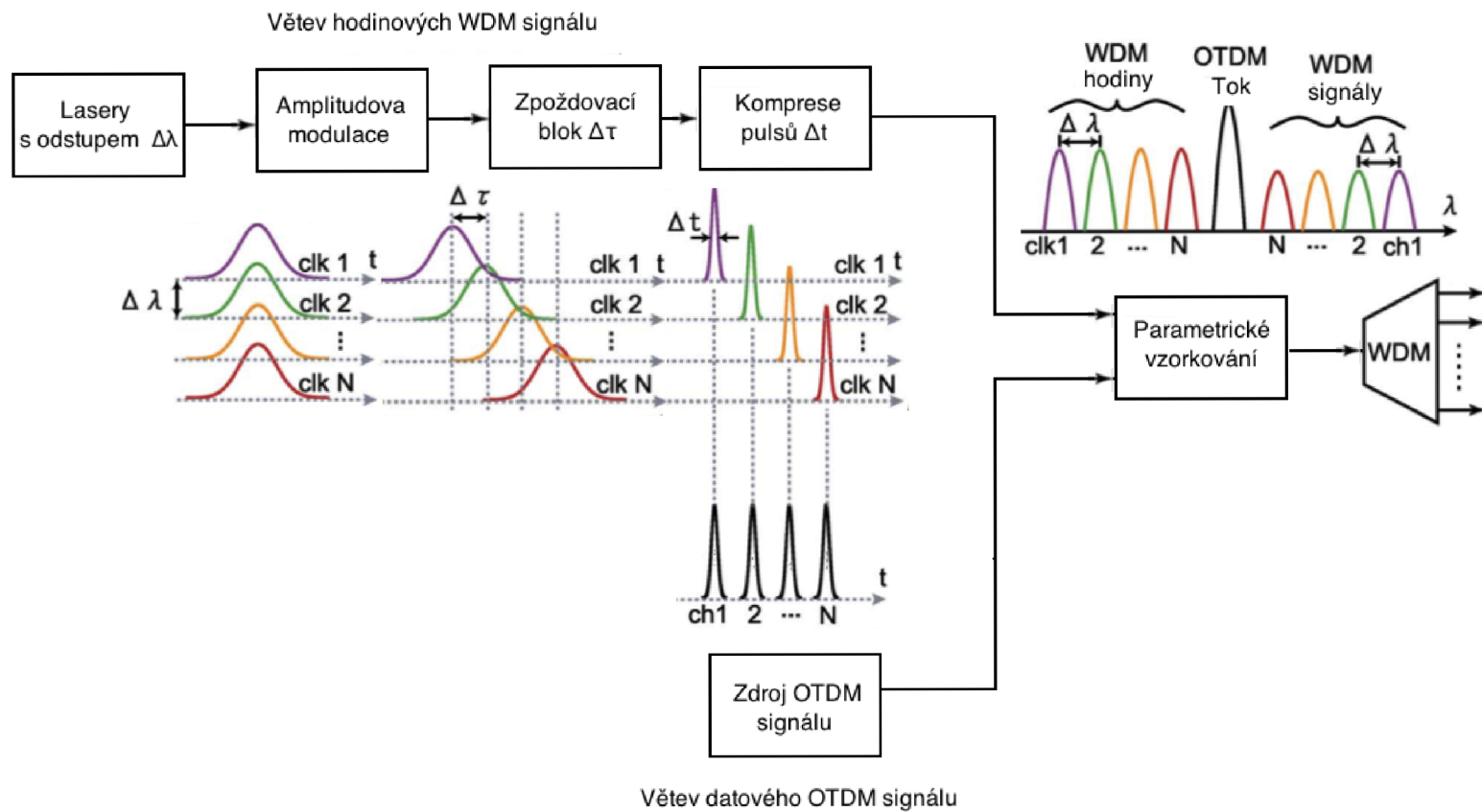
Jeden z možných principů, který by byl schopen splňovat tyto požadávky je parametrické vzorkování. Techniku je možné realizovat pomocí elektroabsorpčního modulátoru EAM s úzkým vzorkovacím oknem, na základě jevů XPM nebo FWM v polovodičovém optickém zesilovači nebo pomocí vysoce nelineárního vlákna [19][13].

## Parametrická konverze OTDM / WDM na základě ultrakrátkých pulsů Ramanové komprese

Koncept konverze OTDM/WDM je znázorněn na obr. 5.1. WDM NRZ (Non Return to Zero) hodinové pulsy jsou produkovány amplitudovým modulátorem, jako např. Mach – Zehnder modulátor (MZM), nebo EAM. Tyto modulátory produkují pulsy šířkou kolem 20 ps při 10 GHz amplitudové modulaci, které nejsou dostatečně krátké pro demultiplexování ultrarychlých OTDM signálů. WDM hodinové pulsy jsou odesílány do zpožďovacího bloku pro řízení zpoždění hodinového signálu nezávisle tak aby byly synchronní s cílovým OTDM přítokem. Zpožďovací blok funguje jako tzv. Delay – Couple blok, ve kterém vstupní WDM hodinové pulsy jsou zpožděné prostřednictvím laditelné optické zpoždění (delay) a spojené do jednoho výstupního vlákna (couple). Po zpožďovacím bloku, šířky synchronních WDM pulsů jsou současně komprimované na ultrakrátký rozsah (několik pikosekund) prostřednictvím Ramanovské komprese [19].

Komprese pracuje na základě adiabatické solitonové komprese využitím vysoko výkonného DRA (Distributed Raman amplifier) zesilovače. Kvůli DRA pulsní energii se zvyšuje, solitonové pulsy jsou komprimované podél anomální disperze na každé vlnové délce. Pomocí této techniky, komprese může být realizována vlákny s konstantní disperzí, jako např. vlákna s posunutou disperzí (DSF). Konverze OTDM/WDM je realizována pomocí vzorkovací brány na základě parametrické interakce mezi příchozím OTDM signálem a komprimovanými WDM pulsy. OTDM tok s rychlostí  $B = N \times R$  vyžaduje  $N$  WDM synchronních hodinových signálů při opakovací frekvenci  $R$  ( $N$  je počet signálů a  $R$  je rychlost). Parametrický proces může být realizován buď pomocí FWM v HNLF, nebo kaskádovaných SHG a DFG v pravidelně polarizované LiNbO<sub>3</sub> [19].

Obr. 5.1: Princip konverze OTDM/WDM [19].





## 5.1 Konverze OTDM / WDM

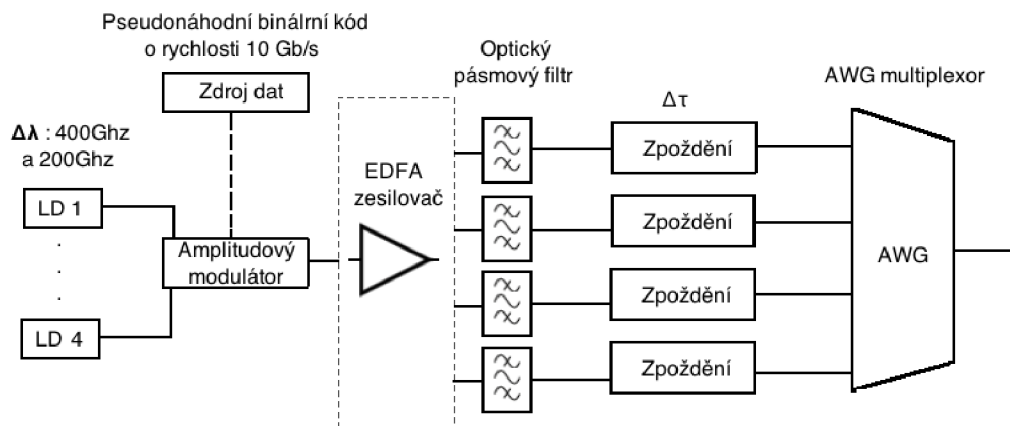
Pro znázornění optické konverze OTDM–WDM byl navržen model konverze 40 Gb OTDM datového toku pomocí 4x10 Gb WDM hodinového signálu.

Celý proces systému je rozdělen na tři části. Jsou to:

- větev datového OTDM signálu,
- větev hodinového WDM signálu,
- větev tzv. parametrické brány (OTDM WDM konverze).

### 5.1.1 Větev hodinového WDM signálu

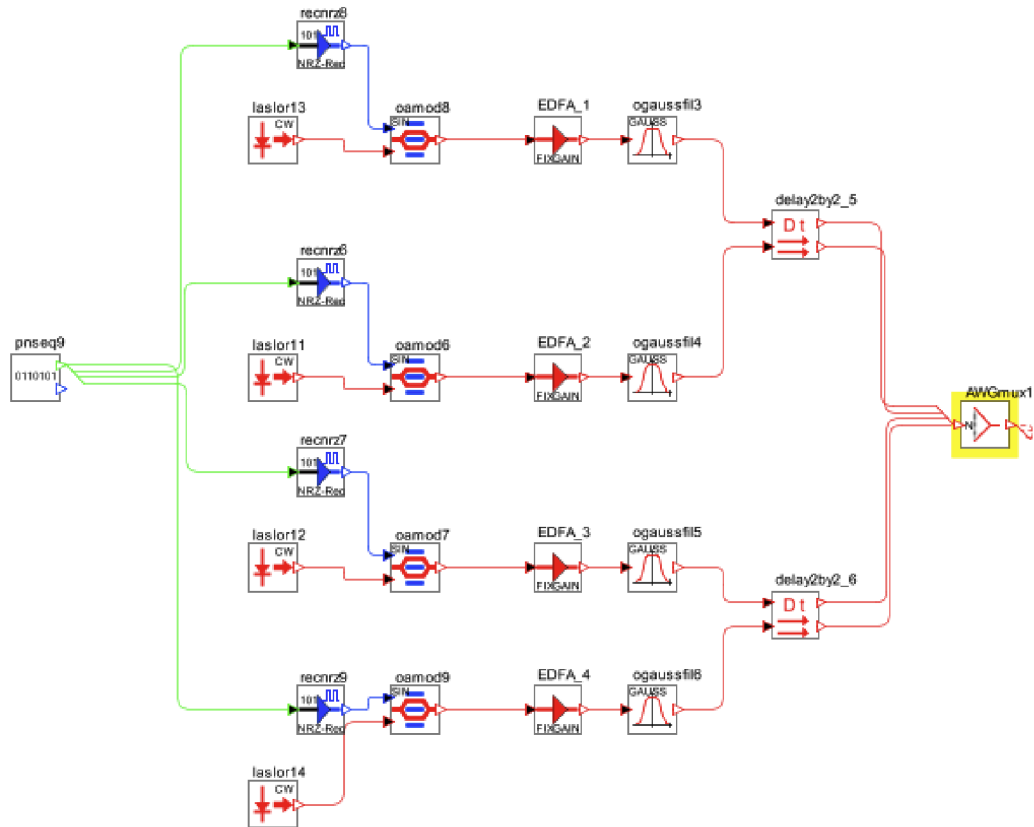
Větev WDM hodinového signálu tvoří PBRS generátor, modulátor a zdroj záření. Optický signál z CW (Continuous Wave) laseru s výkonem 20 mW je modulován pomocí elektroabsorpčního modulátoru. Modulace je řízena sinusovým signálem o frekvenci 10 GHz a špičkovým napětím  $V_{pi}$ .



Obr. 5.2: Blokove zobrazení WDM větvy.

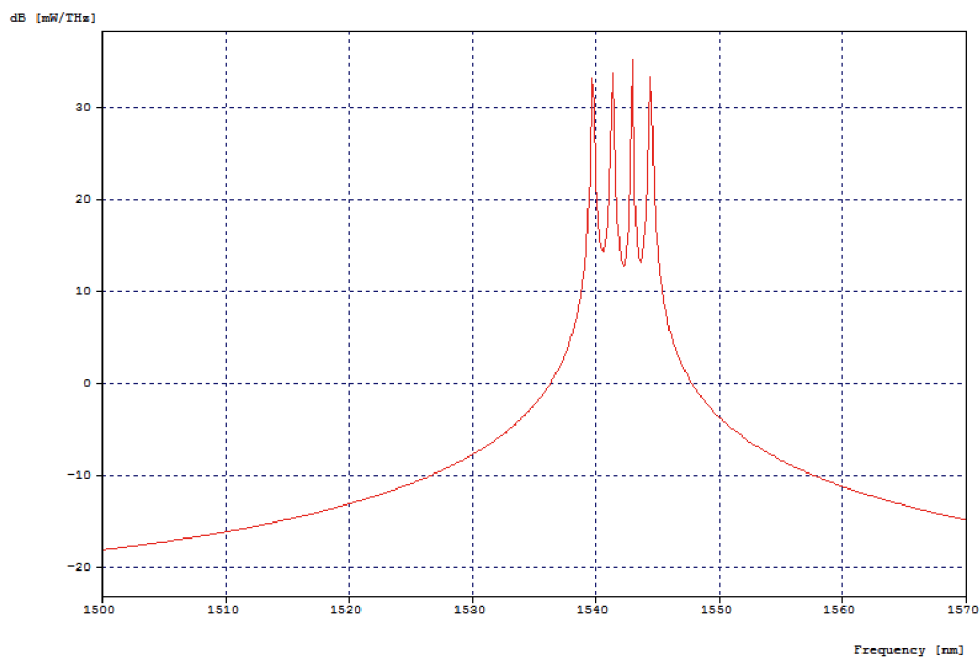
Vlnové délky čtyř CW laseru byly nastavené na čtyři různé vlnové délky. Konverze byla zkoumána při třech nastaveních kanálového odstupu, viz obr. 5.4 a obr. 5.5.

- 400 GHz (3,2 nm) pro hodinové WDM kanály s vlnovými délkami od 1538,2 nm (clk 1) až do 1547,7 nm (clk 4).
- 200 GHz (1,6 nm) pro hodinové WDM kanály s vlnovými délkami od 1539,8 nm (clk 1) až do 1544,5 nm (clk 4).
- 100 GHz (0,8 nm) pro hodinové WDM kanály s vlnovými délkami od 1539,8 nm (clk 1) až do 1542,0 nm (clk 4).

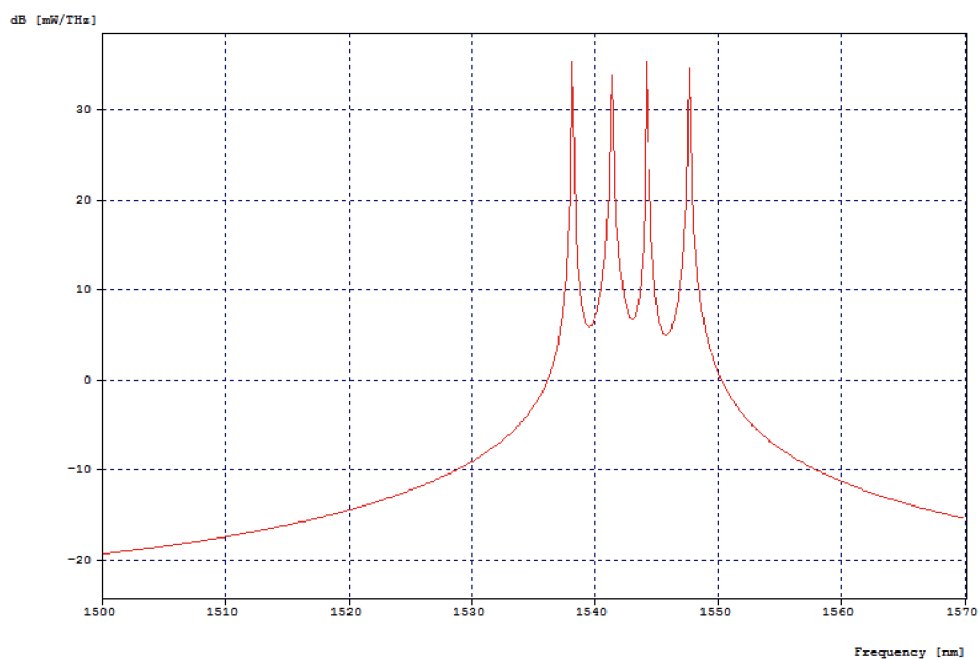


Obr. 5.3: Realizace WDM větvy v programu OptSim.

Byly používány optovláknové zesilovače typu EDFA. Na výstupu byl nastaven konstantní výkon 10 dBm. EDFA se používá pro kompenzaci ztrát v důsledku modulací. WDM hodiny, které mají stejné načasování byly odeslány do zpoždovacího bloku (Delay). Přesné načasování hodinových signálu je nezbytné pro správný průběh konverze. WDM hodiny bylo třeba synchronizovat s datovým OTDM signálem a proto byly zpoždovací bloky nastaveny podle hodnoty načasování datového OTDM toku. Výsledné signály mají šířku vzhřeba 20 ps (FWHM). Po zpoždění byly hodinové WDM signály sloučeny do jednoho toku pomocí AWG multiplexoru.



Obr. 5.4: Optické spektrum hodinového WDM toku při kanálovém odstupu 200 GHz.

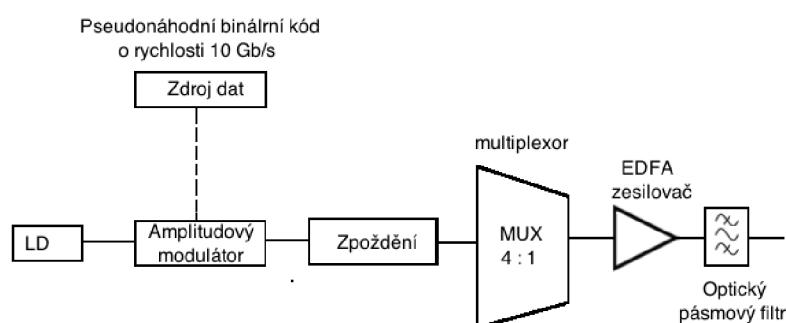


Obr. 5.5: Optické spektrum hodinového WDM toku při kanálovém odstupu 400 GHz.

### 5.1.2 Větev datového OTDM signálu

Pro vytvoření vysoce kvalitního sledu impulsů pro generování vysokorychlostního OTDM toku, byl zvolen laser CW a modulátor řízený sinusovým signálem s frek-

venci 10 GHz. Záření CW laseru bylo nastaveno na délku 1552 nm. Sled impulsů byl modulován s kapacitou dat 10 Gb/s pomocí PBRs generátoru. EDFA byl používán pro kompenzaci ztrát při modulaci. Výsledná šířka pulsu (FWHM) v této fázi byla 3,5 ps. Datový signál s kapacitou 10 Gb/s byl následně multiplexován do jednoho společného toku pomocí 4:1 Multiplexoru. Ještě před vstupem do parametrické brány na datový signál byl aplikován zesilovač EDFA a následně 3,0 nm pásmový filtr.



Obr. 5.6: Blokové zobrazení datové OTDM větvy.

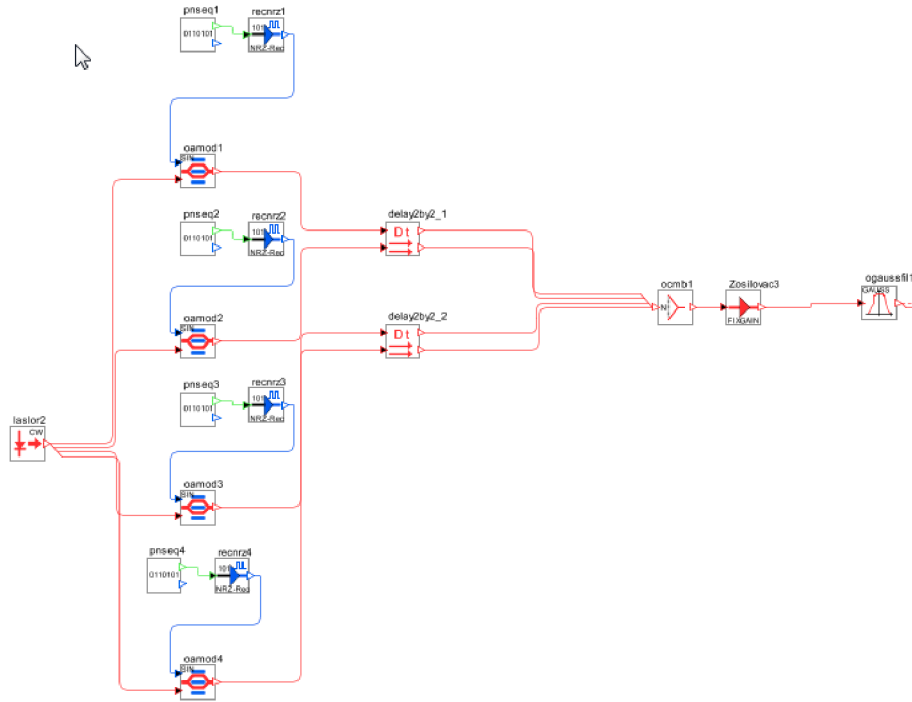
### 5.1.3 Adiabatická solitonová komprese pomocí Ramanovského zesilovače

Adiabatická komprese znamená, že solitonový puls se promění na velmi krátký puls v důsledku anomální disperze a distribuovaného ramanovského zesílení. Pomocí této techniky je možné výrazně navýšit kompresní poměr a efektivně zvýšit počet kanálů. Adiabatickou solitonovou kompresi je možné vysvětlit pomocí rovnice týkající se trvání solitonového pulsu  $T_{FWHM}(0)$  a koeficientu skupinové rychlosti disperze  $\beta_2$  (GVD – Group Velocity Dispersion) [6].

$$T_{FWHM}(0) = \frac{2N^2|\beta_2|}{\gamma E_s}, \quad (5.1)$$

kde  $E_s = 2P_0T_0$  je solitonova energie, kde  $P_0$  je špičkový výkon,  $N$  je řád solitonu a  $\gamma$  je koeficient nelinearity.

Solitonová propagace je adiabatická v momentě, kdy parametry vlákna jako disperze a nelinearita nebo solitonová energie (prostřednictvím zisku nebo ztráty) se mění vzhledem k délce solitonu. V tomto režimu celkovou energii solitonu můžeme



Obr. 5.7: Realizace OTDM větvy v programu OptSim.

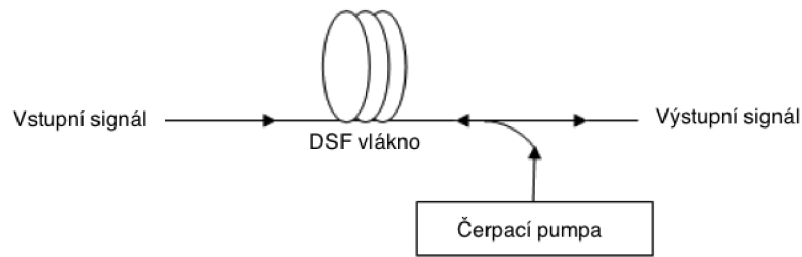
vyjádřit podle rovnic 5.2. Je zřejmé, že doba trvání solitonu se změní v důsledku změn buď disperze nebo nelinearity podél vlákna. Tyto parametry se mění změnou velikosti jádra (zužující) v běžných vláknech nebo změnou mikrostruktur parametrů v PCF (Photonic – Crystal Fiber) vláknech .

Zanedbáním kolísání  $\gamma$ , poměr trvání impulsu na vstupu a výstupu  $T_{FWHM}(0)$  a  $T_{FWHM}(L)$  je roven poměru vstupních a výstupních disperzních koeficientů  $\beta_2(0)$  a  $\beta_2(L)$  [22].

$$T_{FWHM}(L) = \frac{\beta_2(L) \cdot T_{FWHM}(0)}{\beta_2(0) \cdot G}, \quad (5.2)$$

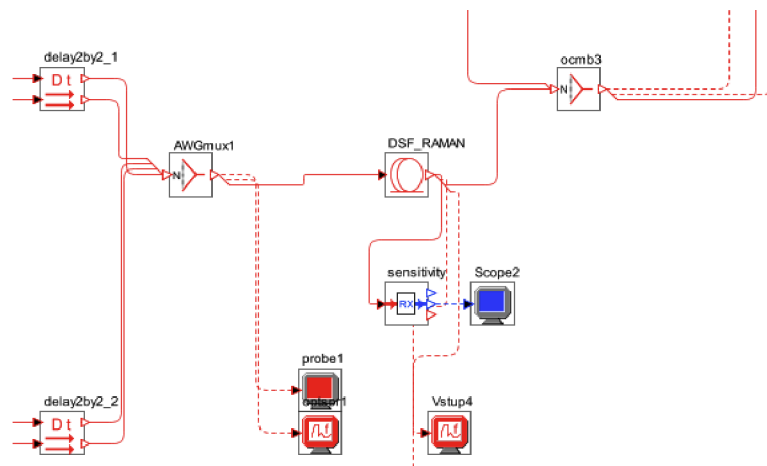
kde  $\beta_2(0)$  je koeficient skupinové rychlosti disperze při vstupu a výstupu vlákna,  $T_{FWHM}(0)$  a  $T_{FWHM}(L)$  je šířka pulsu při vstupu a výstupu a  $G$  je zisk a je dán  $G = \frac{E_{out}}{E_{in}}$ , kde  $E_{out}$  a  $E_{in}$  je energie vstupních a výstupních pulsů.

V praxi solitonová energie není konstantní vzhledem k útlumu vlákna. Snížení solitonové energie vede k rozšíření pulsu, a proto musí být nahrazena dalším snížením disperze. Další zesílení zvyšuje solitonové energie a tímto mechanismem může být dosaženo komprese pulsů. Typický příklad je použití Ramanovských zesilovačů, které jsou velmi vhodné pro poskytnutí distribuovaného zisku požadovaného pro adiabatické solitonové komprese. Princip praktické aplikace tohoto kompresního mechanismu je znázorněn na obr. 5.8. Komprese hodinových impulsů je založena na hoře



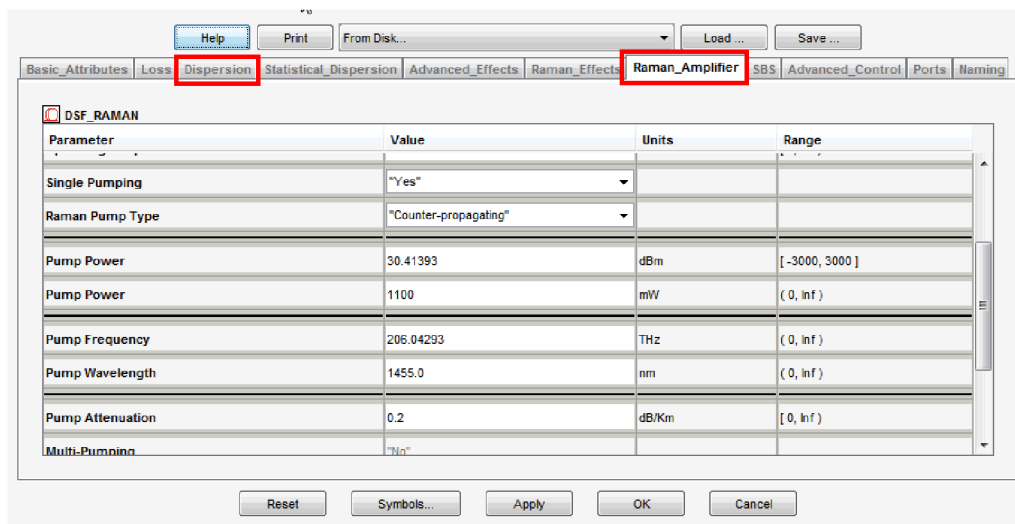
Obr. 5.8: Realizace Ramanovského kompresoru.

uvedeném adiabatickém solitonovém kompresoru RA – MPC (Raman Multiwavelength Pulse Compressor). RA – MPC se skládá ze 17 km DSF vlákna a z čerpacího laseru s laditelnou vlnovou délkou, což je aplikováno proti směru šíření optického WDM signálu. Disperze DSF vlákna je  $3,8 \text{ ps/nm/km}$ , a disperzní sklon  $0,06 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$  na  $1552 \text{ nm}$ . Čerpací laser byl nastaven na vlnovou délku  $1454 \text{ nm}$ , čím byla optimalizována kvalita komprese všech WDM impulsů. V programu OptSim byla komprese realizována pomocí optického vlákna "DSF\_RAMAN". Díky bohatým možnostem v nastaveních při konfiguraci vlákna lze přímo nakonfigurovat disperze a také ramanovské zesílení (viz obr.5.10).

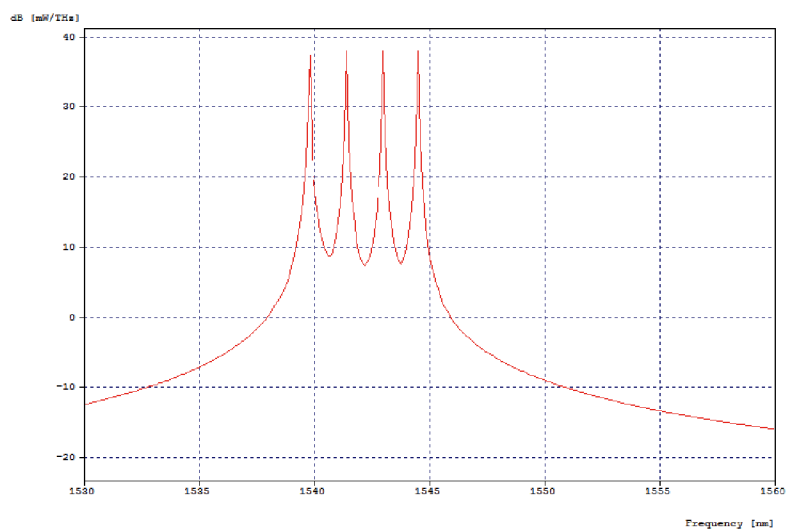


Obr. 5.9: Realizace Ramanovského kompresoru v prostředí OptSim.

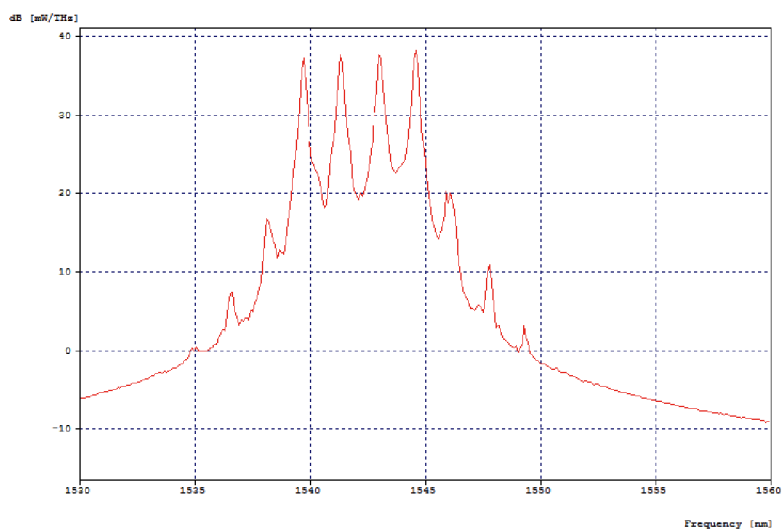
Kompresce byla prozkoumána při různých nastaveních výkonu laserové pumpy. Optické spektrum WDM signálu s kanálovým odstupem  $400 \text{ GHz}$  je zobrazen při vstupu do kompresoru (obr.5.11) a pak na výstupu s nastavením výkonu laseru  $1 \text{ mW}$  (obr.5.12) a  $800 \text{ mW}$  (obr.5.13). Na grafech je vidět výraznou změnu v optickém spektru signálu.



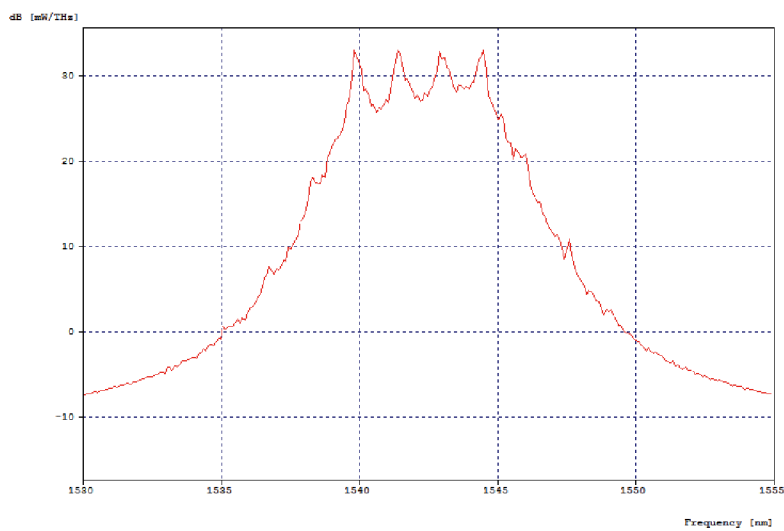
Obr. 5.10: Možnosti nastavení disperze a ramanovského zesílení při konfiguraci vlákna.



Obr. 5.11: Optické spektrum signálu před vstupem do kompresoru.



Obr. 5.12: Optické spektrum signálu při výkonu pumpy 1 mW.



Obr. 5.13: Optické spektrum signálu při výkonu pumpy 800 mW.



## Kalkulace útlumové bilance

Pro bezchybnou činnost optických komunikačních systémů je nutné zajistit dostatečnou úroveň přenášeného optického signálu. Při návrhu optického přenosového systému je třeba uvažovat s útlumem. Celkový útlum trasy je stanoven součtem dílčích útlumů použitých síťových prvků. Výsledky analýzy jsou přehledně zhrnuty v tabulce 5.1. Kromě provedení kalkulační a návrhu sítě z hlediska útlumové bilance je však potřeba v praxi přihlídnout i k jiným specifickým podmínkám v dané oblasti. Při návrhu optické sítě je potřebné uvažovat vždy aj na základě individuálního prostředí. Na kompenzaci ztrát byly používány vhodné EDFA zesilovače.

Tab. 5.1: Kalkulace celkového útlumu pro větev s hodinovým WDM signálem

|           |                               | Počet [kus]<br>Délka [km] | Měrný útlum<br>[dB, dB/km]          | <b>Celkový útlum<br/>[dB]</b> |
|-----------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Konektory | typ SC                        | 8                         | 0,2                                 | 1,6                           |
| Modulátor | OAM                           | 1                         | 3                                   | 3                             |
| Spoždění  | Delay                         | 1                         | 0,5                                 | 0,5                           |
| Filter    | BPS                           | 1                         | 3                                   | 3                             |
| AWG       | 4:1                           | 1                         | 5                                   | 5                             |
| Vlákno    | G. 652 typ A                  | 1                         | 0,4                                 | 0,4                           |
| Rezerva   | Stárnutí, tepl.<br>kompenzace |                           |                                     | 1                             |
|           |                               |                           | <b>celkový útlum<br/>větvě [dB]</b> | <b>11,8</b>                   |

Útlum modulátoru se pohybuje v jednotkách dB, modulátor Oamod má vnitřní útlum  $-3$  dB. Při propojení jsme uvažovali s optickými patch kabely s konektory SC s určitou hodnotou vložného útlumu  $-0,4$  dB/km. Museli jsme kalkulovat aj s propojením filtru a následně i jeho útlumem což jsme stanovili na 3 dB. Útlum AWG multiplexeru byl stanoven na  $\sim 5$  dB. Celkový útlum pro větev s hodinovými WDM signály jsme stanovili na 11,45 dB a 6 dB pro větev s datovým OTDM signálem.

### 5.1.4 Parametrická konverze OTDM / WDM

Když je vysoce výkonný optický signál spuštěn do vlákna, linearita optické odezvy se ztratí. Jeden z nelineárních efektů vzhledem k třetímu řádu elektrické náchylnosti se nazývá Kerrův jev. Čtyřvlenné směšování (FWM) je typem optického Kerrůvho jevu a nastane, když ve vlákne působí světelné vlny dvou nebo více různých vlnových délek. To vede ke generaci nové vlny odlišné frekvence (známé jako Idler). FWM je druh optického parametrického kmitání. V přenosových systémech s hustým vlnovým multiplexem (DWDM) je potřeba se vyhnout efektům FWM, ale pro některé aplikace poskytuje FWM efekt účinné technologické možnosti např. při měření nelinearity a chromatické disperze optických vláken [2]. V následujícím textu jsme zkoumali FWM z pohledu možné konverze OTDM/WDM.

Na obr. 5.14 je schematický diagram, který ukazuje FWM ve frekvenční doméně. Frekvenci Idleru je možné určit z rovnice [2]:

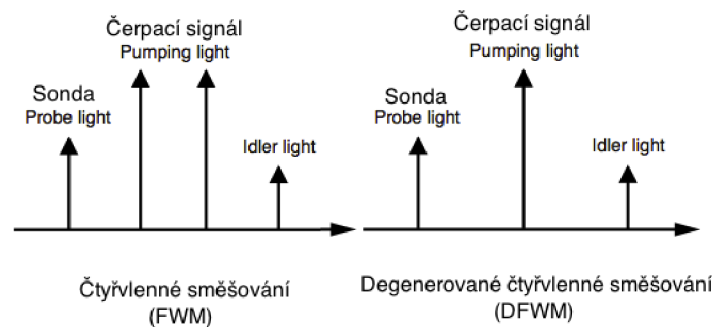
$$f_{idler} = f_{p1} + f_{p2} - f_{probe}, \quad (5.3)$$

kde  $f_{p1}$  a  $f_{p2}$  je frekvence čerpacího světla a  $f_{probe}$  je frekvence světla tzv. sondy (Probe).

Tato vyjádření se nazývá fázová shoda frekvence [2]. Když frekvence obou čerpacích signálů (Pumping light) jsou identické, používá se termín degenerované čtyřvlenné směšování (DFWM) a rovnice v tomto případě mohou být napsány následovně [2]:

$$f_{idler} = 2f_p - f_{probe}, \quad (5.4)$$

kde  $f_p$  je frekvence degenerovaného čerpacího světla.



Obr. 5.14: Znázornění FWM a DFWM [2].

Kontinuální vlna DFWM může být vyjádřena následovně pomocí nelineárních rovnic [2]:

$$\frac{dE_p}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_p = i\gamma(|E_p|^2 + 2|E_{probe}|^2 + 2|E_{idler}|^2)E_p + 2i\gamma E_p^* E_{probe} E_{idler} \exp(i\Delta\beta z), \quad (5.5)$$

$$\frac{dE_{probe}}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_{probe} = i\gamma(|E_{probe}|^2 + 2|E_{idler}|^2 + 2|E_p|^2)E_{probe} + 2i\gamma E_{idler}^* E_p^2 \exp(-i\Delta\beta z), \quad (5.6)$$

$$\frac{dE_{idler}}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_{idler} = i\gamma(|E_{idler}|^2 + 2|E_p|^2 + 2|E_{probe}|^2)E_{idler} + 2i\gamma E_{probe}^* E_p^2 \exp(-i\Delta\beta z), \quad (5.7)$$

kde  $z$  je směr šíření optické vlny ve vlákně,  $\alpha$  je koeficient útlumu vlákna a  $E_p$ ,  $E_{probe}$ ,  $E_{idler}$  jsou elektrické pole čerpací vlny (Pumping light), sondy (Probe light) a Idleru.

Nelineární koeficient  $\gamma$  může být vyjádřen jako [2]:

$$\gamma = \frac{2\pi f_p}{c} \cdot \frac{n_2}{A_{eff}}, \quad (5.8)$$

kde  $n_2$  je nelineární index lomu a  $A_{eff}$  je účinná plocha vlákna. Termín  $\Delta\beta$  v rovnici 5.5 představuje fázový nesoulad konstanty šíření a může být definován jako [2]:

$$\Delta\beta = \beta_{probe} + \beta_{idler} - 2\beta_{pump} = \frac{8\pi f_p^2}{c} D(f_p f_{probe} - f_p), \quad (5.9)$$

kde  $D$  je koeficient chromatické disperze.

Pro vytvoření FWM je nutné, aby se vlnová délka čerpadla (Pumping light) shodovala s vlnovou délkou vlákna, kde je nulová disperze. První člen na pravé straně rovnice 5.5 představuje účinky vlastní fázové modulace (SPM) a křížové fázové modulace (XPM) vyplývající z optického Kerrůvho jevu.

Parametrická konverze pomocí FWM nabízí dvě hlavní výhody: vysoká rychlost konverze a schopnost provést souběžný převod signálů v pásmu vlnových délek.

K dosažení tohoto druhu konverze, musí být splněny následující podmínky:

- a) vlnová délka čerpadla (Pumping light) se musí shodovat s vlnovou délkou nulové disperze,
- b) změna chromatické disperze v podélném směru vlákna by měla být co nejmenší,
- c) polarizace čerpadla (Pumping light) a signálu (Probe Light) musí být shodující.

Pozornost musí být navíc věnována délce koherence vlákna. Nechť  $\Delta f$  je odstup frekvence mezi čerpací vlnou a vlnou světla signálu (nebo Idleru), pro generace efektivního DFWM musí délka vlákna splňovat následující podmínku [2]:

$$L \leq L_{coh} = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \cdot \frac{c}{4\pi^2 f_p^2 |D(f_p)|} \cdot \frac{1}{\Delta f^2} \propto \frac{1}{\Delta f^2}, \quad (5.10)$$

kde  $L_{coh}$  je délka koherence.

Snížení délky vlákna je významné pokud jde o podmínku (b), protože to má za následek homogenní rozložení chromatické disperze podél vlákna. Snížení délky vlákna je také účinné pro uspokojování stavu (c). Pokud není použita polarizace - zachovávající vlákno (PMF), stav polarizace při vstupu do vlákna není zachována až do výstupu. To je vzhledem ke změnám v polarizaci ve směru délky způsobené dvojlomem ve vlákně. V případě, kdy stav polarizace je vyrovnán v okamžiku vstupu do vlákna, relativní fázový rozdíl mezi čerpací větvou a signálními větvami může být vyjádřen jako [2]:

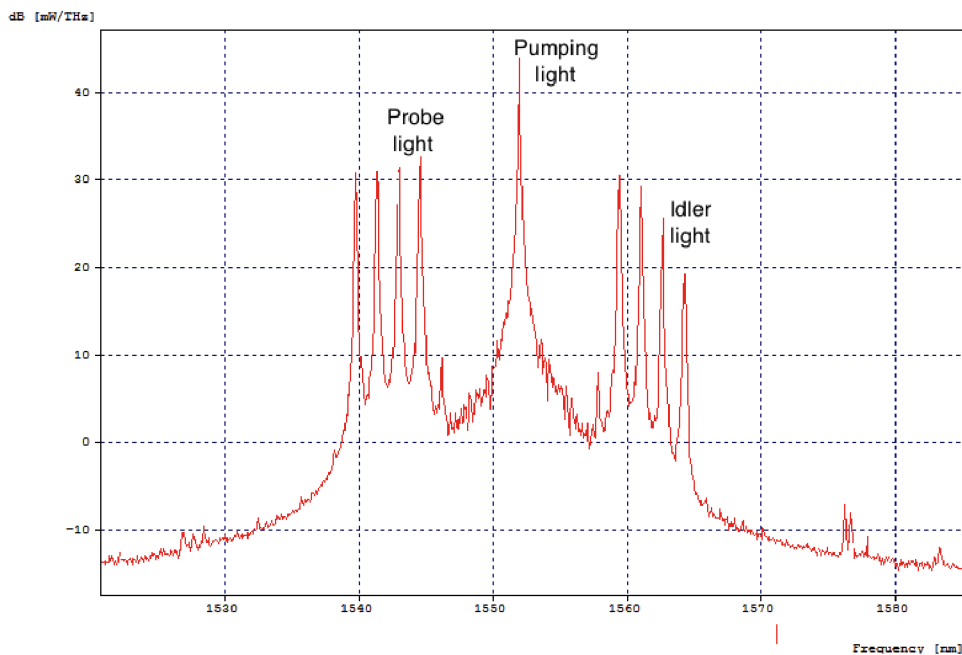
$$\Delta\phi = \frac{2\pi^2}{c} \Delta n \cdot \Delta f \cdot L. \quad (5.11)$$

Je-li však délka vlákna  $L$  snížena a je-li omezen aj dvoulom  $\Delta n$ , může být do jisté míry kontrolován problém neshody polarizace. Avšak délka vlákna nepostačuje ku generaci nelineárního efektu. Řešením je použití vysoce nelineárního vlákna (HNLF) s následujícími parametry.

Tab. 5.2: Charakteristika HNLF vlákna.

| Charakteristika                                    | Hodnota                             |
|--|-------------------------------------|
| Délka  | 200 m                               |
| Koeficient útlumu                                  | 0,6 dB/km                           |
| Vlnová délka pro nulovou disperzi                  | 1552 nm                             |
| Disperzní sklon (při vlnové délce nulové disperze) | 6,1 ps/nm <sup>2</sup> /km          |
| Nelineární koeficient                              | 15 W <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> |

Konverze OTDM/WDM funguje na hoře uvedené teorii. V našem případě čerpací signál (Pump light) bude OTDM datový tok a sondu (Probe light) bude reprezentovat WDM hodinový signál (viz obr. 5.15)

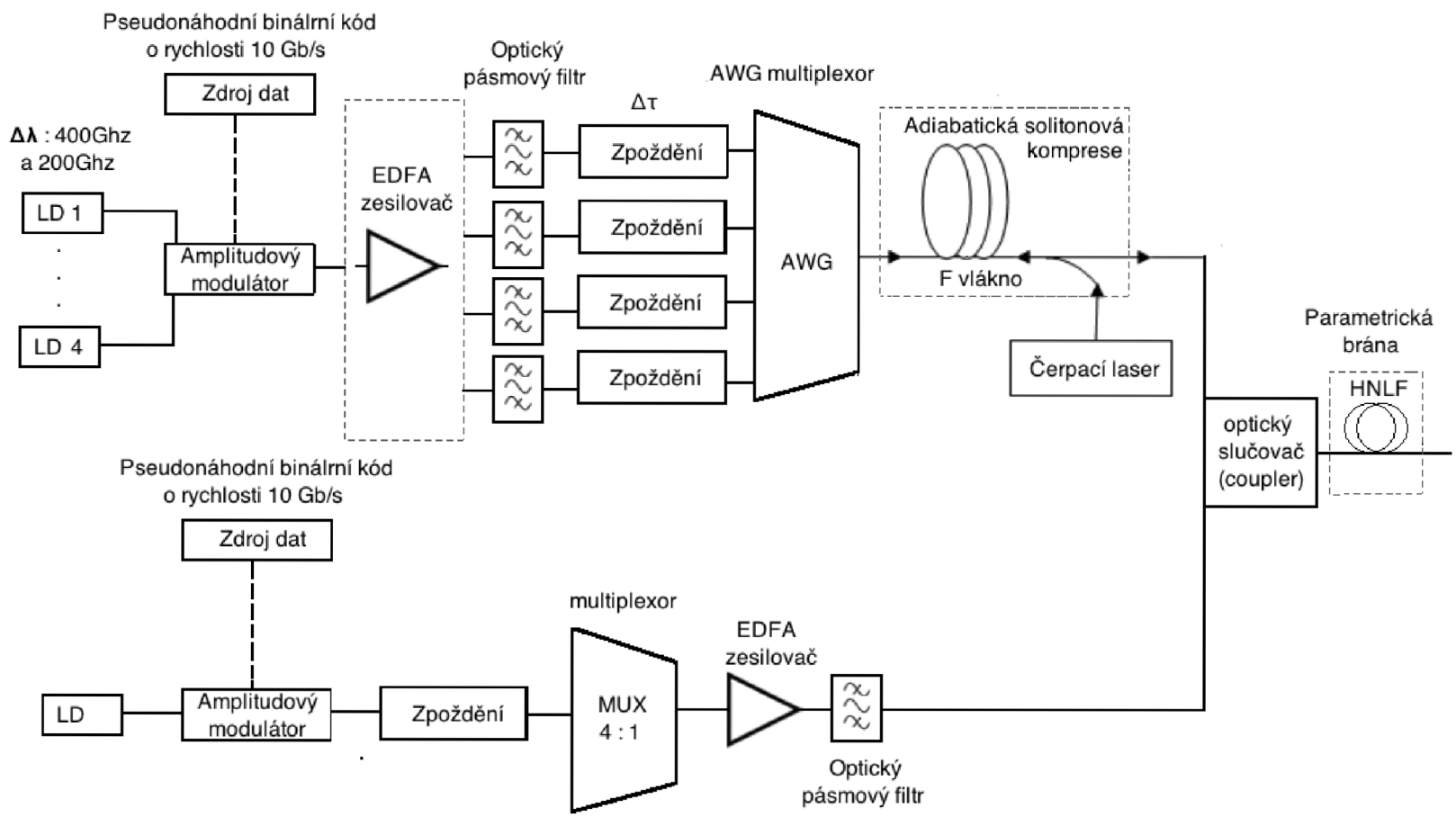


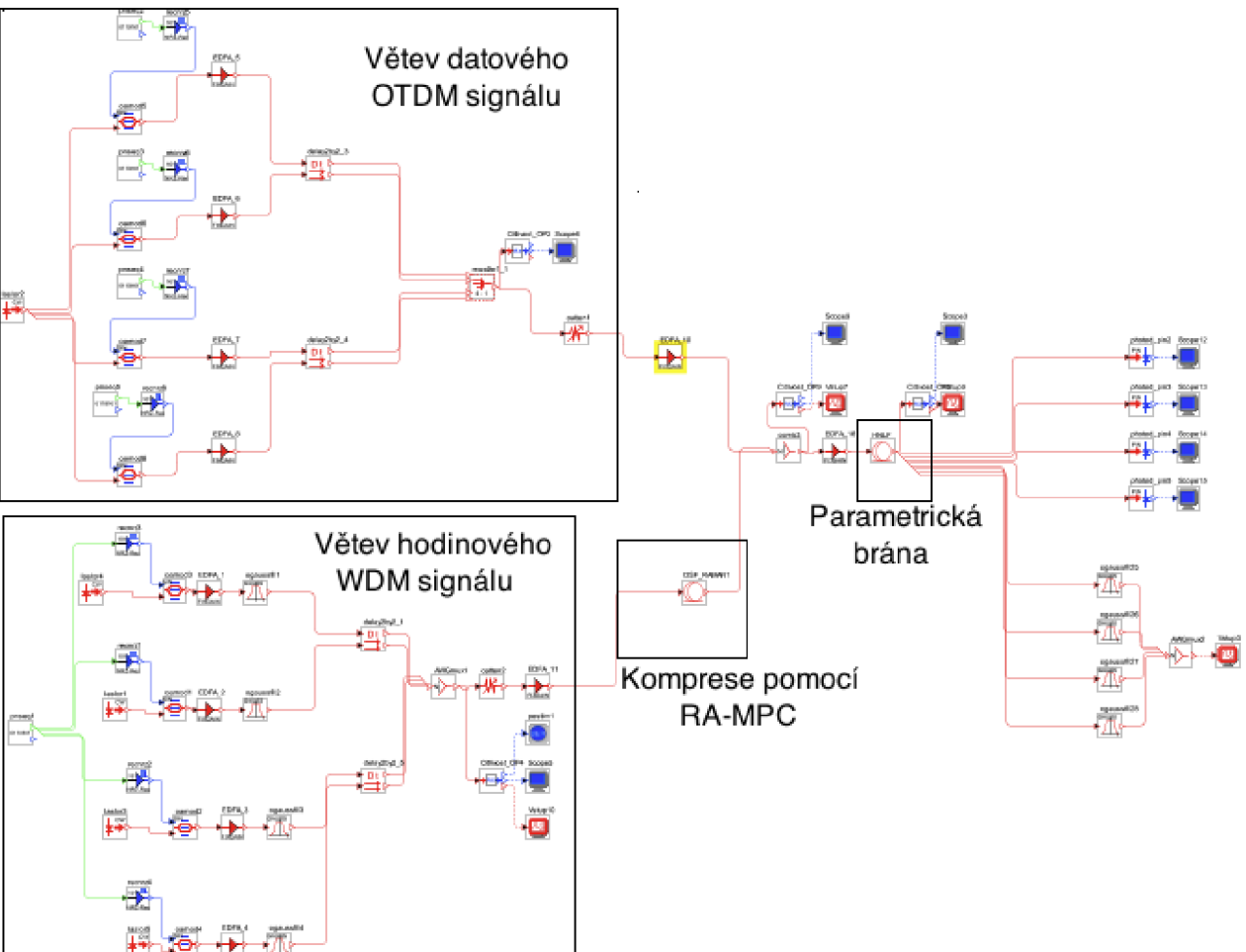
Obr. 5.15: Výsledná konverze OTDM na WDM.

Na obr. 5.16 je vidět blokové schéma možné konverze.

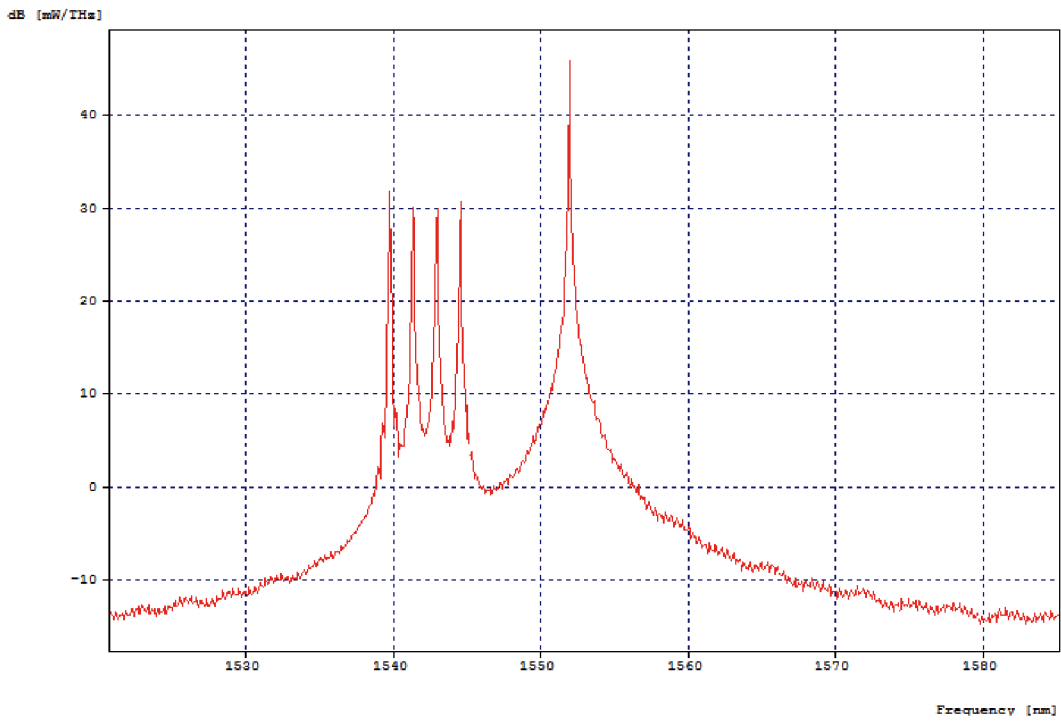
V simulačním programu OptSim konverze byla provedena za snahou simulovat reální podmínky. Finální konverze se uskuteční v HNLF vlákne. Na obr. 5.18 a 5.19 jsou zobrazené optické spektra na vstupu a na výstupu HNLF vlákna pro případy s různým kanálovým odstupem hodinového WDM signálu. Pro charakterizaci výsledných datových WDM signálů byly aplikovány pásmové filtry BPF. Hodnotu pro nastavení střední frekvence filtru jsme dostali z rovnice 5.4. Optické spektrum výsledného WDM signálu je zobrazeno na obr. 5.20.

Obr. 5.16: Blokové schéma modelu pro konverzi OTDM/WDM.

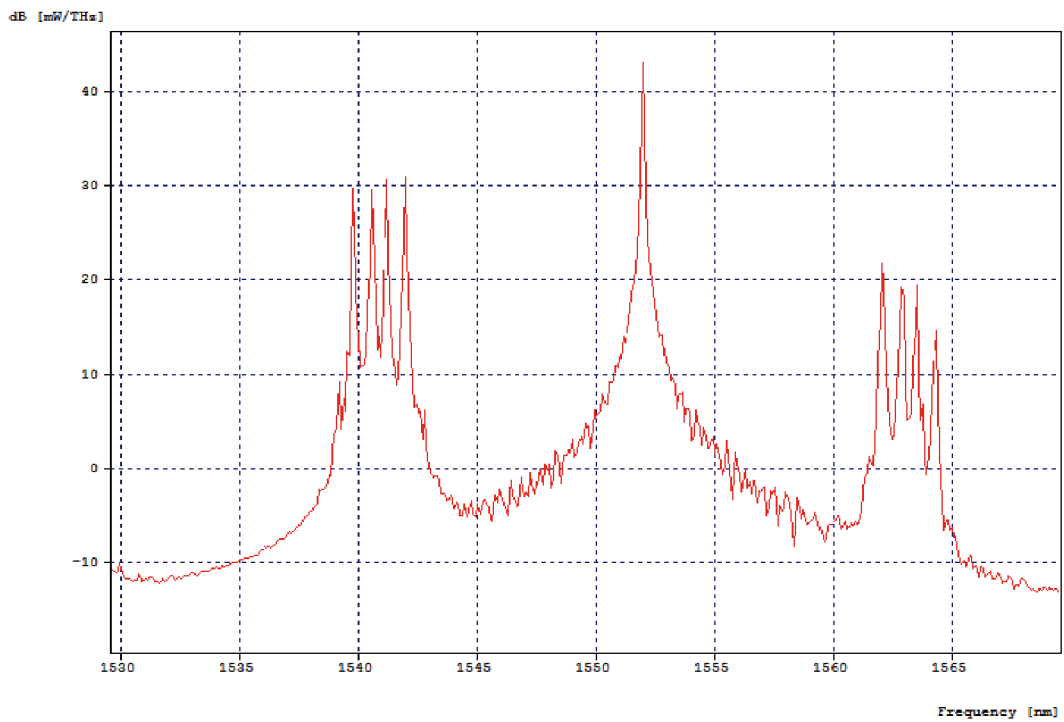




Obr. 5.17: Realizace konverze OTDM na WDM v programu OptSim.

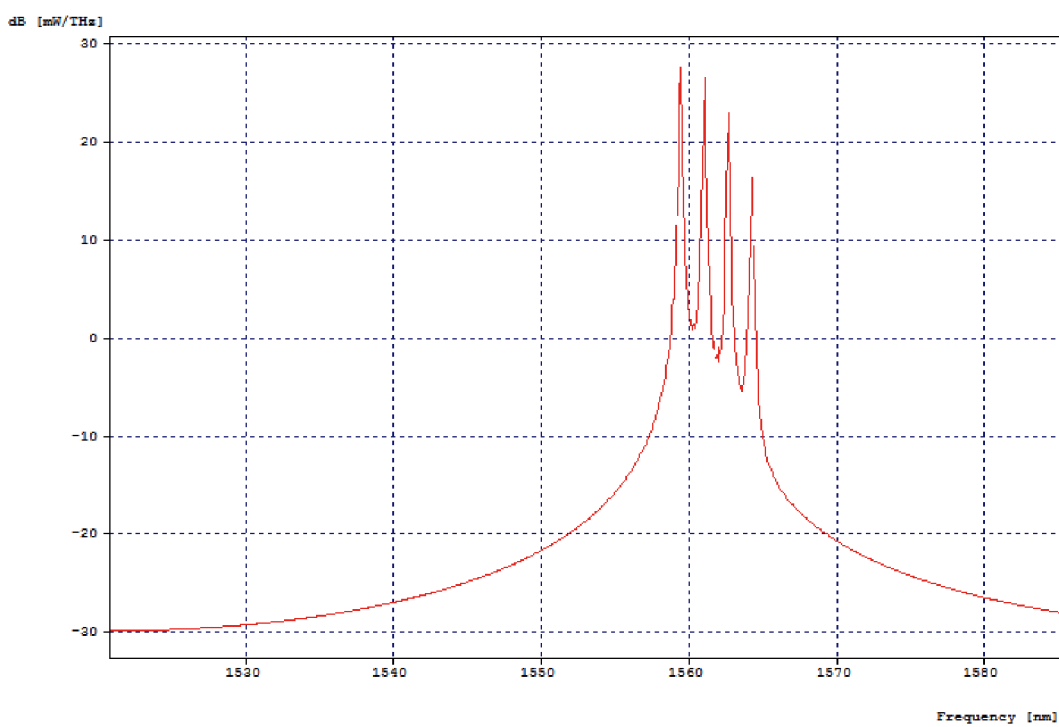


Obr. 5.18: Optické spektrum signálu na vstupu do HNLF vlákna ( $\Delta\lambda = 200$  GHz).



Obr. 5.19: Optické spektrum signálu na výstupu HNLF vlákna ( $\Delta\lambda = 200$  GHz).





Obr. 5.20: Optické spektrum výsledného datového WDM signálu ( $\Delta\lambda = 200$  GHz).

## 5.1.5 Chybovost systémů

### BER (Bit Error Ratio)

Důležitým krokem je měření bitové chybovosti (BER). Je definováno pomocí specifikaci ITU-T G. 957, G.691 a G. 692. Maximální tolerovaná chybovost je dána hodnotou. Bitová chybovost je dána jako poměr chybně přenesených bitů k celkovému počtu přenášených bitů a je to bezrozměrné číslo.

$$BER = \frac{n_e}{v_p \cdot t_m}, \quad (5.12)$$

kde  $n_e$  je počet chybně přenesených bitů,  $v_p$  je přenosová rychlost a  $t_m$  je interval pozorování. Hodnota chybovosti souvisí i s odstupem od šumu, jak je vidět ve vztahu s Gaussovým rozložením:

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^\infty e^{-\frac{Q^2}{2}} dQ \cong \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}}, \quad (5.13)$$

kde  $Q$  představuje SNR.  $Q$  faktor charakterizuje kvalitu digitálního signálu z analogového hlediska, to znamená, že je posuzován poměrem signál/šum. V případě digitálního signálu je využito kombinace signál/šum, která zodpovídá úrovním log. 1 a log. 0 při optimální rozhodovací úrovni.

### OSNR (Optical Signal-To-Noise Ratio)

Pro udržení hladiny určité chybovosti přenosového kanálu je nutné zachovat odstup optického signálu  $P_s$  od výkonu šumu  $P_n$  (SNR - Signal to Noise Ratio). Je dáno vztahem:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n}, \quad (5.14)$$

nebo

$$SNR_{dB} = 10 \log \frac{P_s}{P_n} [\text{dB}]. \quad (5.15)$$

Monitorujeme šumové vlastnosti dílčích částí přenosového systému jako optických zesilovačů, přijímačů záření nebo zdrojů optického záření. Šumové vlastnosti laserových polovodičových diod se udávají pomocí relativní šumové intenzity RIN (Relative Intensity Noise) a jsou udávány v dB/Hz.

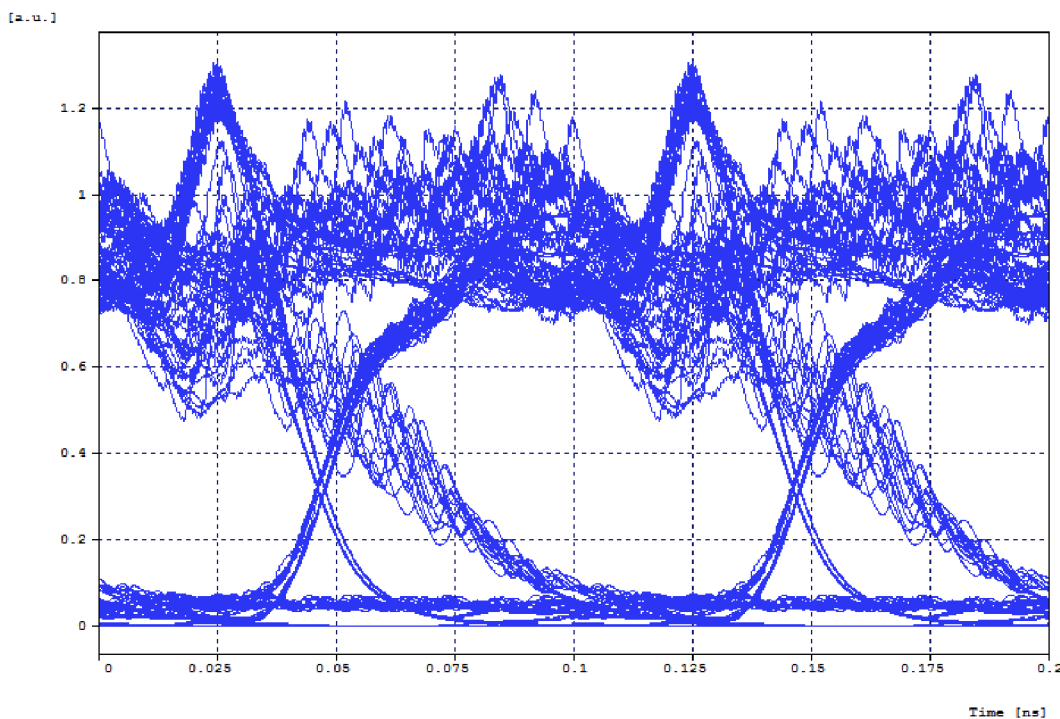
### Měření chybovosti systému

Signál po konverzi pomocí HNLF přichází na jednotlivé Basselove filtry. Pomocí těchto filtrů sa uskuteční výběr požadované frekvence (vlnové délky) (obr.5.17).

Šířka pásma filtrů před přijímači má vliv na BER, čím je užší tím se zmenšuje hotnota chybovosti BER. Signál prochází optickým přijímačem, který realizuje detekci. Tento signál je zobrazen pomocí diagramu oka, kde byl zobrazen vliv šumů na signál (obr. 5.21 5.22 5.23). Optický přijímač obsahuje diodu pro detekci optického signálu a také obsahuje Basselov filtr pro výběr požadované vlnové délky. Při konverzi datového OTDM na datový WDM signál jsme dosáhly následující výsledky bitové chybovosti BER (tab.5.3 5.4 5.5):

Tab. 5.3: BER pro jednotlivé kanály při kanálovém odstupu 100 GHz

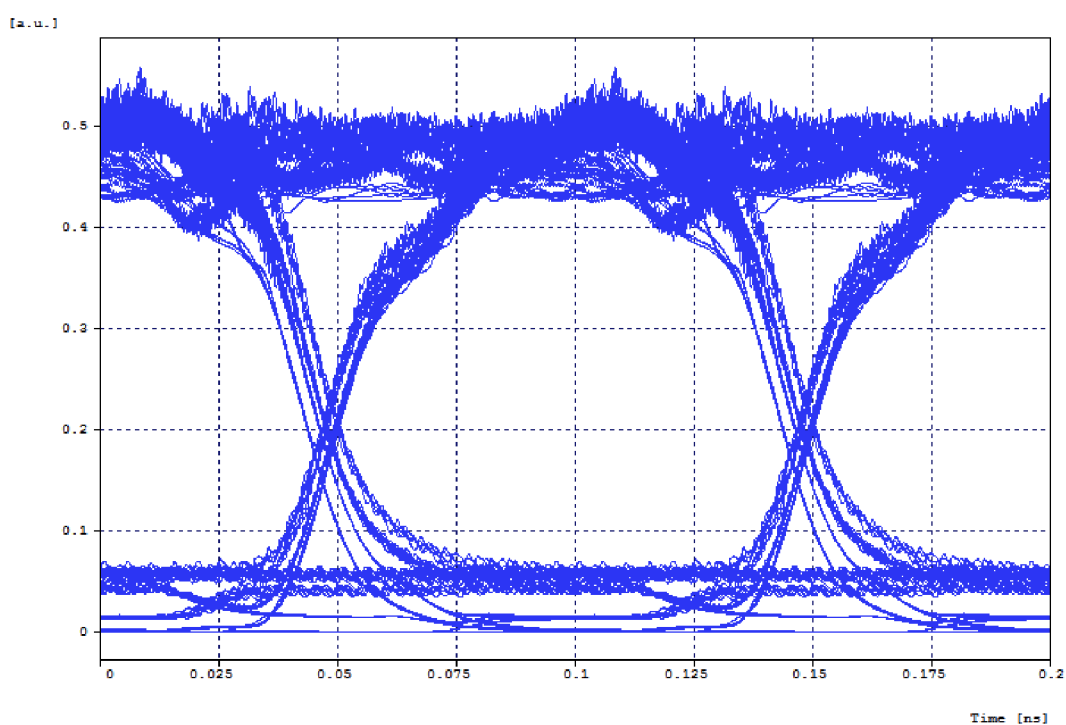
| Kanál | Frekvence [THz] | Q – Faktor [dB] | BER                    |
|-------|-----------------|-----------------|------------------------|
| 1     | 191,635         | 17,565          | $5,259 \cdot 10^{-14}$ |
| 2     | 191,736         | 17,565          | $5,324 \cdot 10^{-14}$ |
| 3     | 191,812         | 17,565          | $4,956 \cdot 10^{-14}$ |
| 4     | 191,913         | 17,565          | $5,124 \cdot 10^{-14}$ |



Obr. 5.21: Diagram oka detekovaného signálu při kanálovém odstupu 100 GHz

Tab. 5.4: BER pro jednotlivé kanály při kanálovém odstupu 200 GHz

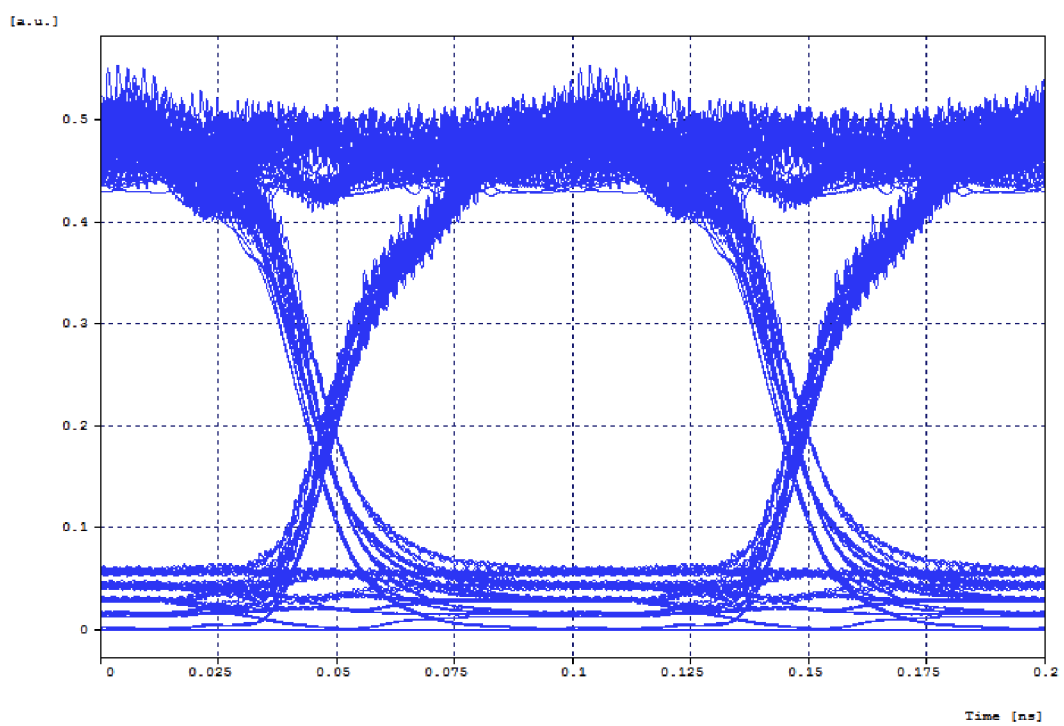
| Kanál | Frekvence [THz] | Q – Faktor [dB] | BER                    |
|-------|-----------------|-----------------|------------------------|
| 1     | 191,635         | 20,507          | $2,156 \cdot 10^{-26}$ |
| 2     | 191,837         | 20,507          | $2,157 \cdot 10^{-26}$ |
| 3     | 192,039         | 20,507          | $2,149 \cdot 10^{-26}$ |
| 4     | 192,240         | 20,507          | $2,176 \cdot 10^{-26}$ |



Obr. 5.22: Diagram oka detekovaného signálu při kanálovém odstupu 200 GHz

Tab. 5.5: BER pro jednotlivé kanály při kanálovém odstupu 400 GHz

| Kanál | Frekvence [THz] | Q – Faktor [dB] | BER                    |
|-------|-----------------|-----------------|------------------------|
| 1     | 191,432         | 21,964          | $7,175 \cdot 10^{-36}$ |
| 2     | 191,836         | 21,964          | $7,201 \cdot 10^{-36}$ |
| 3     | 192,239         | 21,964          | $7,084 \cdot 10^{-36}$ |
| 4     | 192,641         | 21,964          | $6,941 \cdot 10^{-36}$ |



Obr. 5.23: Diagram oka detekovaného signálu při kanálovém odstupě 400 GHz

## 6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl rozbor optických sítí WDM a OTDM a možnosti jejich přímé konverze. V práci byly detailně popsány lineární a nelineární jevy vznikající v optických vláknech a jednotlivé prvky používané při jednotlivých systémech multiplexu. Dále byly prozkoumány různé systémy pro konverzi OTDM/WDM.

Práce byla rozdělena na pět kapitol. V první kapitole jsou popsány základní termíny v optice jako index lomu, vlnová délka a pod. Ve druhé kapitole byly popsány optické vlákno a vlastnosti optického vlákna, které mají vliv na optický přenos. Ve třetí a čtvrté kapitole byly popsány základní multiplexovací systémy používané v optice a jednotlivé prvky v optickém přenosovém systému. Jsou zmíněny např. zdroje záření, detektory, optické zesilovače, rozbočovače a zlučovače. Poslední kapitola byla věnována samotné konverzi mezi technologiemi WDM a OTDM. Byly zmíněny doposud publikované experimenty a možné techniky k realizaci OTDM/WDM.

V diplomové práci dále byly podle uvedených možností vytvořeny modely pro vzájemné konverze OTDM/WDM. Pro realizaci systému byla aplikována metoda na základě nelineárního efektu FWM a ultrakrátkých pulsů Ramanové komprese. Praktická realizace modelu pro vzájemné konverze byla provedena v programovém prostředí OptSim.

Požadavkem na diplomovou práci bylo ověřit funkčnost konverze. Vzhledem k omezené možnosti přístupu k programu OptSim bylo velice náročné správně navrhnout a doladit veškeré parametry potřebné k realizaci této metody konverze. Simulace byla provedena za snahou realizovat reálné podmínky což vzhledem k časové náročnosti podařilo jenom částečně. V příloze na DVD lze najít návrh funkčního modelu konverze s různým odstupem WDM kanálů.

## LITERATURA

- [1] ABOKETAF, A. , PREBLE, S., ELSHAARI. W. A.: *Optical time division multiplexer on silicon chip*. [online]. 2009, Rochester Institute of Technology New York, [cit. 2013-12-5 ]. dostupné z WWW: <http://www.rit.edu/kgcoe/nanophotonics/PDF/OTDM.pdf>.
- [2] ASU, O., MASATERU TADAKUMA, SHU, N., *Four-Wave Mixing in Optical Fibers and Its Applications*, WP Team, Opto-technology Lab., R & D Div. Fukawa. 2000, [cit. 2013-12-5 ].
- [3] BOH RUFFIN A.: *Stimulated Brillouin Scattering: An overview of Measurements, System Impairments, and Applications*. [online]. 2004, Corning, Inc., 1 Science Dr., Corning, NY 14831, [cit. 2013-11-5 ]. dostupné z WWW: <http://www.corning.com>.
- [4] BURČÍK, J. *Ramanovské zesilovače pro telekomunikace*. 2006, ČVUT Praha, FEL. [online]. dostupné z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032401>.
- [5] DADO, M. a kol.: *Kapitoly z optiky pre technikov*. EDIS Žilina, 1998, ISBN 80-7100-390-5 [cit. 2013.10.2].
- [6] DONGFANG, J., JION CHEN, ZHAOYING, W., TIANXIN, Y., *Adiabatic soliton compression based on distributed Raman amplification in dispersion decreasing fiber* College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin. 2011, SPIE-OSA-IEEEI Vol. 8307 83070L-5, [cit. 2013-12-5 ].
- [7] DUTTA, A.K., DUTTA, N.K., FUJIWARA, M.: *WDM TECHNOLOGIES: OPTICAL NETWORKS*. 2004, Elsevier Academic Press, [cit. 2013-11-5 ]. ISBN: ISBN 0-12-225263-2,
- [8] FILKA, M.: *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. 2009, ISBN: ISBN 978-80-86785-14-1, [cit. 2013-09-30].
- [9] FILKA, M.: *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. ISBN: ISBN 978-80-86785-14-1, 2009 [cit. 2013-10-10].
- [10] FILKA, M. , ŠIFTA, R.: *Simulace a měření vlnových multiplexů pro pasivní optické sítě*. [online]. 2011, ElektrověstVUT Brno, [cit. 2013-12-20 ]. ISSN: 1213-1539

- [11] FILKA, M., MÜNSTER, P., ŠIFTA, R., TEJKAL, V.: *Trendy optických přenosu*. Sdělovací technika. 2012, roč. 2012, č. 4, s. 5.
- [12] *Fundamentals of Nonlinear Optics* Aristides Marcano. Phys. Today 65, 56 (2012), DOI:10.1063/PT.3.1753.
- [13] KUPČIHA, L.: *Vzájemná konverze OTDM a WDM*. Brno (2013), Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brne, FEKT, Ústav Telekomunikace, Vedoucí práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [14] LAFATA, P.: *Pasivní optické sítě WDM-PON*. [online]. 2009, ČVUT Praha, [cit. 2013-11-5 ]. dostupné z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050004>.
- [15] LUKÁŠ, M.: *Laserové diody 2 - Typy a struktury laserových diod*. [online]. 2001, PrF UP Olomouc, [cit. 2013-11-5 ]. dostupné z WWW: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>.
- [16] LUCKI, M.: *Optické zesilovače*. [online]. 2006, ČVUT Praha, [cit. 2013-11-5 ]. dostupné z WWW: [http://data.cedupoint.cz/oppa\\_e-learning/2\\_KME/162.pdf](http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/162.pdf).  
<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032401>].
- [17] MARŠÁLEK, L.: *Optická vlákna*. 2006, [online]. [cit. 2013-10-1]. dostupné z WWW: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>.
- [18] MULVAD, H.C.H., PALUSHANI, E., GALILI, M., HU, H., Ji, H., XU, J., CLAUSEN, A.T., JEPPESEN, P., OXENLOVE, L.K.: *Time-domain optical Fourier transformation for OTDM-DWDM and DWDM-OTDM conversion*. Information Photonics and Optical Communications (IPOC), 2011 International Conference on, On page(s): 1 - 3. [cit. ].
- [19] NYUGEN, H.: *Reconfigurable All-Optical OTDM-to-WDM Conversion Using a Multiwavelength Ultrashort Pulse Source Based on Raman Compression*. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, roč. 30, č. 6, ISSN: 0733-8724, 2012 IEEE
- [20] OSAMU, A., MASATERU, T., SHU N.: *Four-Wave Mixing in Optical Fibers and Its applications*. [online]. 2000, Furukava university of Technology and Economics, Department of Atomic Physics [cit. ]. dostupné z WWW: <http://dept.phy.bme.hu>.



- [21] SÝKORA, J.: *Princip WDM*. [online]. 2004, ČVUT Praha, [cit. 2013-11-5 ]. dostupné z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072805>.
- [22] TRAVERS, J. C. , STONE, M. J, RULKOV, A. B., CUMBERLAND, B. A.: *Optical pulse compression in dispersion decreasing photonic crystal fiber*. Femtosecond Optics Group, Department of Physics, Prince Consort Road. Centre for Photonics and Photonic Materials, Department of Physics, University of Bath, Claverton Down, Bath BA2 7AY, UK. 2007, [cit. 2013-12-20 ].
- [23] TTC Marconi: *Digitální komunikační technika I*. Třetí vydání. Praha, 1996. 212s.
- [24] TURÁN, J.: *Optické komunikačné systémy*. 1999, ELFA košice, ISBN: ISBN 80-88964-20-2.
- [25] VÁRALLYAY, Z., K.: *Nonlinear wave propagation and ultrashort pulse compression in step-index and microstructured fibers*. [online]. 2007, Budapest university of Technology and Economics, Department of Atomic Physics [cit. ]. dostupné z WWW: <http://dept.phy.bme.hu>.
- [26] *Úloha č. 8 Vlastnosti optických vláken*. Pracovní dokumentace, [cit. 2013-10-1] [online] dostupné z WWW: [http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\\\_08.pdf](http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\_08.pdf).
- [27] *Vlastnosti optických vláken*. Pracovní dokumentace, [cit. 2013-10-1] [online] dostupné z WWW: <ftp://ftp.kemt.fei.tuke.sk>.
- [28] WILFERT, O.: *Optoelektronika*. 1993, VUT Brno, ISBN: ISBN 80-214-0551-1.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AWG Arrayed Waveguide Grating

BER Bit Error Ratio

BGS Brilluin Gain Spectrum

CW Continuous Wave

CWDM Coarse Wavelength Division Multiplexing

DCF Dispersion Compansation Fiber

DEMUX Demultiplexer

DFG Difference Frequency Generation

DBF Distributed FeedBack

DSF Dispersion Shifted Fiber

DSF Dense Wavelength Division Multiplexing

E/O Electrical/Optical

EAM Electro Absorption Modulator

EDF Erbium Doped Fiber

EDFA Erbium Doped Fiber Aplifier

FBG Fibre Bragg Grating

FBG Fused Bionic Taper

FP Fabry – Perot

FWHM Full Width at Half Maximum

FWM Four Wave Mixing

HNLF Highly Non – Linear Fiber

ITU International Telecommunication Union

LD Laser Diode

LED Light Emitting Diode

LiNbO<sub>3</sub> Lithium Niobate

ML Mode locked

MLLD Mode Locked Laser Diode

MUX Multiplexer

MZM Mach – Zehnder Modulator

NALM Nonlinear Amplifying Loop Mirror

NRZ Non Return to Zero

NOLM Nonlinear Optical Loop Mirror

O/E Optical/Electrical

OSP Optical Signal Processing

OTDM Optical Time Division Multiplexing

PCF Photonic Crystal Fiber

PLC Planar Lightwave Circuit

PMD Polarization Mode Disperzion

PRBS PseudoRandom Binary Sequence

RZ Return to Zero

SBS Stimulated Brillouin Scattering

SHF DFG Second Harmonic Generation and Difference Frequency Generation

SNR Signal to Noise Ratio

SPM Self Phase Modulation

SRS Stimulated Raman Scattering

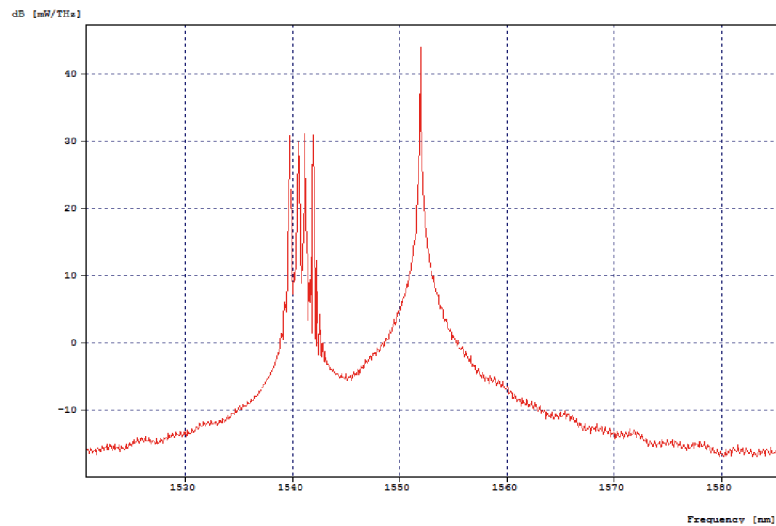
TDM Time Division Multiplexing

WDM Wavelength Division Multiplexing

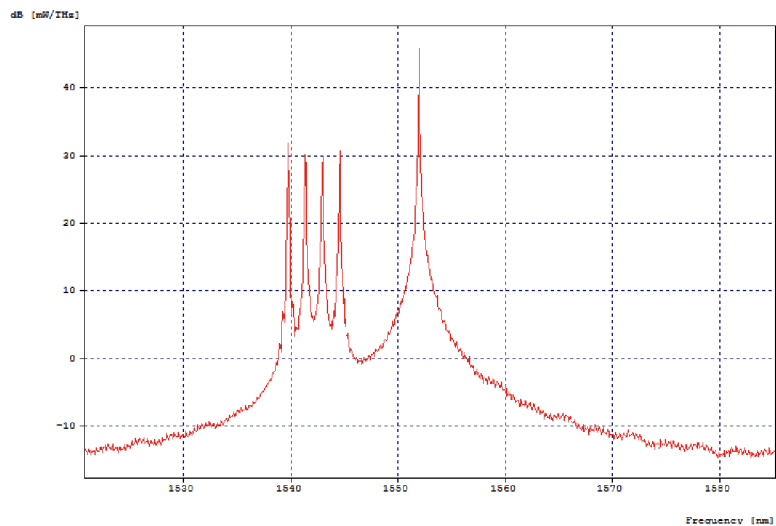
XPM Cross Phase Modulation

## A PRVNÍ PŘÍLOHA

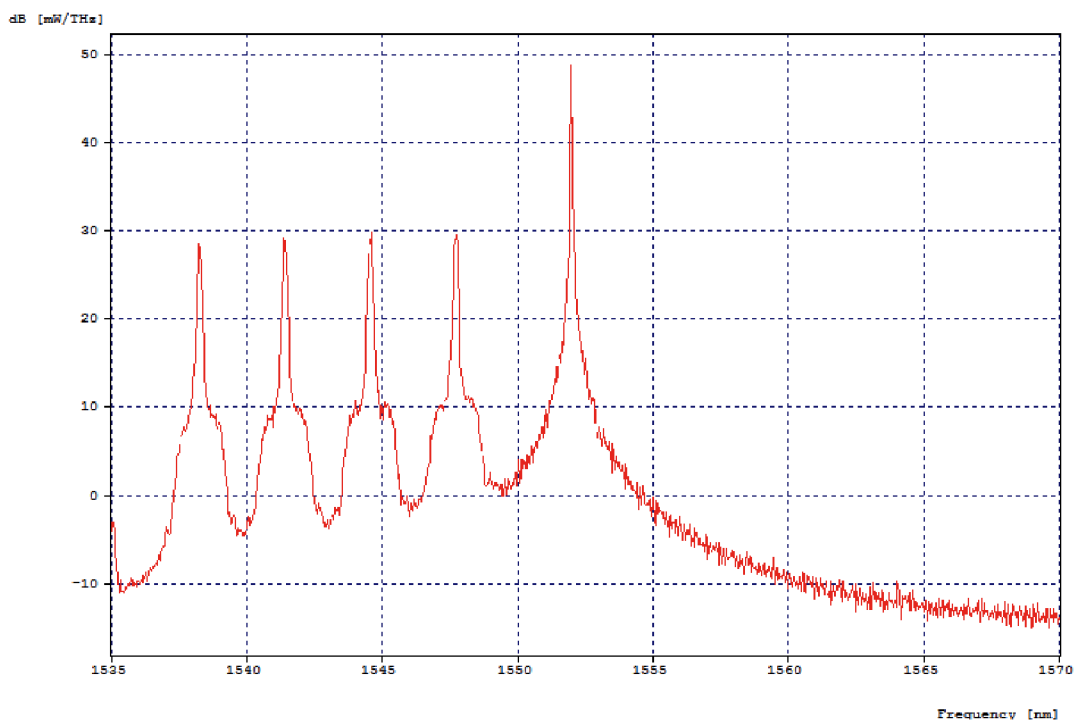
### A.1 Optické spektra signálů při jednotlivých bodech konverze



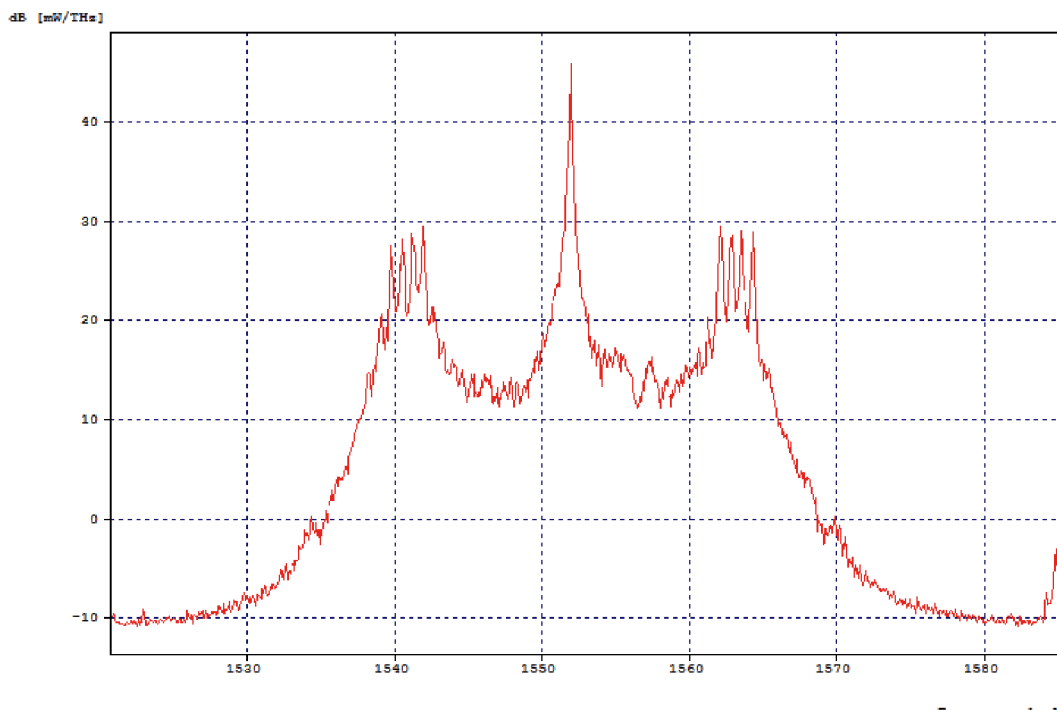
Obr. A.1: Optické spektrum signálu na vstupu do HNLF vlákna (odstup kanálů 100 GHz).



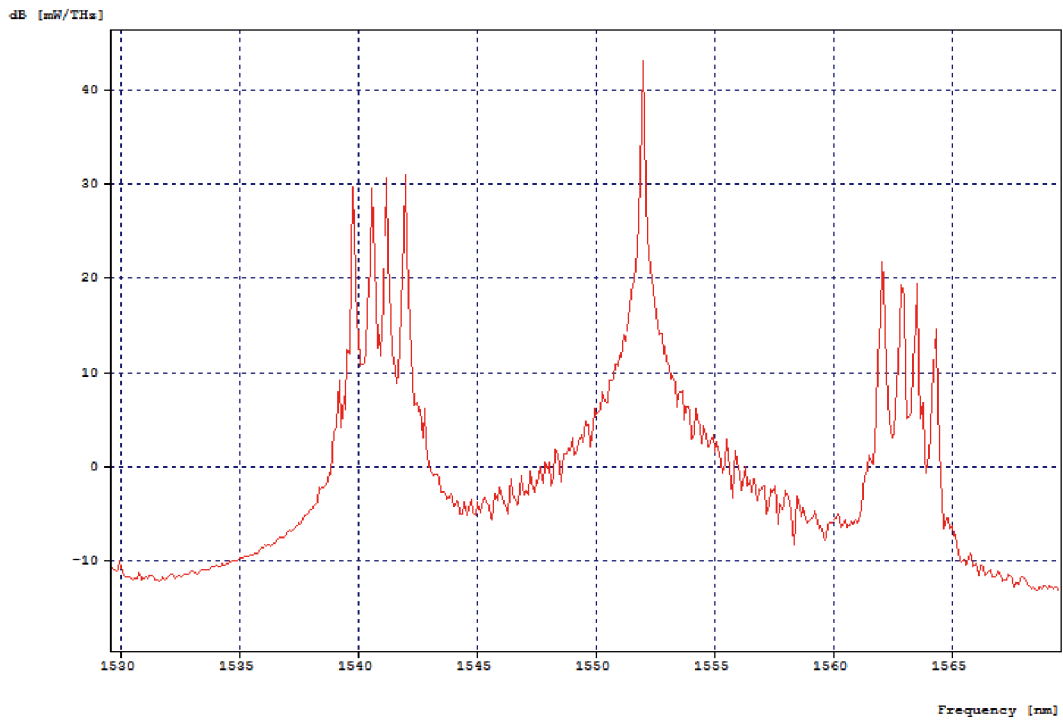
Obr. A.2: Optické spektrum signálu na vstupu do HNLF vlákna (odstup kanálů 200 GHz).



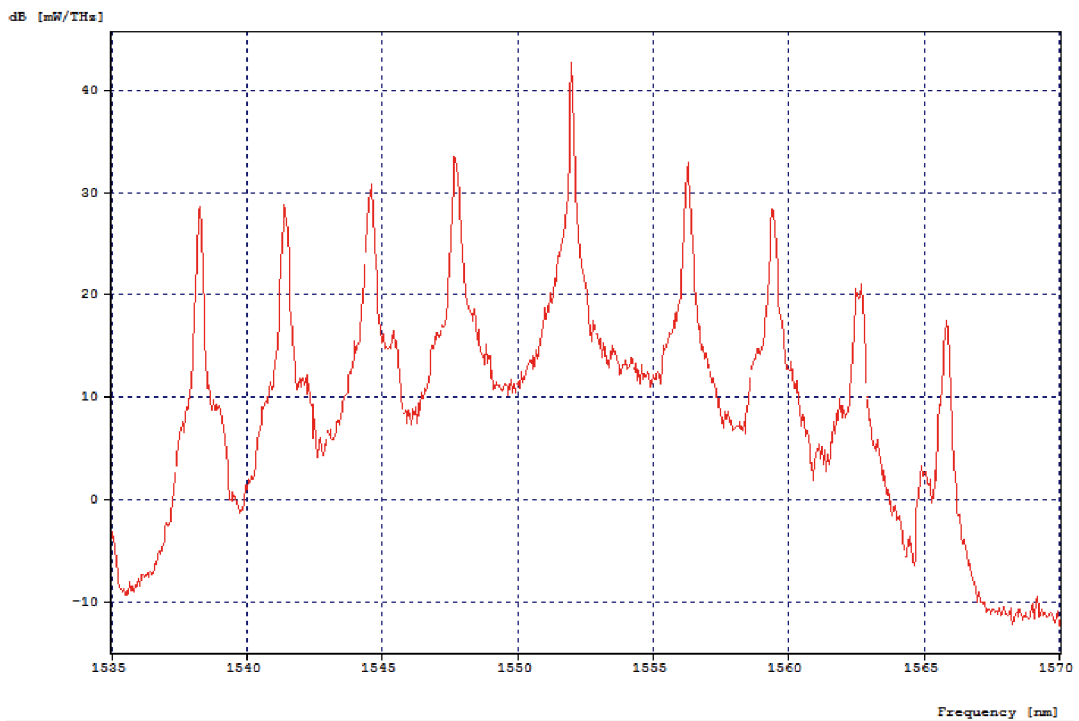
Obr. A.3: Optické spektrum signálu na vstupu do HNLF vlákna (odstup kanálů 400 GHz).



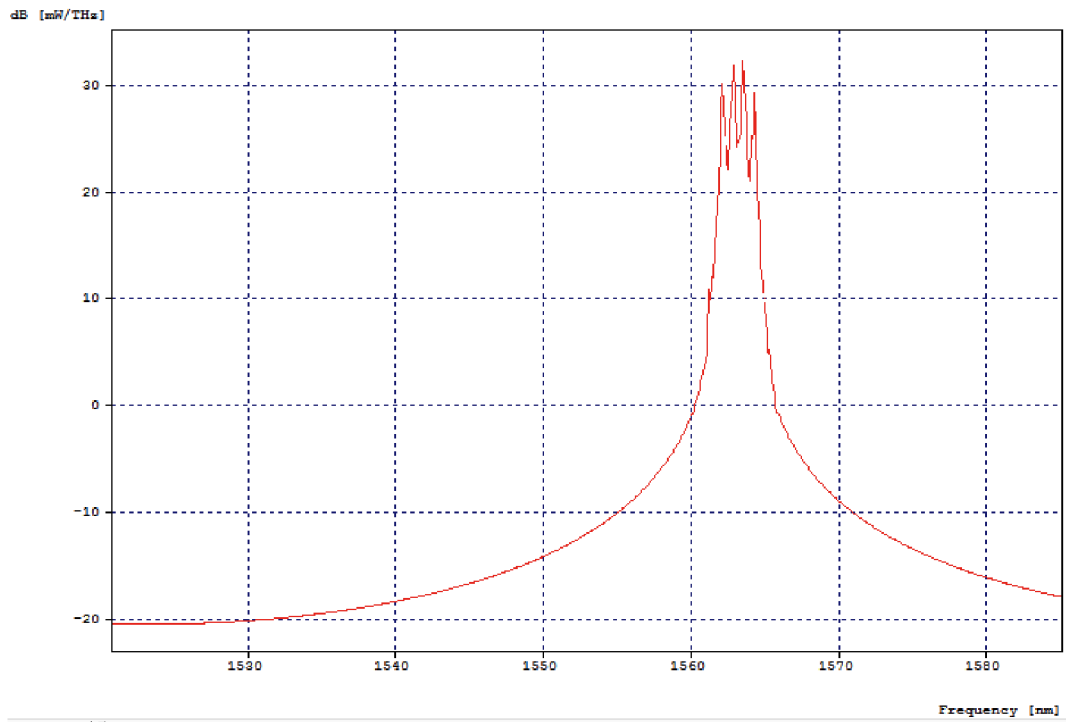
Obr. A.4: Optické spektrum signálu na výstupu HNLF vlákna (odstup kanálů 100 GHz).



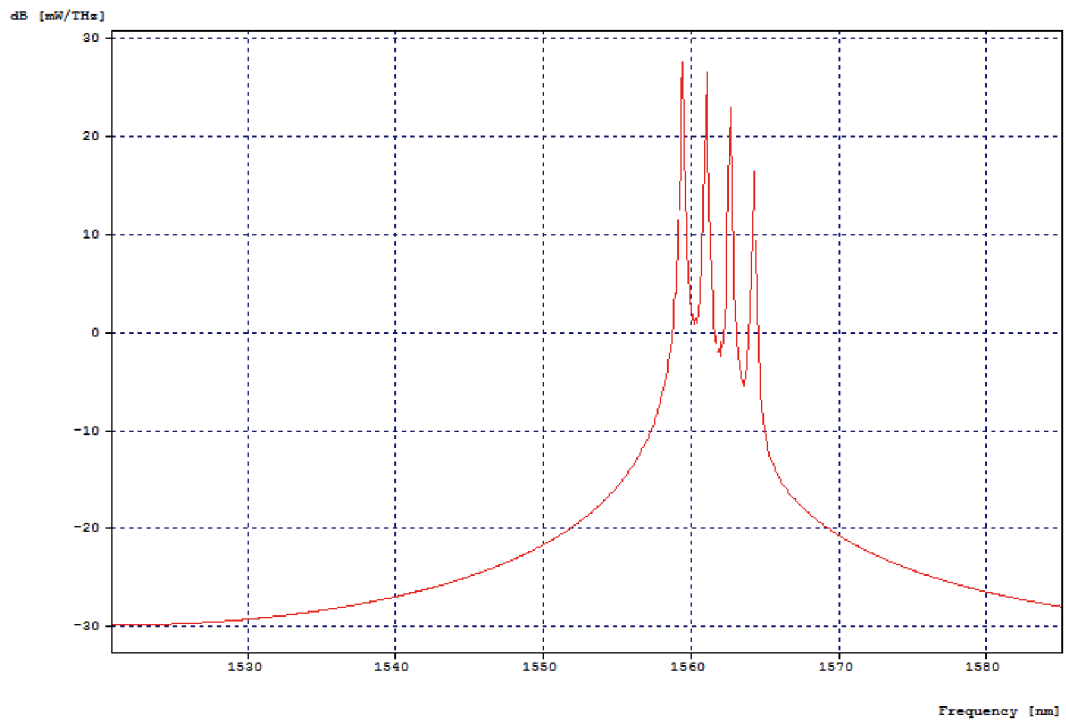
Obr. A.5: Optické spektrum signálu na výstupu HNLF vlákna (odstup kanálů 200 GHz).



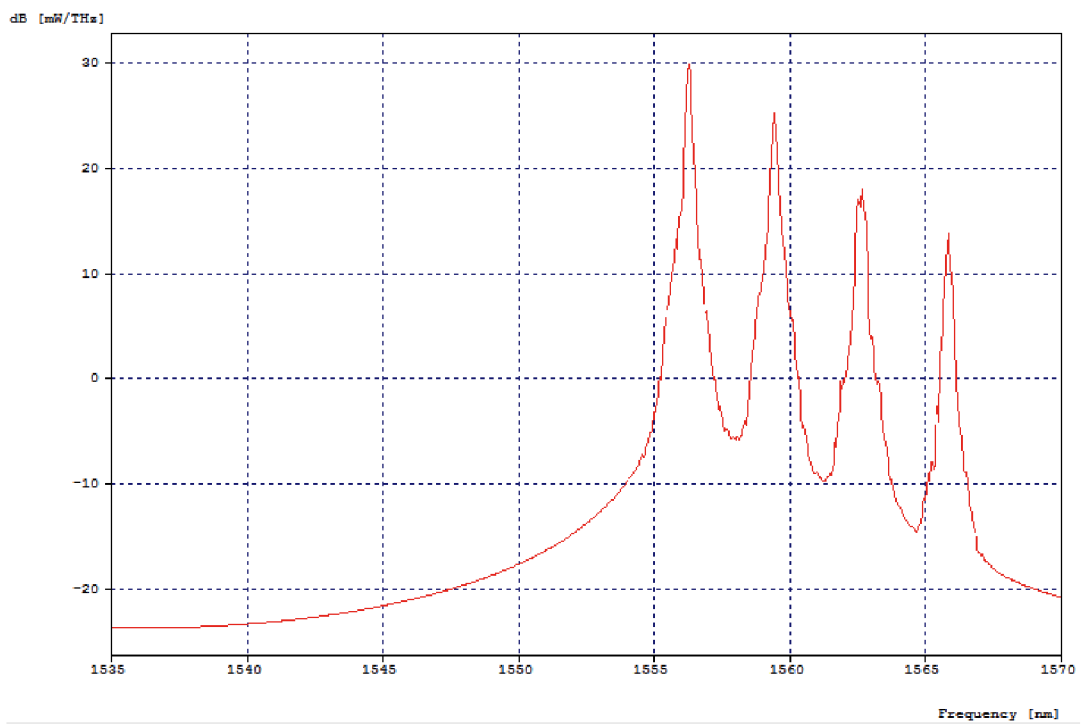
Obr. A.6: Optické spektrum signálu na výstupu HNLF vlákna (odstup kanálů 200 GHz).



Obr. A.7: Optické spektrum výsledného datového WDM signálu (odstup kanálů 100 GHz).



Obr. A.8: Optické spektrum výsledného datového WDM signálu (odstup kanálů 200 GHz).



Obr. A.9: Optické spektrum výsledného datového WDM signálu (odstup kanálů 400 GHz).



## B DRUHÁ PŘÍLOHA

### B.1 Obsah přiloženého DVD

Návrh systému v programe OptSim

- Conv\_OTDM\_WDM100.moml
- Conv\_OTDM\_WDM200.moml
- Conv\_OTDM\_WDM400.moml

Elektronická verze diplomové práce

- Diploma\_thesis.pdf